

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO
PAULO – CAMPUS CUBATÃO**

ARTHUR JOSÉ CARDOSO DOS SANTOS
SARAH SOARES BAETA NEVES

SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO CUBATÃO

CUBATÃO
2024

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO
PAULO – CAMPUS CUBATÃO**

ARTHUR JOSÉ CARDOSO DOS SANTOS
SARAH SOARES BAETA NEVES

SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO CUBATÃO

Trabalho de PFC apresentado à Banca de Defesa do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP, Campus Cubatão, como requisito básico para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Dra. Flavia Daylane Tavares de Luna

Coorientador(a): Dr. Walter Augusto Varella

CUBATÃO
2024

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste Projeto Final de Curso.

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) - Campus Cubatão, pela excelente formação, pelos professores qualificados, pelos colaboradores dedicados e pelos recursos disponibilizados.

À nossa orientadora, Prof. Dra. Flavia Daylane Tavares de Luna, e ao nosso coorientador, Dr. Walter Augusto Varella, pela orientação e apoio ao longo do projeto.

Agradecemos aos ex-alunos Guilherme Cardoso da Silva e Kawan Trindade Lessa Paulo pelos dispositivos disponibilizados, que foram fundamentais para a realização das pesquisas.

Ao Thiago Augusto da Mata Souza, aluno bolsista no CEPEMA, pela disponibilização dos dados referentes às coordenadas dos pontos de coleta, essenciais para o desenvolvimento do projeto.

Aos nossos amigos e colegas, pelo apoio ao longo desta jornada.

Por fim, nossa mais profunda e eterna gratidão às nossas famílias, que sempre torceram por nós, nos apoiando e nos acolhendo em cada etapa dessa jornada. Suas presenças e gestos estão refletidos em cada uma de nossas conquistas, pois elas também pertencem a vocês!

RESUMO

Este trabalho destaca a importância da qualidade da água em ambientes fluviais para a saúde dos ecossistemas, a agricultura e o abastecimento de água potável. O monitoramento da água é essencial para manter a qualidade em níveis aceitáveis, preservar a biodiversidade, fornecer recursos hídricos seguros para consumo humano e apoiar atividades econômicas como a agricultura e a pesca. O estudo identifica os desafios enfrentados devido à urbanização e atividades industriais, que impactam negativamente a qualidade da água. Para abordar esses desafios, propõe-se a implementação de um Sistema de Monitoramento da Qualidade da Água baseado em tecnologias de IoT e comunicação LoRa, com a utilização de sensores de turbidez, oxigênio dissolvido, temperatura e pH. O objetivo deste estudo foi estabelecer um sistema de monitoramento da qualidade da água no rio Cubatão, utilizando tecnologias de IoT e LoRa. O desenvolvimento do sistema é dividido em etapas, empregando dispositivos ESP32 LoRa e sensores para coletar e transmitir dados. O protótipo desenvolvido, utilizando a rede LoRa, demonstrou comunicação eficiente e geração de dados relevantes para análise ambiental. A plataforma ThingSpeak foi eficaz, permitindo análises claras e acessíveis. O protótipo atingiu seus objetivos e demonstrou potencial para gestão e preservação da qualidade da água.

Palavras-chaves: microcontrolador; sistema de supervisão; parâmetros ambientais; sensores; fluvial.

ABSTRACT

This work highlights the importance of water quality in river environments for the health of ecosystems, agriculture and the supply of drinking water. Water monitoring is essential to maintain quality at acceptable levels, preserve biodiversity, provide safe water resources for human consumption and support economic activities such as agriculture and fishing. The study identifies challenges faced due to urbanization and industrial activities, which impact water quality levels. To address these challenges, it is proposed to implement a Water Quality Monitoring System based on IoT and LoRa communication technologies, using turbidity, distribution distribution, temperature and pH sensors. The objective of this study was to establish a water quality monitoring system in the Cubatão River, using IoT and LoRa technologies. System development is divided into stages, employing ESP32 LoRa devices and sensors to collect and transmit data. The project developed, using the LoRa network, presented efficient communication and generation of relevant data for environmental analysis. The ThingSpeak platform was effective, enabling clear and accessible analysis. The prototype achieved its stated objectives and potential for water quality management and preservation.

Keywords: microcontroller; supervision system; environmental parameters; sensors; river.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista aérea do percurso do Rio Cubatão, destacado em vermelho.....	18
Figura 2 - Diagrama PRISMA.....	21
Figura 3 - Exemplo da interface de funcionamento do ThingSpeak "Sistema IoT Calidad de Agua"....	28
Figura 4 - Exemplo da interface de funcionamento do ThingSpeak.....	28
Figura 5 - Diagrama de blocos do projeto.....	30
Figura 6 - Diagrama de pinos ESP32 LoRa.....	31
Figura 7 - Sensor de temperatura DS18B20.....	31
Figura 8 - Sensor pH-4502C.....	32
Figura 9 - Sensor de turbidez SEN0189.....	33
Figura 10 - Sensor de Oxigênio Dissolvido (OD).....	34
Figura 11 - Esquema elétrico do protótipo para monitoramento da qualidade da água.....	35
Figura 12 - Layout da placa PCB do protótipo para monitoramento da qualidade da água.....	36
Figura 13 - Placa PCB do protótipo para monitoramento da qualidade da água.....	36
Figura 14 - Caixa de proteção.....	37
Figura 15 - Mapa dos pontos de medições ao longo do Rio Cubatão.....	40
Figura 16 - Microcontrolador (receptor).....	41
Figura 17 - Microcontrolador (gateway).....	42
Figura 18 - Representações gráficas dos testes de interligação do sistema.....	43
Figura 19 - Teste em reservatório de água.....	44
Figura 20 - Teste de interligação do sistema.....	44
Figura 21 - Teste de luz no sensor de turbidez.....	45
Figura 22 - Gráfico do teste de luz no sensor de turbidez.....	46
Figura 23 - Teste de medição sem interferência.....	47
Figura 24 - Gráficos dos testes de medição dos sensores em função do tempo.....	47
Figura 25 - Localização da análise da água no ponto 0 (23°55'18.4"S 46°30'04.3"W).....	49
Figura 26 - Análise química in loco no ponto 0 (23°55'18.4"S 46°30'04.3"W).....	50
Figura 27 - Resultado das análises químicas no ponto 0 (23°55'18.4"S 46°30'04.3"W).....	51
Figura 28 - Localização da análise da água no ponto 1 (23°52'51.1"S 46°26'47.3"W).....	52
Figura 29 - Análise química in loco no ponto 1 (23°52'51.1"S 46°26'47.3"W).....	53
Figura 30 - Resultado das análises químicas no ponto 1 (23°52'51.1"S 46°26'47.3"W).....	53
Figura 31 - Localização da análise da água no ponto 2 (23°52'48.0"S 46°25'18.6"W).....	54
Figura 32 - Análise química in loco no ponto 2 (23°52'48.0"S 46°25'18.6"W).....	55
Figura 33 - Resultado das análises químicas no ponto 2 (23°52'48.0"S 46°25'18.6"W).....	56
Figura 34 - Localização da análise da água no ponto 3 (23°52'49.8"S 46°24'43.4"W).....	57
Figura 35 - Análise químicas in loco no ponto 3 (23°52'49.8"S 46°24'43.4"W).....	58
Figura 36 - Resultado das análises químicas no ponto 3 (23°52'49.8"S 46°24'43.4"W).....	58
Figura 37 - Análise comparativa entre as medições dos parâmetros e os valores estabelecidos pelo CONAMA.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Artigos selecionados por meio do método PRISMA.....	22
Tabela 2 - Parâmetros de qualidade da água (CONAMA).....	27
Tabela 3 - Lista de preços dos componentes.....	38
Tabela 4 - Coordenadas dos pontos de análises químicas ao longo do rio Cubatão.....	40
Tabela 5 - Dados coletados em teste.....	79
Tabela 6 - Dados coletados no ponto 1 (23°52'51.1"S 46°26'47.3"W).....	80
Tabela 7 - Dados coletados no ponto 0 (23°55'18.4"S 46°30'04.3"W).....	82
Tabela 8 - Dados coletados no ponto 2 (23°52'48.0"S 46°25'18.6"W).....	84
Tabela 9 - Dados coletados no ponto 3(23°52'49.8"S 46°24'43.4"W).....	85
Tabela 10 - Dados coletados no teste de influência de luz.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ASBRAN	Associação Brasileira de Nutrição
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
LoRa	<i>Long Range</i> (Longo Alcance)
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i> (Rede de Área Ampla de Longo Alcance)
LPWA	<i>Low Power Wide Area</i> (Ampla Área)
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i> (Rede de Área Ampla)
OD	Oxigênio Dissolvido
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
pH	Potencial Hidrogeniônico

PRISMA

Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and

Meta-Analyses

(Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e

Meta-Análises)

TDS Total de Sólidos Dissolvidos

USB *Universal Serial Bus* (Porta Serial Universal)

Wi-Fi *Wireless Fidelity* (Fidelidade Sem Fios)

SUMÁRIO

<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	14
<u>1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....</u>	14
<u>1.2 PROBLEMA DE PESQUISA.....</u>	15
<u>1.3 QUESTÃO DE PESQUISA.....</u>	16
<u>1.4 OBJETIVOS.....</u>	16
<u>1.4.1 Objetivo Geral.....</u>	16
<u>1.4.2 Objetivos Específicos.....</u>	16
<u>1.5 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....</u>	17
<u>1.6 JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO.....</u>	17
<u>1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....</u>	19
<u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</u>	20
<u>2.1 METODOLOGIA DA PESQUISA.....</u>	20
<u>2.2 REVISÃO DOS ARTIGOS SELECIONADOS.....</u>	22
<u>2.3 REDE LoRa E LoRaWAN.....</u>	25
<u>2.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....</u>	26
<u>2.5 DISPOSITIVO DE VISUALIZAÇÃO.....</u>	27
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</u>	29
<u>3.1 DESCRIÇÃO FUNCIONAL.....</u>	29
<u>3.1.1 ESP32 LoRa.....</u>	30
<u>3.1.2 Sensor de Temperatura.....</u>	31
<u>3.1.3 Sensor de pH.....</u>	32
<u>3.1.4 Sensor de Turbidez.....</u>	32
<u>3.1.5 Sensor de Oxigênio Dissolvido (OD).....</u>	33
<u>3.2 PROJETO ELÉTRICO/MECÂNICO.....</u>	34
<u>3.2.1 Desenho do circuito elétrico.....</u>	34
<u>3.2.2 Desenvolvimento da placa PCB.....</u>	35
<u>3.2.3 Esquema mecânico/montagem.....</u>	37
<u>3.3 LISTA DE COMPONENTES.....</u>	37
<u>3.4 ESCOLHAS DOS PONTOS DE MEDAÇÃO.....</u>	39
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</u>	41

<u>4.1 TESTE DA REDE LoRa.....</u>	41
<u>4.2 TESTE INICIAL DA NUVEM.....</u>	42
<u>4.3 TESTE DE INTERLIGAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO.....</u>	43
<u>4.4 TESTE DE INFLUÊNCIA DA INCIDÊNCIA DE LUZ NO SENSOR DE TURBIDEZ.....</u>	45
<u>4.5 TESTE DE VARIAÇÃO DA MEDIDA EM FUNÇÃO DO TEMPO.....</u>	46
<u>4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA INTERLIGAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO APLICADO NO RIO CUBATÃO.....</u>	48
<u>4.6.1 Análise do Ponto 0 (23°55'18.4"S 46°30'04.3"W).....</u>	48
<u>4.6.2 Análise do Ponto 1 (23°52'51.1"S 46°26'47.3"W).....</u>	51
<u>4.6.3 Análise do Ponto 2 (23°52'48.0"S 46°25'18.6"W).....</u>	54
<u>4.6.4 Análise do Ponto 3 (23°52'49.8"S 46°24'43.4"W).....</u>	57
<u>4.6.5 Comparação dos resultados analíticos com os parâmetros do CONAMA.....</u>	59
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....</u>	61
<u>5.1 CONCLUSÕES GERAIS.....</u>	61
<u>REFERÊNCIAS.....</u>	63
<u>ANEXO 1 - CÓDIGO GATEWAY.....</u>	68
<u>ANEXO 2 - CÓDIGO EMBARCADO NO DISPOSITIVO COLETOR DE DADOS DOS SENsoRES.....</u>	73
<u>ANEXO 3 – RESULTADOS PARCIAIS DE ANÁLISES QUÍMICAS EM TANQUE DE ÁGUA DURANTE 90 MINUTOS.....</u>	79
<u>ANEXO 4 - TABELA REFERENTE AOS DADOS COLETADOS NO PONTO 1.....</u>	80
<u>ANEXO 5 - TABELA REFERENTE AOS DADOS COLETADOS NO PONTO 0.....</u>	82
<u>ANEXO 6 - TABELA REFERENTE AOS DADOS COLETADOS NO PONTO 2.....</u>	84
<u>ANEXO 7 - TABELA REFERENTE AOS DADOS COLETADOS NO PONTO 3.....</u>	85
<u>ANEXO 8 - TABELA REFERENTE AOS DADOS COLETADOS NO TESTE DE INFLUÊNCIA DE LUZ NO SENSOR DE TURBIDEZ.....</u>	87

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital que desempenha um papel essencial na sustentação da vida e do ecossistema em nosso planeta. A qualidade da água é um fator crítico que afeta a saúde humana, a biodiversidade e a economia (Leite, 2023).

Em ambientes fluviais, como rios e córregos, a qualidade da água desempenha um papel central na manutenção do equilíbrio ecológico, no abastecimento de água potável e na agricultura (Liloja *et al.*, 2021). No entanto, a crescente urbanização, a agricultura intensiva e as atividades industriais representam desafios significativos para a preservação da qualidade da água nesses ecossistemas (Rao *et al.*, 2021).

Para abordar efetivamente esses desafios e garantir a preservação da qualidade da água em ambientes fluviais, a implementação de um Sistema de Monitoramento da Qualidade da Água se torna imperativa (Maciel, 2020). Tal sistema envolve a coleta sistemática de dados relevantes, a análise precisa e a resposta adequada a quaisquer mudanças ou contaminações identificadas (Maciel, 2020).

A utilização de tecnologias de ponta, como a IoT (Internet das Coisas) e a comunicação LoRa (*Long Range*), abre novas perspectivas para uma monitorização mais eficaz e abrangente, permitindo o controle contínuo e remoto da qualidade da água em tempo real (Neves Neto, 2022).

Portanto, este estudo busca explorar como a automação e tecnologias como LoRa podem otimizar a gestão da qualidade da água no Rio Cubatão, na Baixada Santista, São Paulo. Sendo um importante recurso hídrico para comunidades e indústrias, a poluição no rio pode causar graves consequências para a biodiversidade, saúde pública e economia local. Por isso, o monitoramento contínuo e preciso dos parâmetros da água é essencial para uma gestão sustentável dos recursos hídricos.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O projeto de monitoramento da qualidade da água de ambientes fluviais, surge da necessidade de compreender e enfrentar os desafios associados à degradação da qualidade da água do rio, como é abordado no trabalho de Sacramento (2015).

A urbanização descontrolada, o despejo de poluentes, as mudanças climáticas e outras pressões antropogênicas têm impactos diretos na qualidade da água fluvial (Silva *et al.*, 2012).

Para enfrentar esses desafios, é essencial dispor de sistemas de monitoramento eficazes que forneçam dados precisos e em tempo real sobre os parâmetros críticos da água.

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, os corpos d'água devem ser classificados e monitorados de acordo com parâmetros específicos para garantir sua qualidade. Pesquisas realizadas na Bacia do Rio Cubatão indicam que a qualidade da água varia significativamente ao longo do curso do rio, influenciada por atividades humanas e naturais (Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo - SigRH, 2003).

O monitoramento da qualidade da água envolve a medição de diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos que indicam o estado de saúde do corpo hídrico. Parâmetros como pH, temperatura, oxigênio dissolvido, turbidez, DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio) são comumente utilizados para avaliar a qualidade da água. A poluição por esgotos domésticos e industriais é uma das principais causas da degradação da qualidade da água no Rio Cubatão, tendo bairros que despejam totalmente seus esgotos ao rio (Prefeitura Municipal de Cubatão, 2019).

Devido à falta de dispositivos apropriados, no presente trabalho não foi realizado o sensoriamento do DBO e DQO. Os parâmetros que serão trabalhados neste projeto incluem pH, temperatura, turbidez e oxigênio dissolvido, que forneceram uma base importante para o estudo inicial. A inclusão do sensoriamento

de DBO e DQO em pesquisas futuras valorizará significativamente o projeto, permitindo uma análise mais abrangente e precisa das condições ambientais e melhorando a precisão dos resultados.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema central desta pesquisa reside na falta de sistemas de monitoramento da qualidade da água em rios que sejam abrangentes (oferecendo uma cobertura completa de diferentes parâmetros da qualidade da água), precisos (garantindo medições confiáveis), eficientes (permitindo a coleta e análise de dados de maneira rápida e com o uso otimizado de recursos) e acessíveis (economicamente viáveis e de fácil utilização). Os métodos tradicionais de coleta de dados são frequentemente demorados, caros e limitados em sua capacidade de fornecer informações em tempo real. Além disso, a falta de conectividade em ambientes fluviais remotos representa um obstáculo significativo para a coleta e transmissão de dados de qualidade da água, como é abordado por Kulwant *et al.* (2024).

Portanto, através da revisão da literatura científica, notou-se a escassez de artigo que abordassem o monitoramento da qualidade da água em bacias fluviais. Além dessa lacuna, também se identificou a carência de estudos que se dediquem à definição de parâmetros específicos para a avaliação da qualidade da água em ambientes fluviais, bem como à geração de relatórios e à estabelecimento de modelos de especificação exemplares, como demonstrado por Maciel (2020) e Neves (2022).

Essas lacunas, identificadas no cenário atual de pesquisa, possibilitam um direcionamento adequado quanto às necessidades de pesquisa e o desenvolvimento de projetos futuros, bem como o projeto em questão.

1.3 QUESTÃO DE PESQUISA

De que maneira a implementação de automação na coleta e análise de dados, por meio das tecnologias de IoT (Internet das Coisas) e comunicação LoRa (*Long Range*), pode aprimorar o monitoramento da qualidade da água de um rio?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo deste projeto é desenvolver um sistema de monitoramento da qualidade da água no Rio Cubatão, utilizando tecnologias de IoT e comunicação LoRa.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do projeto:

- Desenvolver um sistema de monitoramento utilizando sensores (pH, turbidez, temperatura e oxigênio dissolvido) para medição da qualidade da água de um rio.
- Coletar os dados gerados pelos sensores e enviar para armazenamento e processamento em uma plataforma de nuvem.
- Criar um painel visual (*dashboard*) para apresentar as informações monitoradas por meio de gráficos.

1.5 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Este estudo teve como foco a implementação e validação do sistema de monitoramento da qualidade da água em um ambiente fluvial. O escopo do projeto abrangerá a seleção e instalação de sensores, o desenvolvimento da plataforma de comunicação LoRa e a criação da interface de usuário. A validação será realizada em condições específicas desse ambiente. Outros contextos podem exigir adaptações adicionais.

1.6 JUSTIFICATIVA PARA O ESTUDO

A justificativa para este estudo reside na importância crítica da preservação da qualidade da água em ambientes fluviais para a saúde humana, a biodiversidade e o desenvolvimento sustentável. À medida que os desafios ambientais crescem, a necessidade de sistemas avançados de monitoramento se torna evidente, como é visto no trabalho de Silva *et al.* (2012).

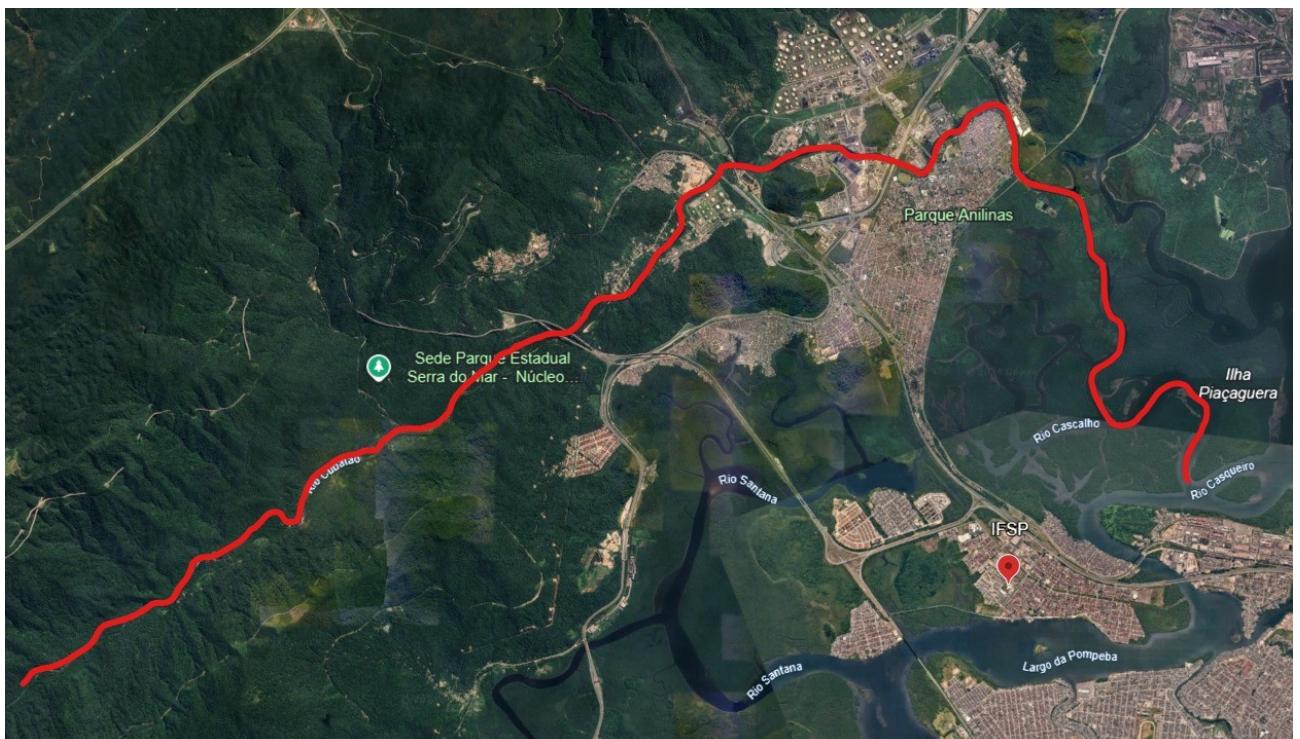
Esse projeto se justifica pela lacuna atual em soluções de monitoramento eficazes e acessíveis para ambientes fluviais, bem como pelo potencial de contribuir significativamente para a gestão responsável dos recursos hídricos.

O Rio Cubatão é fundamental para a região da Baixada Santista, tanto social quanto economicamente. Ele fornece água potável para muitas comunidades e é vital para diversas indústrias localizadas nas proximidades, impulsionando a economia (Prefeitura Municipal de Cubatão, 2019).

O Rio Cubatão abastece cerca de 1 milhão de pessoas em três municípios (Cubatão, Santos e São Vicente) (Confederação Nacional de Municípios, 2016).

Conforme ilustrado na Figura 1, a vista aérea do Rio Cubatão evidencia sua passagem pela cidade. O percurso do rio é realçado em vermelho na figura, destacando a interação entre o rio e as áreas urbanas. Esta perspectiva ilustra como o rio desempenha um papel crucial no abastecimento de água e na vida cotidiana da comunidade local.

Figura 1 - Vista aérea do percurso do Rio Cubatão, destacado em vermelho



Fonte: Google Earth (2024)

O rio Cubatão sustenta a biodiversidade e o equilíbrio ecológico da região, o que é crucial para a qualidade de vida dos moradores. Por diversos anos, foram lançados no rio resíduos provenientes das indústrias ao redor (Silva *et al.*, 2012).

Na década de 1980, a cidade de Cubatão foi considerada a mais poluída do mundo pela ONU, ganhando o apelido de “Vale da Morte” devido à alta poluição do ar (dez vezes mais do que o limite recomendado pela Organização Mundial da Saúde) e seus efeitos devastadores na saúde pública, incluindo nascimentos de crianças com malformações e doenças respiratórias, hepáticas e sanguíneas (Naoum, 2021). Esse título refletia a gravidade da situação ambiental e a necessidade urgente de ações para mitigar os impactos da poluição. Atualmente, Cubatão é um exemplo de recuperação ambiental, com esforços contínuos para melhorar a qualidade do ar e proteger a saúde de seus habitantes (CETESB, 2024).

O monitoramento da qualidade da água no Rio Cubatão, utilizando tecnologias de IoT e comunicação LoRa, contribui diretamente para os ODS 13 e 14. Para o ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima (Uniandrade, 2023), o sistema permite identificar mudanças na qualidade da água em tempo real, facilitando respostas rápidas a eventos climáticos extremos, como enchentes e secas. Isso ajuda na adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, protegendo os ecossistemas fluviais. Além disso, de acordo com a ODS 14 - Vida na Água (Uniandrade, 2023), o monitoramento contínuo e eficiente ajuda a preservar a qualidade da água, essencial para a saúde dos ecossistemas aquáticos e costeiros.

A detecção precoce de poluentes e a implementação de medidas corretivas garantem a sustentabilidade dos recursos hídricos e a biodiversidade. Ao manter a água limpa e segura, o trabalho de monitoramento contribui para o desenvolvimento sustentável e a proteção dos recursos naturais para as futuras gerações.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho compreenderá as seguintes seções:

Introdução: Apresentação do contexto, problema, questão de pesquisa e objetivos do projeto.

Revisão da Literatura: Revisão dos principais conceitos relacionados à qualidade da água, monitoramento ambiental, tecnologias IoT, LoRa e projetos similares.

Materiais e métodos: Descrição detalhada dos materiais, métodos e técnicas utilizados na implementação do sistema de monitoramento.

Resultados e Discussões: Resultados encontrados com o projeto.

Conclusão: Análises referente ao desenvolvimento do trabalho, destacando as contribuições alcançadas e as perspectivas para futuras aplicações.

Referências: Lista das fontes utilizadas na pesquisa.

Anexos: Códigos utilizados no projeto.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre os principais estudos relacionados ao monitoramento da qualidade da água em ambientes fluviais utilizando a tecnologia LoRa. A análise abrange diferentes abordagens de monitoramento, tecnologias aplicadas e desafios enfrentados.

Além disso, serão discutidos alguns trabalhos relevantes encontrados nas bases de dados, bem como a apresentação de materiais necessários para o entendimento do sistema proposto.

2.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

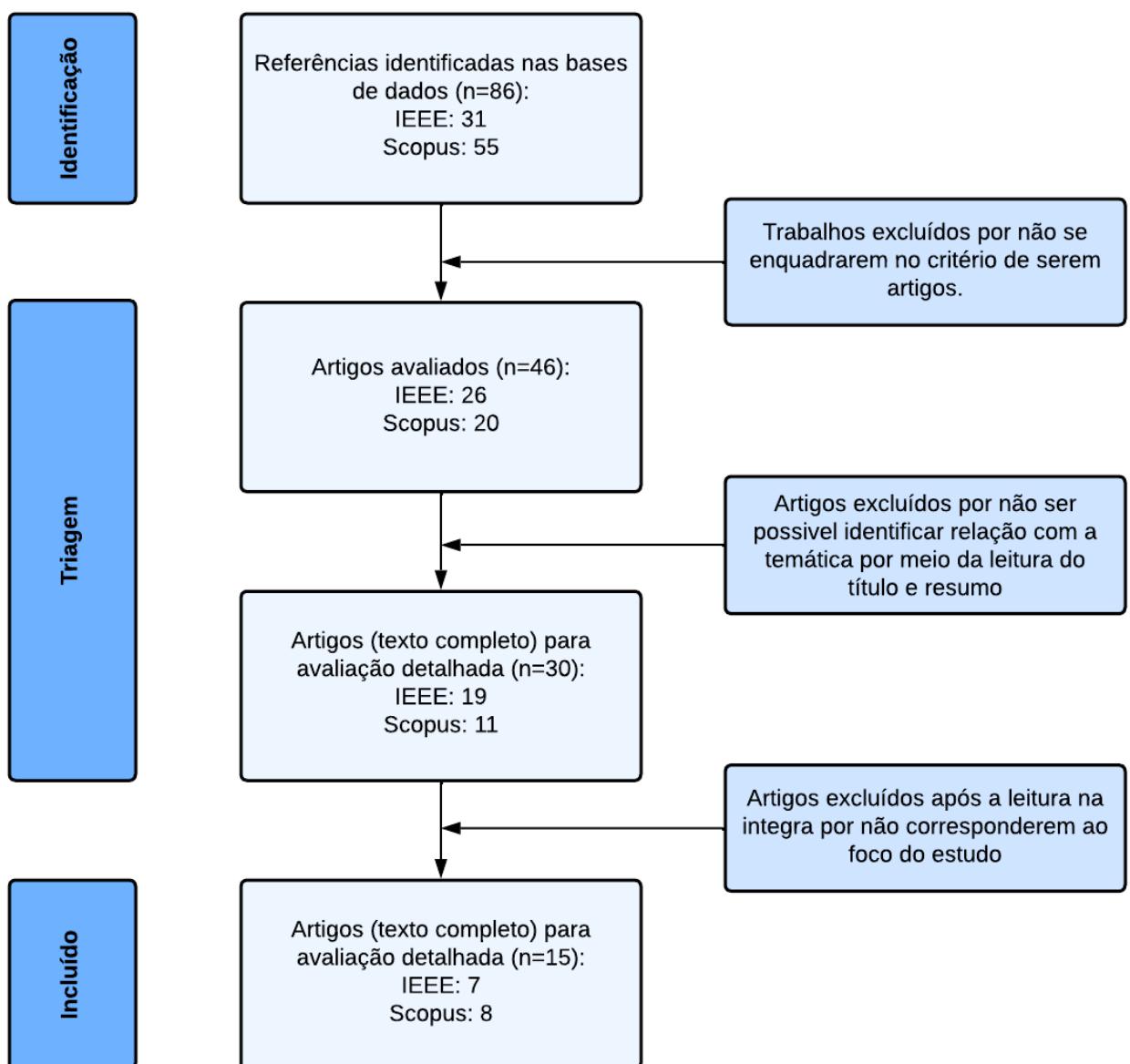
A metodologia adotada neste trabalho envolveu uma pesquisa em bases de dados de periódicos, utilizando o Scopus e o IEEE. O critério de busca foi estabelecido com base em palavras-chave, utilizando "*River Monitoring*" e "*LoRa*" como termos principais, conduzindo a pesquisa em inglês e abrangendo o período de 2019 a 2024 para as buscas bibliográficas.

Nas bases de dados pesquisadas foram identificados 86 trabalhos iniciais. Para aprimorar o critério de filtragem e garantir uma seleção dos estudos mais relevantes, utilizou-se a metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Essa metodologia visa não apenas proporcionar transparência no processo de revisão, mas também ajudar os autores a melhorarem a qualidade do relato de revisões sistemáticas e meta-análises, como destacado por Moher *et al.* (2015).

No processo de filtragem, foram aplicados critérios adicionais de exclusão, além dos iniciais que limitavam a seleção apenas a artigos. Esses critérios incluíram a leitura dos títulos e resumos para identificar os estudos mais alinhados ao tema. Após essa etapa, foi realizada uma leitura aprofundada dos trabalhos, excluindo aqueles que não apresentavam uma ênfase adequada ao foco desta pesquisa, que são os sistemas de monitoramento da qualidade da água em rios.

O uso do PRISMA, como mostrado na Figura 2, permitiu uma triagem, resultando em um processo mais estruturado, assegurando a inclusão apenas de estudos que atendem aos objetivos da pesquisa de maneira relevante para o trabalho.

Figura 2 - Diagrama PRISMA



Fonte: Autoria própria (2024)

Na Tabela 1, estão listados os 15 artigos resultantes da triagem do método PRISMA, com seus títulos, autores, base de dados utilizada e ano de publicação.

Tabela 1 - Artigos selecionados por meio do método PRISMA

River Water Quality Monitoring System Using LoRa Devices And PSoC5LP	Camargo <i>et al.</i>	Scopus	2020	
IoT-based System for Real-time Water Pollution Monitoring of Rivers	Khan <i>et al.</i>	IEEE	2021	
Sungai Pusu River Emergency Vital Signs Monitoring Using LoRaWAN	Kosnin <i>et al.</i>	IEEE	2021	
Leveraging IoT and Machine Learning for Improved Monitoring of Water Resources - A Case Study of the Upper Ewaso Nyiro River	Kabi e Maina	IEEE	2021	
Performance Evaluation of River Water Quality Monitoring Using Lora Connectivity with Fuzzy Algorithm	Perdana <i>et al.</i>	Scopus	2021	
River Water Pollutant Level Monitoring System using WebSocket Protocol and LoRa Communication Module	Nurwarsito <i>et al.</i>	IEEE	2021	
A Network Infrastructure for Monitoring Coastal Environments and Study Climate Changes in Marine Systems	Campagnaro <i>et al.</i>	IEEE	2022	
TEMPSENSE: LoRa Enabled Integrated Sensing and Localization Solution for Water Quality Monitoring	Baghel <i>et al.</i>	Scopus	2022	
Real-Time Information System Of Raw Water Salt Levels Pdam Tirta Khatulistiwa Pontianak Based On Lora Gateway Technology	Imansyah <i>et al.</i>	Scopus	2022	
LoRaWAN Monitoring System for Emergency Vital Signs in Pusu River	Habaebi <i>et al.</i>	Scopus	2022	
A LoRaWAN Network for the Real-Time Monitoring of the Venice Lagoon: Preliminary Tests	Ghalkhani <i>et al.</i>	IEEE	2023	
LoRa-based Network for Water Quality Monitoring in Coastal Areas	Sendra <i>et al.</i>	Scopus	2023	
Low cost, LoRa based river water level data acquisition system	Kabi <i>et al.</i>	Scopus	2023	
Development of a Water Monitoring System Prototype	Díaz	IEEE	2023	
Evaluation of LoRa Network Performance for Water Quality Monitoring Systems	Syed Taha <i>et al.</i>	Scopus	2024	

Fonte: Autoria própria (2024)

2.2 REVISÃO DOS ARTIGOS SELECIONADOS

A importância da qualidade da água é um tema recorrente em diversos estudos voltados para o monitoramento de ambientes fluviais e costeiros, especialmente devido aos impactos causados por atividades agrícolas, industriais e urbanas. Neste contexto, a tecnologia LoRa surge como uma alternativa promissora para a coleta de dados de qualidade da água em diferentes cenários, como demonstrado nas literaturas a seguir.

Sendra *et al.* (2023) abordam que a qualidade da água em áreas costeiras e corpos d'água, como rios, é destacada devido à vulnerabilidade a atividades humanas. O estudo sugere a implementação de um sistema de monitoramento que utiliza a tecnologia LoRa, combinada com análises avançadas, como Big Data e inteligência artificial, para otimizar a interpretação dos dados e a resposta a incidentes de poluição.

Já o estudo de Habaebi *et al.* (2022) enfatiza a água como um elemento crucial para o equilíbrio ecológico e a biodiversidade. Realizado no Rio Sungai Pusu, na Malásia, o trabalho destaca a necessidade de integrar tecnologias de análise, como inteligência artificial, sensores e LoRa para prever e mitigar incidentes de poluição de maneira mais eficaz e ampliar o monitoramento para períodos mais longos.

De forma semelhante, o artigo de Kabi *et al.* (2023) aborda a importância da água para a sobrevivência dos organismos aquáticos e o abastecimento humano. Realizado no Rio Muringato, Quênia, o estudo utiliza sensor de controle de nível, além de rede LoRa e nuvem para análise do monitoramento da água, garantindo uma boa gestão para os recursos hídricos locais.

No artigo Perdana *et al.* (2021), realizaram um estudo no Rio Citarum na Indonésia, explora o uso de um algoritmo *fuzzy* para avaliar a qualidade da água. Com o auxílio de sensores de temperatura, sólidos totais dissolvidos (TDS), pH e turbidez, além da rede LoRa, o estudo garante uma boa análise do rio, permitindo monitoramento contínuo e respostas rápidas a mudanças na qualidade da água.

O artigo Imansyah *et al.* (2022) enfatiza a importância do Rio Kapuas, na Indonésia, como um recurso vital para ecossistemas e a saúde humana. Destaca a necessidade de expandir a pesquisa para outros corpos hídricos e ambientes remotos, onde a conectividade com a internet pode ser limitada utilizando sensores de monitoramento da qualidade da água e no LoRa, o sistema garante a expansão e a continuidade do monitoramento em áreas abrangentes.

O estudo Nurwarsito *et al.* (2021) foca no Rio Arzobispo, em Bogotá, Colômbia, sugerindo a necessidade de um monitoramento mais abrangente e contínuo. Para isso, foram utilizados sensores de temperatura, pH e turbidez, integrados a um microcontrolador e um módulo LoRa, oferecendo uma proposta para uma gestão mais eficiente desse recurso hídrico.

Em Baghel *et al.* (2022), apresentam um estudo realizado próximo ao rio Satluj, na Índia, sugerindo uma integração com sistemas de gestão de dados em larga escala para aprimorar a análise das informações. Para isso, foram utilizados um microcontrolador, um módulo LoRa e diversos sensores de monitoramento da qualidade da água, como pH, temperatura, sólidos totais dissolvidos (TDS) e condutividade elétrica (CE).

Ghalkhani *et al.* (2023) apresentam a importância do monitoramento da Lagoa de Veneza, em Veneza, devido aos impactos das mudanças climáticas e poluição. A pesquisa desenvolveu um sistema de monitoramento da qualidade da água, utilizando sensores para medir parâmetros como pH, condutividade elétrica, turbidez, oxigênio dissolvido e nível da água. Além disso, um módulo LoRa é empregado para projetar uma gestão desse recurso hídrico.

No estudo de Díaz (2023), realizado no Rio Atoyac, no México, os autores ressaltam a falta de um monitoramento eficiente em áreas remotas. Para resolver esse problema, os autores desenvolvem um sistema, de baixo custo, que utiliza sensores para medir os parâmetros da água, como pH, condutividade elétrica, turbidez, oxigênio dissolvido e temperatura, juntamente com um módulo LoRa.

O artigo de Khan *et al.* (2021) aborda sobre o problema da poluição da água em Bangladesh, especialmente em áreas urbanas e industriais, assim o estudo ressalta a falta de procedimentos automatizados para a previsão de inundações. Para abordar esse problema, foram utilizados sensores de qualidade da água, em

conjunto com um módulo ESP e LoRa. Criando um aplicativo e software de monitoramento mais acessíveis, garantindo uma gestão eficaz.

Em Kabi e Maina (2021), o estudo se concentra na bacia do Rio Ewaso Nyiro, no Quênia, evidenciando a necessidade de um sistema de monitoramento acessível para coleta de dados em tempo real. Os autores utilizam um sensor de nível, juntamente com um módulo LoRa para comunicação com a nuvem, permitindo que esses dados sejam integrados em um sistema de “*Machine Learning*” para a detecção de anomalias.

Kosnin *et al.* (2021) destacam o monitoramento do rio Sungai Pusu, crucial para garantir a saúde pública e ambiental, assim uma das dificuldades mencionadas é a ausência de sistemas de monitoramento de longo alcance e baixo consumo de energia. Para solucionar esse problema, os autores empregaram um módulo LoRa, juntamente com sensores de temperatura, pH e turbidez, visando aprimorar a gestão e propor uma solução eficaz.

No trabalho de Campagnaro *et al.* (2022) discutem a importância da água para a compreensão das mudanças ambientais, com foco na lagoa de Veneza. O estudo desenvolveu um sistema que utiliza sensores de pH, condutividade elétrica, turbidez, GPS, temperatura e nível, integrados a um microcontrolador. Essa abordagem garante uma análise detalhada, contribuindo para a gestão dos recursos hídricos.

Em Syed Taha *et al.* (2024) abordam a importância da água no local de estudo, onde apenas 47% dos recursos hídricos são potáveis. Para realizar esse monitoramento, foi desenvolvido um aplicativo que gerencia a coleta de dados, em conjunto com sensores de qualidade da água, módulos LoRa e servidores LoRaWAN.

No estudo de Camargo *et al.* (2020), é abordado como a água é um recurso finito e como certas ações têm esgotado ou tornado esse recurso inadequado para consumo, destacando a necessidade de mensuração contínua. Os autores desenvolvem um sistema de monitoramento utilizando sensores sem fio, Internet das Coisas (IoT) e *Machine-to-Machine (M2M) communication*, além de sensores de parâmetros da água e uma interface gráfica desenvolvida em Java.

Esses trabalhos demonstram a crescente necessidade de monitoramento eficaz e contínuo da qualidade da água, integrando tecnologias avançadas para proteger ecossistemas, promover a saúde pública e garantir a disponibilidade de recursos hídricos de qualidade. A adoção de sistemas de monitoramento utilizando LoRa e técnicas de aprendizado de máquina pode ser uma solução viável para enfrentar os desafios atuais relacionados à poluição da água e à gestão de recursos hídricos.

2.3 REDE LoRa E LoRaWAN

A tecnologia LoRa (*Long Range*) e o protocolo LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) têm se mostrado eficazes para aplicações de Internet das Coisas (IoT) em ambientes de monitoramento ambiental. LoRa é uma tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance e baixo consumo de energia, ideal para dispositivos que transmitem pequenos volumes de dados e para aplicações em áreas remotas. LoRaWAN, por sua vez, é um protocolo de rede que gerencia a comunicação entre dispositivos LoRa e *gateways*, garantindo a segurança e a integridade dos dados (Datatem, 2023).

A especificação LoRaWAN é uma tecnologia que tem como objetivo integrar eficientemente esses dispositivos à internet em âmbitos regionais, nacionais ou globais. A especificação atende de forma abrangente aos requisitos fundamentais da Internet das Coisas (IoT), proporcionando comunicação bidirecional, segurança robusta, capacidade de mobilidade e serviços de localização (LORA ALLIANCE, 2021).

A relação de mestre e escravo entre dois dispositivos ESP32 LoRa caracteriza um modelo de comunicação em que um dispositivo, identificado como mestre, assume o comando e coordena as operações de outro dispositivo, chamado escravo, através do protocolo LoRa (*Long Range*). O LoRa é uma tecnologia de comunicação sem fio com alcance estendido e baixo consumo de energia, proporcionando uma eficiente transmissão de dados entre dispositivos conectados à Internet das Coisas (IoT) (LOGPYX, 2021).

2.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os principais parâmetros utilizados para avaliar a qualidade da água incluem pH, temperatura, oxigênio dissolvido e turbidez (CETESB, 2023). De acordo com o Plano de Bacia UGRHI 7, o Rio Cubatão é considerado como classe 2 de água doce, classe que abrange águas com salinidade igual ou inferior a 0,5‰. Segundo o artigo 4º da Resolução CONAMA nº 357/2005, a classe 2 são de águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;
- d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e
- e) à aquicultura e à atividade de pesca.

Os valores ideais para os parâmetros medidos no artigo estão dispostos na Tabela 2:

Tabela 2 - Parâmetros de qualidade da água (CONAMA)

Parâmetros	Valores Ideais
pH	6,0 a 9,0
Temperatura	-
Oxigênio dissolvido	> 5 mg L ⁻¹
Turbidez	< 100 NTU

Fonte: CONAMA (2024)

O pH da água é um indicador importante da acidez ou alcalinidade do corpo hídrico, devendo estar entre 6,0 e 9,0 para garantir a vida aquática e a potabilidade da água. Valores fora dessa faixa ideal podem afetar negativamente os ecossistemas e a qualidade da água para consumo humano.

A temperatura da água é outro parâmetro crucial, pois deve ser monitorada para detectar variações que possam indicar a presença de poluição térmica, prejudicial aos organismos aquáticos.

O oxigênio dissolvido (OD) é essencial para a respiração dos organismos aquáticos e deve ser mantido em níveis não inferiores a 5 mg L⁻¹, já que concentrações mais baixas podem indicar a presença de poluentes orgânicos.

A turbidez, por sua vez, é uma medida da clareza da água e deve permanecer abaixo de 100 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) para preservar a saúde dos ecossistemas aquáticos e garantir a qualidade do recurso hídrico.

2.5 DISPOSITIVO DE VISUALIZAÇÃO

ThingSpeak é uma plataforma de código aberto que capacita os usuários a interagirem com dispositivos conectados à Internet. Esta ferramenta disponibiliza uma versão gratuita para experimentação e implementação de projetos relacionados à Internet das Coisas (IoT), e integra-se ao software MatLab, eliminando a necessidade de aquisição de uma licença separada para análise de dados. Adicionalmente, oferece diversas funcionalidades, incluindo gráficos para visualização de dados e gatilhos para automatização de tarefas.

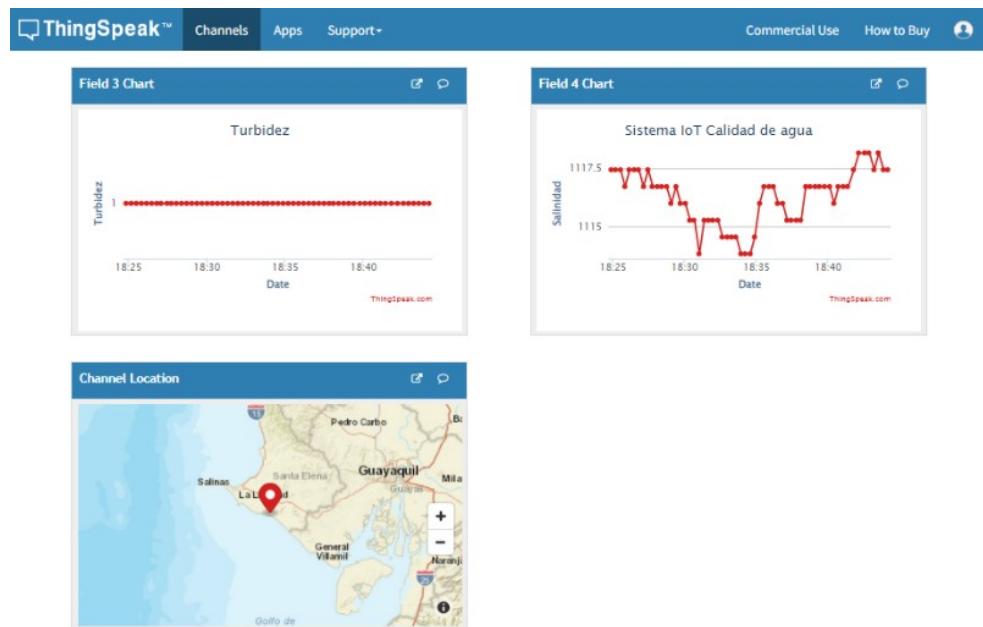
As Figuras 3 e 4 apresentam um exemplo da interface de funcionamento do *ThingSpeak*.

Figura 3 - Exemplo da interface de funcionamento do ThingSpeak "Sistema IoT Calidad de Agua"



Fonte: Borbor (2022)

Figura 4 - Exemplo da interface de funcionamento do ThingSpeak



Fonte: Borbor (2022)

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do sistema de monitoramento da qualidade da água, incluindo a descrição dos dispositivos e sensores empregados, o projeto elétrico e mecânico, além das escolhas realizadas para a definição dos pontos de medição.

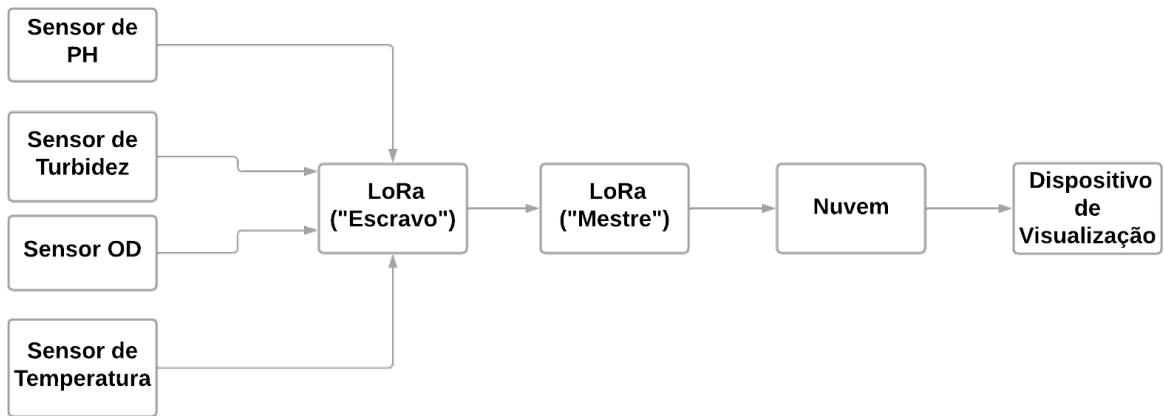
3.1 DESCRIÇÃO FUNCIONAL

Para garantir a eficiência e funcionalidade do sistema de monitoramento, foram utilizados dois dispositivos ESP32 LoRa, um desempenhando a função de coletar e transmitir dados (dispositivo escravo), e o outro atuando como receptor desses dados (dispositivo mestre). Além disso, foram incorporados sensores para monitorar as operações do sistema.

A Figura 5 ilustra o diagrama de blocos do projeto, iniciando com a coleta dos dados de qualidade da água por meio de quatro sensores: Turbidez, pH, Temperatura e Oxigênio Dissolvido, todos conectados ao microcontrolador ESP32 LoRa. Este atua como um dispositivo escravo, onde os dados são convertidos para valores digitais e enviados para outro ESP32 LoRa, que desempenha o papel de *gateway*, utilizando o protocolo de comunicação LoRaWan.

O microcontrolador designado como *gateway* está posicionado próximo a uma rede de comunicação de dados com acesso à internet. A partir desse ponto, os dados são transmitidos para a nuvem. Pela comunicação com a internet, esses dados são então enviados ao dispositivo de visualização, onde um painel visual (*dashboard*) é apresentado. Esse *dashboard* permite a visualização gráfica das informações monitoradas e a geração de relatórios detalhados sobre a qualidade da água.

Figura 5 - Diagrama de blocos do projeto



Fonte: Autoria própria (2024)

Os tópicos seguintes apresentam informações dos componentes e funcionamento do sistema.

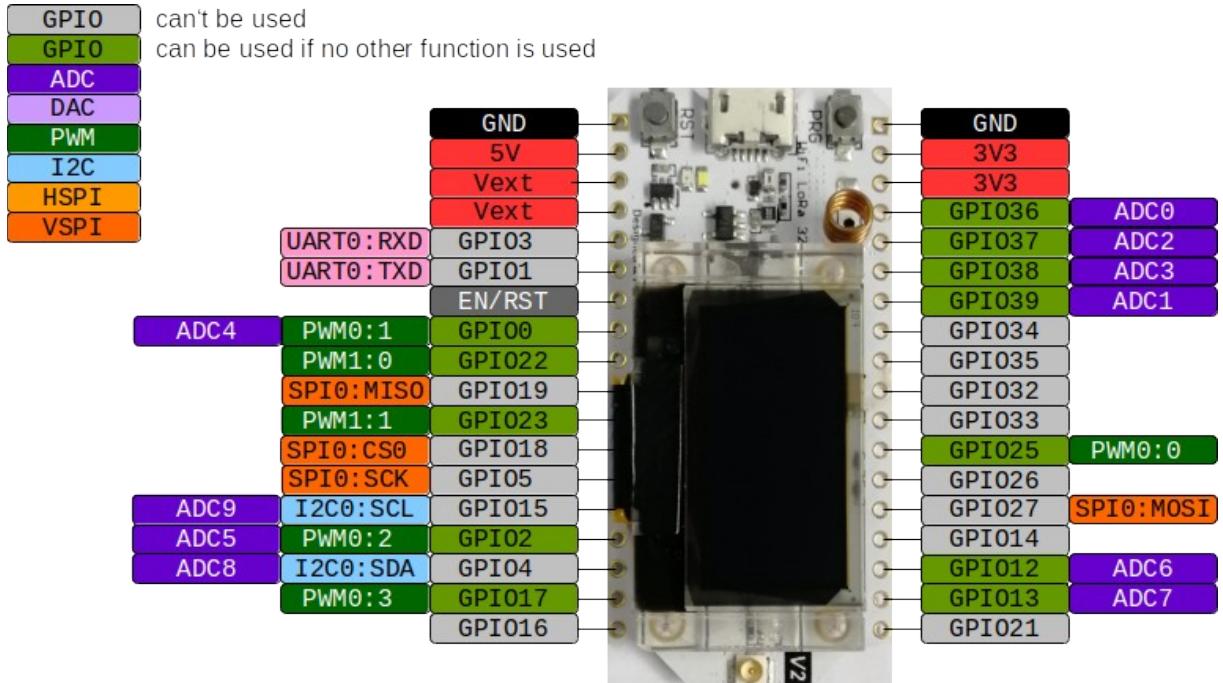
3.1.1 ESP32 LoRa

Um microcontrolador é um dispositivo que integra todos os componentes necessários para o funcionamento de um chip. Neste projeto, ele é utilizado como um monitor, coletando dados dos sensores e transmitindo-os.

Para isso, foi utilizado o módulo microcontrolado ESP32 LoRa, que oferece recursos de comunicação, incluindo Wi-Fi, Bluetooth e LoRa, graças ao chip SX1278. O módulo está disponível de forma independente ou em placas que incluem componentes adicionais, como reguladores de tensão, portas USB e várias entradas e saídas, que podem ser utilizadas para conectar sensores e atuadores.

A Figura 6 apresenta o diagrama de pinos do ESP32 LoRa.

Figura 6 - Diagrama de pinos ESP32 LoRa



Fonte: RIOT Documentation (2024)

3.1.2 Sensor de Temperatura

O Sensor de Temperatura DS18B20, como apresentado na Figura 7, é um termômetro digital que mede a temperatura em graus Celsius com resolução de 9 a 12 bits. Ele também possui uma função de alarme que pode ser configurada para emitir um sinal quando a temperatura atingir um limite específico. O DS18B20 utiliza uma interface de comunicação de 1 fio, que é simples de conectar a um microprocessador e não requer uma fonte de alimentação externa.

Figura 7 - Sensor de temperatura DS18B20



Fonte: Autoria própria (2024)

3.1.3 Sensor de pH

O sensor pH-4502C, como apresentado na Figura 8, é um dispositivo prático e funcional que pode ser usado com microcontroladores. Ele consiste em um eletrodo de pH e um módulo eletrônico que transmite os dados do eletrodo para o microcontrolador. O eletrodo pode ser imerso no líquido desejado, com apenas o cabo exposto. O sensor pH-4502C é ideal para monitorar os níveis de pH em locais como piscinas, aquários, reservatórios de água, rios e lagos. Isso garante condições adequadas para seres humanos, animais e plantas.

A calibração deste sensor foi realizada conforme as especificações do fabricante, DFRobot. O processo seguiu uma calibração de dois pontos, utilizando soluções de pH 4,0 e 7,0, com o objetivo de ajustar e garantir a precisão da sonda, com base no valor de tensão da saída ao mergulhar a sonda nessas soluções.

Figura 8 - Sensor pH-4502C



Fonte: Autoria própria (2024)

3.1.4 Sensor de Turbidez

O sensor de turbidez SEN0189, como apresentado na Figura 9, mede a quantidade de partículas em suspensão na água usando luz. À medida que o número de partículas aumenta, a turbidez da água também aumenta. Esses sensores são usados para avaliar a qualidade da água em uma variedade de aplicações, incluindo rios, águas residuais, tanques de sedimentação e laboratórios. O sensor oferece saídas de sinal tanto analógicas quanto digitais.

A calibração deste sensor foi realizada de acordo com as especificações do fabricante, DFRobot. O processo seguiu a relação entre turbidez e tensão, onde quanto maior a tensão, menor é o valor de NTU, sendo o limite máximo de 3000 NTU conforme especificado pelo fabricante. Foi necessário obter o valor de saída do sensor imerso em água limpa em um ambiente claro e ajustá-lo para o valor nulo de NTU. Essa relação está descrita no código do sensor, conforme apresentado no Anexo 01.

Figura 9 - Sensor de turbidez SEN0189



Fonte: Autoria própria (2024)

3.1.5 Sensor de Oxigênio Dissolvido (OD)

O módulo analógico do eletrodo OD, conforme a Figura 10, é um dispositivo que mede a capacidade de um líquido para sofrer reações de oxidação dissolvida. Ele é utilizado em várias aplicações, como controle de qualidade da água e monitoramento de processos químicos.

O funcionamento do módulo baseia-se na medição da diferença de potencial elétrico entre um eletrodo de referência e um eletrodo de trabalho, ambos em

contato com o líquido em análise. Essa diferença de potencial é diretamente relacionada à capacidade do líquido em promover reações de oxidação dissolvida.

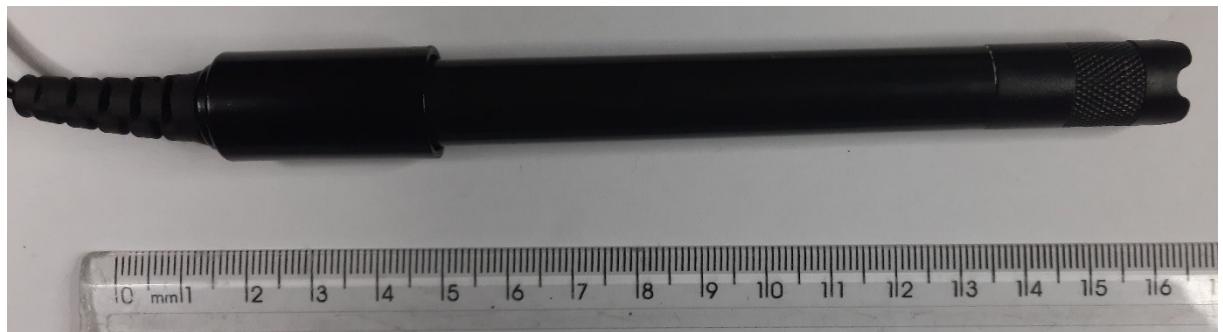
O módulo converte o sinal elétrico em uma leitura numérica compreensível, geralmente em milivolts (mV), assim, o microcontrolador, processa esse sinal e exibe a concentração de oxigênio dissolvido em mg L^{-1} .

A calibração deste sensor foi realizada conforme as especificações do fabricante, DFRobot, utilizando um processo de calibração de dois pontos, a qual é consiste em calibrar o dispositivo com duas referências conhecidas, geralmente um valor mínimo e um máximo, permitindo corrigir desvios e melhorar a exatidão das leituras.

Inicialmente, foi adicionada a solução de NaOH 0,5 mol/L na ponta da sonda. Em seguida, mediu-se a tensão e temperatura em duas amostras de água purificada a diferentes temperaturas, uma resfriada e a outra aquecida (sem ultrapassar 40°C).

Esse procedimento permite calcular a compensação de temperatura, uma vez que a tensão está linearmente relacionada à concentração de oxigênio dissolvido, considerando as variações de temperatura, conforme o fabricante.

Figura 10 - Sensor de Oxigênio Dissolvido (OD)



Fonte: Autoria própria (2024)

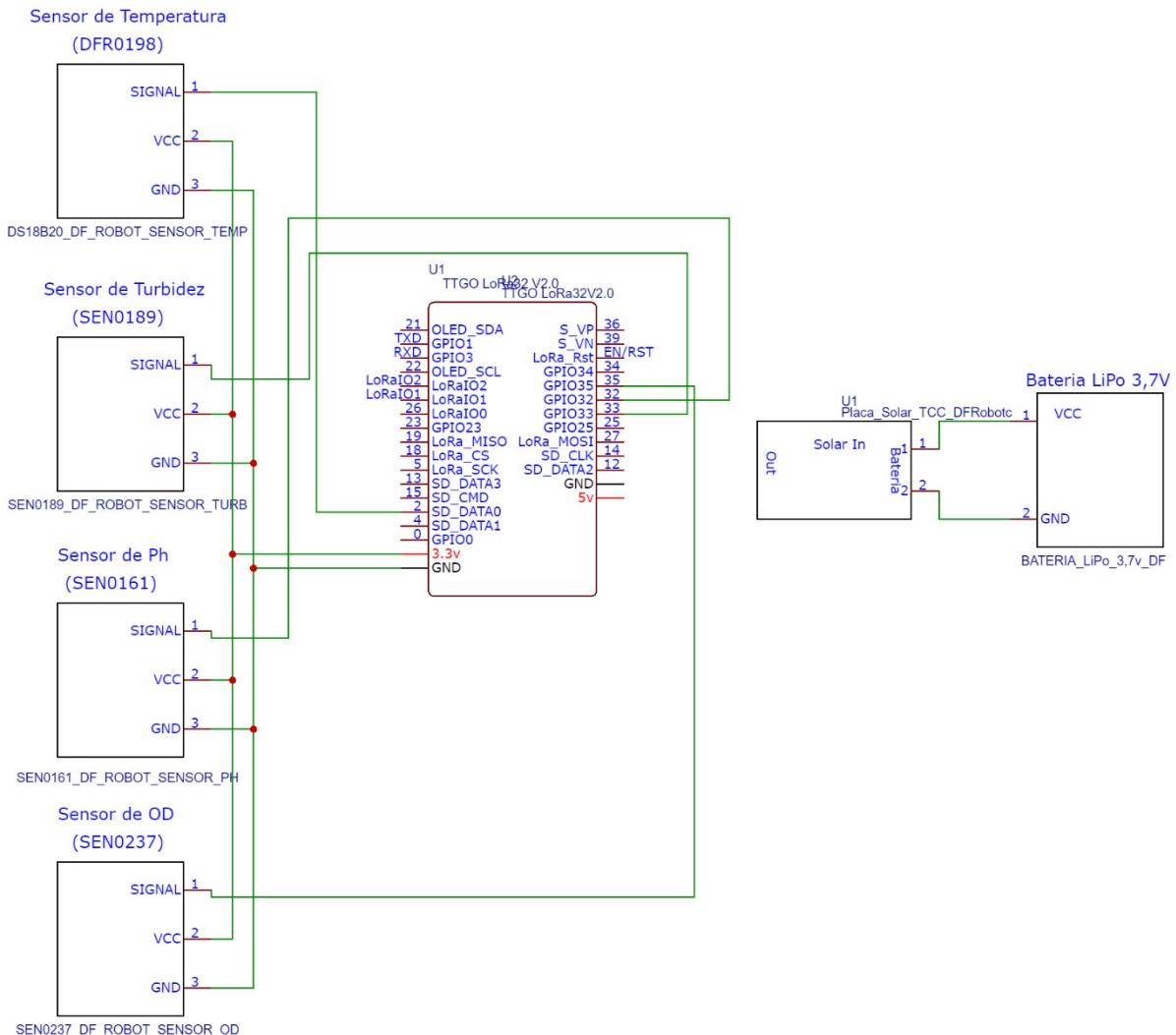
3.2 PROJETO ELÉTRICO/MECÂNICO

3.2.1 Desenho do circuito elétrico

Na Figura 11, apresenta-se o esquema elétrico que ilustra as conexões dos sensores com o microcontrolador. É importante ressaltar que todos os sensores são alimentados por uma tensão de 3,3 Volts (Vcc) e conectados ao terra (GND). As ligações específicas dos sensores estão claramente definidas da seguinte maneira:

- O sensor DS18B20 é integrado ao sistema através da utilização da entrada digital 2 do microcontrolador.
- O sensor pH-4502C é integrado ao sistema através da utilização da entrada digital 32 do microcontrolador.
- O sensor SEN0189 é integrado ao sistema através da utilização da entrada digital 38 do microcontrolador.
- O sensor TDS SEN024 é integrado ao sistema através da utilização da entrada digital 33 do microcontrolador.

Figura 11 - Esquema elétrico do protótipo para monitoramento da qualidade da água

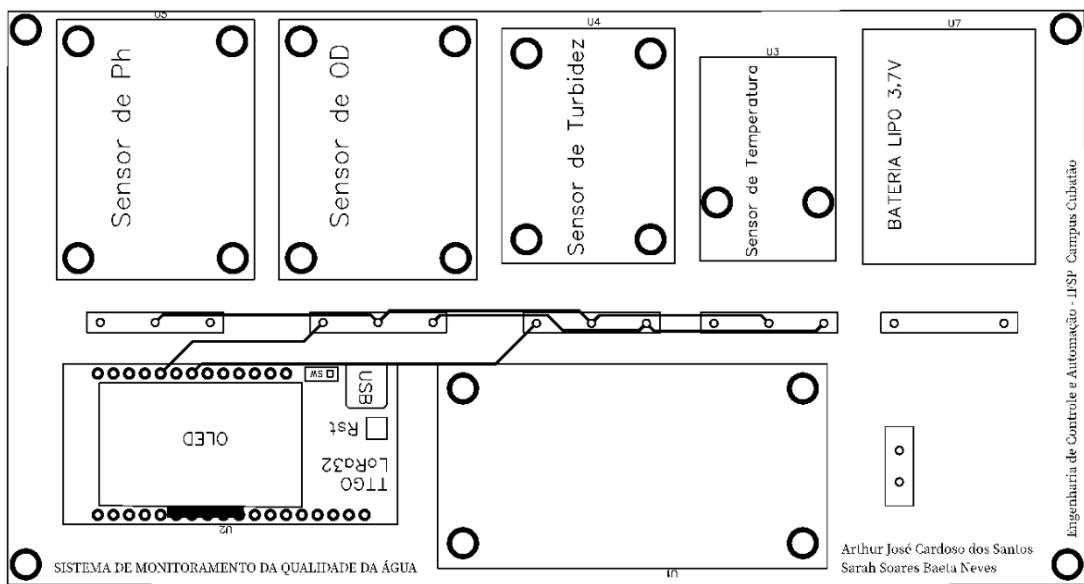


Fonte: Autoria própria (2024)

3.2.2 Desenvolvimento da placa PCB

A Figura 12 ilustra a placa PCB desenvolvida para o projeto, cuja criação foi baseada no esquema elétrico previamente elaborado. O design foi realizado utilizando o *software* gratuito EasyEDA (2024), que proporcionou ferramentas essenciais para a elaboração de um *layout* eficiente e funcional.

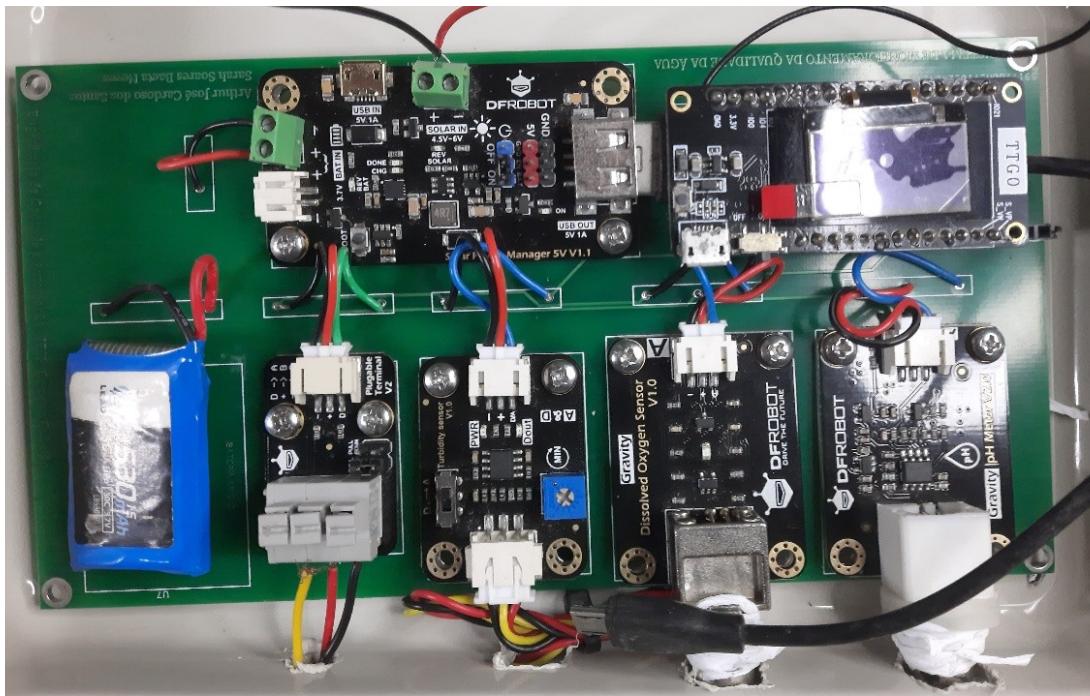
Figura 12 - Layout da placa PCB do protótipo para monitoramento da qualidade da água



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 13 apresenta a placa já impressa, encomendada através da JLCPCB, empresa conhecida por oferecer fabricação de qualidade a um custo acessível. O principal objetivo dessa placa é integrar os componentes necessários para o monitoramento da qualidade da água, utilizando comunicação via LoRa, assegurando precisão e confiabilidade no sistema.

Figura 13 - Placa PCB do protótipo para monitoramento da qualidade da água

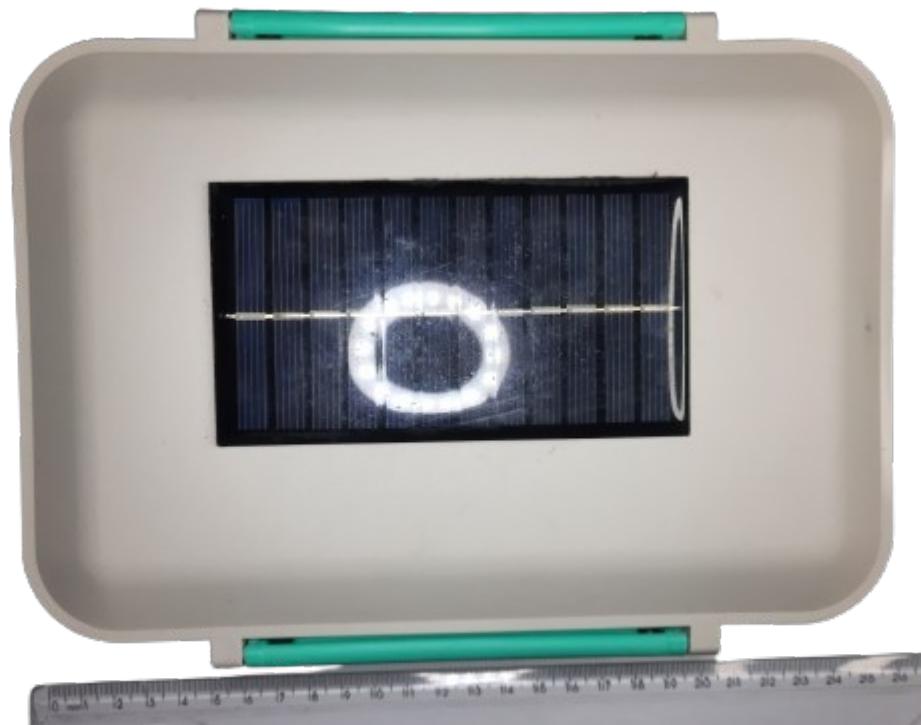


Fonte: Autoria própria (2024)

3.2.3 Esquema mecânico/montagem

O protótipo é composto por uma placa de circuito impresso (PCB) no qual os componentes eletrônicos são instalados. A interconexão entre essas placas é estabelecida por meio de conectores predefinidos. A placa abriga o microcontrolador, o sistema de alimentação, os pinos para conexão dos sensores, além de um dispositivo de gerenciamento de energia solar acoplado a uma bateria de 3,7V. Todo o sistema está integrado em uma caixa de proteção, acoplada a uma boia, e conta com uma mini placa solar que garante a autonomia energética do projeto. Essa caixa, mostrada na Figura 14, é projetada com saídas específicas para os sensores, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 14 - Caixa de proteção



Fonte: Autoria própria (2024)

3.3 LISTA DE COMPONENTES

Na Tabela 3 são apresentados os componentes a serem utilizados com suas respectivas informações técnicas e com o custo dos componentes encontrados no mês de outubro de 2024.

Tabela 3 - Lista de preços dos componentes

Item	Descrição	Informações Técnicas	Qtd.	Valor Unitário	Valor total
1	Bateria Lipo	Tensão nominal: 3,7V Tensão máxima: 4,2V Tensão mínima: 3,0V Capacidade: 530mAh Taxa de descarga: 30C Dimensão: 40 x 25 x 8 (mm)	1 unid.	R\$59,95	R\$59,95
2	ESP32 LoRa	Taxa de transf.: 0,018 a 37,5 Kbps Dimensões: 51 x 26 x 10 mm Peso: 12,5g	2 unid.	R\$39,60	R\$79,20

		Alimentação: 3,3 ~ 7V Temp. de operação: -40°C ~ 90°C			
3	Gerenciador de Energia Solar 5V (DFR0559)	Tensão de entrada solar: 4,5V ~ 6V Entrada da bateria: Bateria Li-polímero/Li-íon de célula única de 3,7V Corrente de carregamento: máx. 900mA Tensão de corte de carregamento: 4,2V±1% Fonte de alimentação regulada: 5V 1A Temp. de operação: -40°C ~ 85°C Dimensões: 33 x 63 (mm)	1 unid.	R\$26,50	R\$26,50
4	Mini Placa Painel Célula Solar Fotovoltaica	Tensão: 6V Corrente: 160mA Potência: 0,96W Tamanho: 110 x 60 (mm)	1 unid	29,95	29,95
5	Sensor de Temperatura (DS18B20)	Medida do sensor de inox: 6 x 50 (mm) Comp. do cabo: 100m Alimentação: 3,0V ~ 5,5V Faixa de temp.: -55°C ~ 125°C Ligaçāo de saída: vermelho (VCC), amarelo (dados) e preto (GND)	1 unid.	R\$40,92	R\$40,92
6	Sensor de pH (SEN0161)	Corrente de trabalho: 5 ~ 10mA Faixa de concentração detectável: 0 ~ 14 Faixa de temperatura de detecção: 0°C ~ 180°C Temperatura de trabalho: -10°C ~ 50°C Dimensões: 42 x 32 x 20 (mm)	1 unid.	R\$215,50	R\$215,50

7	Sensor de Turbidez (SEN0189)	Tensão de trabalho: 3,3 ~ 5,5VDC Sinal de saída: 0 ~ 2,3V Corrente de trabalho: 3 ~ 6mA Faixa de medição: 0 ~ 1000ppm Comprimento do cabo: 0,6m Dimensões: 42 x 32 (mm) Peso: 23g	1 unid.	R\$64,38	R\$64,38
8	Sensor de Oxigênio Dissolvido (SEN0237)	Corrente de trabalho: 5 ~ 10mA Faixa de detecção: 0 ~ 20 mg L-1 Tempo de resposta: Até 98% de resposta completa, dentro de 90 segundos (25°C) Faixa de pressão: 0 ~ 50 PSI	1 unid.	R\$926,94	R\$926,94
-	TOTAL	-	-	-	R\$1443,04

Fonte: Autoria própria (2024)

Os valores apresentados na lista de componentes correspondem apenas ao custo necessário para replicação do projeto, visto que, no desenvolvimento deste trabalho, os sensores e microcontroladores utilizados foram disponibilizados por ex-alunos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) - Campus Cubatão, Guilherme Cardoso da Silva e Kawan Trindade Lessa Paulo.

3.4 ESCOLHAS DOS PONTOS DE MEDIÇÃO

Os pontos de medição definidos neste projeto foram selecionados para abranger as diferentes condições ambientais e características hidrográficas do rio Cubatão. As localizações selecionadas foram definidas com base em coordenadas previamente analisadas e fornecidas por Thiago Augusto da Mata Souza, bolsista do Centro de Pesquisa em Meio Ambiente – Universidade de São Paulo (CEPEMA-USP), um centro de pesquisa dedicado à solução de problemas ambientais e ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis.

As coordenadas geográficas dos pontos de medição estão detalhadas na Tabela 4, permitindo uma identificação das áreas analisadas.

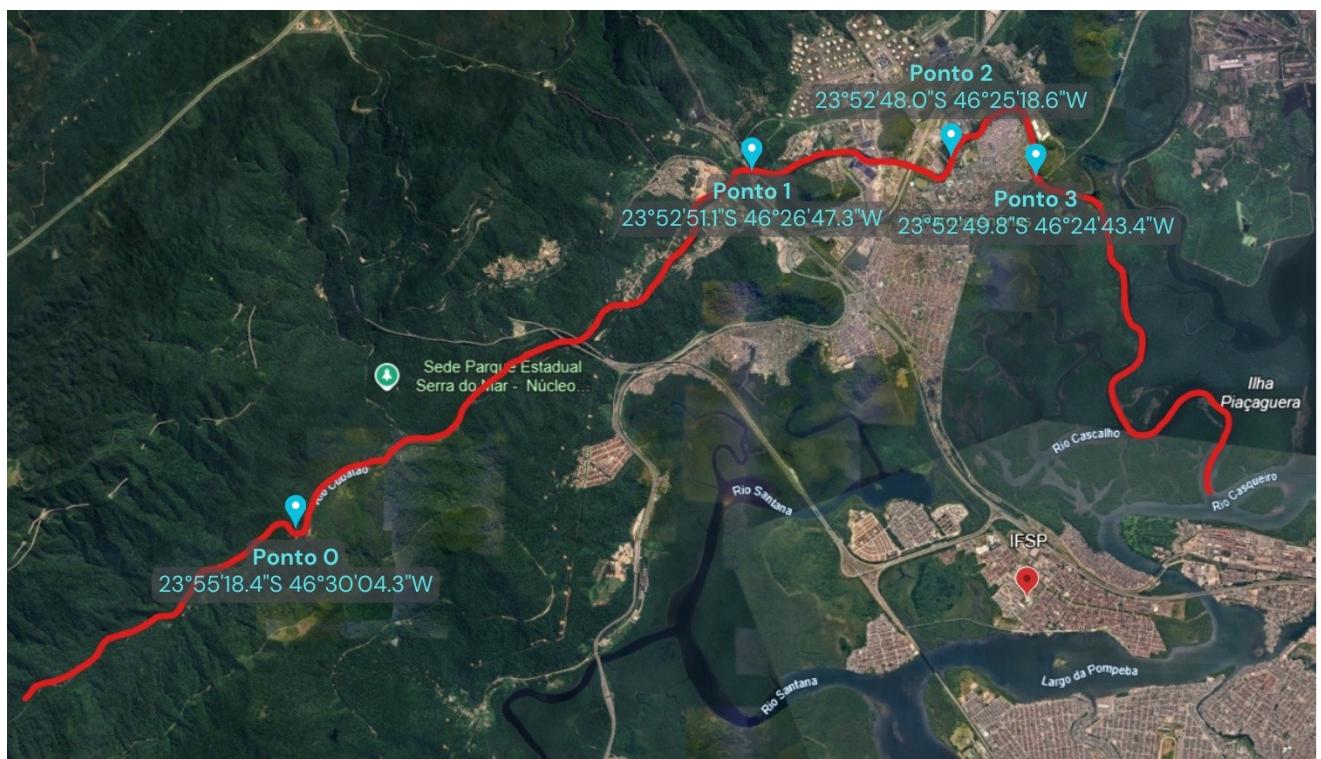
Tabela 4 - Coordenadas dos pontos de análises químicas ao longo do rio Cubatão

Pontos de Medição	Coordenadas da Localização
Ponto 0	23°55'18.4"S 46°30'04.3"W
Ponto 1	23°52'51.1"S 46°26'47.3"W
Ponto 2	23°52'48.0"S 46°25'18.6"W
Ponto 3	23°52'49.8"S 46°24'43.4"W

Fonte: Autoria própria (2024)

Além disso, a escolha dessas localizações considerou critérios como acessibilidade e potencial impacto das atividades humanas, garantindo que o projeto seja testado nas diferentes condições do rio Cubatão, como é demonstrado na Figura 15.

Figura 15 - Mapa dos pontos de medições ao longo do Rio Cubatão



Fonte: Autoria própria (2024)

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são expostos os resultados obtidos com o protótipo de monitoramento da qualidade da água em reservatório de água e no Rio Cubatão, acompanhados da análise e discussão dos dados coletados.

4.1 TESTE DA REDE LoRa

A rede LoRa foi configurada na frequência de 915MHz, para não ultrapassar a banda permitida, conforme a Resolução da ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) nº 769, de 30 de setembro de 2024. Em seguida, foi realizado um teste inicial utilizando um microcontrolador programado como receptor, como ilustra a Figura 16, que confirmou com êxito o envio e recebimento de dados pela rede LoRa.

Figura 16 - Microcontrolador (receptor)



Fonte: Autoria própria (2024)

Na fase seguinte, o microcontrolador foi ajustado para funcionar como *gateway*, como mostrado na Figura 17, encarregado de transmitir as informações para serem armazenadas na nuvem (conjunto de servidores conectados através da internet) por meio de uma conexão Wi-Fi, utilizando o código do *gateway*. Para os testes de comunicação, o *gateway* foi estrategicamente instalado dentro da biblioteca do IFSP Campus Cubatão, e as medições ocorreram em um raio de 100 metros ao seu redor.

Figura 17 - Microcontrolador (*gateway*)



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados demonstraram que o sinal permaneceu estável e com qualidade durante todo o processo de teste, como a Cartilha Orientativa - Internet das Coisas IoT/M2M (ANATEL) já sinalizava com os dados referentes à cobertura da rede LoRa, sendo:

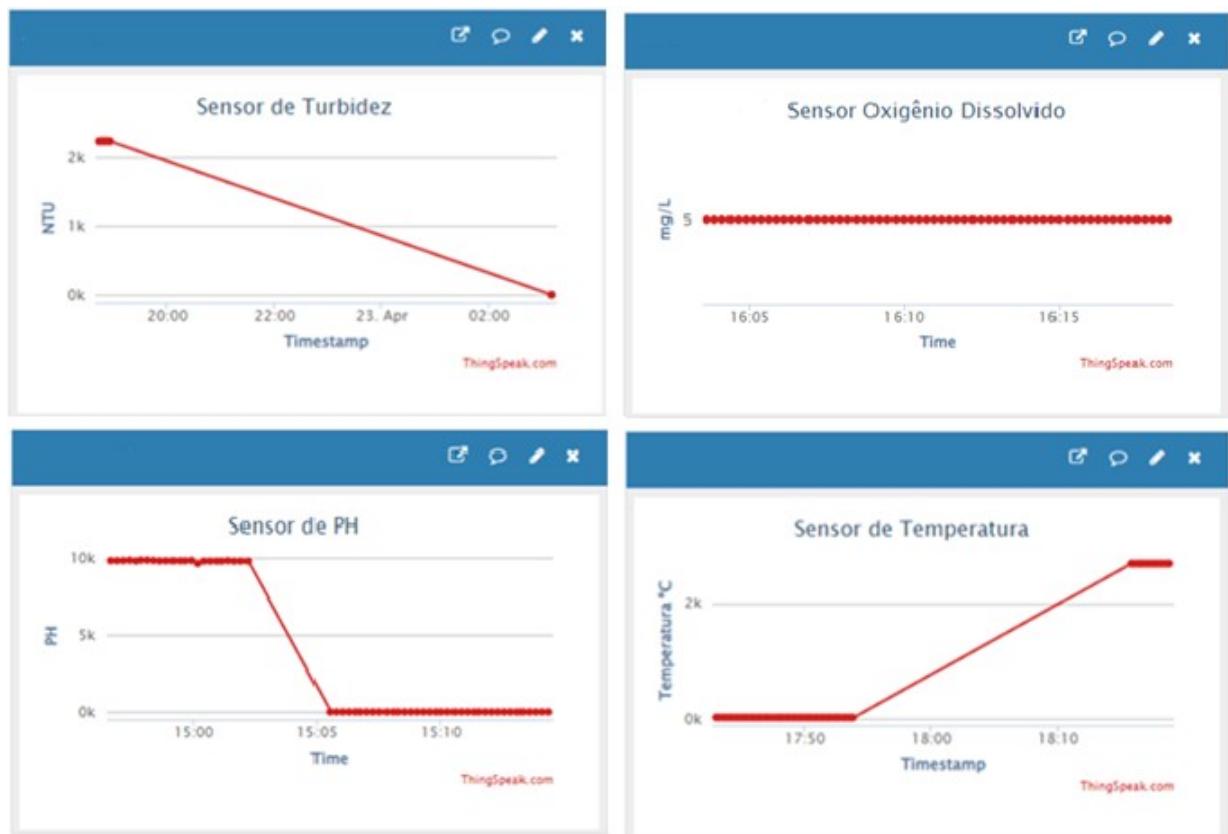
- 2 a 5 km em área urbana
- 15 km em área suburbana
- 45 km área rural

4.2 TESTE INICIAL DA NUVEM

Para o monitoramento das medições, utilizou-se a plataforma ThingSpeak, que oferece uma variedade de ferramentas, como gráficos interativos para a visualização em tempo real dos dados coletados, além de recursos como gatilhos automáticos para a execução de tarefas com base em parâmetros específicos.

Neste projeto foram realizadas medições individuais de cada sensor (Turbidez, pH, Temperatura e Oxigênio Dissolvido) com o objetivo de fazer um teste inicial da interligação do sistema. Os dados foram transmitidos e exibidos na interface do ThingSpeak, como mostrado na Figura 18, que apresenta os gráficos gerados na plataforma.

Figura 18 - Representações gráficas dos testes de interligação do sistema



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados mostraram que o teste inicial de interligação do sistema com a nuvem foi satisfatório, apesar de certas inconsistências observadas em alguns parâmetros. Essas divergências podem ter origem em ajustes inadequados de escala, calibração incorreta dos sensores ou erros na implementação do código.

4.3 TESTE DE INTERLIGAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

Com o objetivo de testar o sistema e avaliar sua eficiência em condições mais próximas da realidade proposta neste estudo, os dados dos sensores foram coletados em tanque de água, como demonstrado na Figura 19.

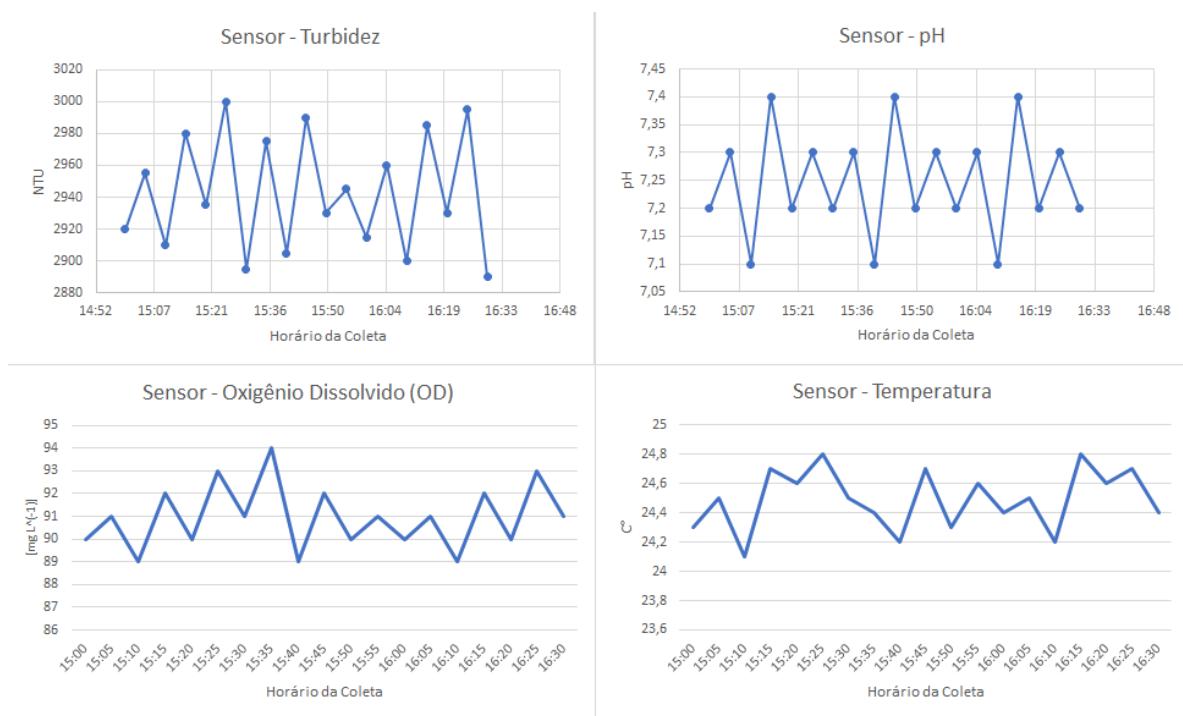
Figura 19 - Teste em reservatório de água



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 20 apresenta os resultados plotados a partir de uma tabela disponível no anexo, exportada diretamente da plataforma ThingSpeak. Os gráficos exibem os resultados dos testes realizados ao longo de 90 minutos durante a tarde, em condições climáticas favoráveis e estáveis. As medições, realizadas a cada 5 minutos como parte de um teste inicial, permitem visualizar os parâmetros monitorados, incluindo turbidez, pH, temperatura e oxigênio dissolvido.

Figura 20 - Teste de interligação do sistema



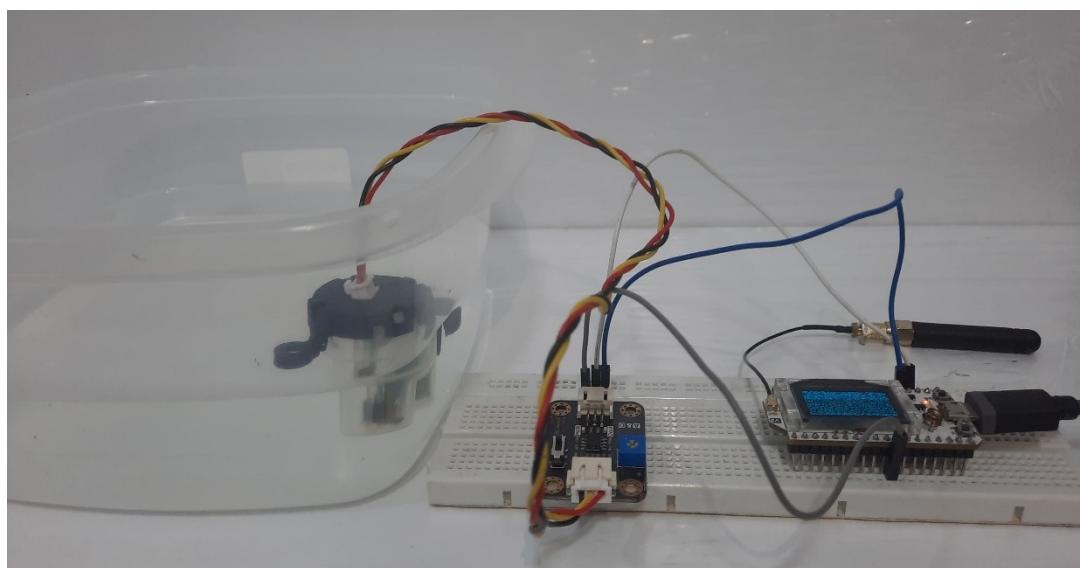
Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados demonstraram que o teste de interligação inicial do sistema de monitoramento foi satisfatório, evidenciando parcialmente a eficiência do sistema proposto. Os erros apresentados anteriormente na plataforma estavam relacionados à utilização incorreta da escala, tanto na configuração da plataforma quanto no código dos sensores. Esses erros foram devidamente corrigidos.

4.4 TESTE DE INFLUÊNCIA DA INCIDÊNCIA DE LUZ NO SENSOR DE TURBIDEZ

Para compreender melhor como a claridade pode impactar os resultados foi realizado um teste simples com o sensor de turbidez, conforme ilustrado na Figura 21. O sensor foi imerso em um recipiente com água limpa e submetido a dois ambientes por 5 minutos: um ambiente com iluminação artificial direta, utilizando uma lanterna posicionada a uma distância de aproximadamente 30 cm do recipiente, e outro ambiente completamente escuro, obtido ao cobrir o recipiente com um material opaco. O objetivo foi observar as diferenças nos valores de NTU entre essas condições.

Figura 21 - Teste de luz no sensor de turbidez



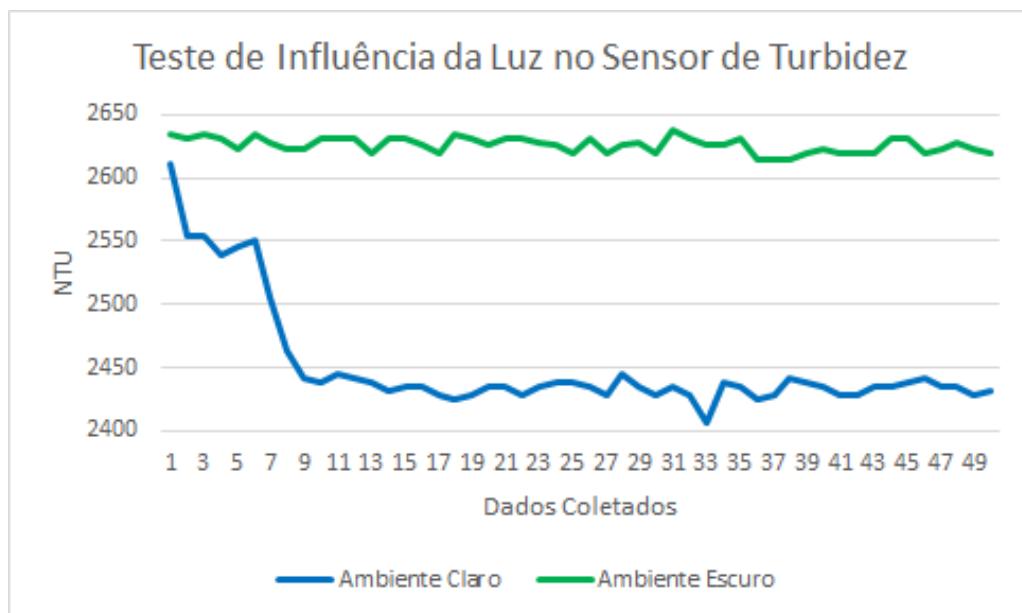
Fonte: Autoria própria (2024)

O gráfico do teste apresentado na Figura 22 revela que, em ambientes claros, ocorre uma variação dos valores até atingir estabilidade, enquanto em ambientes escuros os valores medidos apresentam maior precisão. Embora a diferença entre

ambientes claros e escuros não seja significativamente impactante com base nos dados coletados, a variação percentual de 6,94% entre os valores obtidos reforça a importância desse fator. Portanto, o sensor na embarcação deve ser posicionado em um local com baixa exposição à luz para garantir medições mais confiáveis.

Conforme a relação observada, quanto maior a tensão, menor é o valor de NTU, indicando que valores próximos a 3000 NTU correspondem a menores tensões e uma menor concentração de partículas em suspensão na água.

Figura 22 - Gráfico do teste de luz no sensor de turbidez



Fonte: Autoria própria (2024)

4.5 TESTE DE VARIAÇÃO DA MEDIDA EM FUNÇÃO DO TEMPO

Para entender melhor o tempo máximo em que se pode realizar medições antes que os sensores sejam saturados por conta de fatores externos, como partículas microscópicas suspensas na água que não se dissipam facilmente e a formação de coloides, foi realizada uma medição como mostra a Figura 23, com os sensores interligados à embarcação em um reservatório de água. O teste foi realizado durante a tarde, em um dia nublado (condições climáticas amenas), ao longo de 60 minutos, que foi o tempo previamente estipulado para garantir uma boa captura dos parâmetros.

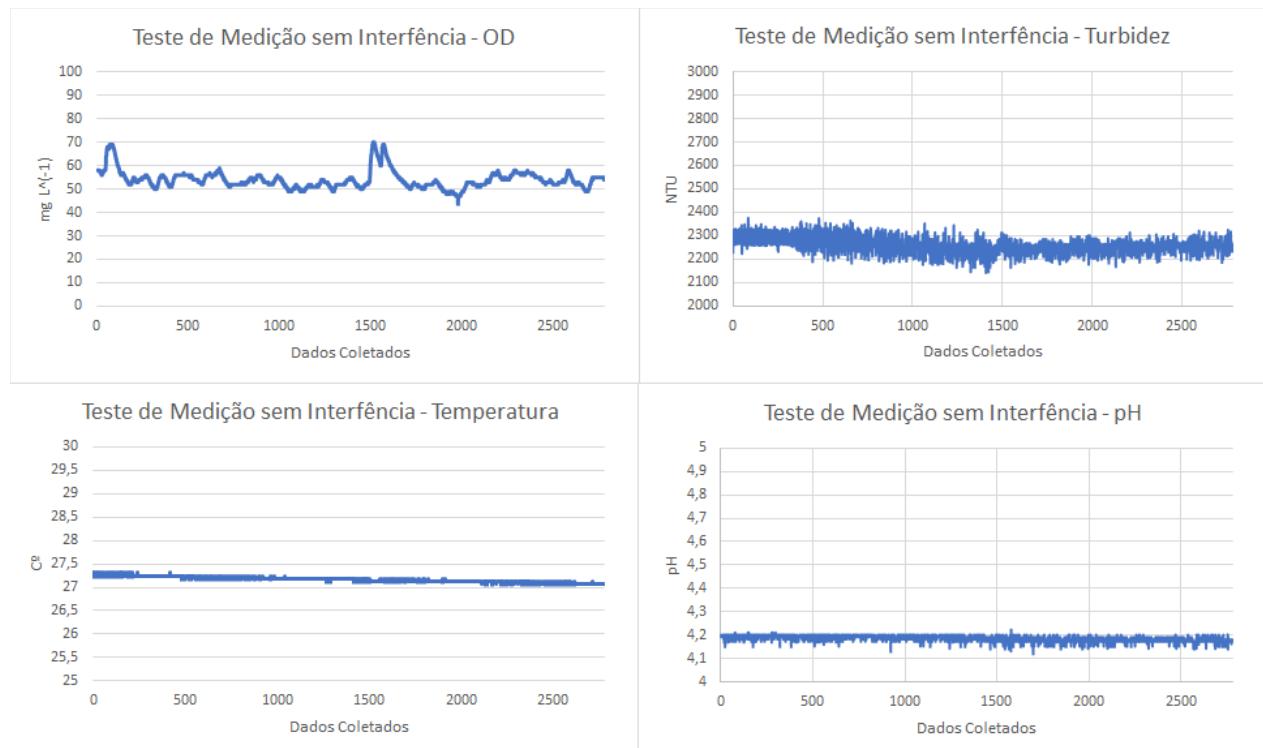
Figura 23 - Teste de medição sem interferência



Fonte: Autoria própria (2024)

Conforme a Figura 24, que apresenta o gráfico do comportamento dos sensores durante o tempo de coleta de dados, observa-se que os sensores seguiram o comportamento esperado dentro do período estipulado, sem apresentar incoerências ou valores significativamente divergentes. Assim, nos proporcionando uma boa margem de tempo para realizar medições dos sensores quando aplicados no Rio Cubatão.

Figura 24 - Gráficos dos testes de medição dos sensores em função do tempo



Fonte: Autoria própria (2024)

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA INTERLIGAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO APLICADO NO RIO CUBATÃO

Com o intuito de testar e avaliar a eficiência do sistema no contexto do rio Cubatão, conforme o objetivo deste projeto, foram realizadas quatro medições ao longo do rio em um único dia. Os testes ocorreram sob condições climáticas estáveis, entre 15h e 19h, com tempo predominantemente nublado.

O tempo das medições variou em função das condições do local escolhido, como a estrutura do ambiente e as questões de segurança. Os pontos de medição foram selecionados em áreas de fácil acesso, como as margens do rio, o que justifica a realização das medições na superfície do rio Cubatão.

No entanto, algumas diferenças foram observadas ao comparar os resultados dos sensores com os parâmetros estabelecidos pelo CONAMA.

Além disso, certos pontos fora do padrão podem ter sido causados por fatores como o ajuste do protótipo na água durante as medições, a remoção do equipamento antes do desligamento do armazenamento de dados ou até mesmo a interferência de pedras no local da coleta.

4.6.1 Análise do Ponto 0 (23°55'18.4"S 46°30'04.3"W)

O primeiro ponto analisado no estudo corresponde a uma área próxima à nascente do rio Cubatão. Trata-se de uma região preservada e de acesso restrito, onde não há interferência humana direta, o que a torna ideal para análises ambientais de qualidade da água em um estado mais natural. A Figura 25 apresenta a paisagem do local, destacando suas características preservadas e o ambiente ao redor.

Figura 25 - Localização da análise da água no ponto 0 (23°55'18.4"S 46°30'04.3"W)



Fonte: Autoria própria (2024)

O *gateway* de comunicação foi posicionado a poucos metros do protótipo, garantindo uma comunicação continua entre os dispositivos e facilitando a transmissão de dados em campo. A Figura 26 exibe o protótipo no local da coleta de dados.

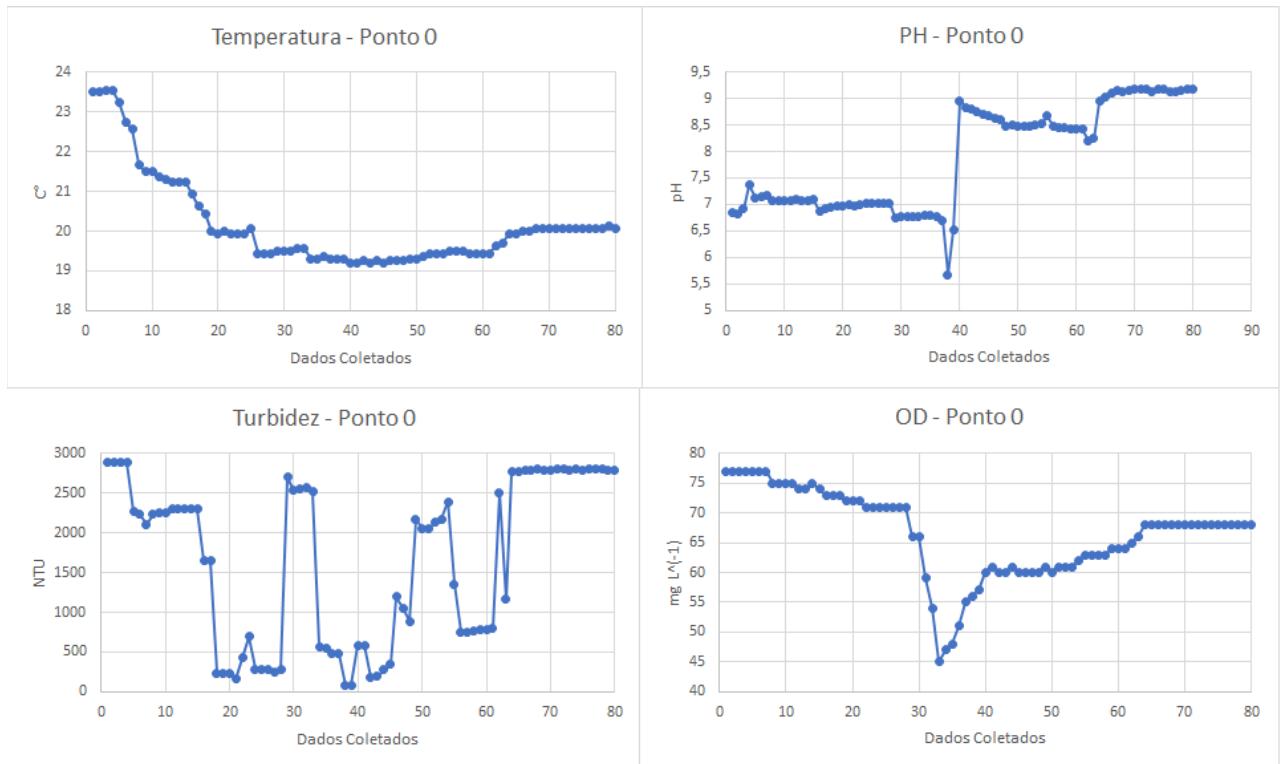
Figura 26 - Análise química in loco no ponto 0 (23°55'18.4"S 46°30'04.3"W)



Fonte: Autoria própria (2024)

Devido à distância dessa área em relação às redes de telecomunicação, as medições realizadas pelos sensores não puderam ser enviadas diretamente para a nuvem. Em vez disso, os dados foram armazenados localmente para posterior transferência, processamento e análise. Os dados coletados, referente a medição dos sensores na superfície do rio Cubatão, foram organizados e processados em uma planilha Excel, onde também foram gerados gráficos para melhor visualização e análise, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Resultado das análises químicas no ponto 0 ($23^{\circ}55'18.4"S$ $46^{\circ}30'04.3"W$)



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados obtidos durante as medições, realizadas na superfície do rio Cubatão no ponto 0 ao longo de aproximadamente 20 minutos, totalizaram 80 leituras dos sensores de Turbidez, pH, Temperatura e Oxigênio Dissolvido. Esses dados indicaram o funcionamento adequado do protótipo e evidenciaram a variação dos parâmetros ao longo do processo de coleta.

4.6.2 Análise do Ponto 1 ($23^{\circ}52'51.1"S$ $46^{\circ}26'47.3"W$)

O segundo ponto analisado corresponde a uma área situada próxima a uma estação de tratamento de água e, ao longo do curso do rio até esse ponto, passando por algumas áreas residenciais. A Figura 28 ilustra a paisagem local do ponto de medição.

Figura 28 - Localização da análise da água no ponto 1 (23°52'51.1"S 46°26'47.3"W)



Fonte: Autoria própria (2024)

O *gateway* de comunicação foi posicionado a poucos metros do protótipo, aproveitando a proximidade com uma área urbana, onde há sinal de telecomunicação. Isso permitiu o monitoramento remoto dos parâmetros coletados por meio da internet. A Figura 29 mostra o protótipo posicionado no rio para a coleta dos dados.

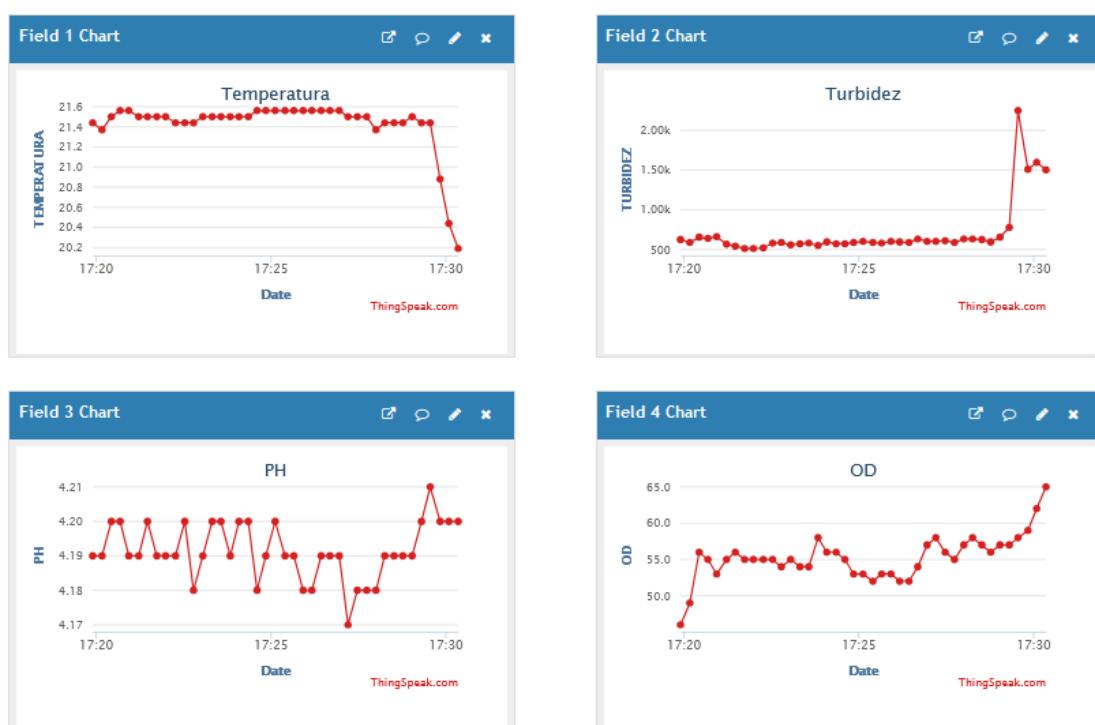
Figura 29 - Análise química in loco no ponto 1 ($23^{\circ}52'51.1"S$ $46^{\circ}26'47.3"W$)



Fonte: Autoria própria (2024)

Devido às condições favoráveis da rede de comunicação, foi possível utilizar a plataforma ThingSpeak, que havia sido previamente configurada para armazenamento na nuvem e monitoramento remoto. Os dados coletados referem-se às medições realizadas pelos sensores na superfície do rio Cubatão, os quais são apresentados através de um gráfico gerado pela plataforma, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Resultado das análises químicas no ponto 1 ($23^{\circ}52'51.1"S$ $46^{\circ}26'47.3"W$)



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados obtidos durante as medições realizadas na superfície do rio Cubatão, no ponto 1, ao longo de aproximadamente 10 minutos, totalizaram 41 leituras dos sensores de Turbidez, pH, Temperatura e Oxigênio Dissolvido, que foram armazenadas na nuvem. Esses dados confirmaram o funcionamento adequado do protótipo e evidenciaram a variação dos parâmetros ao longo do processo de coleta.

Observou-se uma estabilidade dos parâmetros e uma diminuição nos valores medidos, o que pode estar relacionado ao local, que se encontrava próximo à margem do rio, uma área mais tranquila e com fluxo reduzido.

4.6.3 Análise do Ponto 2 (23°52'48.0"S 46°25'18.6"W)

O terceiro ponto analisado neste trabalho corresponde a uma área situada na região central da cidade de Cubatão, onde há uma maior concentração urbana. Ao longo do curso do rio Cubatão até esse ponto, a área apresenta características distintas, como ilustrado na Figura 31, que mostra a paisagem local do ponto de medição.

Figura 31 - Localização da análise da água no ponto 2 (23°52'48.0"S 46°25'18.6"W)



Fonte: Autoria própria (2024)

O *gateway* de comunicação foi posicionado próximo ao protótipo, aproveitando a proximidade com a área urbana, onde há boa cobertura de sinal de

telecomunicações. Isso possibilitou o monitoramento remoto dos parâmetros coletados via internet. A Figura 32 exibe o protótipo instalado no rio para a coleta dos dados.

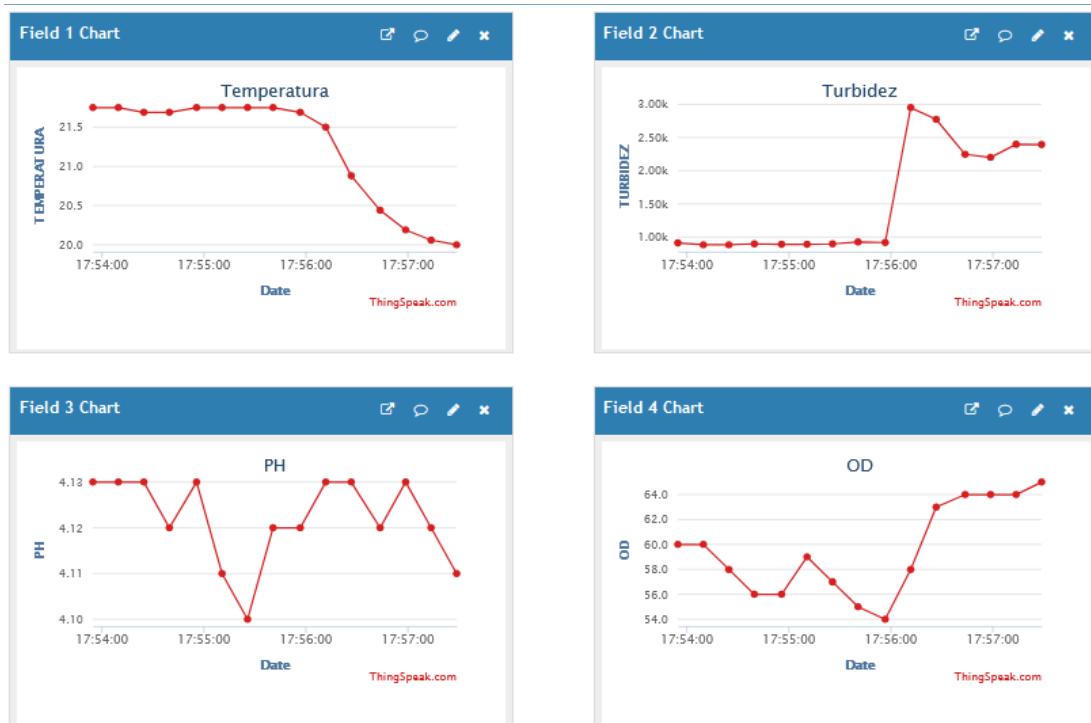
Figura 32 - Análise química in loco no ponto 2 (23°52'48.0"S 46°25'18.6"W)



Fonte: Autoria própria (2024)

Devido à localização, com uma melhor cobertura de sinal de telecomunicação, foi possível utilizar a plataforma ThingSpeak, que havia sido previamente configurada para armazenamento na nuvem e monitoramento remoto. Os dados coletados referem-se às medições realizadas pelos sensores na superfície do rio Cubatão, os quais foram apresentados por meio de gráficos gerados pela plataforma, conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Resultado das análises químicas no ponto 2 ($23^{\circ}52'48.0"S$ $46^{\circ}25'18.6"W$)



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados obtidos durante as medições na superfície do rio Cubatão, no ponto 2, ao longo de aproximadamente 5 minutos, totalizaram 16 leituras dos sensores de Turbidez, pH, Temperatura e Oxigênio Dissolvido, que foram armazenadas na nuvem. Essa quantidade de medições e o tempo limitado no local de medição se justificam pelo fato de a área ser um pouco hostil para esse tipo de teste.

Embora o tempo de medição tenha sido curto, os dados confirmaram o funcionamento adequado do protótipo e evidenciaram a variação dos parâmetros ao longo do processo de coleta. No entanto, devido à quantidade limitada de dados, não é possível fazer comparações diretas com os pontos anteriores e com os parâmetros do CONAMA. Apesar disso, pode-se observar uma maior estabilidade dos parâmetros e uma alteração nos valores, possivelmente relacionada ao fato de o local estar próximo à margem do rio, uma área mais tranquila com fluxo reduzido, mas visivelmente mais poluída.

4.6.4 Análise do Ponto 3 (23°52'49.8"S 46°24'43.4"W)

O último ponto analisado está localizado próximo ao fim do curso do rio Cubatão no município de mesmo nome, caracterizada por uma grande concentração urbana e algumas indústrias ao longo do rio. A Figura 34 ilustra a paisagem local do ponto de medição.

Figura 34 - Localização da análise da água no ponto 3 (23°52'49.8"S 46°24'43.4"W)



Fonte: Autoria própria (2024)

O *gateway* de comunicação foi posicionado perto do protótipo, aproveitando a proximidade com a área urbana, onde há boa cobertura de sinal de telecomunicações, possibilitando o monitoramento remoto dos parâmetros coletados via internet. A Figura 35 mostra o protótipo instalado no rio para a coleta dos dados.

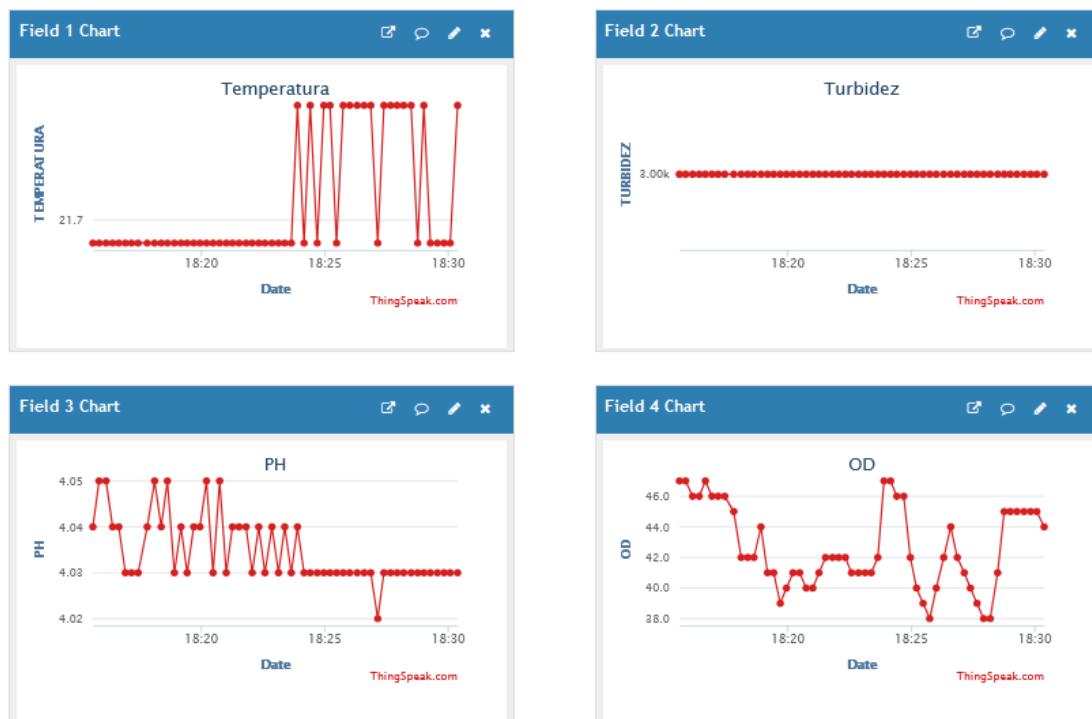
Figura 35 - Análise químicas in loco no ponto 3 (23°52'49.8"S 46°24'43.4"W)



Fonte: Autoria própria (2024)

Devido à localização, que oferece uma melhor cobertura de sinal de telecomunicação, foi possível utilizar a plataforma ThingSpeak, previamente configurada para armazenamento na nuvem e monitoramento remoto. Os dados coletados referem-se às medições realizadas pelos sensores na superfície do rio Cubatão, que foram apresentados por meio de gráficos gerados pela plataforma, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36 - Resultado das análises químicas no ponto 3 (23°52'49.8"S 46°24'43.4"W)



Fonte: Autoria própria (2024)

Os resultados obtidos durante as medições realizadas na superfície do rio Cubatão, no ponto 3, ao longo de aproximadamente 15 minutos, totalizaram 56 leituras dos sensores de Turbidez, pH, Temperatura e Oxigênio Dissolvido, armazenadas na nuvem. Esses dados confirmaram o funcionamento adequado do protótipo e evidenciaram a variação dos parâmetros ao longo do processo de coleta.

Neste caso, observou uma estabilidade variável dos parâmetros e uma diminuição nos valores medidos, o que pode estar relacionado ao local, que se encontrava próximo à margem do rio, uma área mais tranquila com fluxo reduzido, além de aparentar ser mais poluída, devido à coloração da água e à presença de óleo nesta área.

Foi também observada a estabilidade incomum do valor da turbidez, o que pode ser explicado por um problema no sensor, o qual acabou entrando água na sua extremidade de medição, o que dificultou a troca de sinais com o seu módulo.

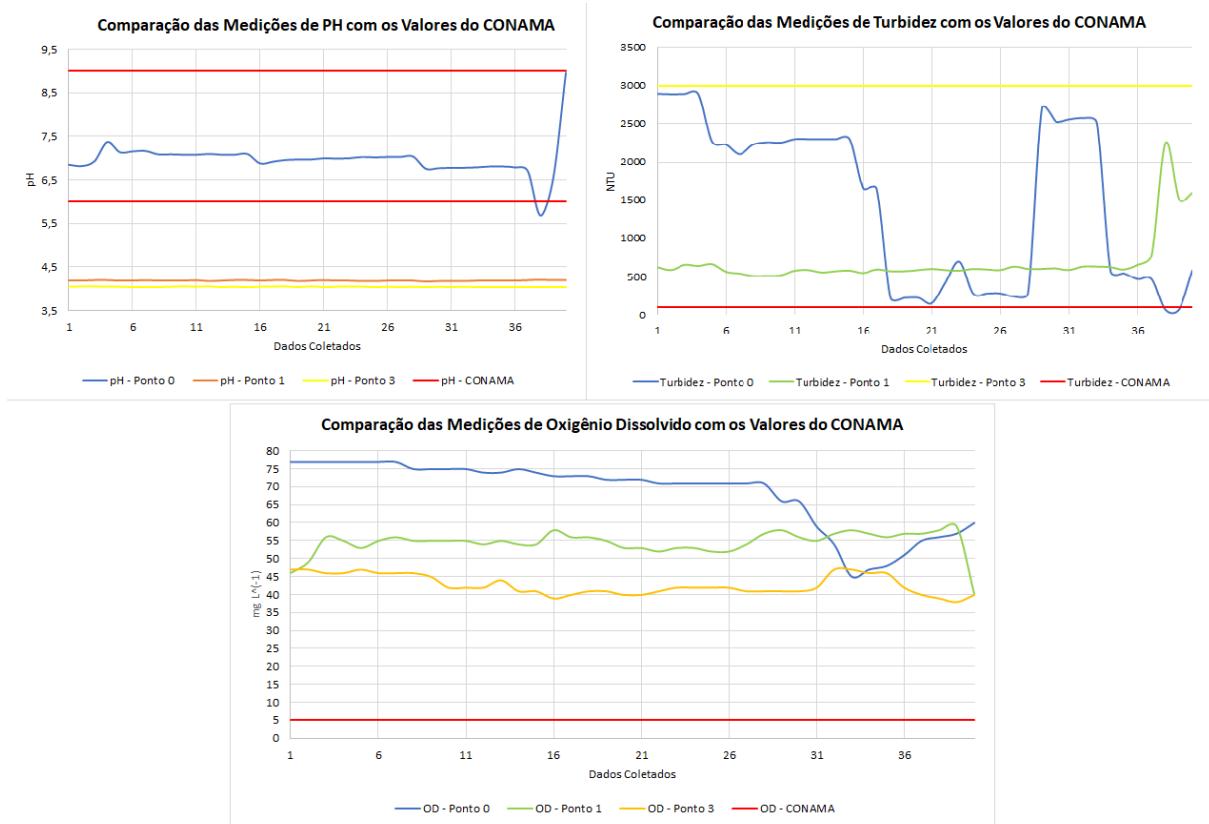
4.6.5 Comparação dos resultados analíticos com os parâmetros do CONAMA

Para estabelecer uma relação mais clara entre a Tabela 2, foi elaborado gráficos ilustrados na Figura 37. Estes gráficos comparam os parâmetros obtidos segundo os padrões do CONAMA com os valores medidos nos pontos de monitoramento.

Devido à variedade dos dados coletados, optou-se por realizar a análise considerando apenas as 40 primeiras medições dos pontos 0, 1 e 3. Para os pontos 1 e 3, os dados foram exportados da plataforma ThingSpeak. O ponto 2 foi desconsiderado devido a falta de medições quando comparado aos outros pontos, conforme explicado em uma seção anterior deste trabalho.

Foram analisados os seguintes parâmetros: turbidez, pH e oxigênio dissolvido, comparando os valores medidos em cada ponto com os limites determinados pelo CONAMA. A temperatura, entretanto, não foi incluída, pois, apesar de ser uma variável relevante, ela atua como um fator auxiliar e não é considerada, por si só, um indicador direto de poluição ou degradação da qualidade da água. Essa é a razão pela qual a Resolução do CONAMA não apresenta um parâmetro específico para temperatura.

Figura 37 - Análise comparativa entre as medições dos parâmetros e os valores estabelecidos pelo CONAMA



Fonte: Autoria própria (2024)

No gráfico de pH, as linhas vermelhas representam os limites estabelecidos pelo CONAMA para este parâmetro de qualidade, que devem estar entre 6,0 e 9,0. Observa-se que apenas o ponto 0, representado pela linha azul, atende a esse padrão. No entanto, os demais pontos, representados pelas linhas amarela e verde, estão fora dos limites aceitáveis.

No gráfico de turbidez, as linhas vermelhas indicam o limite máximo de 100 NTU estabelecido pelo CONAMA. Neste caso, nenhum dos três pontos analisados, – representados pelas cores azul, verde e amarela, – alcança os requisitos exigidos, ultrapassando o limite permitido para turbidez.

Por sua vez, o gráfico referente ao sensor de oxigênio dissolvido apresenta uma linha vermelha que representa o limite mínimo de 5 mg L⁻¹ estabelecido pelo CONAMA. Conforme observado, todos os pontos avaliados, identificados pelas cores amarela, azul e verde, atendem aos padrões requeridos para este parâmetro.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

Para assegurar a qualidade da água em ambientes fluviais, é essencial realizar monitoramentos regulares e adotar medidas que garantam sua preservação, mantendo-a adequada para diferentes usos. Este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento e implementação de um protótipo de monitoramento da qualidade da água no Rio Cubatão, utilizando rede LoRa, para medir os parâmetros temperatura, pH, oxigênio dissolvido e turbidez.

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados obtidos ao longo dos testes, desde a etapa inicial, em que se avaliou a viabilidade e o funcionamento do protótipo, até sua implementação no Rio Cubatão, demonstraram que a rede LoRa proporciona uma comunicação eficiente e confiável em projetos de monitoramento ambiental.

O monitoramento realizado por meio da plataforma ThingSpeak mostrou-se eficaz em locais com cobertura de telecomunicação, permitindo a geração de gráficos intuitivos que facilitam a análise clara dos parâmetros medidos. Além disso, a plataforma apresenta ampla acessibilidade, podendo ser utilizada em qualquer dispositivo com acesso à internet, o que torna seu uso prático e eficiente.

A implementação do protótipo no Rio Cubatão foi bem-sucedida, ainda que as medições tenham sido limitadas às margens e a pontos de fácil acesso. Essa aplicação permitiu demonstrar o potencial do protótipo para a análise da qualidade da água em ambientes fluviais.

No entanto, observou-se que alguns sensores, como os de turbidez e oxigênio dissolvido, exigem calibração mais precisa ou até mesmo a substituição por modelos mais sofisticados, a fim de atender aos padrões exigidos, como os estabelecidos pelo CONAMA.

A integração dos componentes do sistema funcionou conforme o esperado, gerando dados que, se analisados e trabalhados de forma adequada, podem contribuir para a preservação e o manejo sustentável dos recursos hídricos.

Portanto, os objetivos do projeto foram alcançados com sucesso, pois foi desenvolvido um sistema de monitoramento utilizando sensores para medir a qualidade da água do Rio Cubatão, coletando dados de parâmetros essenciais como pH, temperatura, turbidez e oxigênio dissolvido. Esses dados foram enviados para armazenamento e processamento em uma plataforma de nuvem, permitindo sua análise contínua e em tempo real. Além disso, foi criado um painel visual (*dashboard*) que apresenta as informações monitoradas de forma clara e intuitiva por meio de gráficos.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a adoção de sensores mais sofisticados, que proporcionem maior precisão nas medições. Além disso, sugere-se a implementação de uma embarcação autônoma, que permita o monitoramento em pontos mais profundos e de difícil acesso, ampliando a abrangência espacial das análises. Outra possibilidade de melhoria seria a integração de algoritmos de inteligência artificial, que poderiam ser utilizados para a análise preditiva dos dados coletados.

Assim, este trabalho reforça a viabilidade do uso de rede LoRa para o monitoramento ambiental em ambientes fluviais, como o rio Cubatão, destacando seu potencial para aplicações em sistemas de gestão e preservação da qualidade da água. Mesmo com as limitações identificadas, o protótipo desenvolvido demonstra potencial neste aspecto, evidenciando que, com os aprimoramentos sugeridos, poderá contribuir para a proteção dos recursos hídricos em diferentes cenários.

REFERÊNCIAS

ANATEL. **Cartilha Orientativa - Internet das Coisas IoT/M2M.** Disponível em: <https://sistemas.anatel.gov.br/anexar-api/publico/anexos/download/a028ab5cc4e3f97442830bba0c8bd1dd>. Acesso em: 07 de maio de 2024.

ANATEL. **Resolução da ANATEL nº 769, de 30 de setembro de 2024.** [S. I.], 2024. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2024/1979-resolucao-769>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

BAGHEL *et al.* **TEMPSENSE: LoRa Enabled Integrated Sensing and Localization Solution for Water Quality Monitoring.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 71, pp. 1-11, 2022, Art no. 3000311. Disponível em: doi: 10.1109/TIM.2022.3175059. Acesso em: 02 de junho de 2024.

BORBOR. **Sistema IoT Calidad de agua.** Disponível em: <https://thingspeak.com/channels/1979139>. Acesso em: 14 de novembro de 2023.

CAMARGO *et al.* **River Water Quality Monitoring System Using LoRa Devices And PSoC5LP.** ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol 15, n 18, 2020. Scopus. Disponível em: https://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2020/jeas_0920_8322.pdf. Acesso em: 08 de dezembro de 2023.

CAMPAGNARO *et al.* **A Network Infrastructure for Monitoring Coastal Environments and Study Climate Changes in Marine Systems.** OCEANS 2022, Hampton Roads, Hampton Roads, VA, USA, 2022, pp. 1-8. Disponível em: doi: 10.1109/OCEANS47191.2022.9977287. Acesso em: 08 de dezembro de 2023.

CETESB. **Cubatão comemora quatro décadas de Vale com Vida.** 2024. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2024/03/14/cubatao-comemora-quatro-decadas-de-vale-da-vida/> Acesso em: 18 de março de 2024.

CETESB. **Índices de Qualidade das Águas.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/Apendice-C-Indices-de-Qualidade-das-Aguas.pdf>. Acesso em: 07 de julho de 2024.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 357/2005.** [S. I.], 2005. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/component/sisconama/?view=atosnormativos>. Acesso em: 19 de abril de 2024.

Confederação Nacional de Municípios. **Vazamento de petróleo contamina Rio Cubatão e prejudica Municípios paulistas.** Disponível em: <https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/vazamento-de-petroleo-contamina-rio-cubatao-e-prejudica-municipios-paulistas>. Acesso em: 16 de janeiro de 2024.

Datatem. **LoRa e LoRaWAN para Conectividade M2M.** 2023. Disponível em: <https://datatem.com.br/lora-e-lorawan-para-iot/> Acesso em: 01 de maio de 2024.

DÍAZ. Development of a Water Monitoring System Prototype. IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV), Boca del Río, Veracruz, Mexico, 2023, pp. 1-4. Disponível em: doi: 10.1109/ICEV59168.2023.10329655. Acesso em: 01 de maio de 2024.

EasyEDA. Disponível em: <https://easyeda.com/pt>. Acesso em: 02 de março de 2024.

GHALKHANI et al. A LoRaWAN Network for the Real-Time Monitoring of the Venice Lagoon: Preliminary Tests. IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), La Valletta, Malta, 2023, pp. 421-426. Disponível em: doi: 10.1109/MetroSea58055.2023.10317530. Acesso em: 03 de março de 2024.

HABAEBI et al. LoRaWAN Monitoring System for Emergency Vital Signs in Pusu River. International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM), 16(15), pp. 93–111, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3991/ijim.v16i15.30117>. Acesso em: 03 de março de 2024.

IMANSYAH et al. Real-Time Information System of Raw Water Salt Levels PDAM Tirta Khatulistiwa Pontianak Based on LoRa Gateway Technology. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, v. 100, n. 18, 2022. Acesso em: 03 de março de 2024.

KABI e MAINA. Leveraging IoT and Machine Learning for Improved Monitoring of Water Resources - A Case Study of the Upper Ewaso Nyiro River. IST-Africa Conference (IST-Africa), South Africa, 2021, pp. 1-8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9576970>. Acesso em: 04 de março de 2024.

KABI et al. Low Cost, LoRa Based River Water Level Data Acquisition System. HardwareX, v. 14, p. e00414, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.johx.2023.e00414>. Acesso em: 04 de março de 2024.

KHAN et al. IoT-based System for Real-time Water Pollution Monitoring of Rivers. International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (ICECIT), Khulna, Bangladesh, 2021, pp. 1-5. Disponível em: doi: 10.1109/ICECIT54077.2021.9641483. Acesso em: 04 de março de 2024.

KOSNIN et al. Sungai Pusu River Emergency Vital Signs Monitoring Using LoRaWAN. 2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, pp. 49-52. Disponível em: doi: 10.1109/ICCCE50029.2021.9467252. Acesso em: 04 de março de 2024.

KULWANT et al. Desafios e oportunidades para monitoramento e gestão da qualidade da água na Índia. Gestão integrada de recursos hídricos na Índia: uma

abordagem computacional: otimização para sustentabilidade e planejamento, p. 121-137, 2024. Acesso em: 11 de julho de 2024.

LEITE, Maria Yasmim Fernandes. **Plataforma de monitoramento da qualidade d'água utilizando sistemas embarcados**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8317>. Acesso em: 20 de novembro de 2023.

LILOJA et al. **IoT-Based Water Quality Monitoring System Using LoRaWAN**. In: Smys, S., Palanisamy, R., Rocha, Á., Beligiannis, G.N. (eds) Computer Networks and Inventive Communication Technologies. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 58. Springer, Singapore. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9647-6_92. Acesso em: 14 de setembro de 2023.

LOGPYX. **LoRa: solução para conectividade das coisas**. Disponível em: <https://logpyx.com/lora-solucao-para-conectividade-das-coisas/>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

LORA ALLIANCE. LoRa Alliance Achieves 2021 Goals; **LoRaWAN® Secures Its Position as the Dominant Technology for Low Power Wide Area Networks**. Disponível em: <https://lora-alliance.org/lora-alliance-press-release/lora-alliance-achieves-2021-goals-lorawan-secures-its-position-as-the-dominant-technology-for-low-power-wide-area-networks/>. Acesso em: 15 de novembro de 2023.

MACIEL, Nelson Rafael Portela. **Sistema autónomo de monitorização da qualidade de águas fluviais baseado em tecnologia Sigfox**, 2020. Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. ASBRAN. Cerca de 2 milhões de pessoas morrem no ano por causa de água. Portal da ASBRAN - Associação Brasileira de Nutrição. 2011. Disponível em: Acesso em: 14 de setembro de 2023.

MatLab. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 08 de novembro de 2023.

Moher. **Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA**. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5123/S1679-49742015000200017>. Acesso em: 07 de novembro de 2023.

NAOUM. **Desafios de um Biomédico**. 2021. Disponível em: <https://www.ciencianews.com.br/index.php/livro-desafios-de-um-biomedico/>. Acesso em: 07 de novembro de 2023.

NEVES NETO, Mário Fernando Moura das. **Desenvolvimento De Protótipo De Sistema De Baixo Custo Para Monitoramento Da Qualidade Da Água De Bacias Amazônicas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrônica). Universidade do Estado do Amazonas - Escola Superior de Tecnologia. Manaus, 2022. Acesso em: 11 de novembro de 2023.

NURWARSITO et al. River Water Pollutant Level Monitoring System Using WebSocket Protocol and LoRa Communication Module. 2021 2nd International Conference on ICT for Rural Development (IC-ICTRuDev), Jogjakarta, Indonesia, 2021, pp. 1-6. Disponível em: doi: 10.1109/IC-ICTRuDev50538.2021.9656506. Acesso em: 06 de abril de 2024.

PERDANA et al. Performance Evaluation of River Water Quality Monitoring Using Lora Connectivity with Fuzzy Algorithm. INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS COMMUNICATIONS & CONTROL. Disponível em: <https://doi.org/10.15837/ijccc.2021.4.4226>. Acesso em: 16 de julho de 2024.

Prefeitura Municipal de Cubatão. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico de Cubatão.** Disponível em: https://www.cubatao.sp.gov.br/wp-content/uploads/2022/01/PLANO_MUNICPAL_SA NEAMENTO_BASICO_DE-CUBATAO.pdf. Acesso em: 03 de fevereiro de 2024.

RAO et al. ESP32 Based Implementation of Water Quality and Quantity Regulating System. 2021 Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Intelligent Computing Communication & Security (ICIIC 2021), p. 122-129. Disponível em: doi: 10.2991/ahis.k.210913.016. Acesso em: 03 de outubro de 2023.

RIOT Documentation. Disponível em: https://doc.riot-os.org/group_boards_esp32_heltec-lora32-v2.html. Acesso em: 13 de novembro de 2024.

SACRAMENTO, Daniel Lídio Pereira do. **Uma proposta de análise do ciclo de vida de credenciais em redes LoRaWAN privadas para IIoT.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: [<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/160025/TCC%202015-1%20Daniel%20L%C3%A3dio%20Pereira%20do%20Sacramento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>]. Acesso em: 23 de novembro de 2023.

SENDRA et al. LoRa-based Network for Water Quality Monitoring in Coastal Areas. Mobile Netw Appl 28, 65–81 (2023). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11036-022-01994-8>. Acesso em: 06 de agosto de 2024.

SILVA et al. A Importância Da Bacia Hidrográfica Do Rio Cubatão: Uma Visão Bibliográfica Dos Principais Poluentes Do Rio Cubatão - SP. Revista Ceciliiana, Jun 4(1): 48-51, 2012. Disponível em: https://sites.unisanta.br/revistaceciliiana/edicao_07/1-2012-48-51.pdf. Acesso em: 23 de novembro de 2023.

Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo - SigRH. **Plano de Bacia UGRHI 7.** Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/6781/plano-de-bacia-sintese_1.htm>. Acesso em: 12 setembro de 2024.

SYED TAHA et al. **Evaluation of LoRa Network Performance for Water Quality Monitoring Systems.** Applied Sciences, 14(16), 7136. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app14167136>. Acesso em: 15 de agosto de 2024.

Uniandrade. **ONU: Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** 2023. Disponível em: <https://uniandrade.br/blog/onu-os-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/>. Acesso em: 03 de novembro de 2024.

ANEXO 1 - CÓDIGO GATEWAY

```
// Importa a biblioteca Wi-Fi
#include <WiFi.h>

// Bibliotecas para LoRa
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

// Bibliotecas para Display OLED
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

// Define os pinos usados pelo LoRa
#define SCK 5
#define MISO 19
#define MOSI 27
#define SS 18
#define RST 14
#define DIO0 26

#define BAND 915E6 // Banda de frequência utilizada para LoRa

// Pinos do OLED
#define OLED_SDA 4
#define OLED_SCL 15
#define OLED_RST 16
#define SCREEN_WIDTH 128 // Largura do display OLED, em pixels
#define SCREEN_HEIGHT 64 // Altura do display OLED, em pixels

// Substitua com suas credenciais de rede
String apiKey = "MQNN7IQTQN190QOY"; // Insira sua chave API de escrita do
ThingSpeak
const char *ssid = "TCCARTSARAH"; // Substitua pelo SSID e senha do seu Wi-Fi
const char *password = "tccarthursarah";
const char* server = "api.thingspeak.com";

WiFiClient client;

// Inicializa variáveis para obter e salvar dados do LoRa
int rssi;
String loraMessage;
String temperature;
String ntu;
String phValue;
```

```
String OD;
String readingID;

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RST);

// Substitui o placeholder pelos valores do sensor
String processor(const String& var) {
    // Serial.println(var);
    if(var == "TEMPERATURE") {
        return temperature;
    }
    else if (var == "NTU") {
        return ntu;
    }
    else if (var == "PH") {
        return String(phValue);
    }
    else if (var == "OD") {
        return String(OD);
    }
    else if (var == "RRSI") {
        return String(rssi);
    }
    return String();
}

// Inicializa o display OLED
void startOLED() {
    // Reinicia o display OLED via software
    pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
    digitalWrite(OLED_RST, LOW);
    delay(20);
    digitalWrite(OLED_RST, HIGH);

    // Inicializa o OLED
    Wire.begin(OLED_SDA, OLED_SCL);
    if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3c, false, false)) { // Endereço
0x3C para 128x32
        Serial.println(F("Falha na alocação do SSD1306"));
        for(;); // Não prossiga, loop infinito
    }
    display.clearDisplay();
    display.setTextColor(WHITE);
    display.setTextSize(1);
    display.setCursor(0,0);
    display.print("ENVIO LORA");
```

```

}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  startOLED();

  int counter = 0; // Inicializa o contador
  SPI.begin(SCK, MISO, MOSI, SS);

  // Configura o módulo transceptor LoRa
  LoRa.setPins(SS, RST, DIO0); // Configura o módulo LoRa

  while (!LoRa.begin(BAND) && counter < 10) {
    Serial.print(".");
    counter++;
    delay(2000);
  }
  if (counter == 10) {
    // Incrementa o readingID em cada nova leitura
    Serial.println("Falha na inicialização do LoRa!");
  }
  Serial.println("Inicialização LoRa OK!");
  delay(2000);

  // Conecta à rede Wi-Fi com SSID e senha
  Serial.print("Conectando a ");
  Serial.println(ssid);
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(2000);
    Serial.print(".");
  }
  // Imprime o endereço IP local e inicia o servidor web
  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi conectado.");
  Serial.println("Endereço IP: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}

// Lê o pacote LoRa e obtém as leituras dos sensores
void loop() {
  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {
    Serial.print("Pacote LoRa recebido: ");
    while (LoRa.available()) { // Lê o pacote
      String LoRaData = LoRa.readString();
      Serial.print("Temperatura:");

```

```
Serial.print(temperature);
Serial.print("Turbidez:");
Serial.print(ntu);
Serial.print("PH:");
Serial.print(phValue);
Serial.print("OD:");
Serial.print(OD);
Serial.print("RSSI:");
Serial.println(rssi);

// Extrai os dados do pacote LoRa
int pos1 = LoRaData.indexOf('/');
int pos2 = LoRaData.indexOf('&');
int pos3 = LoRaData.indexOf('$');
int pos4 = LoRaData.indexOf('%');
readingID = LoRaData.substring(0, pos1);
temperature = LoRaData.substring(pos1+1, pos2);
ntu = LoRaData.substring(pos2+1, pos3);
phValue = LoRaData.substring(pos3+1, pos4);
OD = LoRaData.substring(pos4+1, LoRaData.length());
}

rss = LoRa.packetRssi(); // Obtém o RSSI
Serial.print(" com RSSI ");
Serial.println(rss);

// Atualiza o display OLED com os dados recebidos
display.clearDisplay();
display.setCursor(0, 0);
display.setTextSize(1);
display.print("Pacote Enviado!");

display.setCursor(0, 20);
display.print("Temperatura:");
display.setCursor(72, 20);
display.print(temperature);
display.display();

display.setCursor(0, 30);
display.print("Turbidez:");
display.setCursor(62, 30);
display.print(ntu);
display.display();

display.setCursor(0, 40);
display.print("PH:");
display.setCursor(42, 40);
```

```
display.print(phValue);
display.display();

display.setCursor(0, 50);
display.print("OD:");
display.setCursor(42, 50);
display.print(OD);
display.display();

display.setCursor(0,60);
display.print("RSSI:");
display.setCursor(52,60);
display.print(rssi);
display.display();

}

// Envia os dados para o ThingSpeak
if (client.connect(server, 80)) {
    String postStr = apiKey;
    postStr += "&field1=";
    postStr += String(temperature);
    postStr += "&field2=";
    postStr += String(ntu);
    postStr += "&field3=";
    postStr += String(phValue);
    postStr += "&field4=";
    postStr += String(OD);
    postStr += "\r\n\r\n\r\n\r\n\r\n\r\n\r\n";

    client.print("POST /update HTTP/1.1\n");
    client.print("Host: api.thingspeak.com\n");
    client.print("Connection: close\n");
    client.print("X-THINGSPEAKAPIKEY: " + apiKey + "\n");
    client.print("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\n");
    client.print("Content-Length: ");
    client.print(postStr.length());
    client.print("\n\n");
    client.print(postStr);
}
//delay(30000); // Adicione um atraso se necessário
}
```

ANEXO 2 - CÓDIGO EMBARCADO NO DISPOSITIVO COLETOR DE DADOS DOS SENsoRES

```
// Bibliotecas para LoRa
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

// Bibliotecas para OLED
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

// Bibliotecas para o Sensor
#include <OneWire.h>
#include <EEPROM.h>

// Definir os pinos usados pelo LoRa
#define SCK 5
#define MISO 19
#define MOSI 27
#define SS 18
#define RST 14
#define DIO0 26

// Definir a frequência de operação
#define BAND 866E6

// Pinos do OLED
#define OLED_SDA 21
#define OLED_SCL 22
#define OLED_RST 23
#define SCREEN_WIDTH 128 // Largura do display OLED
#define SCREEN_HEIGHT 64 // Altura do display OLED

// Definição do sensor de temperatura
int DS18S20_Pin = 2;
OneWire ds(DS18S20_Pin);

// Definição para sensor de turbidez
float ntu;
float voltaget;

// Definição para sensor de pH
#define PH_PIN A4
float voltage;
float phValue;
```

```

float acidVoltage = 1900;
float neutralVoltage = 1450;
float slope, intercept;

// Definição para sensor de OD (Oxigênio Dissolvido)
#define DO_PIN A7
#define VREF 5000 // Tensão de referência (mv)
#define ADC_RES 4096 // Resolução do ADC
#define TWO_POINT_CALIBRATION 0
#define READ_TEMP (25) // Temperatura atual da água °C ou função de sensor de temperatura
#define CAL1_V (1200) // Tensão de calibração 1 (mv)
#define CAL1_T (25) // Temperatura de calibração 1 (°C)
#define CAL2_V (1300) // Tensão de calibração 2 (mv)
#define CAL2_T (15) // Temperatura de calibração 2 (°C)

// Tabela de DO (Oxigênio Dissolvido)
const uint16_t DO_Table[41] = {
    14460, 14220, 13820, 13440, 13090, 12740, 12420, 12110, 11810, 11530,
    11260, 11010, 10770, 10530, 10300, 10080, 9860, 9660, 9460, 9270,
    9080, 8900, 8730, 8570, 8410, 8250, 8110, 7960, 7820, 7690,
    7560, 7430, 7300, 7180, 7070, 6950, 6840, 6730, 6630, 6530, 6410};

uint8_t Temperature;
uint16_t ADC_Raw;
uint16_t ADC_Voltage;
uint16_t DO;
float OD;

// Função para leitura de OD
int16_t readDO(uint32_t voltage_mv, uint8_t temperature_c) {
    #if TWO_POINT_CALIBRATION == 0
        uint16_t V_saturation = (uint32_t)CAL1_V + (uint32_t)35 * temperature_c -
        (uint32_t)CAL1_T * 35;
        return (voltage_mv * DO_Table[temperature_c] / V_saturation);
    #else
        uint16_t V_saturation = (int16_t)((int8_t)temperature_c - CAL2_T) *
        ((uint16_t)CAL1_V - CAL2_V) / ((uint8_t)CAL1_T - CAL2_T) + CAL2_V;
        return (voltage_mv * DO_Table[temperature_c] / V_saturation);
    #endif
}

// Contador de pacotes
int readingID = 0;
int counter = 0;
String LoRaMessage = "";

```

```

float temperature = 0;

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RST);

// Inicializar o display OLED
void startOLED() {
    // Resetar o display OLED via software
    pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
    digitalWrite(OLED_RST, LOW);
    delay(20);
    digitalWrite(OLED_RST, HIGH);

    // Inicializar OLED
    Wire.begin(OLED_SDA, OLED_SCL);
    if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3c, false, false)) { // Endereço
0x3C para 128x32
        Serial.println(F("Falha na alocação do SSD1306"));
        for (;;) {
            ; // Não continuar, entrar em loop infinito
        }
    }
    display.clearDisplay();
    display.setTextColor(WHITE);
    display.setTextSize(1);
    display.setCursor(0, 0);
    display.print("LORA TRANSMISSOR");
}

// Inicializar o módulo LoRa
void startLoRA() {
    // Configurar pinos SPI para o LoRa
    SPI.begin(SCK, MISO, MOSI, SS);
    // Configurar o transceptor LoRa
    LoRa.setPins(SS, RST, DIO0);

    while (!LoRa.begin(BAND) && counter < 10) {
        Serial.print(".");
        counter++;
        delay(500);
    }
    if (counter == 10) {
        // Incrementar o ID de leitura a cada nova tentativa
        readingID++;
        Serial.println("Falha ao iniciar LoRa!");
    }
    Serial.println("Inicialização LoRa OK!");
    display.setCursor(0, 10);
}

```

```

display.clearDisplay();
display.print("Inicialização OK!");
display.display();
delay(2000);
}

void loop() {
    /// TEMPERATURA ///
    float temperature = getTemp();
    Serial.println(temperature);

    /// PH ///
    slope = (7.0 - 4.0) / ((neutralVoltage - 1500) / 3.0 - (acidVoltage - 1500) / 3.0);
    intercept = 7.0 - slope * (neutralVoltage - 1500) / 3.0;
    static unsigned long timepoint = millis();
    if (millis() - timepoint > 1000U) { // Intervalo de tempo: 1s
        timepoint = millis();
        voltage = analogRead(PH_PIN) / 4095.0 * 3300; // Ler a tensão
        phValue = slope * (voltage - 1500) / 3.0 + intercept; // Converter a tensão para
        pH com compensação de temperatura
        Serial.print("\t pH: ");
        Serial.println(phValue, 2);
    }

    /// OD (Oxigênio Dissolvido) ///
    Temperaturet = (uint8_t)READ_TEMP;
    ADC_Raw = analogRead(DO_PIN);
    ADC_Voltage = uint32_t(VREF) * ADC_Raw / ADC_RES;
    Serial.println("OD:\t" + String(readDO(ADC_Voltage, Temperaturet) / 1000));

    /// TURBIDEZ ///
    int sensorValue = analogRead(A5); // Ler o valor no pino analógico
    voltaget = sensorValue * (3.3 / 1453.7); // Converter para tensão
    if (voltaget < 2.5) {
        ntu = 3000;
    } else if (voltaget > 4.2) {
        ntu = 0;
    } else {
        ntu = (-1120.4 * (voltaget * voltaget)) + (5742.3 * voltaget) - 4352.9;
    }
    delay(100);

    //// LoRa: Display e Envio /////
    LoRaMessage = String(readingID) + "/" + String(temperature) + "&" + String(ntu) +
    "$" + String(phValue) + "%" + String((readDO(ADC_Voltage, Temperaturet)) / 100);
    // Enviar pacote LoRa para o receptor
    LoRa.beginPacket();
}

```

```
LoRa.print(LoRaMessage);
LoRa.endPacket();

// Atualizar o display
display.clearDisplay();
display.setCursor(0, 0);
display.setTextSize(1);
display.print("Pacote Enviado!");

display.setCursor(0, 20);
display.print("Temperatura:");
display.setCursor(72, 20);
display.print(temperature);
display.display();

display.setCursor(0, 30);
display.print("Turbidez:");
display.setCursor(62, 30);
display.print(ntu);
display.display();

display.setCursor(0, 40);
display.print("pH:");
display.setCursor(42, 40);
display.print(phValue);
display.display();

display.setCursor(0, 50);
display.print("OD:");
display.setCursor(42, 50);
display.print(String(readDO(ADC_Voltage, Temperaturet) / 100));
display.display();

Serial.print("Enviando pacote: ");
Serial.println(readingID);
readingID++;
delay(1000);
}

// Função para obter a temperatura do sensor DS18S20
float getTemp() {
    byte data[12];
    byte addr[8];

    if (!ds.search(addr)) {
        // Sem mais sensores na cadeia, reiniciar a busca
        ds.reset_search();
```

```
    return -1000;
}

if (OneWire::crc8(addr, 7) != addr[7]) {
    Serial.println("CRC inválido!");
    return -1000;
}

if (addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
    Serial.print("Dispositivo não reconhecido");
    return -1000;
}

ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0x44, 1); // Iniciar conversão com alimentação parasita

byte present = ds.reset();
ds.select(addr);
ds.write(0xBE); // Ler Scratchpad

for (int i = 0; i < 9; i++) { // Necessário 9 bytes
    data[i] = ds.read();
}

ds.reset_search();

byte MSB = data[1];
byte LSB = data[0];

float tempRead = ((MSB << 8) | LSB); // Usar complemento de dois
float TemperatureSum = tempRead / 16;

return TemperatureSum;
}

void setup() {
    // Inicializar o monitor serial
    Serial.begin(115200);
    startOLED();
    startLoRA();
}
```

ANEXO 3 – RESULTADOS PARCIAIS DE ANÁLISES QUÍMICAS EM TANQUE DE ÁGUA DURANTE 90 MINUTOS

Tabela 5 - Dados coletados em teste

Horário Coleta	Turbidez (NTU)	pH	Temperatura (°C)	Oxigênio Dissolvido [mg L ⁻¹]
15:00	2920	7.2	24.3	90
15:05	2955	7.3	24.5	91
15:10	2910	7.1	24.1	89
15:15	2980	7.4	24.7	92
15:20	2935	7.2	24.6	90
15:25	3000	7.3	24.8	93
15:30	2895	7.2	24.5	91
15:35	2975	7.3	24.4	94
15:40	2905	7.1	24.2	89
15:45	2990	7.4	24.7	92
15:50	2930	7.2	24.3	90
15:55	2945	7.3	24.6	91
16:00	2915	7.2	24.4	90
16:05	2960	7.3	24.5	91
16:10	2900	7.1	24.2	89
16:15	2985	7.4	24.8	92
16:20	2930	7.2	24.6	90
16:25	2995	7.3	24.7	93
16:30	2890	7.2	24.4	91

Fonte: Autoria própria (2024)

ANEXO 4 - TABELA REFERENTE AOS DADOS COLETADOS NO PONTO 1

Tabela 6 - Dados coletados no ponto 1 (23°52'51.1"S 46°26'47.3"W)

COLETAS NO PONTO 1 (23°52'51.1"S 46°26'47.3"W)					
Hora	Dados	Temperatura	Turbidez	pH	OD
17:19:55	1	21.44	624.08	4.19	46
17:20:11	2	21.37	586.86	4.19	49
17:20:27	3	21.50	653.64	4.20	56
17:20:42	4	21.56	638.88	4.20	55
17:20:57	5	21.56	661.01	4.19	53
17:21:14	6	21.50	564.39	4.19	55
17:21:29	7	21.50	541.81	4.20	56
17:21:45	8	21.50	511.55	4.19	55
17:22:00	9	21.50	511.55	4.19	55
17:22:17	10	21.44	519.14	4.19	55
17:22:33	11	21.44	579.38	4.20	55
17:22:48	12	21.44	586.86	4.18	54
17:23:04	13	21.50	556.88	4.19	55
17:23:20	14	21.50	571.89	4.20	54
17:23:35	15	21.50	579.38	4.20	54
17:23:51	16	21.50	549.35	4.19	58
17:24:06	17	21.50	594.33	4.20	56
17:24:22	18	21.50	571.89	4.20	56
17:24:37	19	21.56	571.89	4.18	55
17:24:52	20	21.56	586.86	4.19	53
17:25:08	21	21.56	601.78	4.20	53
17:25:25	22	21.56	586.86	4.19	52
17:25:40	23	21.56	579.38	4.19	53
17:25:56	24	21.56	601.78	4.18	53
17:26:11	25	21.56	594.33	4.18	52
17:26:27	26	21.56	586.86	4.19	52
17:26:42	27	21.56	631.49	4.19	54
17:26:58	28	21.56	601.78	4.19	57
17:27:13	29	21.50	601.78	4.17	58
17:27:29	30	21.50	609.22	4.18	56
17:27:45	31	21.50	586.86	4.18	55
17:28:01	32	21.37	631.49	4.18	57
17:28:16	33	21.44	631.49	4.19	58
17:28:32	34	21.44	624.08	4.19	57
17:28:47	35	21.44	594.33	4.19	56
17:29:03	36	21.50	653.64	4.19	57

17:29:19	37	21.44	777.24	4.20	57
17:29:34	38	21.44	2247.59	4.21	58
17:29:51	39	20.88	1508.13	4.20	59
17:30:06	40	20.44	1595.01	4.20	40
17:30:22	41	20.19	1502.24	4.20	41

Fonte: Autoria própria (2024)

ANEXO 5 - TABELA REFERENTE AOS DADOS COLETADOS NO PONTO 0

Tabela 7 - Dados coletados no ponto 0 (23°55'18.4"S 46°30'04.3"W)

COLETAS NO PONTO 0 (23°55'18.4"S 46°30'04.3"W)				
Dados	Temperatura	Turbidez	pH	OD
1	23,5	2891,37	6,84	77
2	23,5	2884,8	6,81	77
3	23,56	2888,11	6,92	77
4	23,56	2889,74	7,36	77
5	23,25	2268,36	7,13	77
6	22,75	2230,77	7,15	77
7	22,56	2107,87	7,16	77
8	21,69	2230,77	7,08	75
9	21,5	2260,08	7,08	75
10	21,5	2255,93	7,07	75
11	21,37	2300,98	7,07	75
12	21,31	2300,97	7,09	74
13	21,25	2300,98	7,07	74
14	21,25	2300,95	7,07	75
15	21,25	2300,98	7,09	74
16	20,94	1651,5	6,87	73
17	20,62	1651,5	6,91	73
18	20,44	230,9	6,95	73
19	20	230,83	6,96	72
20	19,94	230,91	6,96	72
21	20	158,4	6,99	72
22	19,94	427,39	6,98	71
23	19,94	697,65	6,99	71
24	19,94	286,64	7,02	71
25	20,06	286,47	7,01	71
26	19,44	286,66	7,02	71
27	19,44	246,88	7,02	71
28	19,44	286,64	7,03	71
29	19,5	2704,26	6,75	66
30	19,5	2535,35	6,76	66
31	19,5	2561,32	6,77	59
32	19,56	2577,17	6,77	54
33	19,56	2522,08	6,78	45
34	19,31	571,89	6,8	47
35	19,31	549,35	6,8	48

36	19,37	473,47	6,78	51
37	19,31	473,48	6,7	55
38	19,31	76,74	5,67	56
39	19,31	84,96	6,52	57
40	19,19	586,86	8,96	60
41	19,19	586,54	8,83	61
42	19,25	174,59	8,8	60
43	19,19	188,97	8,76	60
44	19,25	278,57	8,69	61
45	19,19	349,66	8,67	60
46	19,25	1193,28	8,62	60
47	19,25	1054,9	8,61	60
48	19,25	883,53	8,47	60
49	19,31	2179,21	8,5	61
50	19,31	2052,42	8,48	60
51	19,37	2052,42	8,48	61
52	19,44	2143,91	8,47	61
53	19,44	2179,21	8,5	61
54	19,44	2394,41	8,52	62
55	19,5	1357,54	8,67	63
56	19,5	741,24	8,48	63
57	19,5	747,29	8,45	63
58	19,44	761,29	8,44	63
59	19,44	777,38	8,42	64
60	19,44	789,19	8,42	64
61	19,44	801,25	8,42	64
62	19,62	2501,84	8,21	65
63	19,69	1160,79	8,25	66
64	19,94	2766,51	8,95	68
65	19,94	2775,8	9,02	68
66	20	2798,22	9,11	68
67	20	2789,39	9,16	68
68	20,06	2804,72	9,13	68
69	20,06	2782,65	9,16	68
70	20,06	2782,65	9,19	68
71	20,06	2811,11	9,19	68
72	20,06	2800,39	9,19	68
73	20,06	2791,61	9,14	68
74	20,06	2804,72	9,19	68
75	20,06	2798,22	9,18	68
76	20,06	2806,86	9,14	68
77	20,06	2802,56	9,13	68
78	20,06	2813,22	9,15	68
79	20,12	2782,65	9,17	68

80	20,06	2798,22	9,19	68
Fonte: Autoria própria (2024)				

ANEXO 6 - TABELA REFERENTE AOS DADOS COLETADOS NO PONTO 2

Tabela 8 - Dados coletados no ponto 2 (23°52'48.0"S 46°25'18.6"W)

COLETAS NO PONTO 2 (23°52'48.0"S 46°25'18.6"W)					
Hora	Dados	Temperatura	Turbidez	pH	OD
17:53:39	1	-	-	-	-
17:53:55	2	21.75	911.43	4.13	60
17:54:10	3	21.75	883.53	4.13	60
17:54:25	4	21.69	883.53	4.13	58
17:54:40	5	21.69	897.51	4.12	56
17:54:56	6	21.75	890.52	4.13	56
17:55:11	7	21.75	890.52	4.11	59
17:55:26	8	21.75	897.51	4.10	57
17:55:41	9	21.75	925.32	4.12	55
17:55:57	10	21.69	918.38	4.12	54
17:56:12	11	21.50	2951.39	4.13	58
17:56:27	12	20.88	2773.49	4.13	63
17:56:44	13	20.44	2247.59	4.12	64
17:56:59	14	20.19	2200.90	4.13	64
17:57:14	15	20.06	2398.16	4.12	64
17:57:29	16	20.00	2394.41	4.11	65

Fonte: Autoria própria (2024)

ANEXO 7 - TABELA REFERENTE AOS DADOS COLETADOS NO PONTO 3

Tabela 9 - Dados coletados no ponto 3(23°52'49.8"S 46°24'43.4"W)

COLETAS NO PONTO 3 (23°52'49.8"S 46°24'43.4"W)					
Hora	Dados	Temperatura	Turbidez	pH	OD
18:15:38	1	21.69	3000.00	4.04	47
18:15:53	2	21.69	3000.00	4.05	47
18:16:10	3	21.69	3000.00	4.05	46
18:16:26	4	21.69	3000.00	4.04	46
18:16:41	5	21.69	3000.00	4.04	47
18:16:57	6	21.69	3000.00	4.03	46
18:17:12	7	21.69	3000.00	4.03	46
18:17:28	8	21.69	3000.00	4.03	46
18:17:50	9	21.69	3000.00	4.04	45
18:18:08	10	21.69	3000.00	4.05	42
18:18:24	11	21.69	3000.00	4.04	42
18:18:39	12	21.69	3000.00	4.05	42
18:18:56	13	21.69	3000.00	4.03	44
18:19:12	14	21.69	3000.00	4.04	41
18:19:27	15	21.69	3000.00	4.03	41
18:19:43	16	21.69	3000.00	4.04	39
18:19:58	17	21.69	3000.00	4.04	40
18:20:14	18	21.69	3000.00	4.05	41
18:20:30	19	21.69	3000.00	4.03	41
18:20:46	20	21.69	3000.00	4.05	40
18:21:02	21	21.69	3000.00	4.03	40
18:21:17	22	21.69	3000.00	4.04	41
18:21:33	23	21.69	3000.00	4.04	42
18:21:50	24	21.69	3000.00	4.04	42
18:22:05	25	21.69	3000.00	4.03	42
18:22:21	26	21.69	3000.00	4.04	42
18:22:36	27	21.69	3000.00	4.03	41
18:22:53	28	21.69	3000.00	4.04	41
18:23:09	29	21.69	3000.00	4.03	41
18:23:24	30	21.69	3000.00	4.04	41
18:23:40	31	21.69	3000.00	4.03	42
18:23:55	32	21.75	3000.00	4.04	47
18:24:11	33	21.69	3000.00	4.03	47
18:24:26	34	21.75	3000.00	4.03	46
18:24:43	35	21.69	3000.00	4.03	46
18:24:59	36	21.75	3000.00	4.03	42

18:25:14	37	21.75	3000.00	4.03	40
18:25:30	38	21.69	3000.00	4.03	39
18:25:46	39	21.75	3000.00	4.03	38
18:26:02	40	21.75	3000.00	4.03	40
18:26:20	41	21.75	3000.00	4.03	42
18:26:37	42	21.75	3000.00	4.03	44
18:26:53	43	21.75	3000.00	4.03	42
18:27:10	44	21.69	3000.00	4.02	41
18:27:25	45	21.75	3000.00	4.03	40
18:27:41	46	21.75	3000.00	4.03	39
18:27:57	47	21.75	3000.00	4.03	38
18:28:13	48	21.75	3000.00	4.03	38
18:28:31	49	21.75	3000.00	4.03	41
18:28:47	50	21.69	3000.00	4.03	45
18:29:02	51	21.75	3000.00	4.03	45
18:29:18	52	21.69	3000.00	4.03	45
18:29:35	53	21.69	3000.00	4.03	45
18:29:51	54	21.69	3000.00	4.03	45
18:30:06	55	21.69	3000.00	4.03	45
18:30:24	56	21.75	3000.00	4.03	44

Fonte: Autoria própria (2024)

ANEXO 8 - TABELA REFERENTE AOS DADOS COLETADOS NO TESTE DE INFLUÊNCIA DE LUZ NO SENSOR DE TURBIDEZ

Tabela 10 - Dados coletados no teste de influência de luz

Teste de Influência da Luz no Sensor de Turbidez		
Dados	Ambiente Claro	Ambiente Escuro
1	2611,04	2634,79
2	2554,89	2631,86
3	2554,89	2634,79
4	2538,63	2631,86
5	2545,17	2623,01
6	2551,66	2634,79
7	2505,25	2628,92
8	2463,66	2623,01
9	2442,24	2623,01
10	2438,63	2631,86
11	2445,84	2631,86
12	2442,24	2631,86
13	2438,63	2620,03
14	2431,37	2631,86
15	2435,01	2631,86
16	2435,01	2625,97
17	2427,73	2620,03
18	2424,07	2634,79
19	2427,73	2631,86
20	2435,01	2625,97
21	2435,01	2631,86
22	2427,73	2631,86
23	2435,01	2628,92
24	2438,63	2625,97
25	2438,63	2620,03
26	2435,01	2631,86
27	2427,73	2620,03
28	2445,84	2625,97
29	2435,01	2628,92
30	2427,73	2620,03
31	2435,01	2637,71
32	2427,73	2631,86
33	2405,62	2625,97
34	2438,63	2625,97
35	2435,01	2631,86

36	2424,07	2614,05
37	2427,73	2614,05
38	2442,24	2614,05
39	2438,63	2620,03
40	2435,01	2623,01
41	2427,73	2620,03
42	2427,73	2620,03
43	2435,01	2620,03
44	2435,01	2631,86
45	2438,63	2631,86
46	2442,24	2620,03
47	2435,01	2623,01
48	2435,01	2628,92
49	2427,73	2623,01
50	2431,37	2620,03

Fonte: Autoria própria (2024)