



Trabalho de Conclusão de Curso

Sistema autônomo de baixo custo para medição multiparâmetro de água superficial

de João Arthur Gaia da Rocha Almeida

orientado por

Prof. Dr. Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo

Universidade Federal de Alagoas
Instituto de Computação
Maceió, Alagoas
02 de Fevereiro de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
Instituto de Computação

SISTEMA AUTÔNOMO DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO MULTIPARÂMETRO DE ÁGUA SUPERFICIAL

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto de Computação da Universidade
Federal de Alagoas como requisito parcial
para a obtenção do grau de Engenheiro de
Computação.

João Arthur Gaia da Rocha Almeida

Orientador: Prof. Dr. Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo

Banca Avaliadora:

Erick de Andrade Barboza	Prof. Dr., IC-UFAL
Carlos Ruberto Fragoso Júnior	Prof. Dr., CTEC-UFAL

Maceió, Alagoas
02 de Fevereiro de 2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

A447s Almeida, João Arthur Gaia da Rocha.

Sistema autônomo de baixo custo para mediação multiparâmetro de
água superficial / João Arthur Gaia da Rocha Almeida. – 2024.
75 f. : il. color.

Orientador: Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia da
Computação) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Computação.
Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 71-75.

1. Monitoramento da água. 2. Água – Qualidade. 3. Sistemas embarcados
(Computadores). I. Título.

CDU: 004

Dedicatória

À minha família

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha família, a meus pais Maria Letícia e Luiz Artur por terem me criado em um ambiente de amor e carinho, com grande valorização da educação, cultura e ciência. Um engenheiro é antes de tudo um solucionador de problemas e vocês me moldaram com essa mentalidade. Igualmente à minha irmã Ana Letícia, que eu arengo e hei de arengar, que sempre foi uma inspiração, tanto academicamente como pessoalmente. Boa parte do que fiz e faço foi graças a vocês.

Gostaria de agradecer à Ana Malhado e Richard Ladle, por serem meus pais na ciência. A graduação me formou engenheiro, vocês me formaram cientista. Este trabalho é, antes de tudo, um agradecimento à confiança que é depositada em mim.

Gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Ícaro Bezerra, que sempre acreditou no meu trabalho e sempre esteve disponível para me ajudar. Tenho de citar outros professores, Jaime Evaristo, Rodrigo Paes, Fábio Cunha, Thiago Cordeiro, Márcio Ribeiro, Erick de Andrade, Aydano Machado e Rodrigo Peixoto. Cada qual me ensinou, à sua maneira, uma coisa nova.

Gostaria de agradecer aos meus amigos. Primeiramente à Mikaella Roberta, por ser mais que uma amiga, me aturar e me apoiar todos esses anos, você me fez uma pessoa melhor. À equipe drones, Roberto Cavalcante e Tiago Peres, com quem vivi incontáveis aventuras. Aos pareias do IC, Valério Nogueira, Kevin Washington, Hugo Thallys, Sofia Lopes, Álvaro Amorim, José Augusto e Rafael Laranjeira, com quem passei inúmeros perrengues e alegrias nessa graduação. Tenho de citar João Paulo, Jonh e André, as potências fortes do interior, Thiago José, o mutante, e Ulilé, regatiano convertido.

Gostaria de agradecer aos companheiros de Lacos21, em especial Nicolli Albuquerque, Bárbara Pinheiro, Jhonatan Guedes, Carol e Karol. E aos companheiros de EDGE, em especial Thiago Laurentino, Jeferson Fernando, José Renilson, José Gomes, João Victor, Pedro Henrique e Paulo Roberto. E ao Alex Wanderley pela calibração do pH.

Finalmente, agradecer à Universidade Federal de Alagoas, por ter me formado não somente como engenheiro, mas também como cidadão. Tenho de citar o Projeto Ecológico de Longa Duração Costa dos Corais Alagoas, que financiou quase integralmente o projeto e que me acolheu desde o primeiro dia. E o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, por ter proporcionado o teste prático.

02 de Fevereiro de 2024, Maceió - AL

Regra da rã: Dê seus pulos.

Sabedoria Ufalina

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma solução autônoma, baixo custo, para coleta, registro e transmissão de dados multiparâmetros de qualidade de água. Tais características reunidas formam um *datalogger*. Por ser autônomo, não necessita que um operador esteja presente para aquisição e anotação dos dados. O baixo custo facilita sua aplicação em diversos cenários, sem contrapartida onerosa. A transmissão da informação permite a tomada de decisão em tempo real, mesmo que à distância. Por ser multiparamétrico, entrega um perfil mais completo da qualidade da água, pois, quando uma variável sozinha não é capaz de explicar um fenômeno, a conjunção com outras pode fazê-lo. Os resultados mostram a construção de *hardware*, com o custo inferior a R\$ 1.300,00, cerca de 1 salário mínimo, e *software*, bem como a calibração dos sensores de temperatura, sólidos dissolvidos totais, turbidez e pH, além de um teste real em campo bem sucedido de 3 dias.

***Palavras-chave:* IoT; Water Quality Monitoring; Sistemas Embarcados.**

Abstract

This work presents the development of an autonomous, low-cost solution for the collection, recording, and transmission of multiparameter water quality data. These combined features form a datalogger. Being autonomous, it does not require an operator to be present for data acquisition and annotation. The low cost facilitates its application in various scenarios without a burdensome counterpart. The information transmission allows real-time decision-making, even from a distance. As a multiparameter system, it provides a more comprehensive profile of water quality. When a single variable cannot explain a phenomenon, the conjunction with others can. The results demonstrate the construction of hardware, with a cost below R\$ 1,300.00, approximately one minimum wage, and software. The calibration of temperature, total dissolved solids, turbidity, and pH sensors is also presented, along with a successful 3-day real field test.

Keywords: *IoT; Water Quality Monitoring; Embedded Systems.*

Lista de Figuras

2.1	Arquitetura do projeto	20
3.1	Encapsulamentos de Termistor	22
3.2	Divisor de tensão com termistor	23
3.3	Sensor de temperatura MF-58	24
3.4	Curva de calibração do sensor de temperatura	25
3.5	Sensor de TDS keyestudio TDS Meter v1.0	27
3.6	Curva de calibração do sensor de TDS	29
3.7	Sensor de Turbidez TS-300B	30
3.8	Níveis de turbidez	31
3.9	Escala de pH	32
3.10	Sensor de pH 4502c	33
3.11	Curva de calibração do sensor de pH	34
5.1	TTGO T-Beam	38
5.2	Posicionamento dos sensores	42
5.3	Sistema de ancoragem	42
5.4	Esquemático do projeto	43
5.5	Montagem do sistema	44
5.6	Fluxograma da tarefa de coleta dos dados.	46
5.7	Fluxograma da tarefa de persistência dos dados.	47
5.8	Fluxograma da tarefa de transmissão dos dados.	48
5.9	Fluxograma da tarefa de GPS.	49
5.10	Fluxograma da tarefa de recepção dos dados.	50
5.11	Fluxograma da tarefa de do <i>display</i> .	51
5.12	Fluxograma da tarefa de Nuvem	52
5.13	Gráficos no ThingSpeak.	53
6.1	Condições do primeiro teste	55
6.2	Temperatura ao longo do tempo no primeiro teste	56
6.3	TDS ao longo do tempo no primeiro teste	56
6.4	pH ao longo do tempo no primeiro teste	57

6.5	Turbidez ao longo do tempo no primeiro teste	58
6.6	Localização do teste de campo	59
6.7	Peixe-boi marinho (<i>Trichechus manatus</i>)	59
6.8	Posicionamento do datalogger em campo	60
6.9	Vedação entre a tampa e a caixa	60
6.10	Acúmulo de matéria orgânica no <i>datalogger</i>	61
6.11	Acúmulo de água no fundo da caixa estanque	61
6.12	Temperatura ao longo do tempo no teste de campo	62
6.13	TDS ao longo do tempo no teste de campo	63
6.14	pH ao longo do tempo no teste de campo	64
6.15	Comparação entre os sensores de pH, novo à esquerda e usado à direita.	64
6.16	Turbidez ao longo do tempo no teste de campo	65

Lista de Tabelas

3.1	Amostras de temperatura para calibração do sensor	25
3.2	Amostras de TDS para calibração do sensor	28
3.3	Faixas de tensão por solução	31
3.4	Tensão lida para cada pH conhecido	33
4.1	Exemplo de formato dos dados	35
5.1	Conexões do módulo do cartão SD	39
5.2	Conexões do módulo ADC	40
5.3	Conexões de sensores no módulo ADC	40
5.4	Descrição dos campos na nuvem	53
6.1	Custos do projeto	54

Lista de Abreviaturas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
CONAMA	<i>Conselho Nacional do Meio Ambiente</i>
CSV	<i>Comma-separated values</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
I²C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Ingress Protection Code</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LPWAN	<i>Low-Power Wide Area Networks</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Units</i>
ORP	<i>Redox Potential</i>
pH	<i>Potencial de Hidrogênio</i>
ppm	<i>partes por milhão</i>
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
RTC	<i>Real-time clock</i>
RTOS	<i>Real-time operating system</i>
SD	<i>Secure Digital</i>

SPI *Serial Peripheral Interface*

OLED *Organic Light-Emitting Diode*

TDS *Total Dissolved Solids*

XML *Extensible Markup Language*

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivos Gerais	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Organização do Trabalho	17
2	Projeto	19
2.1	Solução	19
3	Instrumentação Ambiental	21
3.1	Temperatura	21
3.1.1	Definição	21
3.1.2	Termistores	22
3.1.3	Equação de Steinhart	22
3.1.4	Cálculo da Temperatura	23
3.1.5	Sensor utilizado	24
3.1.6	Calibração	24
3.2	Sólidos Dissolvidos Totais	26
3.2.1	Definição	26
3.2.2	Funcionamento	26
3.2.3	Sensor utilizado	27
3.2.4	Cálculo de TDS	27
3.2.5	Calibração	28
3.3	Turbidez	29
3.3.1	Definição	29
3.3.2	Funcionamento	29
3.3.3	Sensor utilizado	30
3.3.4	Cálculo da turbidez	30
3.4	pH	31
3.4.1	Definição	31

3.4.2	Funcionamento	32
3.4.3	Sensor utilizado	32
3.4.4	Calibração	33
4	Comunicação	35
4.1	Cartão de memória	35
4.2	LoRa	36
4.3	Wi-Fi	36
4.4	GPS	37
4.5	Serial	37
5	Arquitetura	38
5.1	<i>Hardware</i>	38
5.1.1	Microcontrolador	38
5.1.2	Cartão SD	39
5.1.3	ADC	39
5.1.4	Relé	40
5.1.5	Potência	41
5.1.6	Caixa estanque e ancoragem	41
5.1.7	Esquemático	42
5.1.8	Montagem	42
5.2	<i>Software</i>	43
5.2.1	Decisões de Desenvolvimento	43
5.2.2	Sistema Operacional	44
5.2.3	Tarefas	45
5.2.4	<i>Datalogger</i>	45
5.2.5	<i>Gateway</i>	49
5.2.6	ThingSpeak	52
6	Resultados	54
6.1	Custos	54
6.2	Primeiro teste	55
6.2.1	<i>Datalogger</i>	55
6.2.2	<i>Gateway</i>	58
6.3	Teste de campo	58
6.3.1	<i>Datalogger</i>	60
6.3.2	<i>Gateway</i>	65
6.3.3	Nuvem	66
6.4	Pontos de melhoria	66
6.4.1	<i>Hardware</i>	66

6.4.2 <i>Software</i>	67
7 Conclusão	69
7.1 Trabalhos futuros	70
7.1.1 Rede Mesh	70
7.1.2 <i>Low Power</i>	70
7.1.3 Projeto de <i>Hardware</i>	70
7.1.4 Modularização do <i>firmware</i>	70
7.1.5 Produção	70
7.1.6 Robótica Móvel	70
7.1.7 Inteligência Artificial	70
Bibliografia	71

1. Introdução

A água é o elemento básico da vida, essencial em praticamente todos os cenários biológicos conhecidos. Porém, sua importância transborda para outras esferas, como políticas públicas, agropecuária, indústria, tratamento de resíduos e conservação ambiental. Logo, mensurar as características da água é algo de suma importância em diferentes áreas.

A avaliação confiável da qualidade da água por meio de programas de monitoramento é crucial para que os tomadores de decisão entendam, interpretem e usem essas informações em apoio às suas atividades de gerenciamento, com o objetivo de proteger o recurso [Behmel et al. 2016] e a população. Portanto, possuir esses dados é fundamental para a implementação de políticas públicas de saúde e saneamento, por exemplo, que sejam coerentes com a realidade. Prova disso é o fato que, ao longo da história, a qualidade da água para consumo tem sido monitorada para evitar o contato com agentes causadores de doenças [Vikesland 2018].

Mesmo com toda essa relevância, há uma série de desafios a serem enfrentados. Por exemplo, no caso de um reservatório de grande porte, como um lago, uma contaminação em um dos lados pode não afetar o outro [Helmi, Hafiz e Rizam 2014]. Assim, são necessários vários sensores, ou sensores móveis para se ter uma visão global da qualidade do corpo hídrico.

Outra questão importante é a temporal, haja vista que não adianta fazer uma medição e tomá-la como estática e imutável. Como os sistemas hídricos são dinâmicos, dados de longa duração permitem modelar melhor processos de mudança. Além disso, com séries temporais, é possível comparar a resposta do ambiente às políticas públicas [Xu et al. 2011] e identificar o tamanho do impacto de um desastre ambiental.

Contudo, para que haja uma grande cobertura espacial e temporal dos reservatórios, é necessário um grande custo repetitivo (humano, logístico e financeiro) para coletar, e, posteriormente, analisar os dados em laboratório. Esse cenário abre espaço para o monitoramento remoto, isto é, sem a presença física de uma equipe no local. Tal cenário já é realidade em águas oceânicas através de bóias automatizadas e imagens de satélite, devido aos estudos de mudanças climáticas [Silva, Costa e Barletta 2013]. Essas soluções são o estado da arte no monitoramento de água, mas tem sua aplicação limitada devido ao custo altíssimo. Porém, em corpos d'água doce e zonas costeiras, isso ainda é feito da maneira tradicional, devido ao custo inicial elevado dessas abordagens alternativas.

Entretanto, com o advento e barateamento da eletrônica, sensores e tecnologias IoT, acrônimo em inglês para *Internet of Things*, torna-se possível desenvolver aparelhos que façam essas medições com um custo inicial baixo, e que dispensem gastos em logística e recursos humanos, além de entregar resultados em tempo real. O presente trabalho implementa uma solução de baixo custo para monitoramento remoto e de tempo real de características de água, com um teste prático em um rio de zona costeira.

1.1 Justificativa

O uso elevado de produtos químicos nas fábricas, construção civil, agrotóxicos e a lançamento direto, em corpos hídricos próximos, de resíduos provenientes de indústrias são fatores que dão uma enorme contribuição para a redução da qualidade da água ao redor do mundo [Pasika e Gandla 2020]. Com isso, torna-se necessário medir, recorrentemente, o perfil da água, para que se torne possível agir rapidamente em caso de contaminação. Contudo, os métodos tradicionais de monitoramento das características da água envolvem amostragem e técnicas de laboratório; por essa razão são lentos e caros. Existe, assim, uma necessidade para formas de monitoramento mais eficientes [Cloete, Malekian e Nair 2016].

Nesse contexto, um aparelho que fique no ambiente em tempo integral, registre dados físico-químicos, transmita-os em tempo real e seja de baixo custo é uma solução de grande impacto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Desenvolver um sistema de monitoramento de características da água que seja autônomo, de baixo custo, replicável, que registre e transmita os dados em tempo real. O sistema deve ser de baixa manutenção e de aplicação contínua.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o funcionamento, calibrar e operar sensores de características físico-químicas da água;
- Desenvolver um *hardware* de baixo custo, replicável, baixa manutenção e de aplicação contínua;
- Desenvolver um *firmware* que registre e transmita os dados em tempo real de maneira autônoma.

1.3 Organização do Trabalho

O restante do estudo organiza-se em seções que descrevem cada etapa do desenvolvimento do trabalho, fornecendo detalhes teóricos e aplicados da implementação da solução. A

Seção 2 apresenta a ideia geral do trabalho. A Seção 3 trata dos sensores utilizados no trabalho, dando a definição da grandeza a ser medida, o funcionamento do sensor, seu modelo e sua calibração. A Seção 4 trata da comunicação, de quais as tecnologias utilizadas e do porquê delas serem empregadas. A Seção 5 trata da arquitetura do sistema, em matéria de *firmware* e *hardware*. Bem como de quais algoritmos foram empregados, e de quais as escolhas de *firmware*, de *hardware* e de protocolos foram feitas. A Seção 6 discute os resultados obtidos tanto durante a produção do equipamento como nos testes práticos. Finalmente, a Seção 7 trata da conclusão do trabalho.

2. Projeto

Esta seção descreve o projeto como um todo. Apresenta a ideia de solução para o problema de monitoramento da qualidade de água, bem como as diretrizes seguidas para atingir os objetivos propostos. Todos os pontos abordados aqui serão explicados em detalhes nas seções posteriores.

2.1 Solução

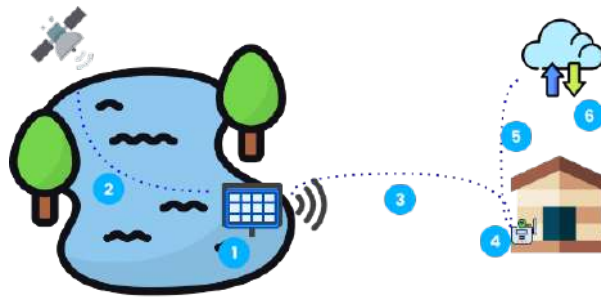
O projeto consiste em 3 eixos principais: *datalogger*, *gateway* e nuvem. O *datalogger* é um equipamento que fica ancorado no corpo hídrico e coleta os dados, por meio dos sensores e de GPS, sigla em inglês para *Global Positioning System*. Essa informação é salva em cartão de memória, além de ser transmitida em tempo real via LoRa, acrônimo em inglês para *Long Range*. Por operar diretamente no ambiente, é alimentado por bateria, carregada por uma placa solar.

Já o *gateway* atua na outra ponta dos dados, em um ambiente com maior estrutura. Ele recebe os dados via LoRa e retransmite para a nuvem via Wi-Fi, além de exibir os dados em um *display* e facilitar a visualização da informação. Por operar em um ambiente controlado, é alimentado pela rede elétrica.

A nuvem, por sua vez, permite a visualização da informação coletada, em tempo real, em qualquer lugar do mundo, além de permitir o *download* dos dados, sem ter que ir ao *datalogger* recuperar o cartão de memória.

Essa arquitetura pode ser vista na figura [2.1](#). O fluxo de trabalho do sistema é indicado nas numerações da imagem: Em 1 e 2, sensores e do GPS coletam os dados, respectivamente, e esses são persistidos no cartão de memória. Em 3, a informação é repassada para o *gateway*, via LoRa. Em 4, o *display* exibe os resultados, que, em 5, são enviados à nuvem. Em 6, a informação é mostrada na nuvem.

Figura 2.1 - Arquitetura do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Em matéria de *hardware*, o projeto é voltado para o baixo custo; por isso, as peças utilizadas são de uso geral, prototipagem ou *kits* de desenvolvimento. Contudo, além do preço, a presença dos componentes em trabalhos similares e a disponibilidade no mercado brasileiro foram determinantes para definir as partes empregadas.

Já o *software* é organizado em tarefas, sendo cada uma responsável por uma nuance do projeto: coleta, transmissão, recebimento e exibição dos dados. Essa característica facilita a manutenção e alteração futura do projeto.

Finalmente, a nuvem utilizada é voltada para aplicações do tipo, tendo rotinas de exibição e *download* dos dados, nativamente implementadas.

3. Instrumentação Ambiental

Esta seção apresenta a descrição dos sensores utilizados no projeto, bem como seu funcionamento, seu modelo, detalhes da calibração e a definição da grandeza medida.

Normalmente, avaliações de qualidade de água são laboratoriais, que demoram, requerem mão-de-obra especializada e altos custos [Wulandari, Abdullah e Asriningtias 2022]. Com isso, a falta de dados em tempo real torna a detecção de contaminantes tardia e ineficiente [Geetha e Gouthami 2017].

Soma-se a isso o fato de que os *dataloggers* de mercado, disponíveis no Brasil, chegam a valer dezenas de milhares de reais, e ainda exigirem a presença do pesquisador em campo.

Dentro desse contexto, múltiplos sensores de baixo custo podem ser aplicados no monitoramento de água [Ighalo, Adeniyi e Marques 2021] e já foram utilizados em trabalhos semelhantes como [Dantas 2020], [Pasika e Gandla 2020], [Wulandari, Abdullah e Asriningtias 2022] e [Silva, Costa e Barletta 2013]. Essas referências, assim como o preço e a disponibilidade nacional, foram fatores determinantes para a escolha dos sensores de temperatura, pH, turbidez e sólidos dissolvidos totais.

Sensores que medem oxigênio dissolvido e ORP, por exemplo, são bastante utilizados em estudos similares como [Helmi, Hafiz e Rizam 2014] e [Cloete, Malekian e Nair 2016], porém estão indisponíveis no mercado brasileiro e a importação inviabilizou a compra para este trabalho.

3.1 Temperatura

3.1.1 Definição

A temperatura é uma grandeza que mede o grau de agitação das partículas (átomos ou moléculas) que constituem um corpo [Feltre 2008]. É um parâmetro com uma grande importância biológica, pois alterações abruptas, ou que ultrapassem um intervalo ótimo, podem gerar mortandade e não desenvolvimento de espécies. Por exemplo, em um ambiente de cultura de caranguejos (*Portunus pelagicus* e *Scylla serrata*), caso a temperatura fique fora de um intervalo certo, suas larvas não se desenvolvem [Niswar et al. 2018], inviabilizando a produção.

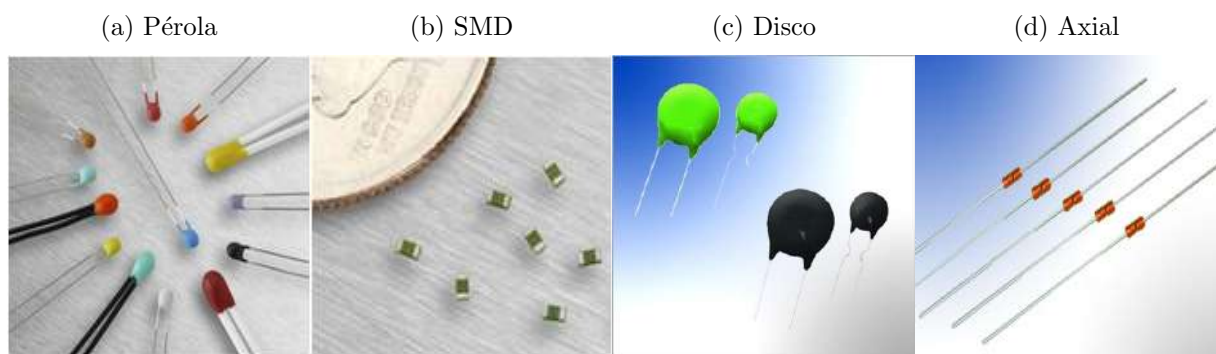
Há diferentes formas de mensurar a temperatura. Ao longo da história, diferentes mecanismos foram e são utilizados como termômetro. Destacam-se a expansão de líquidos

como mercúrio e álcool, variação de pressão de um gás e ligas bimetálicas. Com o avanço da eletrônica, popularizou-se o uso de termômetros digitais, que usam diferentes técnicas, como infravermelho, termopar e termistores. Esta última é especialmente utilizada para medir a temperatura de um sistema, de maneira barata e confiável.

3.1.2 Termistores

Termistores são pequenos semicondutores, feitos de óxidos de metais ferrosos como crômio, cobalto, ferro, manganês e níquel [Morris e Langari 2020]. Alguns encapsulamentos deste componente podem ser vistos na figura 3.1.

Figura 3.1 - Encapsulamentos de Termistor



Fonte: Wikimedia Commons, (2010)

Sua resistência varia conforme a temperatura do meio. Caso a resistência diminua com o aumento da temperatura, possui um Coeficiente de Temperatura Negativo, e é do tipo NTC. Caso contrário, possui um Coeficiente de Temperatura Positivo, e é do tipo PTC. Tendo um baixo custo e alta disponibilidade em diferentes encapsulamentos, a alternativa torna-se ideal para utilização neste projeto.

Porém, por trata-se de um sensor não-linear, desponta a necessidade da utilização de uma equação mais complexa para se extrair, de fato, o valor de temperatura a partir da resistência do componente, bem como de uma calibração que é feita para ajustar a saída dessa resposta não-linear.

3.1.3 Equação de Steinhart

A temperatura de termistores é comumente computada pela equação de [Steinhart e Hart 1968], que é dada por 3.1:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln R)^3 \quad (3.1)$$

Na qual T é a temperatura em Kelvin, R é a resistência e A , B e C são constantes. Uma das formas mais comuns de tratar essa equação é simplificá-la para a equação de parâmetro β [Petkovšek, Nemec e Zajec 2021], dada por 3.2:

$$R = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (3.2)$$

Na qual R_0 é a resistência do termistor a uma temperatura T_0 , que comumente vale 298.15K, ou 25°C. O valor de T_0 é dada pelo datasheet do componente.

Em sequência, utiliza-se as seguintes substituições para A , B e C , dadas respectivamente por 3.3, 3.4 e 3.5:

$$A = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{\beta} \ln R_0 \quad (3.3)$$

$$B = \frac{1}{\beta} \quad (3.4)$$

$$C = 0 \quad (3.5)$$

Resultando no inverso da temperatura em função de T_0 , R_0 , R e β , dado por 3.6 e simplificado para 3.7:

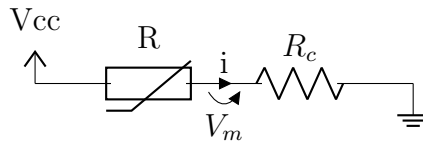
$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{\beta} \ln R_0 + \frac{1}{\beta} \ln R \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (3.7)$$

3.1.4 Cálculo da Temperatura

Visto que T_0 , β e R_0 são constantes, basta possuir o valor de R para encontrar-se T . Isto é feito colocando uma tensão conhecida V_{cc} sobre um resistor de valor conhecido em série com o termistor, formando um divisor de tensão, como pode ser visto na figura 3.2. Em seguida, mede-se a tensão entre os componentes V_m e chega-se ao valor atual de R :

Figura 3.2 - Divisor de tensão com termistor



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Na qual R_c é o resistor conhecido, V_m é a tensão medida pelo microcontrolador do projeto e i é a corrente que atravessa o circuito.

Aplica-se a lei de Ohm para todo o circuito, detalhado em 3.8:

$$V_{cc} = (R + R_c)i \quad (3.8)$$

Aplica-se a lei de Ohm para o resistor conhecido, detalhado em [3.9](#):

$$V_m = R_c i \quad (3.9)$$

Com as equações [3.8](#) e [3.9](#), isola-se R , como mostrado em [3.10](#), [3.11](#) e [3.12](#):

$$V_{cc} = \frac{RV_m}{R_c} + V_m \quad (3.10)$$

$$\frac{RV_m}{R_c} = V_{cc} - V_m \quad (3.11)$$

$$R = \left(\frac{V_{cc}}{V_m} - 1 \right) R_c \quad (3.12)$$

Com isso, dada uma tensão V_m , chega-se a uma resistência R , e, conseqüentemente, a temperatura T .

3.1.5 Sensor utilizado

O sensor utilizado no projeto é o termistor MF-58, visto na figura [3.3](#). Ele opera em temperaturas entre -55°C e 200°C , consome uma potência de até 50mW, e possui comportamento NTC com resistência interna de 10k ohms. Além disso, conta com grande disponibilidade no mercado e encapsulamento de inox, que faz com possa ser utilizado continuamente em ambiente aquoso. É montado em conjunto com um resistor de 10k ohms e alimentado por uma tensão de 5v.

Figura 3.3 - Sensor de temperatura MF-58



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2023

3.1.6 Calibração

A calibração do sensor de temperatura foi realizada via comparação com um termômetro já calibrado, de um instrumento multi sensorial modelo Portable A1 TDS&EC Meter. Para tal, realizaram-se medições com o sensor e o termômetro no mesmo meio ao mesmo

tempo, o que resultou nos pontos vistos na tabela 3.1. Destaca-se que comparou-se diretamente entre o valor convertido de temperatura e não o valor de resistência, pois o sensor de referência tem o *hardware* fechado, impossibilitando medir essa escala.

Tabela 3.1 - Amostras de temperatura para calibração do sensor

Temperatura medida (°C)	Temperatura real (°C)
17.7	19.9
18.7	20.8
20.1	22.4
21.1	22.9
21.7	23.5
22.5	24.0
23.8	25.0
24.2	25.7
25.0	26.6

Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

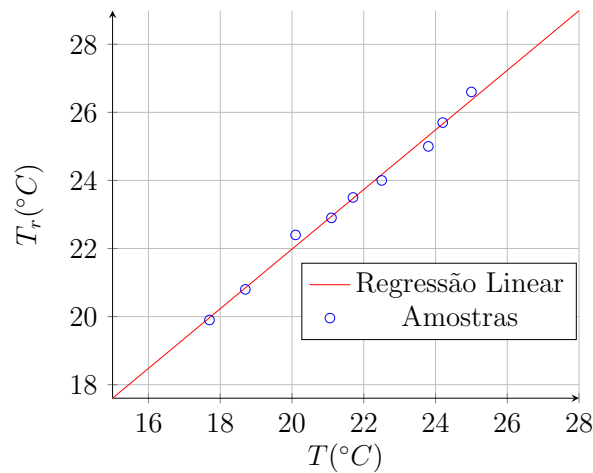
Utilizou-se o *software* Curve Expert Basic para fazer uma regressão linear que fizesse o valor lido pelo sensor ser compensado até chegar ao valor real. O programa resultou na equação 3.13, que obteve um score de 976, numa escala de 0 a 1000, com erro médio quadrático de 0.03.

$$T_r = 4.466406353995638 + (0.8757820472999968)T$$

(3.13)

Na qual T_r e T são, respectivamente, as temperaturas real, medida pelo termômetro, e a medida pelo sensor. Visualmente, a curva de calibração é expressa na figura 3.4

Figura 3.4 - Curva de calibração do sensor de temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

3.2 Sólidos Dissolvidos Totais

3.2.1 Definição

TDS é o acrônimo em inglês para *Total Dissolved Solid*, ou sólidos dissolvidos totais. O parâmetro pode ser descrito como a medida de sais inorgânicos, matéria orgânica e outros materiais dissolvidos na água [Weber-Scannell e Duffy 2007]. Essa grandeza está intimamente relacionada à condutividade elétrica da água [Rusydi 2018] e à salinidade, visto que o principal componente desses sólidos são sais.

Se tratando de água potável, um valor alto de TDS implica em um sabor ruim [Devesa e Dietrich 2018]. Já no ambiente, o aumento dessa escala implica em um aumento de salinidade, que pode levar à mortandade de espécies [Tavares-Dias 2021]. Também já foi descrita uma correlação negativa significativa entre a presença de íons Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- e CO_3^{2-} , que ficam dissolvidos na água, e a produção de clorofila a [Bierhuizen e Prepas 1985].

Na realidade, apesar de sólidos dissolvidos totais e sais solúveis totais serem grandezas diferentes, medidas de maneiras diferentes, podem ser consideradas a mesma coisa [Landscape South Australia Murraylands and Riverland 2015]. Por essa relação entre salinidade e TDS, torna-se possível classificar a água como doce, salobra ou salgada. O artigo 2º da Resolução CONAMA nº 357/2005, classifica a água da seguinte forma:

- I - águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 ‰;
- II - águas salobras: águas com salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰;
- III - águas salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30 ‰;

As unidades para TDS são mg/L ou ppm , que são equivalentes, considerando a densidade da água $\rho = 1 \frac{kg}{L}$ pela análise dimensional vista na equação 3.14:

$$1 \frac{mg}{L} = 1 \frac{mg}{L\rho} = 1 \frac{mg}{kg} = \frac{1}{10^6} = 1ppm \quad (3.14)$$

3.2.2 Funcionamento

O TDS mede os sólidos dissolvidos. Na prática, as moléculas desses sólidos se quebram em íons, que aumentam a condutividade elétrica da água. Desta forma, quanto mais condutivo o meio, mais íons e mais sólidos dissolvidos.

Os sensores de TDS consistem de dois eletrodos que ficam imersos na água a uma distância fixa um do outro. A partir disso, calcula-se a condutividade e, por fim, o valor de TDS. Essa relação é praticamente linear, e pode ser vista na equação 3.15:

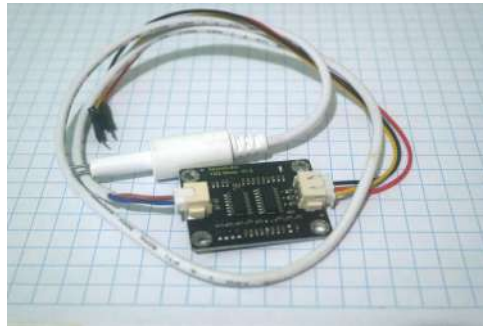
$$TDS(\frac{mg}{L}) = k \cdot EC(\frac{\mu S}{cm}) \quad (3.15)$$

Na qual EC é a condutividade elétrica e k é um valor que varia conforme a situação, comumente girando em torno de 0.5 a 0.75 [Rusydi 2018]. Na prática, a mudança na condutividade da água, gera uma variação de tensão. Que é interpretada de acordo com um cálculo informado pelo fabricante do sensor.

3.2.3 Sensor utilizado

O sensor utilizado no projeto é o keyestudio TDS Meter v1.0, visto na figura 3.5. Ele consegue medir até a escala de 1000 ppm; ou seja, opera em água doce e parcialmente em água salobra. Caso a salinidade esteja fora da escala do sensor, sua medida não será confiável.

Figura 3.5 - Sensor de TDS keyestudio TDS Meter v1.0



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

3.2.4 Cálculo de TDS

O fabricante do sensor provê uma equação de conversão do valor de tensão do sensor para o valor de TDS da água. Primeiramente, calcula-se um coeficiente de temperatura, c_t , como visto na equação 3.16:

$$c_t = 1 + 0.02 * (T_c - 25.0) \quad (3.16)$$

Na qual T_c é a temperatura atual em graus celsius. Com o valor de c_t , calcula-se a tensão compensada, V_c , como visto na equação 3.17:

$$V_c = \frac{V_s}{c_t} \quad (3.17)$$

Na qual V_s é a tensão do sensor.

Finalmente, pode-se calcular o valor de TDS , com a equação 3.18:

$$TDS = (133.42V_c^3 - 255.86V_c^2 + 857.39V_c) \frac{1}{2} \quad (3.18)$$

Vale-se ressaltar que todas as constantes provêm do fabricante do sensor.

3.2.5 Calibração

A calibração do sensor é feita da mesma maneira que o sensor de temperatura. Desta vez, utiliza-se a escala de TDS do Portable A1 TDS&EC. Primeiramente, produzem-se diferentes amostras, com misturas de água filtrada com sal de cozinha ($NaCl$), em diferentes concentrações, como pode ser visto na tabela 3.2

Tabela 3.2 - Amostras de TDS para calibração do sensor

TDS medido (ppm)	TDS (ppm)
98	75
294	254
403	343
576	471
995	719

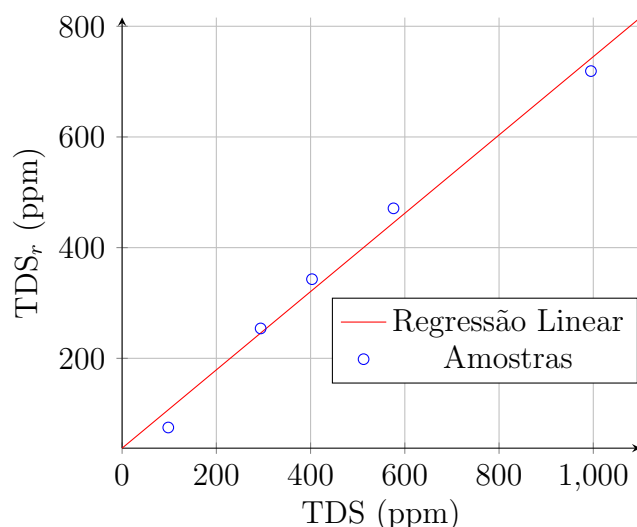
Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Novamente, utilizou-se o *software* Curve Expert Basic para fazer uma regressão linear, que fez com o valor lido pelo sensor fosse compensado até chegar ao valor real. O programa resultou na equação 3.19, que obteve um score de 965, numa escala de 0 a 1000 e um erro médio quadrático de 536, valor que a princípio é alto, mas considerando a escala, dá uma variação média de 23 ppm para mais ou menos.

$$TDS_r = 37.67109365977577 + (0.7073730057908374)TDS \quad (3.19)$$

Na qual TDS_r e TDS são respectivamente os valores de TDS real, medida pelo instrumento calibrado, e o medido pelo sensor. Visualmente, a curva de calibração é expressa na figura 3.6

Figura 3.6 - Curva de calibração do sensor de TDS



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

3.3 Turbidez

3.3.1 Definição

Em poucas palavras, a turbidez pode ser descrita como a claridade óptica da água [Kitchenner, Wainwright e Parsons 2017]. Ao contrário do TDS, a turbidez está relacionada com as partículas em suspensão na água; quanto maior a quantidade de sólidos em suspensão mais turva é a água.

Alguns efeitos negativos da turbidez no ambiente são sufocamento bentônico, irritação das brânquias dos peixes e transporte de contaminantes sorvidos. Além disso, a redução da penetração da luz na água, reduzindo os níveis de fotossíntese [Davies-Colley e Smith 2001].

Ademais, pontua-se que um aumento repentino da turbidez da água, pode ser utilizado como indicador de poluição, chuvas ou de alguma perturbação do assoalho do corpo hídrico.

3.3.2 Funcionamento

Um sensor básico consiste em uma fonte de luz e um receptor, ambos imersos no meio. O receptor percebe as alterações da luz e, a partir disso, pode-se calcular a turbidez. Diferentes estruturas de sensores estão disponíveis no mercado, com emissores em vários comprimentos de onda e com ângulos variados em relação ao receptor, além de ser possível arranjos com vários emissores e receptores.

Diferentes unidades de Turbidez podem ser utilizadas, sendo a escolha da unidade definida de acordo com a construção do sensor. Tipicamente, sensores que utilizem emissor e detector único, com um ângulo de 90° entre eles e luz branca entre 400-680 nm, utilizam

a Unidade de Turbidez Nephelométrica (NTU) [Kitchener, Wainwright e Parsons 2017]. Contudo, o fabricante informa a melhor unidade a ser utilizada em cada caso.

3.3.3 Sensor utilizado

Como sensor, utiliza-se um módulo analógico de baixo custo, TS-300B, que pode ser visto na figura 3.7. O modelo supracitado é comumente utilizado em máquinas de lavar roupa ou lavar pratos, com a função de fazer uma medição da turbidez da água, antes e depois das lavagens, para saber se é necessário mais um ciclo de limpeza.

Figura 3.7 - Sensor de Turbidez TS-300B



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Possui uma faixa de leitura entre 0 e 1000 NTU, com margem de erro de 30 NTU, e utiliza a luz infravermelha de até 940 nm.

Apesar de ser um sensor barato e de alta disponibilidade, há pouca documentação acessível. O *datasheet* que o fabricante disponibiliza está em mandarim e com informações incompletas. Soma-se a isso o fato de que turbidímetros prontos e já calibrados e ou soluções de calibração, são bastante caros e difíceis de encontrar, o que inviabilizou o presente estudo de afirmar a turbidez do meio em NTU.

Vale-se ressaltar que uma proteção plástica é colocada ao redor do sensor, para protegê-lo de choques físicos e da influência da luz do sol. Isto é detalhado na seção 5.1.6.

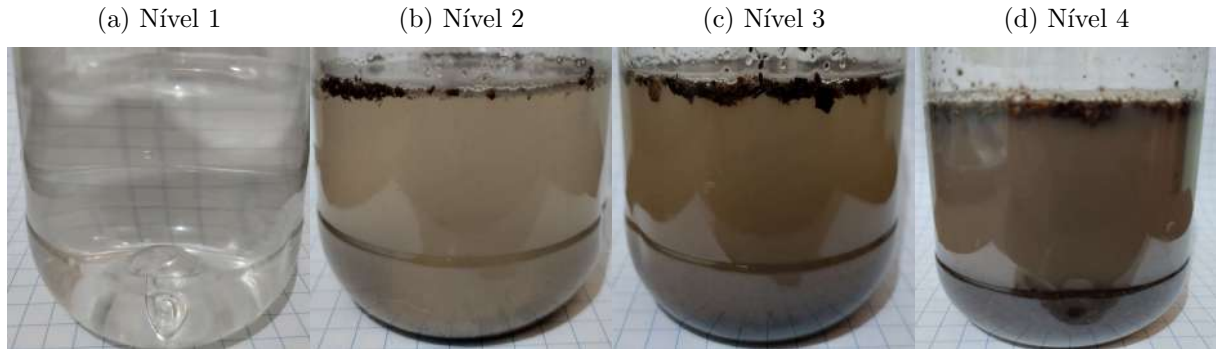
3.3.4 Cálculo da turbidez

Pela dificuldade de categorizar um valor de turbidez em NTU, o sensor atuará como um indicador de turbidez. Assim, não se dirá o quão turvo é o meio em uma escala contínua, e sim em uma escala discreta, seguindo uma estratégia descrita no *datasheet* do componente [Materials 2012].

Primeiro define-se o número de níveis discretos da escala - neste caso, adotou-se o sugerido pelo fabricante, 4 níveis. Em seguida, prepara-se uma mistura de água filtrada com terra vegetal, para cada um deles, com uma escala crescente de turbidez; isto é, o

primeiro nível possui a água mais límpida e o último a água mais turva, como visto na figura 3.8.

Figura 3.8 - Níveis de turbidez



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Posteriormente, com o sensor, faz-se a leitura da tensão para cada solução, que é mostrado na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Faixas de tensão por solução

Nível	Faixa de Tensão (V)
1	3.6 à 5.0
2	3.2 à 3.5
3	2.2 à 3.1
4	0.0 à 2.1

Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Portanto, o valor de tensão retornado pelo sensor é mapeado em um dos níveis de turbidez da escala discreta.

3.4 pH

3.4.1 Definição

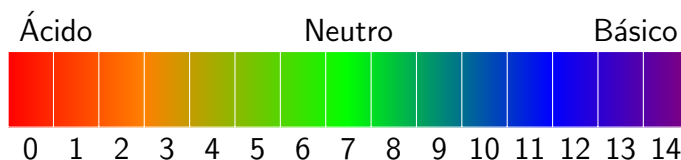
A grandeza pH é formalmente definida, em termos da atividade de íons de hidrogênio (+1) em uma solução, pela equação 3.20 :

$$pH = -\log [a(H^+)] = -\log \left[\frac{m(H^+) \gamma_m(H^+)}{m^\ominus} \right] \quad (3.20)$$

Na qual $a(H^+)$ é a atividade do íon de hidrogênio em uma solução aquosa, $H^+(aq)$, $\gamma_m(H^+)$ é o coeficiente de atividade de $H^+(aq)$ na molalidade $m(H^+)$, e $m^\ominus = 1 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ é a molalidade padrão [Gold 2019].

Em termos mais simples, o pH é uma medida da presença do íon H^+ em uma solução, sendo principalmente utilizado como um indicador ácido base. Sua escala, que é logaritmica, vai de 0, extremamente ácida, até 14, extremamente básica, conforme exemplificado na figura [3.9](#)

Figura 3.9 - Escala de pH



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

O pH é um fator muito relevante em análises de qualidade de água, pois alterações na acidez sugerem que fenômenos importantes estão acontecendo. A acidificação oceânica (fenômeno potencializado pelas mudanças climáticas que prejudica diversos organismos e a fotossíntese), por exemplo, é mensurada com a escala de pH ao longo do tempo [\[Gattuso e Hansson 2011\]](#). Em reservatórios é uma grandeza indicativa do processo de eutrofização [\[Xu et al. 2015\]](#), que pode ser resultado de poluição por esgotos ou fertilizantes, por exemplo.

3.4.2 Funcionamento

O sensor de pH consiste em dois eletrodos, sensitivo e referência. O primeiro fica no interior de uma ampola de vidro permeável ao íon H^+ ; devido a isso, a solução eletrolítica que a preenche interage com o meio externo. Já o segundo fica isolado em outra ampola, imerso em outro tipo de solução que não é influenciada pelo ambiente.

Quando o sensor é imerso em meio aquoso, torna-se possível identificar uma diferença de potencial elétrico entre os eletrodos. Essa tensão varia conforme o pH e a temperatura do meio, e esse valor é convertido na escala de pH. O cálculo de conversão varia conforme o sensor, sendo informado pelo fabricante.

3.4.3 Sensor utilizado

O sensor utilizado foi o ph-4502c, de baixo custo, muito utilizado em aquários, com precisão de uma casa decimal, tendo alta disponibilidade no mercado e documentação na literatura cinza. O sensor pode ser visto na figura [3.10](#)

Figura 3.10 - Sensor de pH 4502c



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

3.4.4 Calibração

A calibração consiste em anotar as tensões retornadas pelo sensor em soluções tampão de pH conhecido. Entre cada medição, a ponta de prova foi limpa com água destilada e seca com papel. As amostras coletadas podem ser vistas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Tensão lida para cada pH conhecido

Tensão(V)	pH
2.59	7.0
3.10	4.0
2.09	10.0

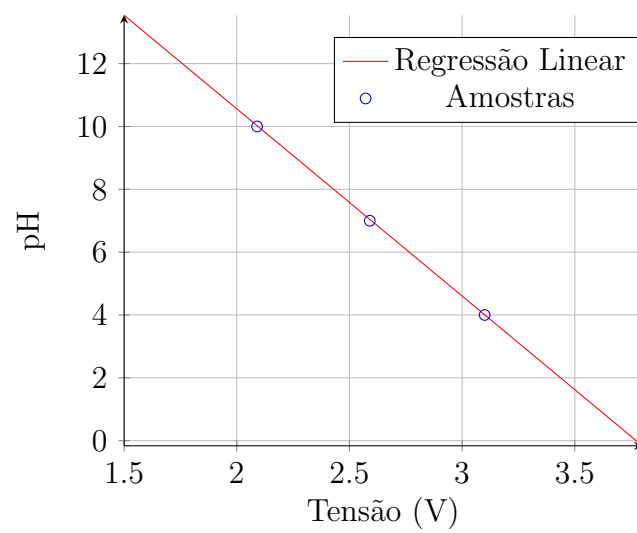
Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Novamente, utilizou-se o *software* Curve Expert Basic para fazer uma regressão linear, que fez com o valor lido pelo sensor fosse compensado até chegar ao valor real. O programa resultou na equação 3.21, que obteve um score de 999, numa escala de 0 a 1000, e um erro médio quadrático de 1.97×10^{-6} .

$$pH = 22.47765131742440 + (-5.958289997725294)v \quad (3.21)$$

Na qual pH e v são, respectivamente, os valores de pH, calculado, e a tensão medida pelo sensor. Visualmente, a curva de calibração é expressa na figura 3.11.

Figura 3.11 - Curva de calibração do sensor de pH



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

4. Comunicação

Esta seção apresenta descrição das formas de comunicação utilizadas no projeto. Detalha seus objetivos, funcionamento, mensagens, remetente e destinatário. Ao todo, foram utilizadas cinco maneiras de comunicação: Cartão de memória, LoRa, Wi-Fi, GPS e Serial. Cada uma delas preenche uma lacuna do projeto e garante que o sistema seja confiável.

O cartão de memória faz a persistência dos dados. Já a rede LoRa permite transmitir os dados em longas distâncias. O Wi-Fi faz a comunicação com o mundo exterior, pondo os dados na nuvem em tempo real, e coleta a data e hora certa. GPS dá um *feedback* sobre a posição do equipamento, além de corrigir a data e hora. Por fim, a comunicação serial tem fins de desenvolvimento.

Protocolos de comunicação entre os módulos, como I2C e SPI, não serão abordados. Aqui, trata-se apenas da comunicação de dados do projeto com o mundo exterior, e não de comunicação interna.

4.1 Cartão de memória

A persistência dos dados é essencial para um *datalogger*. De nada adianta ter sensores calibrados, se a informação não é registrada. Para solucionar essa questão, utiliza-se um cartão de memória do formato SD card, sendo escolhido por possuir alta disponibilidade no mercado, custo acessível e facilidade de leitura em diferentes dispositivos. O tipo de arquivo selecionado foi o CSV, por ser de fácil formatação, de construção aditiva e de baixo consumo de memória, além de ser altamente utilizado na ciência em geral, evitando pós processamento.

Os dados são salvos de acordo com o exemplo da tabela [4.1](#):

Tabela 4.1 - Exemplo de formato dos dados

Date	Time	Temperature (°C)	TDS (ppm)	Turbidity	pH	Latitude	Longitude
yyyy-mm-dd	hh:mm:ss	float	int	int	float	float	float

Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Categoricamente, o cartão de memória não é uma forma de comunicação direta, ele não faz a conversação entre dois equipamentos ou entre um equipamento e o usuário. Contudo, ele funciona como reservatório de informação, que pode ser acessada quando o

datalogger é tirado de operação. Desta forma, indiretamente, há uma comunicação entre o equipamento e o usuário.

4.2 LoRa

LoRa é um acrônimo em inglês de *Long Range*, e trata-se de um protocolo de comunicação sem fio de longa distância voltado para equipamentos (IoT).

A diferença da internet comum para IoT é que a segunda tem “menos tudo” [Augustin et al. 2016]; ou seja, os gargalos de potência, dados, memória, processamento são muito mais apertados.

Dentro desse contexto, ainda há situações em que protocolos de comunicação sem fio mais tradicionais como Wi-Fi e Bluetooth, não são viáveis, como em ambientes remotos e com longas distâncias.

Para suprir essa lacuna, surgiram uma série de tecnologias *Low-Power Wide Area Networks* (LPWAN), como NB-IoT e *sigfox*, na qual o LoRa se enquadra [Zourmand et al. 2019].

Fisicamente, o LoRa opera nas faixas de frequência de 433, 868 ou 915 MHz, com *payload* variável entre 2 e 255 *bytes*, e com velocidade de entre 0,3 e 5,5kbps.

O LoRa é utilizado no projeto para transmitir a informação coletada pelo *datalogger*. A mensagem enviada é praticamente igual à linha que é salva no cartão SD, exceto pela ausência da quebra de linha e pela adição dos caracteres “ $\neg$ ” que servem como verificador, tanto da integridade do pacote, como se o pacote recebido é do formato esperado. O *gateway* recebe os dados e os transfere à nuvem, via Wi-Fi. Esse processo é melhor detalhado na seção 4.3.

4.3 Wi-Fi

A tecnologia Wi-Fi é de ampla utilização nos mais diferentes equipamentos e permite o acesso sem fio à internet. Neste trabalho, ela é utilizada de duas formas: primeiramente, para coletar a data e hora atual para o *datalogger*, seja em uma rede Wi-Fi disponível no local de uso, ou em uma provida pelo operador com o uso de um celular, por exemplo. Essa é uma conexão rápida de propósito único, somente executado durante a inicialização do emissor. Após o objetivo ser atendido, o módulo Wi-Fi é desligado.

A segunda forma é a de transmissão dos dados, recebidos via LoRa, para a nuvem. O *gateway* destrincha o pacote LoRa e envia, via Wi-Fi à nuvem, para que os dados possam ser visualizados em tempo real em qualquer lugar do mundo.

A nuvem escolhida foi a ThingSpeak. Desenvolvida pela MathWorks, é de ampla utilização em projetos IoT e descrita como um aplicativo de coleta de dados IoT para análise de vários sensores, por exemplo, pH, turbidez, tensão, temperatura, umidade, distância, etc [Pasika e Gandla 2020]. Um canal com todos os campos medidos foi criado, e as medições são exibidas em gráficos ao longo do tempo. Facilitando a visualização e

permitindo a tomada de decisão em tempo real. Mais detalhes serão apresentados na seção 5.

4.4 GPS

GPS é um acrônimo em inglês para *Global Positioning System*, ou Sistema de Posicionamento Global. É uma tecnologia altamente difundida e utilizada no mercado. Por meio de triangulação satelital, é possível deduzir as coordenadas geográficas do equipamento.

O GPS possui duas utilidades nesse projeto. Primeiramente, as coordenadas geográficas permitem confirmar o ponto de coleta. Além disso, caso o equipamento tenha se desprendido do ponto de ancoragem, através da mudança acusada pelo GPS, o operador pode recuperar o aparelho com menor dificuldade.

A outra é a atualização da data e hora, visto que há uma defasagem de cerca de 15 segundos por mês em relógios baseados em cristais de quartzo [Lombardi 2008]. Em aplicações que são de longa duração, é um atraso que deve ser corrigido. O GPS também retorna a data e a hora atualizada, o que permite que essa correção seja feita.

4.5 Serial

A comunicação serial é utilizada para fins de desenvolvimento: cada etapa do sistema possui um *log*, informando o resultado de cada etapa concluída. Esse processo é feito com o sistema de *log* nativo do microcontrolador utilizado, e é dividido em níveis: erros, avisos, informações, *debug* e verboso. Cada nível é expresso por uma cor diferente e facilita o desenvolvimento e melhoramento do projeto.

5. Arquitetura

Esta seção detalha a arquitetura de *hardware* e *software* do projeto, destacando as escolhas, estratégias e modelos implementados.

5.1 *Hardware*

Aqui serão explicadas as decisões sobre o *hardware*: Microcontrolador, módulos, bateria, painel solar e o esquemático.

5.1.1 Microcontrolador

O ESP32 é um microcontrolador com Wi-Fi e Bluetooth integrados, de 2,4 GHz desenhado com tecnologia de 40 nm. Foi projetado para obter o melhor desempenho de potência e RF, mostrando robustez, versatilidade e confiabilidade em uma ampla variedade de aplicações e cenários de energia [Espressif Systems 2023]. Somam-se a isso, o baixo custo, a alta disponibilidade e a documentação disponível, sendo esses os motivos para a escolha desse microcontrolador como base do projeto.

Em seguida, para facilitar a implementação e reprodutibilidade do estudo, buscou-se, para o *datalogger*, por um *kit* de desenvolvimento de ESP32 que possuisse comunicação LoRa e GPS integrados, além de disponibilidade no mercado nacional. Dentre as opções, a única que preencheu essas lacunas foi a placa TTGO T-Beam, que pode ser vista na figura 5.1

Figura 5.1 - TTGO T-Beam



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

Já para o *gateway*, basta que o *kit* de desenvolvimento possua a comunicação LoRa, visto que o Wi-Fi é nativo da ESP32. A placa escolhida foi a Heltec LoRa V2, com alta disponibilidade, e que também conta com um *display* OLED, que facilita a visualização dos dados.

5.1.2 Cartão SD

Para realizar a persistência dos dados no cartão SD, utilizou-se um módulo que faz a comunicação entre o cartão e o controlador via protocolo SPI, que utiliza 4 pinos do T-Beam, mostrados na tabela [5.1](#):

Tabela 5.1 - Conexões do módulo do cartão SD

Pino	Função
13	CS
14	SCK
15	MOSI
35	MISO

Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Destaca-se ainda que o MOSI possui um resistor *pull-up* de $10k\Omega$, seguindo a recomendação da Espressif.

5.1.3 ADC

ADC é um acrônimo em inglês para *Analog to Digital Converter*. Esse componente recebe como entrada uma tensão analógica e converte para um valor numérico inteiro, discretizado. A precisão de um ADC é dada em bits, que geram níveis de tensão variáveis conforme a tensão máxima suportada. Por exemplo, caso possua 10 bits, possuirá $2^{10} = 1024$ níveis de tensão diferentes. Se a tensão de entrada máxima for de 5V, cada nível de tensão possuirá $\frac{5}{1024} = 4mV$ de resolução. Se a leitura do ADC retornar 720, na prática, a entrada é de $720 \times 4mV = 3.5V$, por exemplo.

Em sua maioria, as MCUs possuem um ADC integrado. A ESP32 conta com um ADC de 12 bits. Contudo, seu comportamento não é linear, o que dificulta a calibração, e sua tensão máxima de entrada é de apenas 3.3V, sendo recomendado utilizar até 2.45V. Neste projeto, quatro sensores analógicos são usados, o que implica em quatro pinos de leitura, os sensores de turbidez e pH possuem tensão de saída maior que a tensão máxima de leitura do ADC nativo da ESP32, o que exigiria a utilização de divisores de tensão, além de uma complexidade de *software* maior do que normal para operações do tipo.

Por esses fatores, optou-se pela utilização de um módulo ADC externo. No caso, o ADS1115, que possui 16 bits de precisão, sendo um de sinal e 15 de medição, entrada máxima de 5.5V, comportamento linear, consumo de apenas $150\mu A$ no modo de leitura contínuo. No modo de leitura única, tem desligamento automático, que é o usado na

sonda. Usa o protocolo I²C, ou seja, utiliza somente 2 pinos na comunicação com a MCU, detalhados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Conexões do módulo ADC

Pino	Função
21	SDA
22	SCL

Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Apesar de possuir tensão máxima de entrada 5.5V, para calcular o valor do nível de tensão, pelo *datasheet*, utiliza-se a tensão de referencia de 6.144V. Como são 15 bits de medição, resulta-se em uma resolução de 0.1875mV, como visto nas equações 5.1 e 5.2.

$$2^{15} = 32768 \quad (5.1)$$

$$\frac{6.144}{32768} = 0.1875mV \quad (5.2)$$

Ou seja, cada nível de tensão equivale a apenas 0.1875mV.

Os sensores são ligados nas entradas do ADC de acordo com a tabela 5.3

Tabela 5.3 - Conexões de sensores no módulo ADC

Entrada	Sensor
0	Temperatura
1	TDS
2	Turbidez
3	pH

Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

5.1.4 Relé

Com o intuito de desligar os circuitos dos sensores quando estes não estão efetuando leituras, utiliza-se um módulo relé em detrimento de um transistor. Testes com transistor foram realizados; contudo, o sensor de TDS não operou corretamente, o que favoreceu a escolha do relé.

O relé garante que não haja consumo por parte dos sensores quando não estiverem sendo usados, ou que a precisão dos sensores seja afetada por reduções no potencial elétrico.

Há, ainda, as desvantagens de ser um componente eletromecânico e de necessitar de um regulador de tensão próprio, detalhado na próxima seção.

5.1.5 Potência

O projeto é mantido por quatro baterias de íons de lítio, modelo ICR 18650-22P, possuindo encapsulamento 18650, tensão nominal de 3.7V e capacidade de 2150 mAh. Por estarem ligadas em paralelo, totalizam 8600 mAh.

Esse arranjo foi escolhido primeiramente pela alta disponibilidade dessas baterias no mercado. Segundamente, devido às partes do projeto serem focadas em aplicações genéricas, elas possuem um consumo de corrente alto, quando comparados a um *hardware* específico. Isso se dá principalmente pela presença de LEDs que não podem ser desligados. Além disso o projeto não foi desenvolvido com o objetivo de ser uma aplicação *low-power*.

Para carregar as baterias, utiliza-se um módulo solar de 3,5W de potência máxima, que entrega 9v para um módulo regulador de tensão LM2596, que abaixa para 5v para o carregador TP4056. Que protege o arranjo de sobrecargas, e permite o carregamento via USB para a carga inicial.

Os reguladores da série LM2596 são circuitos integrados monolíticos que fornecem todas as funções ativas para um regulador de comutação abaixador (*buck*), capaz de entregar uma corrente de 3A com excelente balanceamento de carga [Texas Instruments 2023]. Os LM2596 contam com alta eficiência e alta disponibilidade no mercado.

Para transformar a tensão da bateria nos 5v que alimentam o resto do projeto, utilizam-se dois reguladores de tensão MT3608.

Um é dedicado ao módulo relé, sendo necessário para proteger os demais componentes do pico de tensão de *flyback*, fenômeno que consiste em uma alta de tensão gerada pelo corte da alimentação da bobina do relé, que faz com que a energia acumulada na mesma seja liberada. O outro é responsável por alimentar os módulos restantes: sensores, controlador, ADC e cartão de memória.

Os reguladores de tensão da série MT3608 atuam como elevadores de tensão. Possuem eficiência energética de até 97%, suportam cargas de até 4A e são indicados para aplicações com bateria [Aerosemi 2023]. Contam ainda com alta disponibilidade no mercado.

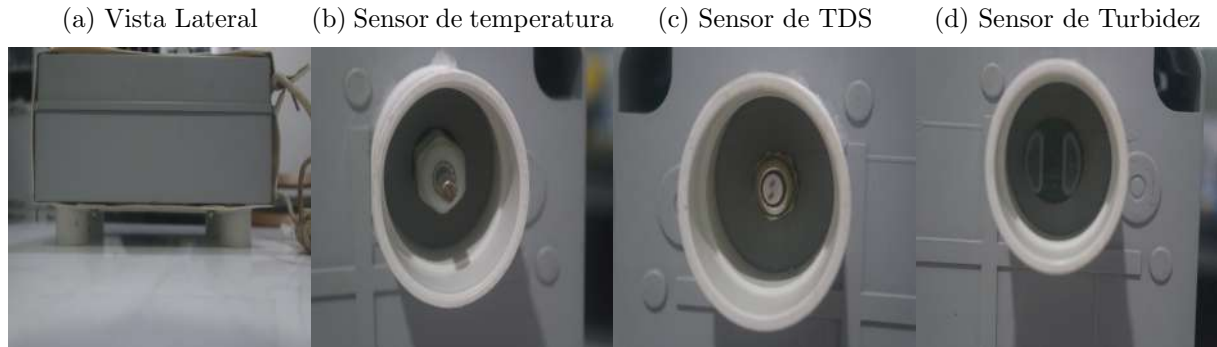
5.1.6 Caixa estanque e ancoragem

Todo o projeto é resguardado por uma caixa estanque modelo KM03206 com dimensões de 300mmx220mmx120mm. Esse encapsulamento difere da maioria das sondas multiparamétricas de mercado, cilíndricas. Pois dessa forma, é mais fácil de reproduzir o estudo e de posicionar o painel solar. Ainda possui proteção UV garantida por cinco anos, sem elementos metálicos externos e certificação IP 65. É complementado pelo uso de cola de poliuretano, para garantir a estanquidade. A interface entre cabos, sensores e caixa é feita com prensa cabos IP 67 e cola de poliuretano.

Como os sensores ficam na parte inferior da caixa estanque, conexões de PVC do tipo luva, de 40mm de diâmetro, são coladas, com cola de cianocrilato, na caixa estanque e envolvem o corpo dos sensores, para evitar choques físicos. Esse arranjo é detalhado

na figura 5.2. O painel solar é colado, com cola de cianocrilato e poliuretano, na parte superior para melhor captação de luz.

Figura 5.2 - Posicionamento dos sensores



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

O sistema de ancoragem é feito por tiras de PVC moldadas termicamente, unidas por parafusos de aço inox com porcas travantes. As tiras envolvem a caixa estanque e uma corda é passada entre elas, que é amarrada a um ponto fixo dentro do corpo hídrico, como pode ser visto na figura 5.3.

Figura 5.3 - Sistema de ancoragem



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

5.1.7 Esquemático

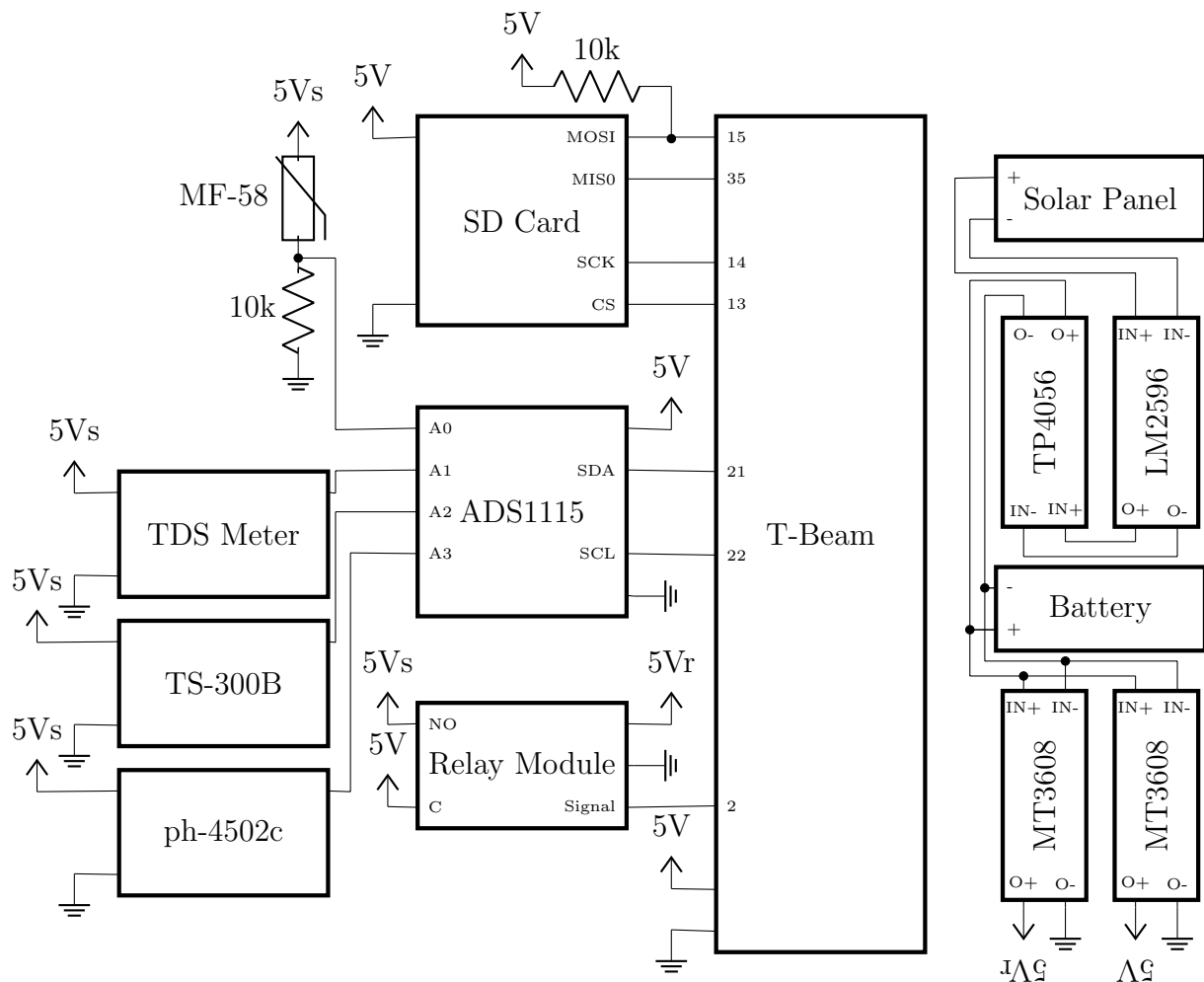
O esquemático completo do projeto pode ser visto na figura 5.4

Destacam-se as linhas 5Vs e 5Vr, que são, respectivamente, os 5V de alimentação dos sensores e do relé.

5.1.8 Montagem

A montagem do sistema foi feita em uma placa ilhada universal quadrada de 15 cm de lado. Dispuseram-se os módulos de maneira a facilitar a substituição e regulação dos

Figura 5.4 - Esquemático do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

mesmos. As ligações foram majoritariamente feitas por fios soldados e ou com conectores Dupont. Podendo ser vista na figura 5.5.

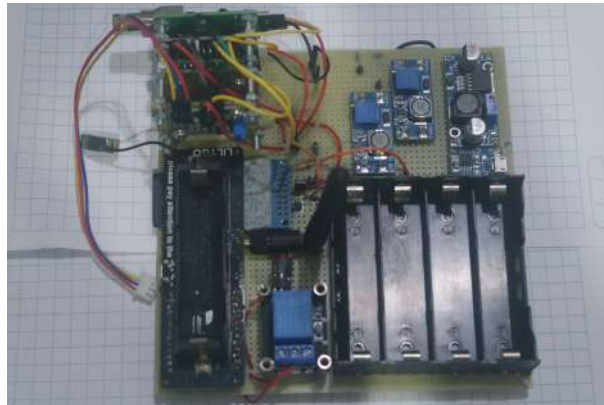
5.2 Software

Aqui são descritas as decisões referentes ao software: Decisões de desenvolvimento, uso de sistema operacional, objetivo e descrição das tarefas, tanto do transmissor, quanto do receptor e nuvem.

5.2.1 Decisões de Desenvolvimento

Para realizar o desenvolvimento do *firmware* do *datalogger*, optou-se pelo *framework* de desenvolvimento nativo da ESP32, esp-idf. Esp-idf é o acrônimo para *Espressif IoT Development Framework*, possuindo documentação ampla, aceitação no mercado e facilidade de se trabalhar com vários arquivos em projetos complexos. Já para o *gateway*, por ser um projeto mais simples, optou-se por elaborar um projeto padrão Arduino-IDE.

Figura 5.5 - Montagem do sistema



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

A versão escolhida do `esp-idf` foi a 4.2, por duas razões. A primeira é a estabilidade do *software*, possuindo maior compatibilidade com bibliotecas de terceiros e menos problemas que versões mais recentes. A segunda é a compatibilidade com o `arduino-core`. `Arduino-core` é o porte das funções e estruturas que comumente são utilizadas em projetos desenvolvidos na `Arduino-IDE`. Isso é importante, pois grande parte das bibliotecas desenvolvidas para os módulos utilizados no projeto foram criadas para serem utilizadas em projetos criados na `Arduino-IDE`, não em projetos `esp-idf`, como por exemplo as bibliotecas do ADC e do GPS.

Com o `arduino-core` sendo utilizado, um código qualquer pensado para operar na `Arduino-IDE` pode ser usado no projeto `esp-idf`. Com isso, aproveita-se as vantagens dos dois mundos: a alta disponibilidade de bibliotecas da `Arduino-IDE`, com a facilidade de desenvolvimento da `esp-idf`. Destaca-se ainda que o *fork*, variação do repositório original desenvolvido por terceiros, de [Zhong 2020](#) do `arduino-core` foi o escolhido, pela documentação e compatibilidade garantida com o `esp-idf`.

A IDE escolhida para o desenvolvimento do projeto foi o VS-code, por possuir extensões úteis ao projeto, como suporte ao `esp-idf`, `markdown`, `cmake` e `git`, além de possuir fácil utilização e vasta documentação.

O projeto foi feito majoritariamente na linguagem C, eventualmente em C++, para fins de compatibilidade. O github foi utilizado para versionamento de código e o projeto está disponível em [repositório do autor](#).

5.2.2 Sistema Operacional

Um sistema operacional é um programa que gerencia o hardware de um computador e fornece uma base para programas aplicativos e atua como um intermediário entre o usuário do computador e o hardware do computador [Silberschatz Peter B. Galvin 2012](#).

Comumente, sistemas embarcados não utilizam sistemas operacionais, devido às limitações de *hardware*. Contudo, soluções *bare metal* são difíceis de implementar, entender,

manter e verificar [Buttazzo 2011]. Soma-se a isso o fato de que os sistemas operacionais de tempo real (RTOS) são capazes de atuar com limitações de processamento e memória, o que torna a escolha ideal para o projeto.

Um RTOS é definido como um sistema no qual a corretude do sistema não depende apenas dos resultados lógicos da computação, mas também no momento em que os resultados são produzidos [Hambarde, Varma e Jha 2014].

As principais características de um sistema de tempo real são: Suporte à multi tarefa, agendamento baseado em prioridade, resposta rápida a interrupções externas, mecanismos básicos para comunicação e sincronização, *kernel* pequeno e com troca de contexto rápida, RTC pode ser utilizado como a referência interna de tempo do sistema [Buttazzo 2011].

Dentro desse contexto, o FreeRTOS é um sistema operacional em tempo real simples e fácil de usar. Seu código fonte é escrito em C e assembly. É *open source* e tem pouco mais de 2.200 linhas de código. O FreeRTOS foi oficialmente portado para a maioria das arquiteturas para sistemas embarcados [Déharbe, Galvao e Moreira 2009]. Conta ainda com muitos anos de mercado, confiabilidade, documentação, exemplos, suporte e de código aberto. Por essas razões, foi a escolha para o projeto.

5.2.3 Tarefas

Aproveita-se da característica de suporte a multi tarefas dos RTOS e estrutura-se o *software* em diferentes tarefas que se comunicam entre si por meio de estruturas do tipo fila. As filas são esvaziadas periodicamente, de acordo com cada tarefa. Esse arranjo foi escolhido em detrimento ao uso de interrupções pela simplicidade de implementação.

Nas seções seguintes serão descritas as tarefas do projeto, tanto do transmissor quanto do receptor.

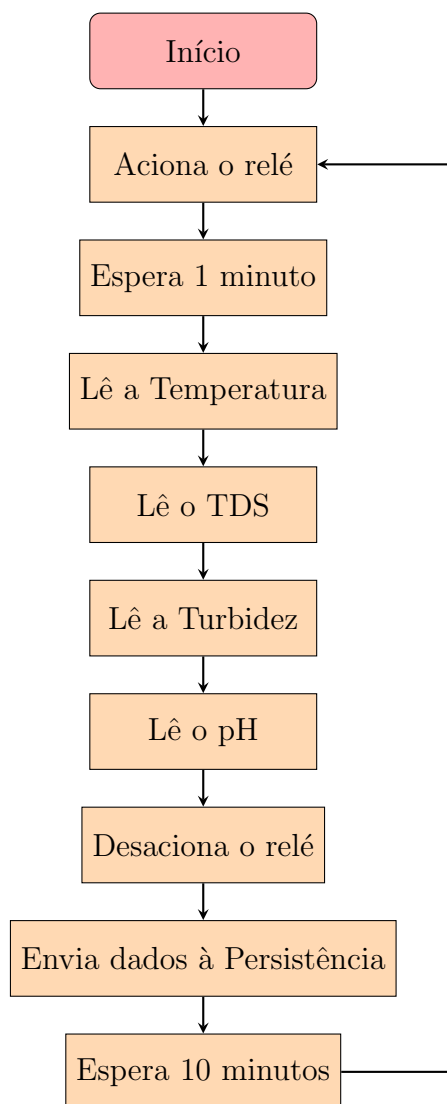
5.2.4 Datalogger

O transmissor é estruturado em torno de quatro tarefas: Coleta, Persistência, Transmissão e GPS.

Coleta

A coleta é responsável pela captura dos dados dos sensores. Inicialmente, aciona-se o relé ligando a alimentação dos sensores. Espera-se um minuto para que os sensores estabilizem o comportamento. Em seguida, realiza-se a aquisição e conversão de dados na seguinte ordem: Temperatura, TDS, Turbidez e pH. Ela é relevante, pois a temperatura é utilizada no cálculo das grandezas seguintes, e o sensor de pH é o que demora mais tempo para estabilizar. Para evitar ruídos, são feitas 32 leituras, espaçadas por 40ms, e é retornada a mediana dessas amostras. Por fim, o relé é desligado, o que por sua vez corta a alimentação dos sensores, e os dados coletados são colocados na fila da tarefa de Persistência. Esse processo se repete a cada 10 minutos. O fluxograma pode ser visto na figura 5.6.

Figura 5.6 - Fluxograma da tarefa de coleta dos dados.



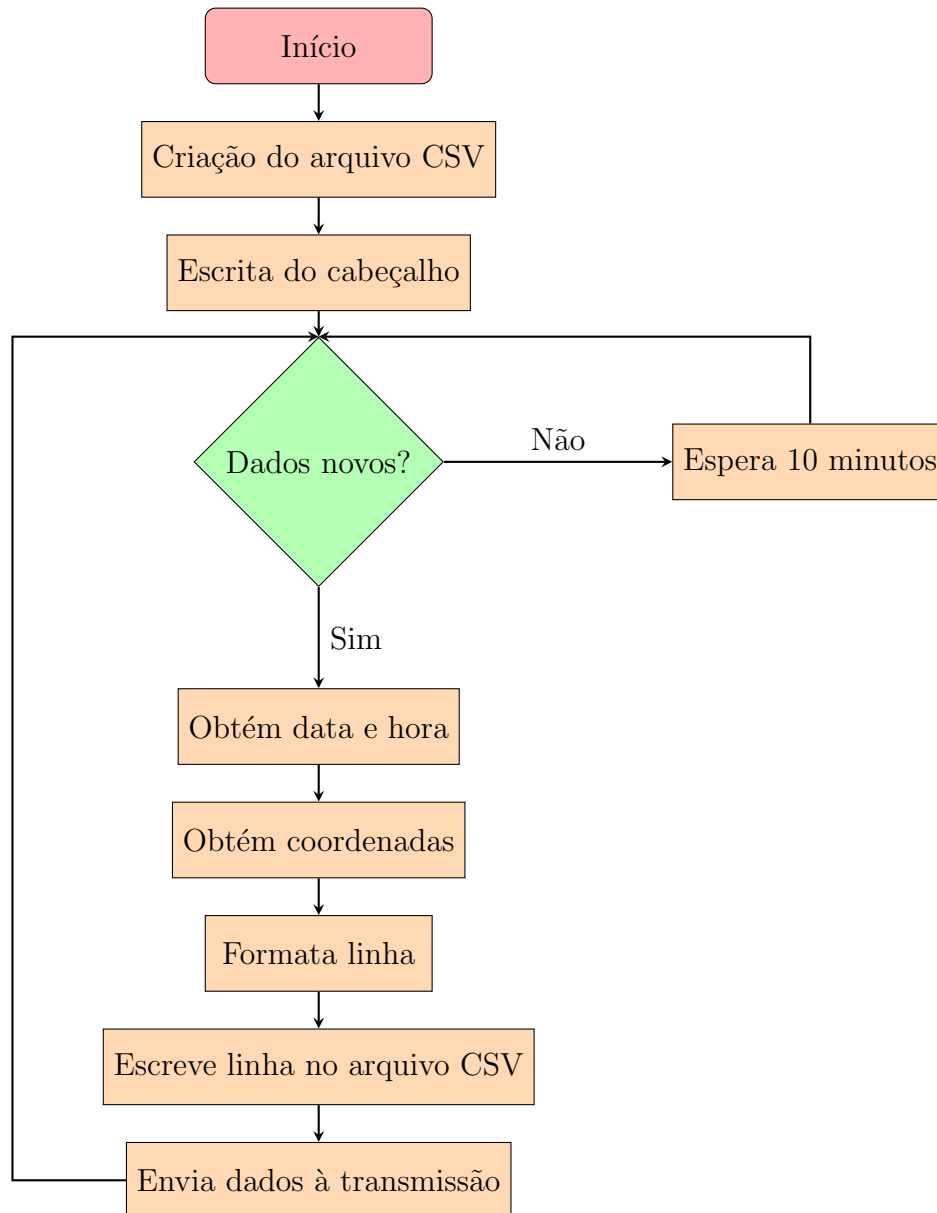
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Persistência

Já a Persistência cria o arquivo em que os dados serão salvos, escreve a linha de cabeçalho e aguarda os dados da tarefa de coleta. Uma vez que há dados na fila, aglutina-se a essa informação a data e hora atuais, a última localização vinda do GPS, e formata-se uma linha no padrão CSV. Essa linha é incrementada no final do arquivo previamente criado, também sendo enviada à tarefa de Transmissão. O fluxograma pode ser visto na figura

[5.7](#)

Figura 5.7 - Fluxograma da tarefa de persistência dos dados.

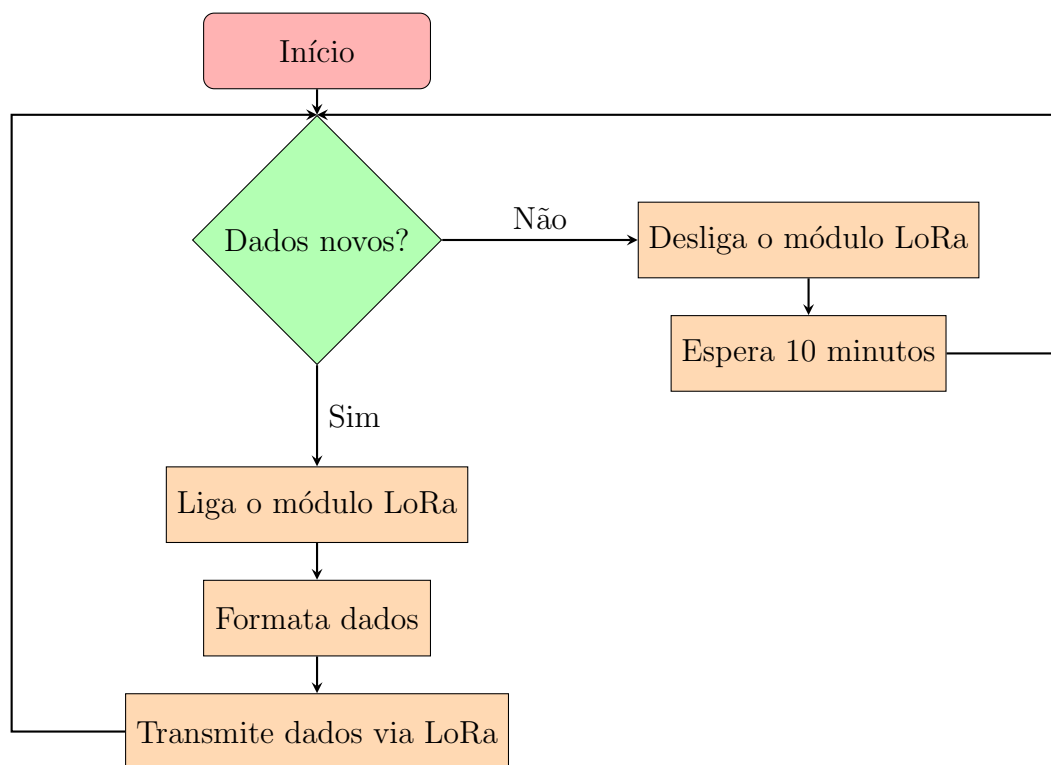


Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Transmissão

A tarefa de Transmissão é responsável por emitir, via LoRa, a informação coletada e formatada pelas tarefas anteriores. Primeiramente, checka-se se há alguma informação nova a ser transmitida; em caso positivo, inicializa-se o módulo LoRa, transmite-se a mensagem e retoma-se a checagem. Caso contrário, desliga-se o módulo LoRa e aguarda-se 10 minutos, para repetir o ciclo novamente. O fluxograma da tarefa pode ser visto na figura [5.8](#).

Figura 5.8 - Fluxograma da tarefa de transmissão dos dados.

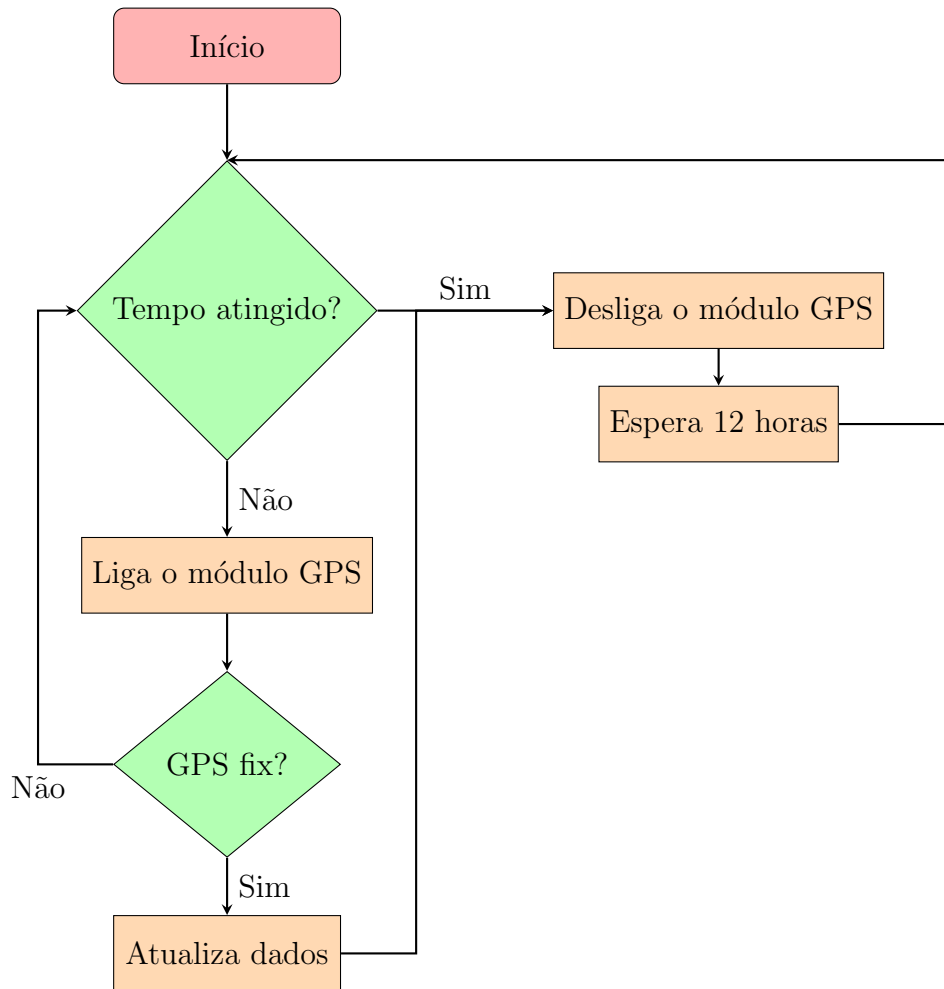


Fonte: Elaborado pelo autor

GPS

Por fim, a tarefa do GPS liga o módulo, tenta realizar a comunicação com os satélites durante 15 minutos, no processo conhecido como GPS *fix*, e, caso seja possível, atualiza os dados de latitude, longitude e tempo real. Após isso, ou em caso negativo da comunicação, o módulo é desligado e aguardam-se 12 horas para uma nova tentativa. Esse intervalo é longo devido ao alto consumo energético do módulo e a baixa necessidade de atualização desses dados. O fluxograma da tarefa pode ser visto na figura [5.9](#)

Figura 5.9 - Fluxograma da tarefa de GPS.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

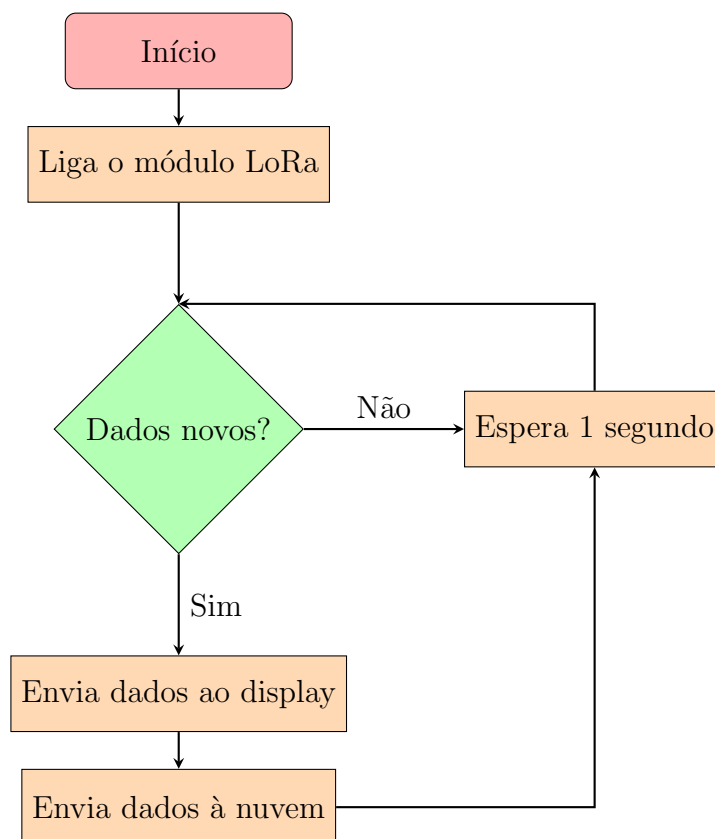
5.2.5 Gateway

Já o *gateway*, possui três tarefas básicas: Recepção, *Display* e Nuvem.

Recepção

É responsável por receber os dados vindos do transmissor via LoRa. Primeiramente, liga-se o módulo LoRa, ativa-se o modo de recepção e aguardam-se novas mensagens. Uma vez que uma mensagem é recebida, ela é repassada as tarefas de *display* e nuvem. Espera-se 1 segundo e o processo se repete. O fluxograma da tarefa pode ser visto na figura [5.10](#).

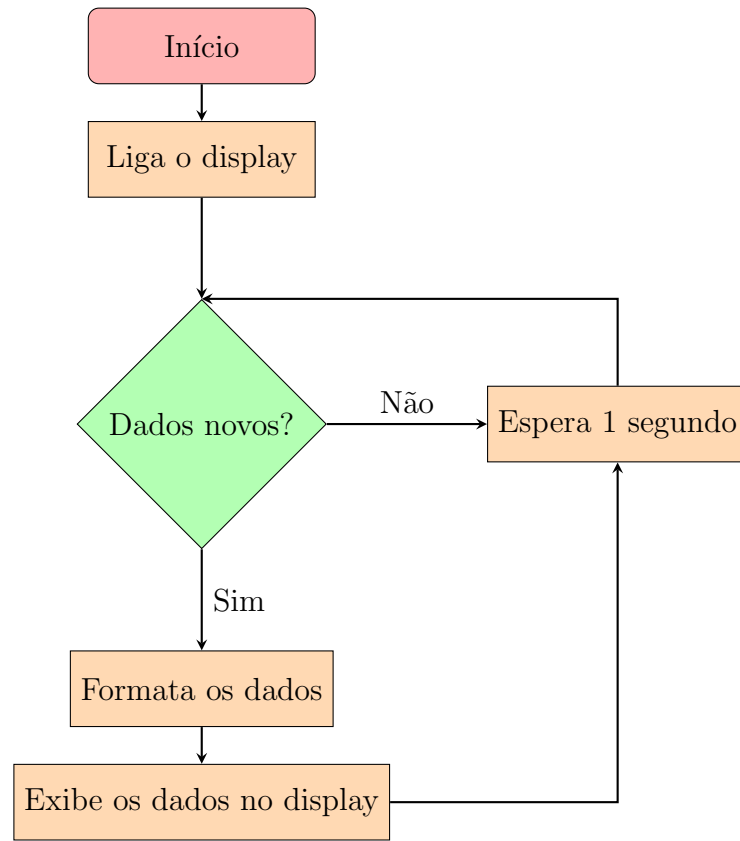
Figura 5.10 - Fluxograma da tarefa de recepção dos dados.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Display

É responsável por exibir os dados lidos no *display*. Primeiramente, inicializa o *display*, checka se há dados novos a serem exibidos, em caso positivo, formata os dados no padrão do *display* e os exibe. Caso negativo, espera-se 1 segundo e o ciclo se repete. O fluxograma da tarefa pode ser visto na figura [5.11](#).

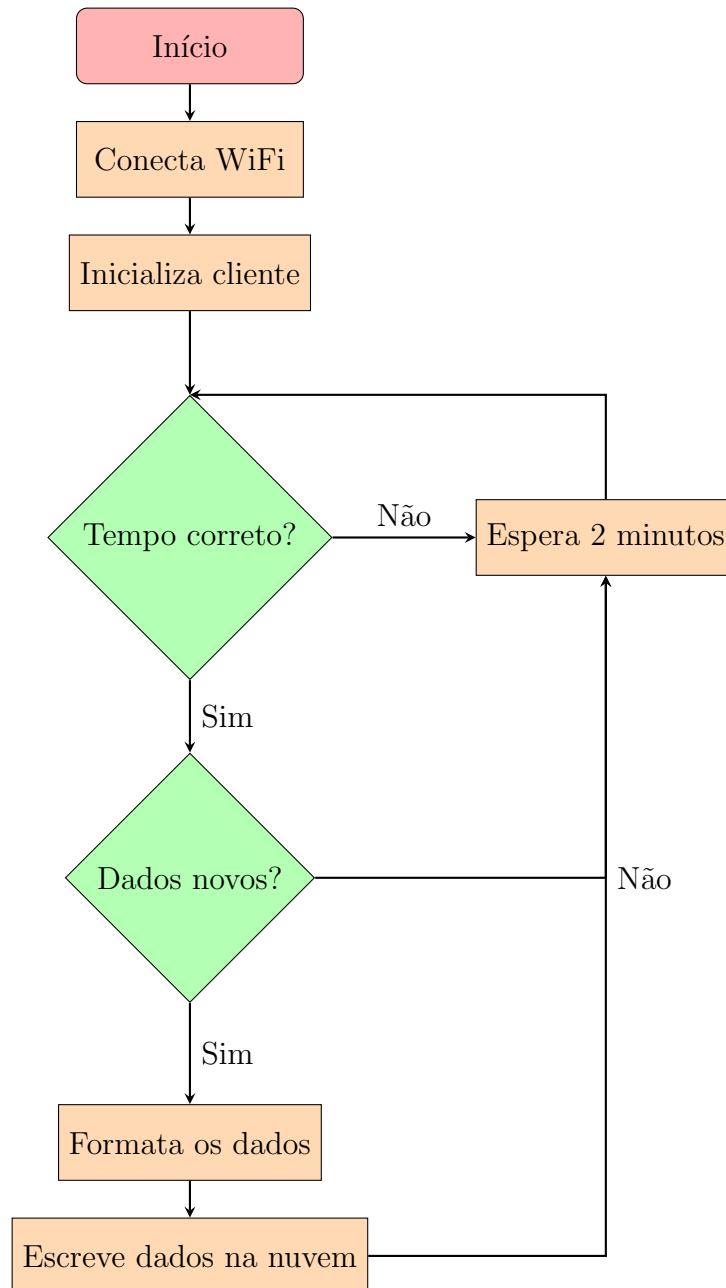
Figura 5.11 - Fluxograma da tarefa de do *display*.

Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Nuvem

É responsável por transmitir os dados à nuvem. Primeiramente, conecta-se a Wi-Fi, e inicializa-se o cliente da nuvem. Caso a diferença entre o tempo atual e o instante da última postagem for igual ou superior que 2 minutos, checka-se se há dados novos a serem postados. Em caso positivo, formata-se os dados para o padrão do ThingSpeak e envia os dados à nuvem. Em caso negativo, espera-se dois minutos e tenta-se novamente. O fluxograma da tarefa pode ser visto na figura [5.12](#)

Figura 5.12 - Fluxograma da tarefa de Nuvem



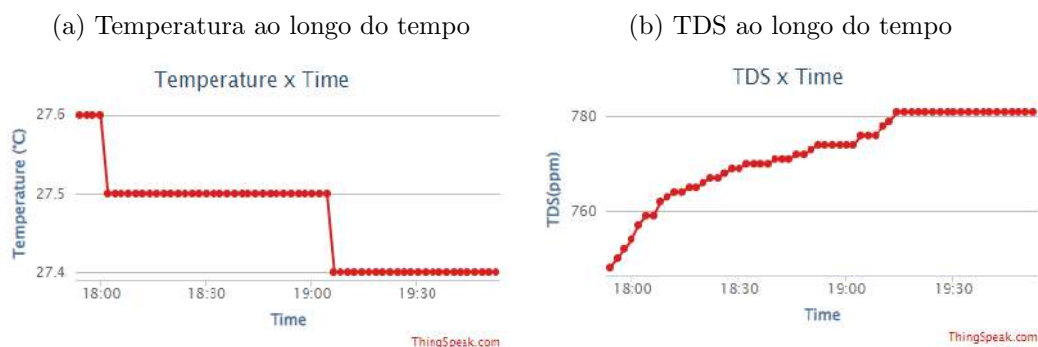
Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

5.2.6 ThingSpeak

A nuvem escolhida para publicar os dados foi a ThingSpeak. Que é uma aplicação e API de IoT de código aberto para armazenar e recuperar dados dos sensores usando o protocolo HTTP pela internet [Deekshath et al. 2018]. Além de dar suporte a gráficos, onde é possível visualizar a leitura dos sensores em tempo real. Permitindo análises básicas, como mudanças abruptas, média e mediana dos dados. Exemplos desses gráficos podem ser vistos na figura 5.13. Também é possível exportar os dados em diversos formatos, como CSV, JSON e XML, o que facilita análises mais profundas sem encerrar as operações de

coleta dos dados.

Figura 5.13 - Gráficos no ThingSpeak.



Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

A publicação de dados nessa nuvem implica na criação de um canal, este pode ser público ou privado. Cada canal possui diferentes campos, de entrada ou saída. Neste projeto, utilizou-se apenas campos de entrada. Cada um deles é descrito na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Descrição dos campos na nuvem

Campo	Descrição
1	Temperatura
2	TDS
3	Turbidez
4	pH
5	Data
6	Hora
7	Latitude
8	Longitude

Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Contudo, nesse trabalho foi utilizado o plano para estudante, que é gratuito e possui limitações. Como limitar o número de mensagens enviadas e só permitir a visualização dos dados das últimas 24 horas, apesar de permitir o *download* de toda a série. Em uma aplicação profissional, deve se considerar os custos de anuidade do plano que melhor se adeque a situação. Ou, ainda, a migração para outra nuvem e até a construção de uma própria.

6. Resultados

Nesta seção, apresentam-se os detalhes de implementação, custos, local de teste, dados coletados e pontos de melhoria do projeto.

6.1 Custos

O valor total do projeto girou em torno de R\$ 1.283,00, praticamente um salário mínimo em vigência no período do cálculo. Esse valor cobre tanto o emissor quanto o receptor. Os preços são detalhados na tabela [6.1](#)

Tabela 6.1 - Custos do projeto

Item	Quantidade	Custo Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
T-Beam	1	360	360
Heltec Lora v2	1	170	170
ADS1115	1	25	25
Módulo Relé	1	13	13
Módulo SD	1	15	15
Cartão SD	1	30	30
MF-58	1	17	17
TDS Meter	1	80	80
ph4502c	1	130	130
TS-300B	1	120	120
Painel Solar	1	100	100
TP4056	1	5	5
LM2596	1	10	10
MT3608	2	8	16
Bateria 18650	4	20	80
Caixa estanque	1	69	69
Prensa cabo	1	3	3
Placa ilhada 15x15 cm	1	40	40
Total			1283

Fonte: Elaborado pelo autor, (2023)

Os custos do projeto são calculados com base no mercado nacional, em outubro de 2023, sem considerar valores de frete e insumos como cola, solda, cabos, conectores e soluções de calibração.

Em comparação com equipamentos comerciais à venda no Brasil, o mais barato deles,

modelo AK87, custa em torno de R\$ 1500,00. Contudo, esse preço contempla apenas o *datalogger*- cada grandeza medida necessita de uma sonda específica, custando entre R\$ 700,00 e R\$ 1000,00 cada. Ademais, o sistema exige que um operador realize a medição em campo.

Vale-se ressaltar que não se encontrou nenhum produto disponível no país que tenha a característica de medir continuamente sem um operador em ambiente remoto e/ou que transmita os dados em tempo real em longas distâncias.

6.2 Primeiro teste

Para identificar possíveis problemas, realizou-se um primeiro teste com duração aproximada de três dias. O ensaio foi feito em um pequeno reservatório, com cerca de 20 litros de água, como pode ser visto na figura [6.1](#). Vale-se ressaltar que o projeto não apresentou vazamentos, falhas de bateria ou de persistência dos dados.

Figura 6.1 - Condições do primeiro teste



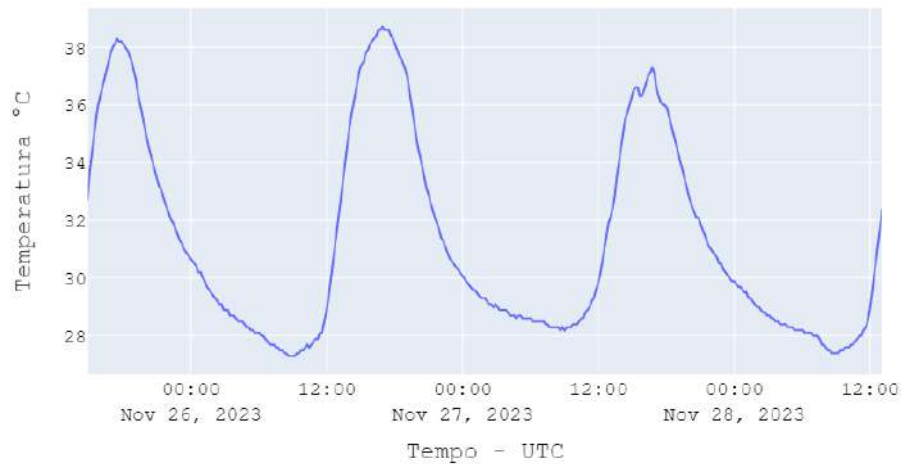
Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

6.2.1 *Datalogger*

Temperatura

Ao analisar os dados de temperatura, nota-se um comportamento cíclico, como pode ser visto na figura [6.2](#), que é coerente com a passagem do sol. Pontua-se que o eixo das abscissas refere-se ao horário UTC, que é adiantado 3 horas em relação ao fuso horário do teste (GMT-3). A temperatura máxima foi de 38.7°C, às 16h55 do dia 26 de novembro de 2023. Já a temperatura mínima foi de 27.3°C, entre 8h36 e 9h09 também do mesmo dia.

Figura 6.2 - Temperatura ao longo do tempo no primeiro teste



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

TDS

Ao analisar os dados de TDS, nota-se um comportamento crescente, como pode ser visto na figura [6.3](#). Como o teste foi feito em um recipiente de baixo volume, a evaporação da água pesa, e faz com que aumente a concentração de sólidos dissolvidos no meio. O valor mínimo foi de 118 ppm, observado entre 16h43 e 17h38 do dia 25 de novembro de 2023. Já o máximo foi de 148 ppm, anotado entre 9h01 e 12h42 do dia 27 de novembro de 2023.

Figura 6.3 - TDS ao longo do tempo no primeiro teste



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

pH

Comportamento semelhante é observado nos dados de pH, que é visto na figura 6.4. Como a quantidade de sólidos dissolvidos aumentou ao longo do tempo, o pH também se alterou; no caso, esse valor subiu. O valor mínimo foi de 6.2, registrado em 15h36 do dia 25 de novembro de 2023. O valor máximo foi de 7.8, anotado entre 03h39 e 13h04 do dia 27 de novembro de 2023.

Figura 6.4 - pH ao longo do tempo no primeiro teste

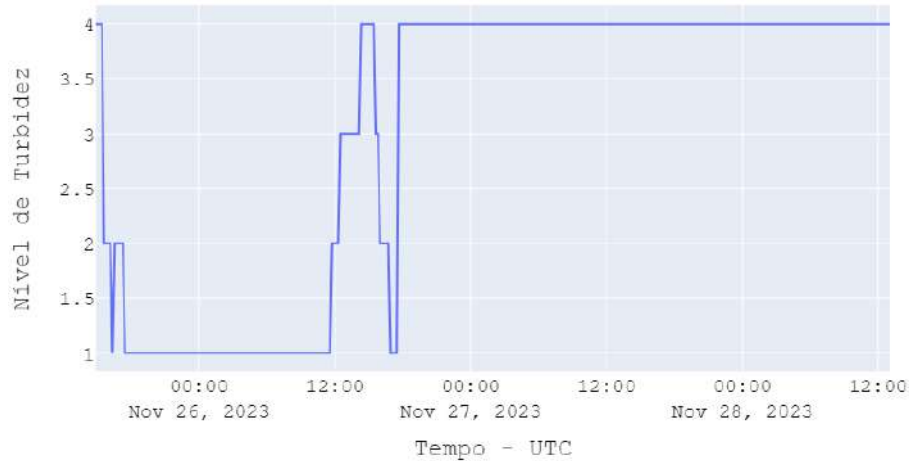


Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

Turbidez

A turbidez apresentou um comportamento incorreto, com variação. Além disso, acusou um nível de turbidez incoerente com o ensaio, visto que a água permaneceu límpida durante todo o teste, como pode ser visto na figura 6.5. Ao analisar o código e realizar novos testes de bancada, notou-se um erro de implementação. A ordem dos níveis de turbidez estava invertida, onde 1 estava como o mais turvo e 4 o mais límpido. A variação observada pode ser explicada por algum sólido em suspensão de tamanho grande, que se alojou no sensor no início do teste, e acabou se desprendendo sozinho depois. O que fez com que o sensor voltasse a ter o comportamento esperado, ao indicar a água transparente. O erro foi corrigido sem maiores problemas.

Figura 6.5 - Turbidez ao longo do tempo no primeiro teste



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

GPS

O GPS não retornou posições válidas. Notou-se que a antena se desprendeu da placa e permaneceu em uma posição não favorável para o recebimento de sinal. O painel solar na parte superior também pode contribuir para o não recebimento do sinal. Para solucionar essa questão, utilizou-se cola para reposicionar a antena.

6.2.2 Gateway

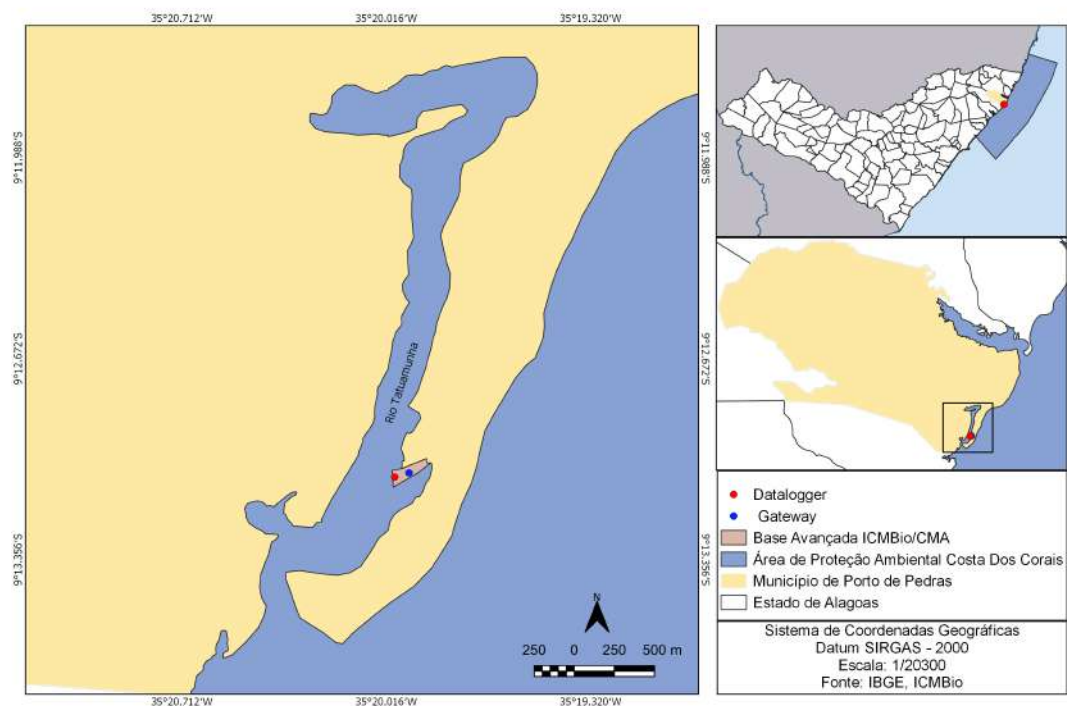
Graças à longa duração do teste, foi possível observar um erro que passara despercebido durante os testes de desenvolvimento. Ao longo do tempo, notou-se que a memória alocada ultrapassava o limite do controlador, o que fazia com que o *gateway* reiniciasse. Contudo, por reiniciar, o equipamento voltava à operação sozinho, e não atrapalhou o andamento do teste.

Dos 385 pacotes enviados pelo *datalogger* ao *gateway*, 170 foram recebidos e transmitidos à nuvem com sucesso, o que totalizou 44% de aproveitamento dos pacotes. Como a informação é persistida no cartão de memória e o volume de dados é alto, esse valor baixo de taxa de recebimento não chega a ser um grande problema.

6.3 Teste de campo

Foi realizado um teste em campo para validar o projeto, entre os dias 5 e 8 de dezembro de 2023. O ensaio aconteceu na Base Avançada do ICMBio e Centro de Mamíferos Aquáticos, localizado no município Porto de Pedras em Alagoas. Como pode ser visto na figura [6.6](#)

Figura 6.6 - Localização do teste de campo



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

Esse local é destinado à preservação e reabilitação do peixe-boi marinho (*Trichechus manatus*), mostrado na figura 6.7. Tendo acesso a margem do Rio Tatuamunha, com três áreas cercadas para manejo dos animais. Vale-se ressaltar que pela proximidade com a foz do rio, cerca de 1,5 km, o local sofre forte influência da maré oceânica.

Figura 6.7 - Peixe-boi marinho (*Trichechus manatus*)



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

Para evitar acidentes com os animais, que são de grande porte e muito curiosos, o

equipamento foi instalado entre estacas de madeira, como pode ser visto na figura 6.8.

Figura 6.8 - Posicionamento do datalogger em campo



Fonte: Eduardo Macedo, (2023)

6.3.1 *Datalogger*

Caixa estanque

Para garantir a estanquidade, utilizou-se um vedante PU e fita adesiva reforçada na junção entre a tampa e o corpo da caixa, como pode ser visto na figura 6.9.

Figura 6.9 - Vedação entre a tampa e a caixa



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

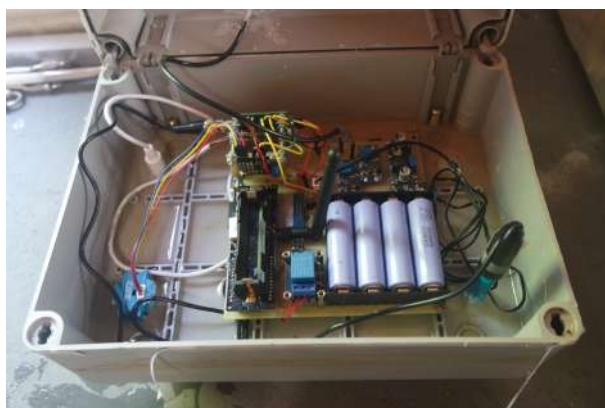
Ao final do teste, foi possível notar que bastante matéria orgânica se depositou na parte da caixa que esteve em contato direto com a água. Como pode ser visto na figura 6.10.

Figura 6.10 - Acúmulo de matéria orgânica no *datalogger*

Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

Internamente, houve um vazamento na junção de algum dos sensores com a caixa, o que gerou um acúmulo de água no fundo. Registrado na figura 6.11. Contudo, como a placa ficou montada sobre um suporte, a água não atingiu os circuitos, e ela pôde operar corretamente pela maior parte do teste.

Figura 6.11 - Acúmulo de água no fundo da caixa estanque



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

Dados

Mesmo com o vazamento, foi possível recuperar os dados salvos no cartão de memória. Das 391 entradas, 357 foram válidas. As 21 primeiras coletas foram descartadas, pois representam o momento em que o projeto estava ligado, mas com a cola PU secando, ainda em terra.

Três leituras do início do dia 8 e as dez últimas do teste foram desconsideradas por retornarem valores fora da realidade, como temperaturas negativas e pH acima da escala. Essas leituras errôneas podem ter ocorrido pelo contato com a água do vazamento ou por alguma perturbação sobre o projeto.

Dos dados restantes, nota-se que algum evento ocorreu por volta das 20h00 do dia 7,

visto que há alterações em três dos quatro padrões observados nas grandezas medidas. A informação coletada após esse evento ainda pode ser considerado válida, visto que os valores estão dentro da escala prevista. Contudo, principalmente para o sensor de pH, a confiança é reduzida. Esse ponto será abordado nas próximas seções.

Temperatura

Novamente, observa-se um comportamento cíclico, com um período de cerca de 24 horas, muito semelhante ao teste inicial, que é condizente com a passagem do sol. A temperatura mínima foi de 28.7°C, entre 9h50 e 10h23 do dia 7. Já a máxima foi de 32.7°C, entre 15h45 e 15h56 do mesmo dia, como pode ser visto na figura 6.12.

Figura 6.12 - Temperatura ao longo do tempo no teste de campo

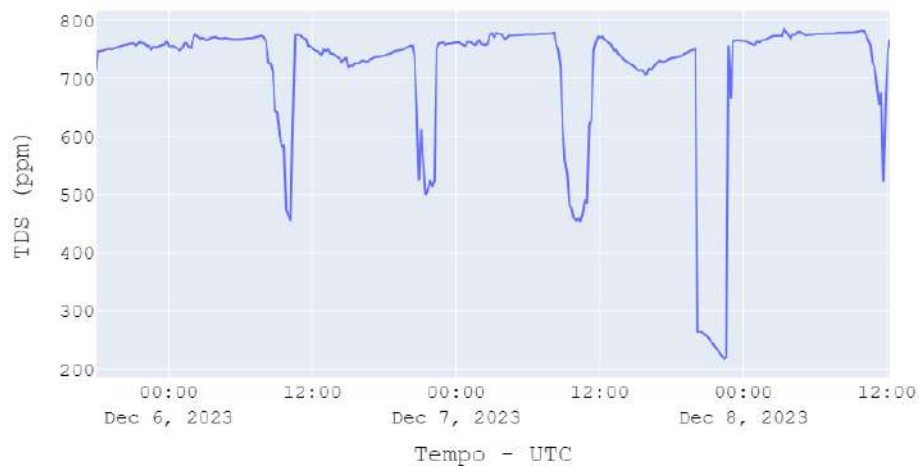


Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

TDS

Diferentemente do primeiro teste, a evaporação não interferiu muito nas medições. O comportamento dessa vez é cíclico: o valor de TDS fica em um platô de 700 a 780ppm, que dura cerca de 10 horas, seguido de um declive de 450 a 550ppm que dura aproximadamente 2 horas, totalizando um período próximo de 12 horas. Esse comportamento, posto na figura 6.13, pode ter relação com a passagem da maré, devido ao aumento e redução da água do mar no sistema.

Figura 6.13 - TDS ao longo do tempo no teste de campo



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

A exceção desse padrão é feita pelo declive no dia 7, que foi muito mais acentuado que nos outros dias, e ficou abaixo dos 300 ppm. Contudo, os dados posteriores voltaram ao comportamento anterior. O valor mínimo foi de 217ppm, registrado às 22h35 desse dia; já o valor máximo foi de 784ppm, às 03h23 do dia 8.

pH

O pH, também teve um comportamento cíclico, com um período aproximado de 12 horas (como pode ser visto na figura [6.14](#)): primeiro com um platô de aproximadamente 7.3 que dura cerca de 7 horas. Seguido de um pico próximo de 8.4 que dura 5 horas. E também pode ter relação com a maré.

Figura 6.14 - pH ao longo do tempo no teste de campo

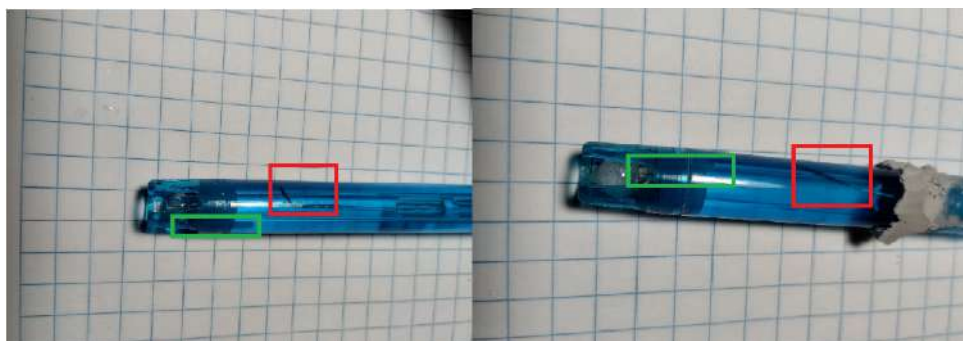


Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

A exceção desse padrão ocorre a partir do evento do dia 7, que gerou uma crescente na curva que é fora da realidade, apesar de estar dentro da escala de pH. Por se tratar de uma grandeza logaritmica, caso o corpo hídrico tivesse chegado a esse nível de alcalinidade, haveria mortandade de espécies, o que não foi observado. O valor máximo de 13.1 foi observado entre 10h13 e 10h25 do dia 8; Já o valor mínimo foi de 6.4, no dia 7, as 22h02.

Ao comparar o estado do sensor com outro novo, notou-se duas alterações físicas, como podem ser vistas na figura 6.15. À esquerda, observa-se o sensor não usado e à direita o usado no teste. Pelo destaque em verde, percebe-se que a peça cilíndrica do usado moveu-se para fora, o que pode ter favorecido a entrada de água no sensor, inutilizando sua solução interna. Já o destaque em vermelho aponta uma diferença de angulação do eletrodo, que pode ter prejudicado ainda mais as leituras.

Figura 6.15 - Comparação entre os sensores de pH, novo à esquerda e usado à direita.

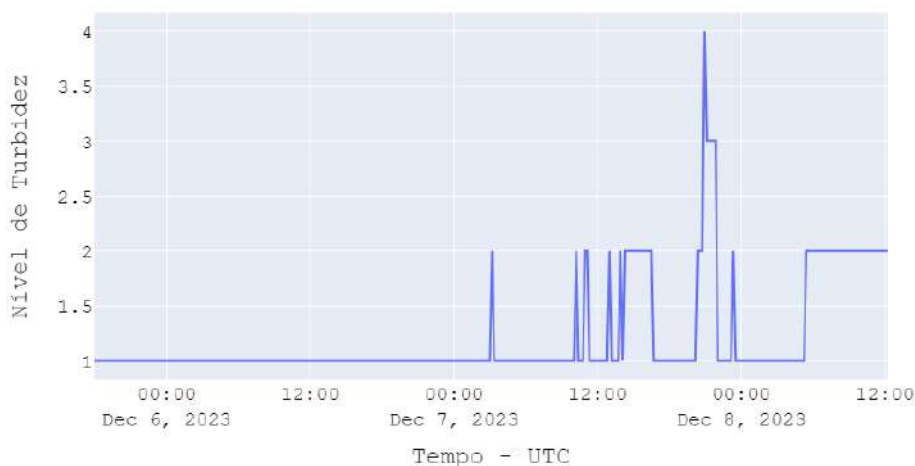


Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

Turbidez

A turbidez, passou a maior parte do tempo constante no nível 1, e, eventualmente no nível 2. Exceto pelo evento dia 7, onde ocorreu um pico para o nível 4 às 20h55, como pode ser visto na figura [6.16](#).

Figura 6.16 - Turbidez ao longo do tempo no teste de campo



Fonte: Elaborado pelo Autor, (2023)

Pelo comportamento do rio, com a influência da maré, esperava-se uma variação maior dessa grandeza. Possivelmente, esse resultado pode ser explicado pela medida ser da superfície da coluna d'água e pela proteção ao redor do sensor, que pode ter represado uma quantidade de água límpida ao redor do sensor e evitado leituras mais precisas.

GPS

Novamente, não houve qualquer posição válida coletada. O recebimento do sinal pode ter sido prejudicado pela placa solar, acima da antena. Contudo, isto não influenciou no andamento do teste, já que o equipamento não se deslocou, nem a duração do ensaio foi grande o bastante para que o atraso do relógio do controlador seja relevante. A utilidade dessa característica é discutida na seção [6.4](#).

6.3.2 Gateway

O *gateway* operou de forma parcialmente correta, identificando 2 pontos falhos. Primeiramente, não se fizeram rotinas para tratar instabilidade da rede Wi-Fi. No primeiro teste e no desenvolvimento, isso não foi um problema, visto que a conexão se manteve sempre estável. No ensaio em campo, a rede apresentou instabilidades e não havia reconexão automática, sendo necessário reiniciar manualmente o equipamento. Outro ponto falho foi a conexão do cabo USB de alimentação, que foi afetada por um mau contato e desligou o

equipamento no final do teste. Entretanto, quando devidamente alimentado e conectado, funcionou com 48% de recebimento dos dados. Nessas janelas dos 114 pacotes enviados pelo *datalogger*, 55 foram recebidos e processados pelo *gateway*.

6.3.3 Nuvem

Enquanto recebeu dados do *gateway*, a nuvem operou corretamente, inclusive permitindo identificar os problemas apontados nele, visto que o tempo de atualização da nuvem ultrapassou muito o que foi observado nos testes preliminares. Assim, ela se mostrou uma ferramenta útil não somente para visualização dos dados, mas também para a identificação de problemas.

6.4 Pontos de melhoria

Os principais pontos de melhorias se concentram nos pontos de falha apontados durante os testes. A estanquidade e o GPS, no *datalogger*. E o tratamento de falhas de conexão Wi-Fi e elétrica no *gateway*. Além do aperfeiçoamento em pontos que não são exatamente falhas, como o uso do relé.

A maior parte dos problemas podem ser sanados com uma profissionalização do design do *hardware*, com uma placa de circuito específica para esse propósito, sem o uso de *kits* de desenvolvimento e módulos genéricos. Isso permitiria tanto uma redução nos custos de fabricação, quanto no consumo energético, o que abriria margem para repensar o projeto como uma solução *low power*, e isso aumenta ainda mais seu potencial de inovação. Detalhes específicos são discutidos nas próximas seções.

6.4.1 Hardware

Relé

Revisitar os testes com transistor e abolir o uso do relé são melhorias factíveis de serem implementadas no curto prazo. Contudo, em um cenário de produção de pescado, pode ser interessante manter o relé para acionar um aquecedor, caso a temperatura baixe, ou ligar uma bomba, caso o TDS suba, por exemplo. Vale-se ressaltar que o relé também serviu como um retorno sonoro de funcionamento para o operador.

GPS

O uso do GPS também pode ser revisto. Sua revogação abre margem para um *kit* de desenvolvimento que não precise dessa característica, isto é, substancialmente mais barato. Todavia, perde-se a opção de segurança caso o equipamento se desprenda do ponto de ancoragem. A atualização do RTC pode ser realizada via LoRa, com o *gateway* enviando mensagens ao *datalogger*.

Alimentação

Utilizar baterias mais simples, de chumbo ácido, pode ser uma forma de baratear e reduzir, ainda mais, o preço do *datalogger*. Também é interessante prever uma bateria para o *gateway*, e uma conexão mais estável que a USB, para que opere mesmo em caso de instabilidade de rede elétrica.

Estanquiedade

Constatou-se que os vazamentos foram um problema no teste prático, e isso precisa ser solucionado para uma operação contínua. Uma alternativa é o uso de resina epóxi na interface dos sensores com o meio externo; porém, essa estratégia diminui a facilidade de manutenção e eventual troca de peças.

Para proteção da placa em si, caso a vedação falhe, pode-se, também, resiná-la, o que melhora tanto a resistência à água quanto à vibração do ambiente. Posicionar a placa no verso da tampa, ao invés do fundo da caixa, deixa-a mais segura em caso de vazamentos.

O simples uso de uma caixa estanque com uma certificação superior, como IP69, melhora a estanquiedade e diminui a necessidade de passagem de cola antes de entrar em operação. A adição de um absorvedor de umidade, como sílica gel, também é uma melhoria simples de ser feita e que prolonga a vida útil do projeto.

Proteção dos sensores

No geral, a proteção dos sensores funcionaram sem problemas, mas a adição de furos para melhorar o fluxo de água ao redor dos detectores é uma melhoria simples de ser feita que mitiga o problema. Contudo, deve-se considerar o acúmulo de matéria orgânica ao redor deles.

6.4.2 *Software*

Sistema operacional

Em matéria de *software*, é possível focar em uma solução mais versátil, que possa ser replicada com outros microcontroladores, diferentes da esp32. Isso abre espaço para um *firmware* feito com Zephyr, que é um sistema operacional mais voltado para este fim, diferentemente do FreeRTOS. O uso do Zbus, barramento de dados do Zephyr, como peça central da arquitetura do sistema, facilita a flexibilização do projeto para receber novos sensores e formas de comunicação.

Rede *Mesh*

Em cenários de grandes reservatórios, com muitos *dataloggers* em operação simultânea, pode ser interessante repensar a comunicação entre eles, possivelmente formando uma rede *mesh*, para retransmitir a informação até o *gateway*. Também é interessante prepará-lo para tratar a informação vinda de múltiplos equipamentos.

Wi-Fi

Em cenários de instabilidade do Wi-Fi, é importante fazer uma rotina de reconexão automática, para que a nuvem seja sempre nutrida com dados novos, inclusive com a possibilidade de trocar de rede, caso necessário.

7. Conclusão

Este trabalho apresentou um protótipo de uma possível solução de baixo custo para o monitoramento de qualidade de água. Formado por três eixos principais: *Datalogger*, *Gateway* e Nuvem. O primeiro coleta, salva, em cartão de memória, e transmite dados ao segundo via LoRa. Este os repassa via Wi-Fi ao terceiro. Que permite a visualização da informação em tempo real.

Para tal, foi desenvolvido dois *firmwares*, um para o *datalogger* e outro para o *gateway*, *multi thread* com FreeRTOS, o que facilita a organização e manutenção do código. Também foi produzida uma placa de circuito, com a união de diversos módulos de uso geral e alta disponibilidade, o que garantiu o baixo custo do projeto e a sua reprodutibilidade. Além disso, foi apresentado o processo de calibração dos sensores e o resultado de um teste prático real em ambiente não controlado.

Apesar de existirem muitos pontos de melhoria, já que se trata de um protótipo, foi possível identificar a viabilidade da arquitetura proposta. O *datalogger* operou de forma confiável, exceção feita pela vedação e pelo GPS, e pôde adquirir, persistir e transmitir os dados durante quase todo o teste prático. O *gateway* enfrentou problemas com a instabilidade da rede Wi-Fi e das conexões elétricas; contudo, enquanto teve condições ideais, operou corretamente e nutriu a nuvem, que exibiu os dados em tempo real à distância, e, ao parar de receber novas informações, serviu de alerta para problemas no sistema.

Portanto, a arquitetura proposta se mostrou viável para a resolução do problema, principalmente no enfoque temporal, tanto para coleta contínua, quanto pela visualização praticamente ao vivo dos dados. Esta característica permite, inclusive, a rápida tomada de decisão em caso de alguma alteração no ambiente. Feitas as melhorias pontuadas na seção anterior, o projeto pode ser aplicado em situações diversas: monitoramento e fiscalização ambiental, pesquisa acadêmica, tratamento e armazenamento de água, hidrelétricas, aquaponia, criação de peixes e outros organismos aquáticos e manutenção de aquários e piscinas. A partir disso, são sugeridos trabalhos futuros na seção [7.1](#).

7.1 Trabalhos futuros

7.1.1 Rede Mesh

Montar uma arquitetura em que vários *dataloggers* atuem juntos, podendo retransmitir as mensagens uns dos outros até que atinjam um *gateway*. Essa mudança enfrenta diretamente o desafio de cobrir espacialmente um grande reservatório.

7.1.2 *Low Power*

Repensar o projeto para uma aplicação *low power* é um grande desafio, que exige mudanças substanciais de *software* e *hardware*. Porém, pode ser utilizado em cenários específicos, que não haja fontes diretas para recarregar a bateria e com baixa necessidade de comunicação. Como a medição de corpos hídricos subterrâneos ou cavernícolas, por exemplo.

7.1.3 Projeto de *Hardware*

Um projeto de *hardware* específico representará um barateamento substancial da solução apresentada. Além de melhorias mecânicas, como um formato que favoreça a estanqueidade e a reprodutibilidade.

7.1.4 Modularização do *firmware*

Repensar o *firmware* de maneira mais modularizada, de maneira que aceite novos sensores e ou novas formas de comunicação sem muito esforço. O que favorece a sua aplicação em cenários que os sensores ou formas de comunicação utilizados não sejam suficientes.

7.1.5 Produção

Já em um cenário de culturas aquáticas, o projeto pode ser utilizado para acionar outros equipamentos caso seja necessário. Ligar um aquecedor se a temperatura ficar abaixo do ideal, ou ligar uma bomba para renovar a água, caso a turbidez ou o TDS estiver fora do esperado, por exemplo.

7.1.6 Robótica Móvel

Em um cenário em que não seja possível posicionar múltiplos *dataloggers*. Um equipamento que além de medir e registrar os dados, vá até o ponto de coleta sozinho é uma solução interessante.

7.1.7 Inteligência Artificial

Associar os dados coletados com modelos de inteligência artificial para prever fenômenos pode diminuir a latência para tomada de decisão. A formulação dos modelos e a posterior validação prática são grandes desafios.

Bibliografia

- [Aerosemi 2023]AEROSEMI. *High Efficiency 1.2MHz 2A Step Up Converter*. [S.l.], 2023. Version 1.0.
- [Augustin et al. 2016]AUGUSTIN, A. et al. A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, MDPI AG, v. 16, n. 9, p. 1466, set. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s16091466>>.
- [Behmel et al. 2016]BEHMEL, S. et al. Water quality monitoring strategies — a review and future perspectives. *Science of The Total Environment*, v. 571, p. 1312–1329, 2016. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716314243>>.
- [Bierhuizen e Prepas 1985]BIERHUIZEN, J. F. H.; PREPAS, E. E. Relationship between nutrients, dominant ions, and phytoplankton standing crop in prairie saline lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 42, n. 10, p. 1588–1594, 1985. Disponível em: <<https://doi.org/10.1139/f85-199>>.
- [Buttazzo 2011]BUTTAZZO, G. C. *Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications*. 3. ed. [S.l.]: Springer, 2011. (Real-Time Systems Series Nº24). ISBN 1461406757; 9781461406754; 1461406765; 9781461406761.
- [Cloete, Malekian e Nair 2016]CLOETE, N. A.; MALEKIAN, R.; NAIR, L. Design of smart sensors for real-time water quality monitoring. *IEEE Access*, v. 4, p. 3975–3990, 2016.
- [Dantas 2020]DANTAS, M. F. d. N. *UM SISTEMA DE TELEMONTORAMENTO E AUTOMAÇÃO BASEADO EM REDE LORA PARA CRIAÇÃO DE CAMARÃO*. 2020. 65 p. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Ceará, Quixadá, 2020.
- [Davies-Colley e Smith 2001]DAVIES-COLLEY, R. J.; SMITH, D. G. TURBIDITY SUSPENDED SEDIMENT, AND WATER CLARITY: A REVIEW. *Journal of the American Water Resources Association*, Wiley, v. 37, n. 5, p. 1085–1101, out. 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03624.x>>.

- [Deekshath et al. 2018]DEEKSHATH, R. et al. Iot based environmental monitoring system using arduino uno and thingspeak. *International Journal of Science Technology & Engineering*, v. 4, n. 9, p. 68–75, 2018.
- [Déharbe, Galvao e Moreira 2009]DÉHARBE, D.; GALVAO, S.; MOREIRA, A. M. Formalizing freertos: First steps. In: SPRINGER. *Formal Methods: Foundations and Applications: 12th Brazilian Symposium on Formal Methods, SBMF 2009 Gramado, Brazil, August 19-21, 2009 Revised Selected Papers 12*. [S.l.], 2009. p. 101–117.
- [Devesa e Dietrich 2018]DEVESA, R.; DIETRICH, A. Guidance for optimizing drinking water taste by adjusting mineralization as measured by total dissolved solids (tds). *Desalination*, v. 439, p. 147–154, 2018. ISSN 0011-9164. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916417323056>>.
- [Espressif Systems 2023]ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet*. [S.l.], 2023. Version 4.2.
- [Feltre 2008]FELTRE, R. *Química. Química Geral. 1ª Ano 1*. [S.l.]: Moderna, 2008. (Em Portuguese do Brasil). ISBN 8516061116; 9788516061111.
- [Gattuso e Hansson 2011]GATTUSO, J.; HANSSON, L. *Ocean Acidification*. OUP Oxford, 2011. ISBN 9780191501784. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=eexpAgAAQBAJ>>.
- [Geetha e Gouthami 2017]GEETHA, S.; GOUTHAMI, S. Internet of things enabled real time water quality monitoring system. *Smart Water*, v. 2, n. 1, p. 1, Jul 2017. ISSN 2198-2619. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40713-017-0005-y>>.
- [Gold 2019]GOLD, V. (Ed.). *The IUPAC Compendium of chemical terminology*. Research Triangle Park, NC: International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), 2019.
- [Hambarde, Varma e Jha 2014]HAMBARDE, P.; VARMA, R.; JHA, S. The survey of real time operating system: Rtos. In: *2014 International Conference on Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 34–39.
- [Helmi, Hafiz e Rizam 2014]HELMI, A. H. M. A.; HAFIZ, M. M.; RIZAM, M. S. B. S. Mobile buoy for real time monitoring and assessment of water quality. In: *2014 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 19–23.
- [Ighalo, Adeniyi e Marques 2021]IGHALO, J. O.; ADENIYI, A. G.; MARQUES, G. Internet of things for water quality monitoring and assessment: A comprehensive review. In: _____. *Artificial Intelligence for Sustainable Development: Theory, Practice and Future Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 245–259. ISBN 978-3-030-51920-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-51920-9_13>.

- [Kitchener, Wainwright e Parsons 2017]KITCHENER, B. G.; WAINWRIGHT, J.; PARSONS, A. J. A review of the principles of turbidity measurement. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, SAGE Publications, v. 41, n. 5, p. 620–642, ago. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0309133317726540>>.
- [Landscape South Australia Murraylands and Riverland 2015]Landscape South Australia Murraylands and Riverland. *Measuring salinity*. 2015. [Online; accessed 2-April-2023]. Disponível em: <<https://www.landscape.sa.gov.au/mr/publications/measuring-salinity: :text=Conversion%20for%20units%20used%20to%20measure%20salinity%3Atext=55%20t>>.
- [Lombardi 2008]LOMBARDI, M. The accuracy and stability of quartz watches. *Horolog. J.*, 2008-02-01 2008. Disponível em: <https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=50647>.
- [Materials 2012]MATERIALS, C. L. C. *46-TS-300B*. [S.l.], 2012. Disponível em: <http://images.100y.com.tw/pdf_file/46-TS-300B.pdf>.
- [Morris e Langari 2020]MORRIS, A. S.; LANGARI, R. *Measurement and instrumentation: Theory and application*. San Diego, CA: Academic Press, 2020.
- [Niswar et al. 2018]NISWAR, M. et al. Iot-based water quality monitoring system for soft-shell crab farming. In: *2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 6–9.
- [Pasika e Gandla 2020]PASIKA, S.; GANDLA, S. T. Smart water quality monitoring system with cost-effective using iot. *Heliyon*, v. 6, n. 7, p. e04096, 2020. ISSN 2405-8440. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020309403>>.
- [Petkovšek, Nemec e Zajec 2021]PETKOVŠEK, M.; NEMEC, M.; ZAJEC, P. Algorithm execution time and accuracy of ntc thermistor-based temperature measurements in time-critical applications. *Mathematics*, v. 9, n. 18, 2021. ISSN 2227-7390. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-7390/9/18/2266>>.
- [Rusydi 2018]RUSYDI, A. F. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, v. 118, n. 1, p. 012019, feb 2018. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>>.
- [Silberschatz Peter B. Galvin 2012]SILBERSCHATZ PETER B. GALVIN, G. G. A. *Operating System Concepts*. 9. ed. [S.l.]: Wiley, 2012. ISBN 9781118063330; 1118063333.
- [Silva, Costa e Barletta 2013]SILVA, E. M.; COSTA, M. F. da; BARLETTA, M. Small-scale water quality monitoring networks. *Journal of Coastal Research*, n. 65 (10065), p.

- 1218–1223, 01 2013. ISSN 0749-0208. Disponível em: <<https://doi.org/10.2112/SI65-206.1>>.
- [Steinhart e Hart 1968]STEINHART, J. S.; HART, S. R. Calibration curves for thermistors. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, v. 15, n. 4, p. 497–503, 1968. ISSN 0011-7471. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0011747168900570>>.
- [Tavares-Dias 2021]TAVARES-DIAS, M. Toxicity, physiological, histopathological, handling, growth and antiparasitic effects of the sodium chloride (salt) in the freshwater fish aquaculture. *Aquaculture Research*, Hindawi Limited, v. 53, n. 3, p. 715–734, out. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/are.15616>>.
- [Texas Instruments 2023]TEXAS INSTRUMENTS. *LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator*. [S.l.], 2023. SNVS124G.
- [Vikesland 2018]VIKESLAND, P. J. Nanosensors for water quality monitoring. *Nature Nanotech*, v. 13, p. 651–660, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41565-018-0209-9>>.
- [Weber-Scannell e Duffy 2007]WEBER-SCANNELL, P. K.; DUFFY, L. K. Effects of total dissolved solids on aquatic organisms: A review of literature and recommendation for salmonid species. *American Journal of Environmental Sciences*, Science Publications, v. 3, n. 1, p. 1–6, Jan 2007. Disponível em: <<https://thescipub.com/abstract/ajessp.2007.1.6>>.
- [Wulandari, Abdullah e Asriningtias 2022]WULANDARI, E. R. N.; ABDULLAH, H. M.; ASRININGTIAS, S. R. Development of portable iot data logger for water quality monitoring. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Innovation in Engineering and Vocational Education (ICIEVE 2021)*. Atlantis Press, 2022. p. 256–260. ISBN 978-94-6239-558-9. ISSN 2352-5398. Disponível em: <<https://doi.org/10.2991/assehr.k.220305.052>>.
- [Xu et al. 2011]XU, J. et al. Environmental response to sewage treatment strategies: Hong kong’s experience in long term water quality monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, v. 62, n. 11, p. 2275–2287, 2011. ISSN 0025-326X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X11004036>>.
- [Xu et al. 2015]XU, Y. et al. Method to predict key factors affecting lake eutrophication – a new approach based on support vector regression model. *International Biodegradation Biodegradation*, v. 102, p. 308–315, 2015. ISSN 0964-8305. CESE-2014 – Challenges in Environmental Science and Engineering Series Conference. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964830515000451>>.

[Zhong 2020]ZHONG, Y. *arduino-esp32*. [S.l.]: GitHub, 2020. <https://github.com/summivox/arduino-esp32>.

[Zourmand et al. 2019]ZOURMAND, A. et al. Internet of things (iot) using lora technology. In: *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 324–330.