

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

FAUSTO CRISTIANO

**Sistema Autossuficiente de Monitoramento
Remoto de Qualidade da Água em Açudes para
Piscicultura**

São José - SC

Fevereiro/2025

SISTEMA AUTOSSUFICIENTE DE MONITORAMENTO REMOTO DE QUALIDADE DA ÁGUA EM AÇUDES PARA PISCICULTURA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Telecomunicações do campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Engenheiro de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Carlos Boabaid Neto, Dr. Eng.

São José - SC

Fevereiro/2025

Fausto Cristiano

Sistema Autossuficiente de Monitoramento Remoto de Qualidade da Água em Açudes para Piscicultura

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Telecomunicações, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

São José - SC, 26 de Fevereiro de 2025

Prof. Carlos Boabaid Neto, Dr. Eng.

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Mario de Noronha Neto, Dr.

Eng.

Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Odilson Tadeu Valle, Dr. Eng.

Instituto Federal de Santa Catarina

*Dedico este trabalho a todas as pessoas que, em algum momento,
duvidaram da minha capacidade de me tornar um Engenheiro.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, e por me permitir chegar até aqui. Foi um caminho árduo, com muitos desafios, mas minha fé, persistência e resiliência me sustentaram e não permitiram que eu desistisse.

Minha gratidão a todos os mestres e professores deste curso, que, com sabedoria, contribuíram para meu crescimento e compartilharam conhecimentos valiosos.

Aos meus colegas estudantes de Engenharia, que, nos corredores da instituição, sempre estavam dispostos a compartilhar e ajudar com os conhecimentos adquiridos ao longo da jornada, meu muito obrigado. Em especial, aos meus amigos Andrey Adriano e Lucas Coelho Raupp, que iniciamos essa jornada juntos e a concluímos da mesma forma: unidos, sempre nos ajudando e fortalecendo.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Carlos Boabaid Neto, Dr. Eng., pelo apoio, orientação e conhecimento valioso ao longo deste processo. Seu compromisso e dedicação foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

E, por fim, agradeço à minha noiva e futura esposa, Luiza Vieira, e ao meu filho Nathan Cristiano, que me acompanharam em diversos momentos desta caminhada, me oferecendo apoio incondicional.

A persistência é o caminho do êxito.
Charles Chaplin

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema autossuficiente para o monitoramento contínuo da qualidade da água em piscicultura, utilizando tecnologia para transmissão dos dados *Narrowband Internet of Things* (NB-IoT). O objetivo principal é otimizar a piscicultura em ambientes controlados, garantindo condições ideais para o crescimento saudável dos peixes e aumentando a eficiência produtiva. Foram implementados sensores para monitorar parâmetros críticos (pH e temperatura), sendo os dados coletados transmitidos para uma plataforma de análise visual Dashboard Blynk. A arquitetura do sistema foi projetada para operar com bateria com recarregamento por energia solar, assegurando autonomia energética mesmo em dias de baixa irradiação solar. Os resultados demonstraram a efetividade do sistema, com a transmissão bem sucedida dos dados para a plataforma e a visualização em tempo real pelo usuário. O sistema permite ao produtor tomar decisões informadas com base nos *insights* fornecidos pela análise dos dados coletados. A combinação de sensores precisos, conectividade remota e energia sustentável qualifica o sistema desenvolvido como uma solução viável.

Palavras-chave: Piscicultura. Qualidade da água. Monitoramento. IoT. NB-IoT.

ABSTRACT

This work presents the development of a self-sufficient system for continuous water quality monitoring in fish farming, using technology for data transmission via NB-IoT. The main objective is to optimize fish farming in controlled environments, ensuring ideal conditions for healthy growth and increasing production efficiency. Sensors were implemented to monitor critical parameters (pH and temperature), with the collected data being transmitted to a visual analysis Dashboard Blynk platform. The system architecture was designed to operate on battery being recharged by solar energy, ensuring energy autonomy even on days with low solar irradiation. The results demonstrated the system's effectiveness, with successful data transmission to the platform and real-time visualization by the user. The system enables producers to make informed decisions based on insights provided by the analysis of the collected data. The combination of precise sensors, remote connectivity, and sustainable energy qualifies the developed system as a viable solution.

Keywords: Pisciculture. Water quality. Monitoring. IoT. NB-IoT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Nível de pH na piscicultura	21
Figura 2 – Efeito da concentração de oxigênio dissolvido nos peixes	22
Figura 3 – Participação no mercado global das tecnologias sem fio	26
Figura 4 – Pinagem da placa LilyGo SIM7000G	30
Figura 5 – Placa de desenvolvimento LilyGo SIM7000G	31
Figura 6 – Curva de descarga da bateria	32
Figura 7 – Perfil de carregamento do CN3065	33
Figura 8 – Sensor de pH	36
Figura 9 – Sensor de temperatura	37
Figura 10 – Painel fotovoltaico	37
Figura 11 – Arquitetura geral	39
Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema	39
Figura 13 – Fluxograma do algoritmo	40
Figura 14 – Arquitetura da plataforma <i>Blynk: App, Server e Libraries</i>	41
Figura 15 – Tensão do painel fotovoltaico	47
Figura 16 – Consumo da bateria no modo <i>Active Mode</i>	50
Figura 17 – Comportamento da bateria	51
Figura 18 – Consumo diário de tráfego de dados do sistema	53
Figura 19 – Medições de temperatura do sensor de superfície	54
Figura 20 – Medições de temperatura do sensor de profundidade	54
Figura 21 – Medições de pH	55
Figura 22 – Tensão da bateria	55
Figura 23 – Visão da <i>dashboard Blynk</i> dos testes em bancada	56
Figura 24 – Visão da <i>dashboard Blynk</i> dos testes em bancada	56
Figura 25 – Açude de criação	57
Figura 26 – Protótipo do projeto	57
Figura 27 – Medidas em campo	58
Figura 28 – Leitura do sensor de pH	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características da placa de desenvolvimento LilyGO SIM7000G	29
Quadro 2 – GPIOs utilizados no projeto	40
Quadro 3 – Comparativo dos planos do <i>Blynk</i>	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores ideais dos parâmetros	20
Tabela 2 – Principais comandos AT e suas funções	35
Tabela 3 – Custos dos componentes do projeto	46
Tabela 4 – Custo sensor de OD	46
Tabela 5 – Valores de medição do painel solar.	48
Tabela 6 – Modos de operação da ESP32	49
Tabela 7 – Consumo de dados por dia	52
Tabela 8 – Valores de calibração do sensor de pH a partir da tensão.	72
Tabela 9 – Incertezas de medição: grandezas primárias.	74
Tabela 10 – Incertezas de medição: grandezas derivadas.	74

LISTA DE CÓDIGOS

Código 3.1 – Bibliotecas utilizadas no algoritmo	43
Código 3.2 – Configuração dos módulos	43
Código 3.3 – Leitura e envio das leituras dos sensores	44
Código A.1 – Algoritmo do projeto	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP *3rd Generation Partnership Project.*

ADC *Analog Digital Converter.*

ANATEL Agência Nacional de Telecomunicações.

GPIO *General-Purpose Input/Output.*

IDE *Integrated Development Environment.*

Imp Corrente na máxima potência.

IoT *Internet of Things.*

Isc Corrente de curto-circuito.

Li-Ion íon de lítio.

LPWA *Low Power Wide Area.*

LTE *Long Term Evolution.*

M2M *machine to machine.*

MOSFET *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.*

NB-IoT *Narrowband Internet of Things.*

NT Unidades Nefelométricas de Turbidez.

OFDMA *Orthogonal frequency division multiple access.*

PH Potencial hidrogeniônico.

Pmax Potência máxima.

RTC *Real Time Clock.*

SC FDMA *Single carrier frequency division multiple access.*

UART *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.*

Vin Tensão de entrada.

Vmp Tensão na máxima potência.

Voc Tensão de circuito aberto.

Vref Tensão de referência.

LISTA DE SÍMBOLOS

η Eficiência.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Piscicultura	19
2.1.1	Benefícios do consumo de peixe	19
2.1.2	Estatísticas de produção e consumo	19
2.2	Monitoramento na piscicultura	20
2.3	Qualidade da água na piscicultura	20
2.3.1	Temperatura	20
2.3.2	Acidez	21
2.3.3	Alcalinidade	22
2.3.4	Oxigênio Dissolvido	22
2.3.5	Turbidez	22
2.3.6	Salinidade	23
2.3.7	Dureza	23
2.3.8	Amônia	23
2.4	Internet das coisas (<i>Internet of Things</i> (IoT))	23
2.4.1	IoT na aquicultura	24
2.5	Tecnologias de comunicação sem fio	24
2.5.1	NB-IoT	24
2.5.1.1	Vantagens da NB-IoT	25
2.5.1.2	Características técnicas e aplicações	25
2.5.1.3	NB-IoT em áreas rurais	26
2.6	Fonte de energia	26
3	DESENVOLVIMENTO	28
3.1	Elementos de hardware	28
3.1.1	Placa de Desenvolvimento LilyGo SIM7000G	28
3.1.1.1	Bateria	31
3.1.1.2	Módulo carregador de bateria CN3065	32
3.1.1.3	<i>Real Time Clock</i> (RTC) Real Time Clock	33
3.1.1.4	Modem SIM7000G	34

3.1.1.5	Monitoramento de tensões	34
3.1.1.6	Funcionamento do <i>Analog Digital Converter Analog Digital Converter (ADC)</i>	34
3.1.2	Sensores	35
3.1.2.1	Sensor de Potencial Hidrogeniônico (Potencial hidrogeniônico (pH))	35
3.1.2.2	Sensor de temperatura	36
3.1.3	Painel fotovoltaico	37
3.1.3.1	Parâmetros principais de um painel fotovoltaico	38
3.2	Arquitetura do sistema	38
3.3	Elementos de software	40
3.3.1	Algoritmo	40
3.3.2	Plataforma <i>Dashboard Blynk</i>	41
3.3.2.1	Planos da plataforma <i>Blynk</i> e limitações do plano gratuito	42
3.3.3	Bibliotecas	43
3.3.4	Configuração dos módulos	43
3.3.5	Leitura dos sensores	44
3.4	Orçamento do sistema	45
4	RESULTADOS	47
4.1	Caracterização do sistema de medição	47
4.1.1	Comportamento do painel fotovoltaico	47
4.1.2	Consumo energético do sistema	48
4.1.2.1	<i>Power Modes</i> da ESP32	49
4.1.3	Autonomia energética do sistema	50
4.1.4	Consumo de dados do sistema	51
4.2	Testes de validação do sistema de medição	53
4.2.1	Testes em bancada	53
4.2.2	Testes em ambiente real	56
5	CONCLUSÃO	59
5.1	Trabalhos futuros	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICES	65
	APÊNDICE A – ALGORITMO DO PROJETO	66
	APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE PH	71
	APÊNDICE C – INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	73

C.1	Grandezas físicas primárias	73
C.2	Grandezas físicas derivadas	74

1 INTRODUÇÃO

A piscicultura, uma área da aquicultura, consiste na criação de peixes em ambientes controlados, como açudes, viveiros, tanques elevados, ou lagos. A criação dos peixes é totalmente controlada, desde o seu crescimento até a fase adulta, quando estarão aptos para consumo. É uma atividade agrícola em plena expansão no Brasil, de importância crescente na economia nacional. (TECHGROUND, 2023).

A piscicultura constitui-se numa excelente alternativa para micro e pequenos produtores, permitindo a geração de receita adicional com baixo impacto ambiental, auxiliando desta forma a fixação das pessoas no campo, e ao mesmo tempo ampliando a oferta ao mercado consumidor de um alimento de alta qualidade com preços acessíveis.

Para que uma produção ocorra de forma equilibrada, sustentável e rentável ao produtor, é extremamente necessário o conhecimento e interpretação prévios e de maneira a mais precisa possível dos valores dos parâmetros físicos e químicos que assegurem uma água de qualidade (SANTOS, 2018). Para este fim, é fundamental a implementação de sensoriamento dos ambientes aquáticos onde esteja sendo realizado o cultivo do pescado. A necessidade de monitoramento constante dos parâmetros faz com que o emprego de sistemas de medição remotos da qualidade da água esteja se tornando uma solução cada vez mais necessária (AQUANATIVA, 2024). A integração de sensores e dispositivos IoT permite a coleta contínua de informações sobre os valores dessas variáveis, possibilitando o controle em tempo real e à distância.

A tecnologia de monitoramento remoto oferece aos produtores informações importantes sobre as condições do cultivo, permitindo a tomada de decisões baseadas nos valores dos parâmetros medidos. Esse nível de controle contribui para aumentar a produtividade, reduzir desperdícios e minimizar os custos operacionais.

Além disso, é importante que estas tecnologias possam ser implantadas a custos reduzidos, de forma a não prejudicar a rentabilidade da atividade de criação, e principalmente de forma a viabilizar sua implantação por pequenos e micro-produtores.

Em resumo, a adoção de novas tecnologias para o monitoramento da qualidade da água na piscicultura garante a saúde e o crescimento dos peixes, contribuindo para a modernização e ganho de eficiência da atividade econômica rural. Essas inovações tecnológicas são essenciais para atender à crescente demanda pelo produto, manter a competitividade do preço ao consumidor e assegurar o lucro ao produtor.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de monitoramento em tempo real da qualidade da água na piscicultura, energizado por bateria e recarregado por energia solar, com transmissão de dados via comunicação sem fio e disponibilização dos dados via Internet.

1.1.2 Objetivos específicos

- identificar e selecionar os sensores adequados ao projeto;
- desenvolver uma solução de alimentação energética utilizando painéis solares;
- implementar um sistema de transmissão de dados via comunicação sem fio para monitoramento remoto;
- testar o sistema de medição, em laboratório e em campo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos, conceitos e tecnologias que serão utilizados no presente projeto, contextualizando e ilustrando seus objetivos.

2.1 Piscicultura

A piscicultura tem observado um crescimento significativo nos últimos anos, motivado pelo aumento do consumo de peixes no Brasil e no mundo. Este aumento do consumo está associado à crescente conscientização sobre os benefícios de uma alimentação saudável (ROSA, 2021).

Com o aumento significativo na demanda pelo consumo de peixe, aumenta a necessidade de métodos de produção mais eficientes e sustentáveis. É neste contexto que a piscicultura ganha enorme importância (ROSA, 2021). Desde que bem planejado e manejado, o investimento em um dos vários ramos da aquicultura pode ser muito bem sucedido, especialmente pelo custo de produção e ótimo retorno (AGRISHOW, 2024), e simultaneamente contemplando vários dos objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil (ONU, 2024).

2.1.1 Benefícios do consumo de peixe

Dietas à base de carne branca são recomendadas por nutricionistas e médicos devido ao seu perfil nutricional mais favorável. Graças à grande variedade de minerais, vitaminas e nutrientes, o consumo de peixe ajuda a prevenir tanto enfermidades físicas, como doenças cardiovasculares, diabetes, osteoporose e câncer, quanto mentais, como depressão e ansiedade (UNIMED, 2021).

2.1.2 Estatísticas de produção e consumo

No Brasil, de 2014 a 2023, a produção saltou de 578.800 para 887.029 toneladas, um aumento de 53,25%. A taxa média de crescimento anual foi de 5,325%. O aumento da produção nacional contribuiu para o aumento do consumo per capita de peixes de aquicultura no Brasil, que atualmente está em 4,35 kg/ano. Em 2023, o Brasil exportou 6.815 toneladas de peixes de aquicultura, gerando uma receita de US\$ 24,7 milhões. Esse resultado representa um aumento de 4% em relação a 2022 (CANALRURAL, 2023). Há a estimativa de que, até 2030, 60% dos peixes disponíveis para o consumo humano sejam produzidos em cativeiro (EMBRAPA, 2023).

2.2 Monitoramento na piscicultura

Por se desenvolver no ambiente aquático, a piscicultura pode ser considerada uma das atividades produtivas de maior complexidade. A água, como meio de cultivo, possui características químicas, físicas e biológicas que interagem de maneira individual e coletiva com todos os organismos vivos nela presentes, influenciando diretamente o desempenho da produção. Portanto, o monitoramento rigoroso da qualidade da água é essencial para o sucesso da piscicultura.

2.3 Qualidade da água na piscicultura

A qualidade da água é um fator que pode determinar o sucesso ou fracasso de uma operação de piscicultura. Um ambiente aquático bem monitorado e controlado favorece o metabolismo adequado dos peixes, resultando em uma produção mais eficiente e sustentável (EMBRAPA, 2017). A manutenção de condições ideais da água não só melhora a saúde dos peixes, mas também maximiza o retorno econômico para os produtores ao reduzir perdas associadas a doenças e mortalidade. Portanto, o monitoramento rigoroso e contínuo dos parâmetros relacionados à qualidade da água é essencial para garantir a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental da piscicultura (ROSA, 2021).

Parâmetros químicos como o potencial hidrogeniônico (pH), concentração de oxigênio dissolvido e alcalinidade, dentre outros, e parâmetros físicos como temperatura, apresentam valores adequados para a piscicultura, conforme indicados na Tabela 1. Estes parâmetros tem relação direta com a presença de nutrientes e contaminantes na água, que tem influência direta na saúde e crescimento dos peixes.

Tabela 1 – Valores ideais dos parâmetros

Parâmetros	Medidas	Unidade
Temperatura	20 até 29	°C
pH	6 até 8	pH
Oxigênio Dissolvido	4 até 10	mg/L
Alcalinidade	20 até 300	mg/L

Fonte: Elaborada pelo autor.

Alguns dos parâmetros de maior significância para o controle da qualidade e, conseqüentemente, o melhor controle da produção, são avaliados a seguir.

2.3.1 Temperatura

A temperatura da água é um dos fatores biológicos mais importantes na cadeia produtiva da piscicultura, além de ser um dos mais difíceis de controlar devido às intempéries climáticas. Todas as atividades fisiológicas dos peixes, como respiração, digestão,

excreção, alimentação e movimentação, estão diretamente relacionadas à variação da temperatura. À medida que a temperatura aumenta, a movimentação dos peixes também aumenta, resultando em um maior consumo de oxigênio dissolvido e um aumento no metabolismo. Em regiões de clima subtropical, as preocupações são maiores durante o verão, quando a temperatura da água pode levar a um consumo excessivo de oxigênio dissolvido. As medições de temperatura devem ser realizadas no fundo e na superfície do tanque, três vezes ao dia, para garantir um monitoramento adequado (EMBRAPA, 2020).

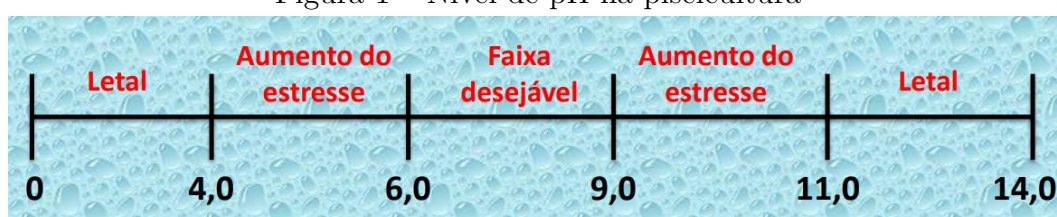
Estudos correlacionam o sucesso da produção de determinadas espécies de peixes com os valores de temperatura da água. Conforme (BOKINGKITO; LLANTOS, 2017), a espécie Tilápia tolera uma ampla faixa de temperatura. A faixa ideal para o desenvolvimento, reprodução e crescimento normal é de 20 a 35 °C, com a faixa ótima para crescimento entre 24 e 32 °C. Tilápias param de se alimentar abaixo de 16 °C e não suportam temperaturas acima de 40 °C. Portanto, a temperatura da água deve ser mantida entre 20-35 °C para garantir o sucesso na produção.

2.3.2 Acidez

A água possui diversas substâncias dissolvidas que interagem através de processos físicos, químicos e biológicos, que irão determinar sua acidez, indicada pela medição do parâmetro pH. Este parâmetro é inversamente proporcional à quantidade de íons H⁺ em uma solução, e serve para determinar, de forma simples e direta, os níveis de acidez ou alcalinidade da água. A escala de pH apresenta um intervalo de medição de 0 a 14, sendo 7 o valor neutro, ou seja, valores na faixa de 0 a 7 indicam uma solução ácida, e valores de 7 a 14 indicam uma solução alcalina.

Para garantir uma produção eficiente de peixes, é importante que a água mantenha um valor de pH equilibrado, evitando extremos de acidez ou alcalinidade. Açudes com água muito ácida ou alcalina precisam de um controle rigoroso do pH para assegurar o crescimento saudável dos peixes, apesar de ser um desafio mantê-lo em um nível próximo do ideal. Valores entre 7,0 e 8,3 são considerados ideais para piscicultura, mas é possível operar com níveis entre 6 e 9 sem prejudicar a qualidade da produção, conforme indicado na Figura 1. Os extremos de acidez ou alcalinidade que provocam mortandade em viveiros de peixes são, aproximadamente, pH<4 e pH>11 (EMBRAPA, 2020).

Figura 1 – Nível de pH na piscicultura



Fonte: EMBRAPA (2017)

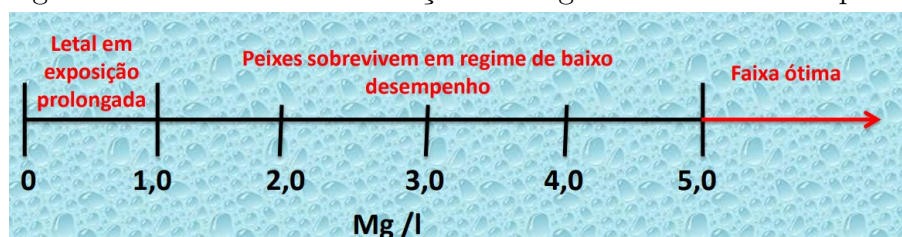
2.3.3 Alcalinidade

A alcalinidade é capacidade da água de neutralizar ácidos, e a medição de alcalinidade indica a presença de sais minerais dissolvidos na água tais como os carbonatos de cálcio (CaCO_3), bicarbonatos (HCO_3), e hidroxila (OH), cuja concentração é medida em miligramas por litro (mg/L). Valores de alcalinidade entre 20 e 300 mg/L indicam quantidades adequadas desses sais minerais para a piscicultura orgânica, ajudando na formação do plâncton. (EMBRAPA, 2017)

2.3.4 Oxigênio Dissolvido

O oxigênio dissolvido na água é a fonte principal de respiração dos peixes. Desta forma, é um dos parâmetros fundamentais para indicar a qualidade do ambiente aquático. O baixo nível de oxigênio na água levará à dificuldade de respiração dos peixes, o que pode ameaçar a vida desses animais, conforme indicado na Figura 2. Além disso, a concentração de oxigênio afeta também a sobrevivência de vários outros organismos presentes na água, notadamente o fitoplâncton.

Figura 2 – Efeito da concentração de oxigênio dissolvido nos peixes



Fonte: EMBRAPA (2017)

Existem dois processos principais de geração de oxigênio dissolvido: por penetração direta do ar atmosférico na água, e por processo fotossintético pelo fitoplâncton (algas especiais). O nível de concentração de oxigênio dissolvido é inversamente proporcional à temperatura da água: quanto mais alta a temperatura, menor o nível de oxigênio presente (EMBRAPA, 2017).

2.3.5 Turbidez

A turbidez da água é um parâmetro essencial na piscicultura, pois afeta diretamente a penetração da luz solar, comprometendo o desenvolvimento do fitoplâncton, base da cadeia alimentar aquática e fonte de oxigênio dissolvido. Águas turvas, com coloração acastanhada ou de barro, indicam a presença de partículas suspensas que prejudicam o equilíbrio do sistema. Sua medição, realizada em Unidades Nefelométricas de Turbidez (NT) por meio de turbidímetros ou sensores específicos, permite o monitoramento con-

tínuo, garantindo condições ideais para a criação de peixes em cativeiro (EMBRAPA, 2017).

2.3.6 Salinidade

A salinidade é um parâmetro essencial na piscicultura, pois influencia o metabolismo, o crescimento e a sobrevivência dos peixes, variando de acordo com a espécie criada. Representa a concentração de sais dissolvidos na água, sendo medida em miligramas por litro (mg/L). O controle da salinidade é determinante para evitar impactos negativos, como alterações na solubilidade de oxigênio e aumento da toxicidade de compostos como a amônia, garantindo condições adequadas para o equilíbrio do ambiente aquático e o desenvolvimento dos peixes (EMBRAPA, 2017).

2.3.7 Dureza

A dureza da água pode ser definida como sua capacidade de resistir a mudanças de pH ao longo do dia, desempenhando um papel importante na estabilidade do ambiente aquático. Embora esteja correlacionada à alcalinidade, esses dois parâmetros não são diretamente proporcionais, pois águas muito alcalinas nem sempre possuem alta dureza. A dureza está relacionada especificamente à presença de sais de cálcio Ca^{2+} e magnésio Mg^{2+} , que são fundamentais para o equilíbrio químico da água e o metabolismo dos peixes, sendo essencial monitorá-la para garantir condições adequadas à piscicultura (EMBRAPA, 2017).

2.3.8 Amônia

A amônia é um parâmetro crítico na piscicultura, pois concentrações elevadas podem ser tóxicas para os peixes. Sua presença na água está associada à excreção dos peixes e ao excesso de alimento não consumido, além do uso de fertilizantes contendo a substância. Para garantir a qualidade do ambiente aquático, é essencial monitorar sua concentração, que não deve exceder 0,1 mg/L. Valores acima desse limite comprometem a saúde dos peixes, afetando o sistema respiratório e causando estresse, o que pode resultar em queda na produtividade e aumento da mortalidade (EMBRAPA, 2017).

2.4 Internet das coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT) compreende um conjunto de tecnologias que visa a automação de processos por meio do uso de sensores, evitando atividades redundantes. No conceito de IoT, tarefas que antes exigiam intervenção humana podem ser realizadas de forma autônoma por sensores e dispositivos conectados. Segundo SANTOS et

al. (2019), um sistema deste tipo é composto por dispositivos inteligentes que fornecem monitoramento, atuação e controle.

2.4.1 IoT na aquicultura

A inclusão de tecnologia no agronegócio tem o potencial de contribuir para elevar a qualidade da produção, reduzindo perdas e diminuindo custos, o que, por sua vez, aumenta a eficiência e conseqüentemente a competitividade do negócio. Neste contexto, é fundamental, por exemplo, implementar métodos automáticos para o monitoramento de parâmetros críticos em cada ramo específico.

Neste projeto, o conceito foi aplicado para o monitoramento e controle da qualidade da água na criação de peixes. Utilizaram-se sensores para medir e monitorar em tempo real variáveis físicas do ambiente aquático.

2.5 Tecnologias de comunicação sem fio

As tecnologias de comunicação sem fio de baixo consumo energético e longo alcance (dentre as quais as principais hoje disponíveis são *LoRa*, *Sigfox*, *NB-IoT*, *LTE-M*, *Zigbee*) são fundamentais para aplicações em IoT. Essas tecnologias foram projetadas para conectar dispositivos que operam com recursos limitados, como sensores alimentados por baterias ou energia solar, garantindo longa duração e confiabilidade. Entre suas principais características estão o baixo consumo de energia, que permite longo tempo de operação com uma única bateria, e a capacidade de comunicação em áreas amplas, mesmo em locais remotos. Elas são amplamente utilizadas em monitoramento ambiental, agricultura de precisão, cidades inteligentes e outros setores que demandam conectividade eficiente e sustentável.(EMBARCADOS, 2021).

2.5.1 NB-IoT

NB-IoT, ou *Narrowband Internet of Things*, é uma tecnologia de comunicação sem fio projetada para conectar dispositivos à internet de forma eficiente e com baixo consumo de energia. Diferentemente das redes de celular convencionais usadas em *smartphones*, o NB-IoT é otimizado para dispositivos que transmitem pequenas quantidades de dados periodicamente, como sensores de monitoramento em geral, medidores de água ou gás, e dispositivos de saúde. Utiliza menos espectro de rádio, resultando em um consumo de energia significativamente menor. Essa eficiência permite que dispositivos conectados por essa tecnologia tenham uma vida útil de bateria de até 10 anos, sendo ideal para aplicações em áreas remotas ou com difícil acesso à energia elétrica. Oferece uma ampla cobertura de sinal, o que torna essa tecnologia de comunicação sem fio eficaz em locais

onde outras tecnologias não conseguem oferecer uma cobertura de sinal adequada para funcionamento (DIGIINTERNATIONAL, 2024).

2.5.1.1 Vantagens da NB-IoT

Apresenta vantagens significativas em relação a outras tecnologias de comunicação sem fio de baixo consumo e longo alcance, especialmente no que diz respeito à cobertura oferecida pelas operadoras móveis. Por operar em espectros licenciados, aproveita a infraestrutura existente das redes celulares, garantindo ampla cobertura, mesmo em áreas remotas ou de difícil acesso, como ambientes rurais, subterrâneos ou industriais. Uma das principais vantagens do NB-IoT é sua capacidade de alcançar uma cobertura de 20 a 50 quilômetros com uma única torre de telecomunicações móvel (DATATERM, 2022).

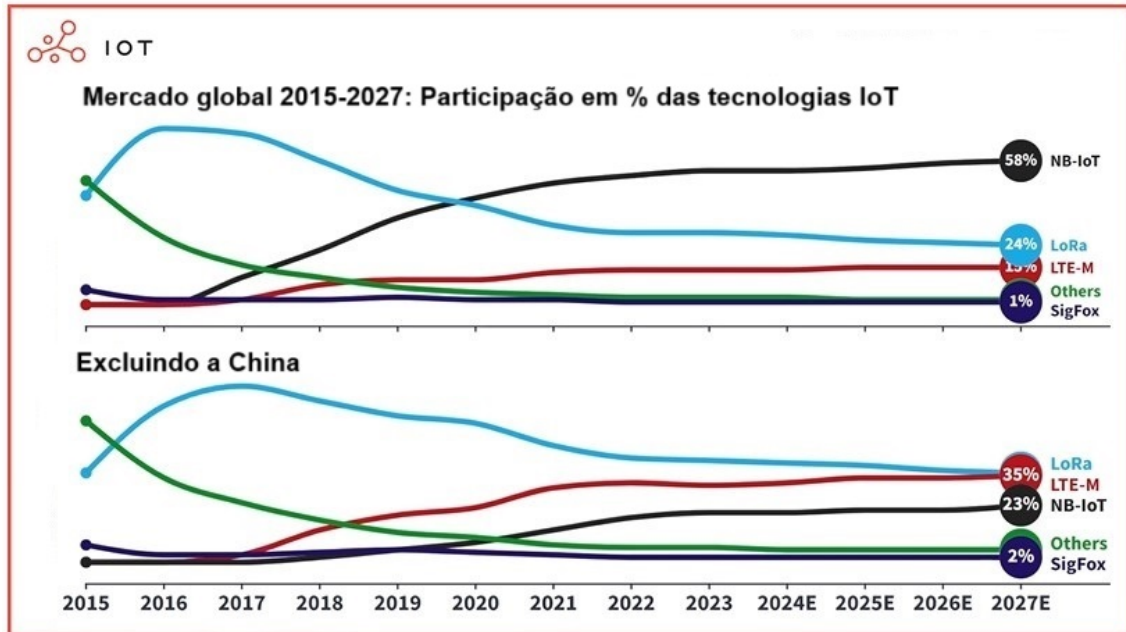
2.5.1.2 Características técnicas e aplicações

A NB-IoT foi desenvolvida pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) como alternativa das tecnologias sem fio ZigBee, Sigfox e LoRa. Usa uma extensão da rede *Long Term Evolution* (LTE) padrão, mas limita a largura de banda a uma única banda de 200 kHz. Utiliza modulação *Orthogonal frequency division multiple access* (OFDMA) para *downlink* e modulação *Single carrier frequency division multiple access* (SC-FDMA) para *uplink* (TELECO, 2013). Classificada como uma tecnologia de rede *Low Power Wide Area* (LPWA), é projetado para suportar dispositivos de IoT, oferecendo cobertura em áreas extensas com baixo consumo de energia (UFRJ, 2021).

Destinada especificamente para equipamentos *machine to machine* (M2M) e IoT, é ideal para a transmissão de pequenos pacotes de dados, como códigos binários e textos, sendo amplamente utilizada em aplicações de telemetria. Utiliza espectros de frequência licenciados, o que minimiza a interferência com outros dispositivos (UFRJ, 2021). De acordo com ANALYTICS (2024), o NB-IoT corresponde a 58% do total de conexões IoT no mundo, conforme ilustrado na Figura 3.

Por suas características, a NB-IoT mostra-se especialmente adequada para aplicações onde o tempo de resposta não é crítico. Há três cenários principais onde este protocolo é amplamente recomendado: controle de recursos como medidores de água, gás e eletricidade, *Smart Cities*, e dispositivos de sensoriamento remoto que não necessitam transmitir grandes volumes de dados. É particularmente adequado para dispositivos estáticos, não sendo recomendado para dispositivos em movimento, como rastreamento de veículos (DATATERM, 2022). Desta forma, a NB-IoT se adapta muito bem aos requisitos do presente projeto.

Figura 3 – Participação no mercado global das tecnologias sem fio



Fonte: ANALYTICS (2024)

2.5.1.3 NB-IoT em áreas rurais

Com o aumento da competitividade no setor agrícola, os produtores enfrentam uma demanda crescente por maior eficiência e produtividade em suas operações. A adoção de novas tecnologias tem sido fundamental para viabilizar essa transformação, impulsionando a transição para uma agricultura digital.

O uso de sensores conectados à IoT, em conjunto com tecnologias de comunicação sem fio, tornou-se uma tendência para otimizar a gestão e o monitoramento remoto de processos agrícolas. Dentre essas tecnologias, o NB-IoT vem ganhando destaque devido à sua capacidade de transmissão de dados com alta estabilidade e longo alcance, além da possibilidade de conectar um grande número de dispositivos sem comprometer a qualidade da comunicação (CONNECTARAGRO, 2021).

2.6 Fonte de energia

Para garantir que o sistema de monitoramento remoto possa funcionar de maneira autônoma e contínua, especialmente em áreas remotas, a alimentação de energia é um aspecto crítico. O uso de baterias recarregáveis por energia solar tem o potencial de garantir a operacionalidade do sistema.

O recarregamento da bateria pode ser realizado por módulos fotovoltaicos, dispositivos que captam a energia do Sol e a convertem em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas. Estes módulos são projetados para maximizar a captação de ener-

gia ao longo do dia, mesmo em condições de luz solar indireta ou parcial (SEIA, 2022). A energia coletada pelos módulos fotovoltaicos é armazenada nas baterias, garantindo que o sistema possa continuar operando durante a noite ou em dias nublados, quando a captação de energia solar é reduzida. Em regiões remotas, onde o acesso à rede elétrica pode ser limitado ou inexistente, os módulos fotovoltaicos permitem que o sistema de monitoramento opere de forma autônoma, eliminando a necessidade de conexões à rede elétrica.

3 DESENVOLVIMENTO

A proposta do presente trabalho compreendeu o desenvolvimento de uma solução para o monitoramento da qualidade da água voltado para a piscicultura, empregando sensores de temperatura e pH.

Foi empregado um sistema autônomo de energia, utilizando bateria recarregável por energia solar fotovoltaica, de forma sustentável.

O sistema transmite os dados obtidos pelos sensores via comunicação sem fio utilizando a tecnologia NB-IoT para uma plataforma *dashboard*.

O desenvolvimento do projeto consistiu na integração de *hardwares* disponíveis no mercado, empregando módulos e sensores específicos para atender às necessidades do sistema. Foi escolhido o ESP32 como microcontrolador central devido às suas capacidades técnicas, enquanto a alimentação energética foi projetada com foco na sustentabilidade, utilizando energia solar e técnicas de operação energeticamente econômicas.

O projeto foi desenvolvido com sensores de temperatura e pH para monitoramento da qualidade da água. A inclusão de sensores adicionais (por exemplo, oxigênio dissolvido) não foi possível devido a limitações de recursos financeiros.

Na estrutura desse capítulo, é descrita a arquitetura do sistema, desde os sensores até a interface de comunicação com a plataforma de monitoramento. Apresenta-se a criação dos algoritmos para leitura dos sensores e envio dos dados, realização de testes para validação do funcionamento dos componentes e análise das dificuldades enfrentadas, como a integração de módulos e a redução do consumo energético.

3.1 Elementos de hardware

Para o desenvolvimento e implementação do sistema de monitoramento da qualidade da água na piscicultura, foram utilizados os elementos descritos a seguir.

3.1.1 Placa de Desenvolvimento LilyGo SIM7000G

A placa de desenvolvimento LILYGO® SIM7000G foi escolhida devido às suas características e funcionalidades, em especial, por possuir modem e circuito de carregamento de bateria por energia solar integrados, que atendem a demanda do projeto. Inclui um microcontrolador ESP32, conhecido por sua capacidade de processamento, juntamente com módulo NB-IoT, que facilita a comunicação em áreas rurais e o rastreamento de localização, e também possui compatibilidade com módulo externo para uso da tecnologia

Lora. O Quadro 1 apresenta as características técnicas do equipamento.

Quadro 1 – Características da placa de desenvolvimento LilyGO SIM7000G

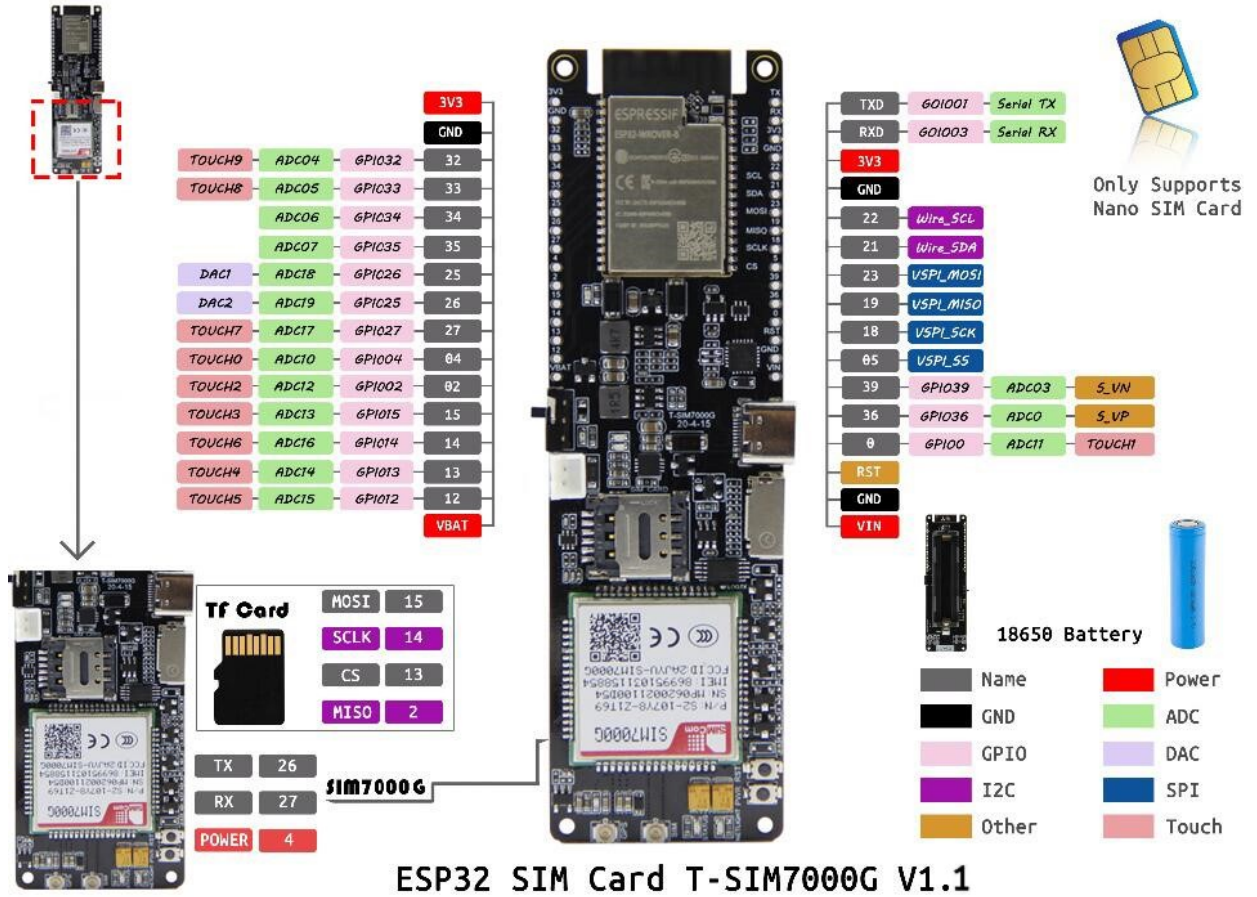
Característica	Descrição
Microcontrolador	ESP32-WROVER-B com dual-core Xtensa LX6, até 240 MHz
Memória	<ul style="list-style-type: none"> • 8 MB de RAM • 4 MB de FLASH • 520 KB de Cache SRAM
Conectividade Wi-Fi	Wi-Fi 802.11 b/g/n (suporta redes de 2.4 GHz)
Conectividade bluetooth	Bluetooth 4.2 (BLE + BR/EDR)
Conectividade móvel	Módulo SIM7000G embutido para redes NB-IoT, LTE-M e GPRS
Interfaces analógicas/digitais	<ul style="list-style-type: none"> • 16 GPIOs programáveis • 16 canais ADC (12 bits) • 2 canais DAC (8 bits) • 16 canais PWM • 4 interfaces SPI • 2 interfaces I2C
Gestão de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Suporte a modos Light Sleep, Deep Sleep e Hibernation • Carregador integrado para baterias Li-ion (CN3065)
Fontes de alimentação	<ul style="list-style-type: none"> • Suporte a alimentação por bateria Li-ion • Entrada para painel solar
Tensão operacional	3.7V a 4.2V
Aplicações	IoT, automação, monitoramento, dispositivos móveis

Fonte: Elaborada pelo autor.

Apresenta baixo consumo de energia, importante para aplicações de IoT que requerem operação contínua com fontes de energia limitadas. A placa inclui circuitos de carregamento e proteção de bateria integrados, garantindo a segurança e durabilidade da bateria. Possui uma interface de carregamento por energia solar (LILYGO, 2023). A capacidade de suportar baterias externas também aumenta a flexibilidade e a autonomia

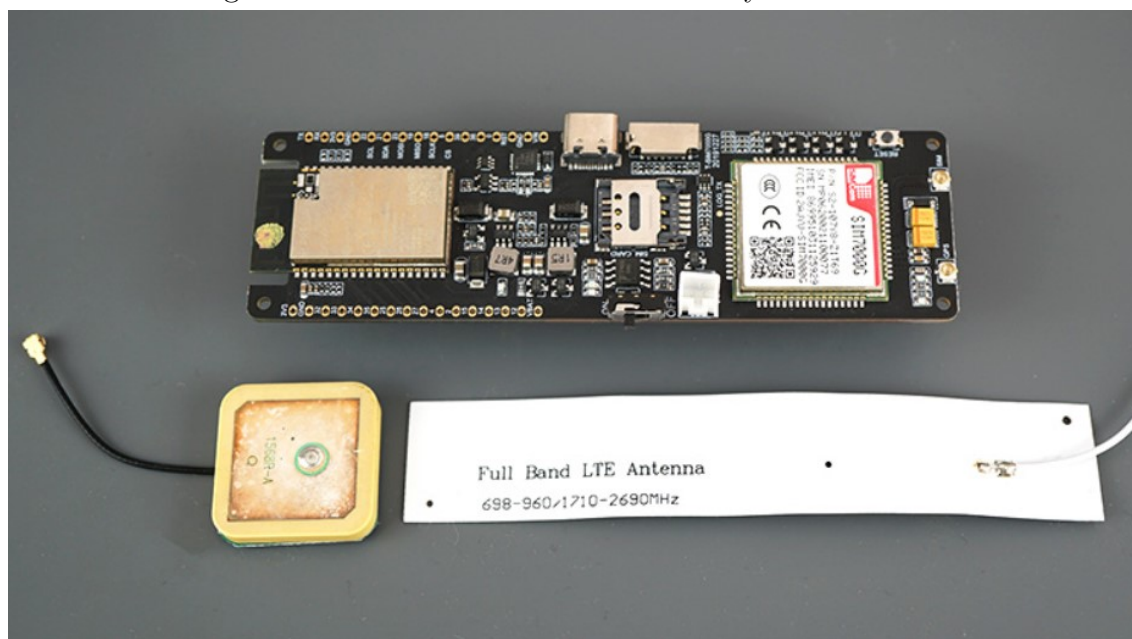
do sistema, tornando-o ideal para uma ampla gama de aplicações de IoT, especialmente em áreas de difícil acesso com cobertura de comunicação limitada, como no caso da piscicultura. A Figura 4 mostra o diagrama de pinagem da placa. Na Figura 5 observa-se a placa e antenas.

Figura 4 – Pinagem da placa LilyGo SIM7000G



Fonte: LILYGO (2023)

Figura 5 – Placa de desenvolvimento LilyGo SIM7000G



Fonte: LILYGO (2023)

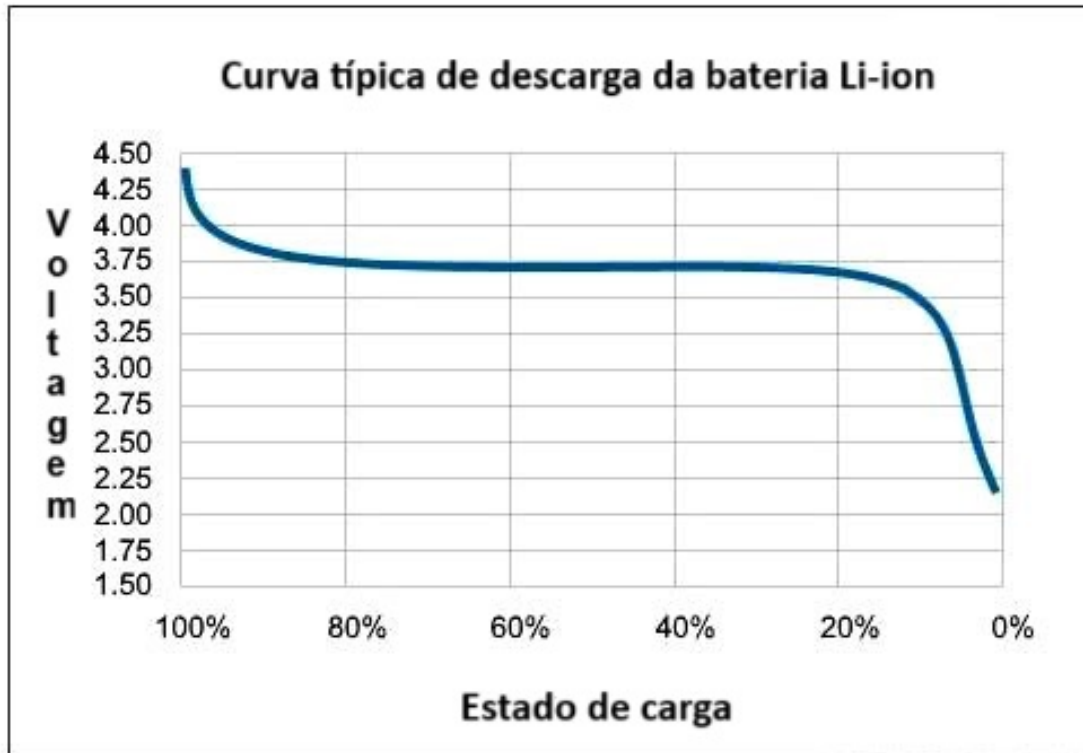
3.1.1.1 Bateria

Utilizou-se uma bateria modelo 18650, de íon de lítio (Li-Ion) de alta capacidade, da fabricante Elgin, com capacidade de carga de 2.600 mAh. A escolha foi condicionada pela própria placa LILYGO®, uma vez que o suporte físico de encaixe da placa ter sido projetado para este modelo.

A escolha do modelo também foi norteadada pela capacidade de carga, em função da necessidade de maximizar a eficiência energética do sistema, uma vez que a fonte de recarga principal é um painel solar. Pelo fato de termos dias nublados ou chuvosos que podem comprometer a geração de energia suficiente para a recarga da bateria, a alta capacidade de armazenamento se fez necessária.

A bateria de Li-Ion modelo 18650 possui um comportamento universal de descarga característico, mostrado na Figura 6. Pode-se constatar que o modelo é capaz de manter a tensão relativamente estável por um significativa porção do seu estado de carga, contribuindo para a autonomia energética do sistema.

Figura 6 – Curva de descarga da bateria



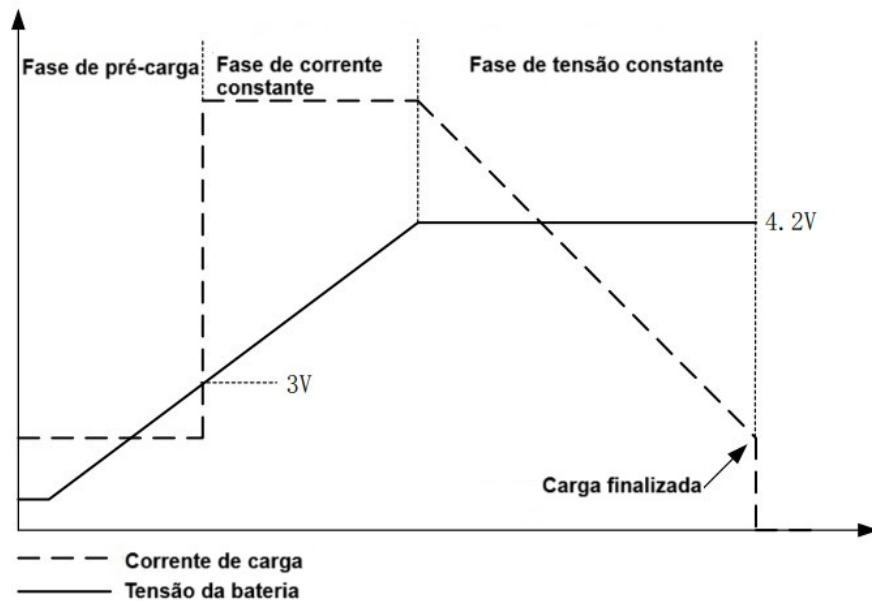
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.1.2 Módulo carregador de bateria CN3065

O emprego de um controlador de carregamento de bateria acoplado ao sistema tem como objetivo o controle de sobretensão, de forma a manter a operação energética estável.

O módulo CN3065 é integrado à placa de desenvolvimento LILYGO® SIM7000G. É um controlador linear de carregamento para baterias, que opera com tensão de entrada entre 4,4V e 6V. Inclui um *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOS-FET) interno, eliminando componentes externos como resistores de detecção e diodos. Ideal para sistemas alimentados por energia solar, utiliza um ADC de 8 bits para ajustar automaticamente a corrente de carregamento com base na fonte de energia disponível. Possui controle térmico para regular a corrente em condições de alta temperatura e tem uma tensão de regulação interna de 4,2 V, ajustável externamente. Entra em modo de espera com consumo abaixo de 3 μ A (CONSONANCE, 2024). A Figura 7 ilustra o perfil de carregamento da bateria através do módulo.

Figura 7 – Perfil de carregamento do CN3065



Fonte: CONSONANCE (2024)

3.1.1.3 RTC Real Time Clock

O **RTC** é usado para gerar as interrupções ou gerenciar temporizações que alteram o modo de operação do microcontrolador.

Foi necessário utilizar o **RTC** interno da ESP32 para gerenciar o tempo de operação e determinar os intervalos nos quais o microcontrolador desperta para realizar as leituras dos sensores. Este gerenciamento foi implementado diretamente no algoritmo como um temporizador, eliminando a necessidade de um módulo **RTC** externo e otimizando a eficiência energética.

O **RTC** interno não realiza a contagem de data e hora diretamente, mas opera com base em contadores, que podem ser configurados para medir intervalos de tempo específicos, como minutos. Dessa forma, é possível agendar eventos, como o envio de leituras dos sensores para a plataforma. Tem uma precisão limitada e pode sofrer desvios, dependendo das condições de uso. Durante o modo *deep sleep*, utiliza um oscilador interno de baixa potência com uma frequência nominal de 150 kHz, que pode resultar em desvios de tempo acumulados. Testes práticos indicam que, em um período de um dia, os desvios podem variar de 5 a 10 minutos, dependendo das condições ambientais e da configuração do sistema (RETROARCHYOSHI, 2022).

No contexto deste projeto, a ausência de um banco de dados local e sem a necessidade de interrupções externas, elimina-se a necessidade de registro de data, pois o controle temporal é gerenciado diretamente pela plataforma *Blynk*. Desta forma, a utilização do **RTC** interno é adequada e suficiente.

3.1.1.4 Modem SIM7000G

Integrado à placa de desenvolvimento LILYGO® SIM7000G, o módulo SIM7000G utiliza tecnologia de rede *wireless* de baixa potência, característica das redes LPWA, permitindo a transmissão de dados em longas distâncias com eficiência energética. O módulo é utilizado para efetuar a conectividade sem fio entre o sistema e a rede da operadora móvel, viabilizando a transmissão dos dados coletados pelos sensores para a plataforma *dashboard Blynk*. Possui homologação pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), assegurando sua conformidade com os padrões regulatórios brasileiros, conforme certificado de homologação (ANATEL, 2021).

A comunicação entre o modem e o microcontrolador ESP32 ocorre por meio da interface *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)*, utilizando comandos AT (*Attention Commands*) especificados pelo fabricante (SIMCOM, 2018). Exemplos destes comandos são listados na Tabela 2. Esses comandos permitem o controle e a configuração do modem, sendo obrigatórios para o funcionamento do sistema. A biblioteca *TinyGSM*, de código *open source*, foi empregada para simplificar essa interação, abstraindo a necessidade de enviar comandos diretamente ao modem. Essa biblioteca disponibiliza funções prontas, otimizando o desenvolvimento e a integração do sistema.

Para estabelecer a comunicação, foram configurados na placa LilyGo os pinos *General-Purpose Input/Output (GPIO)* 26 para recepção de dados (RX), GPIO 27 para transmissão de dados (TX) e GPIO 4 para o controle de energização do modem. O consumo de energia do modem varia conforme a potência de transmissão utilizada, impactando diretamente a autonomia do sistema. Em condições típicas, o modem consome 195mA (XINYUAN-LILYGO, 2022).

3.1.1.5 Monitoramento de tensões

A placa de desenvolvimento possui recursos integrados para o monitoramento das tensões da bateria e do painel fotovoltaico. O GPIO 35 está conectado a um divisor de tensão, permitindo a leitura da tensão da bateria, enquanto o GPIO 36 é dedicado à monitoração da tensão do painel solar. Esses pinos funcionam como entradas analógicas, cujos sinais são processados pelo conversor ADC interno do ESP32. O ADC converte os sinais analógicos em valores digitais, que são interpretados pelo algoritmo para calcular as tensões do sistema.

3.1.1.6 Funcionamento do *Analog Digital Converter ADC*

Nos microcontroladores em geral, o valor lido por um pino GPIO analógico é o resultado da conversão do ADC, que transforma a tensão aplicada ao pino em um valor digital inteiro (ADCvalue), dado pela função $ADCvalue = analogRead(adcPin)$, com resolução de 12 bits, por padrão. Isso significa que o valor digital pode variar de 0

a 4095, representando uma faixa de tensão entre 0 e a Tensão de referência (V_{ref}), que é de 3,3V no caso da ESP32. A relação entre a Tensão de entrada (V_{in}) e o $ADCvalue$, é dado pela Equação 3.1:

Tabela 2 – Principais comandos AT e suas funções

Comando AT	Descrição/Função
AT	Verifica se o modem está respondendo corretamente.
AT+GMR	Obtém informações sobre a versão do firmware do modem.
AT+COPS=?	Lista as operadoras disponíveis na área de cobertura.
AT+COPS?	Consulta a operadora atualmente registrada no modem.
AT+COPS=?	Configura o registro manual do modem em uma operadora específica.
AT+CNMP?	Consulta o modo de operação(LTE / NB-IoT).
AT+CNMP=?	Define o modo de operação do modem, LTE ou NB-IoT.
AT+CSQ	Consulta a qualidade do sinal recebido pelo modem.
AT+CEREG?	Verifica o estado de registro na rede LTE/NB-IoT.
AT+CGATT?	Verifica se o modem está anexado à rede de dados.
AT+CPIN?	Verifica o estado do PIN do SIM card.
AT+CPOWD=1	Desliga o modem de forma controlada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

$$V_{in} = \left(\frac{ADCvalue}{4095} \right) \times V_{ref} \quad (3.1)$$

3.1.2 Sensores

3.1.2.1 Sensor de Potencial Hidrogeniônico (pH)

Para realizar a leitura dos valores de pH, utilizou-se o sensor analógico da fabricante DFRobot, modelo SEN0161 (DFROBOT, 2020), ilustrado na Figura 8. A comunicação com o microcontrolador foi estabelecida utilizando o pino GPIO 34, configurado como entrada analógica.

O sensor SEN0161 é composto por um eletrodo de vidro sensível ao íon hidrogênio e um circuito de condicionamento de sinal que converte a variação de tensão em um valor proporcional ao pH da solução. É capaz de operar em toda a faixa de medição de pH (0 e 14), com uma precisão de $\pm 0,1$ em temperatura ambiente (25°C). A faixa

de temperatura de operação é de 5 a 60°C. O tempo de resposta é inferior a 2 minutos. A tensão de saída varia linearmente com o nível de acidez ou alcalinidade da amostra, permitindo a calibração do sistema para garantir medições confiáveis.

O princípio de funcionamento do sensor baseia-se na medição da diferença de potencial elétrico gerada entre o eletrodo de vidro e um eletrodo de referência submerso na solução. Essa diferença de potencial é causada pela interação dos íons de hidrogênio com a membrana de vidro do eletrodo, que gera uma tensão proporcional à concentração de íons H^+ na solução. O circuito de amplificação integrado ao sensor ajusta essa tensão para um nível adequado à leitura pelo microcontrolador, garantindo uma medição precisa e estável.

Figura 8 – Sensor de pH



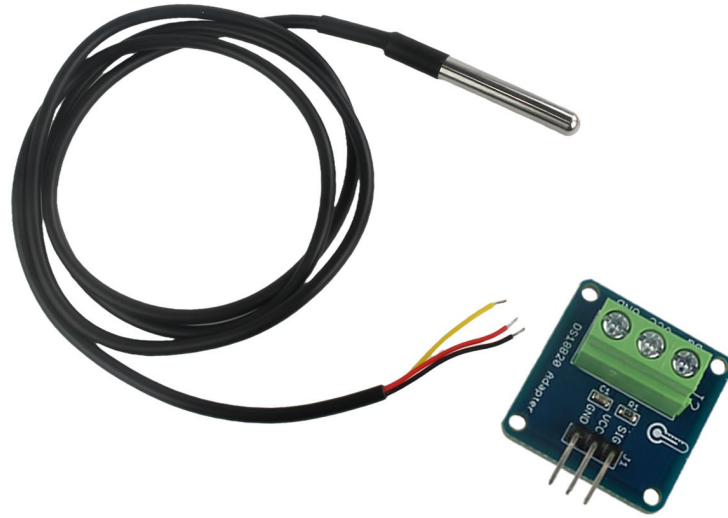
Fonte: DFROBOT (2020)

3.1.2.2 Sensor de temperatura

O sensor de temperatura DS18B20, à prova d'água, é um dispositivo considerado de boa precisão, sendo compatível com Arduino, Raspberry Pi, ARM, ESP32. É equipado com comunicação via um único fio (*one wire*). O elemento sensor e os cabos de conexão apresentam boa vedação (Figura 9), e a capa do elemento sensor é de aço inoxidável, características que possibilitam a operação submersa.

Possui uma ampla faixa de medição (-55°C a +125°C). A precisão é configurável: $\pm 0,5^\circ\text{C}$ para uma resolução de 9 bits, com um tempo de leitura de 93,75 ms. Para faixas de temperatura mais restritas, a precisão melhora e o tempo de leitura aumenta: $\pm 0,5^\circ\text{C}$ com 9 bits, $\pm 0,25^\circ\text{C}$ com 10 bits (tempo de leitura de 187 ms), $\pm 0,125^\circ\text{C}$ com 11 bits (tempo de leitura de 375 ms), e $\pm 0,0625^\circ\text{C}$ com a resolução padrão de 12 bits (tempo de leitura de 750 ms) (USINAINFO, 2023). Cabe salientar que estes valores são nominais, sendo bem diferentes os valores efetivos de incerteza de medição observados na prática, conforme descrito no Apêndice C.

Figura 9 – Sensor de temperatura

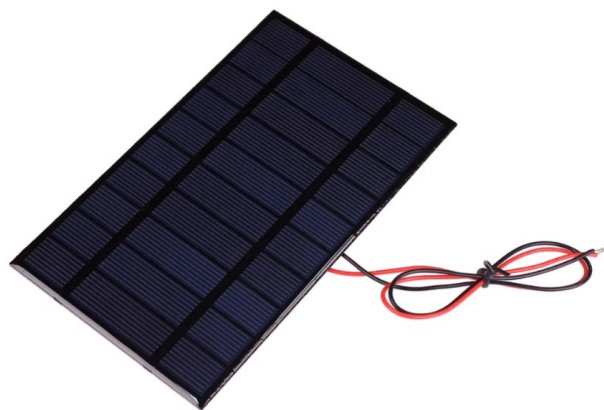


Fonte: UsinaInfo (2023)

3.1.3 Painel fotovoltaico

Para atender às necessidades energéticas do projeto e garantir a autossuficiência do sistema, foram utilizados dois mini-módulos (painéis) fotovoltaicos, com dimensões de 142mm x 85mm, e apresentando as seguintes capacidades nominais: potência elétrica gerada de 2 W, tensão de máxima potência de 5V, corrente de máxima potência de 400 mA. Os módulos foram ligados em paralelo, de forma a atender as condições de operação exigidas pelo módulo carregador, quais sejam, tensão de entrada entre 4,4V e 6V, e corrente máxima admissível de 900mA (CONSONANCE, 2024). A Figura 10 ilustra o modelo selecionado.

Figura 10 – Painel fotovoltaico



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.3.1 Parâmetros principais de um painel fotovoltaico

Os painéis fotovoltaicos possuem características técnicas que determinam sua eficiência e adequação a diferentes aplicações. Entre os principais parâmetros estão:

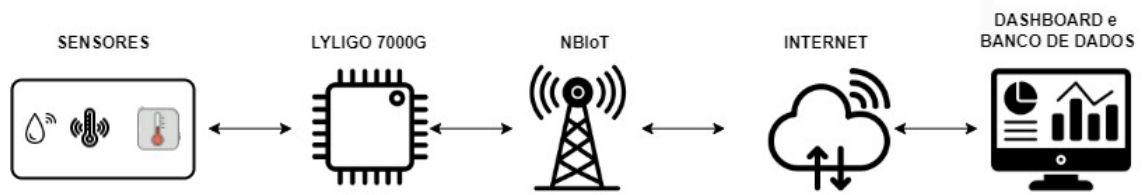
- **Potência máxima (P_{max}):** indica a potência elétrica máxima que o painel pode gerar em condições ideais;
- **Tensão de circuito aberto (V_{oc}):** indica a maior tensão elétrica que o painel fotovoltaico pode gerar quando seus terminais estão desconectados (circuito aberto);
- **Corrente de curto-circuito (I_{sc}):** indica a corrente máxima que o painel pode fornecer em caso de curto-circuito entre seus terminais;
- **Tensão na máxima potência (V_{mp}):** indica a tensão do ponto de operação onde o painel entrega sua potência máxima, em função da carga conectada;
- **Corrente na máxima potência (I_{mp}):** indica a corrente elétrica correspondente ao ponto de máxima potência, com a carga conectada;
- **Irradiância:** medida da quantidade de energia solar que incide sobre uma área específica, por unidade de tempo; é expressa em watts por metro quadrado (W/m^2);
- **Eficiência:** taxa de conversão da energia solar incidente em eletricidade, definida como: $\eta = \frac{P_{max}}{\text{Área do painel} \times \text{Irradiância}}$.

Por padrão, os fabricantes destes módulos informam valores nominais dos parâmetros acima, medidos para uma irradiância de $1.000 W/m^2$. De acordo com [Green et al. \(2015\)](#), é importante uma análise detalhada destas especificações, de forma a garantir a eficiência e a durabilidade do sistema.

3.2 Arquitetura do sistema

A arquitetura do sistema, ilustrada na [Figura 11](#), tem como ponto de partida a aquisição dos valores dos parâmetros de qualidade da água pelos sensores, bem como valores de tensão elétrica da bateria e do painel solar. Estes dados são enviados para a placa de desenvolvimento LilyGo SIM7000G, que possui um microcontrolador ESP32 responsável pelo processamento das informações coletadas. O [Quadro 2](#) apresenta a configuração de utilização dos **GPIO**, que são portas programáveis de entrada e saída de dados utilizadas para prover a interface entre os periféricos e os microcontroladores/microprocessadores. Após o processamento, os dados são transmitidos através do módulo **NB-IoT** integrado à placa de desenvolvimento. Os dados transmitidos são então recebidos por uma plataforma de *dashboard*, que apresenta as informações de forma visual.

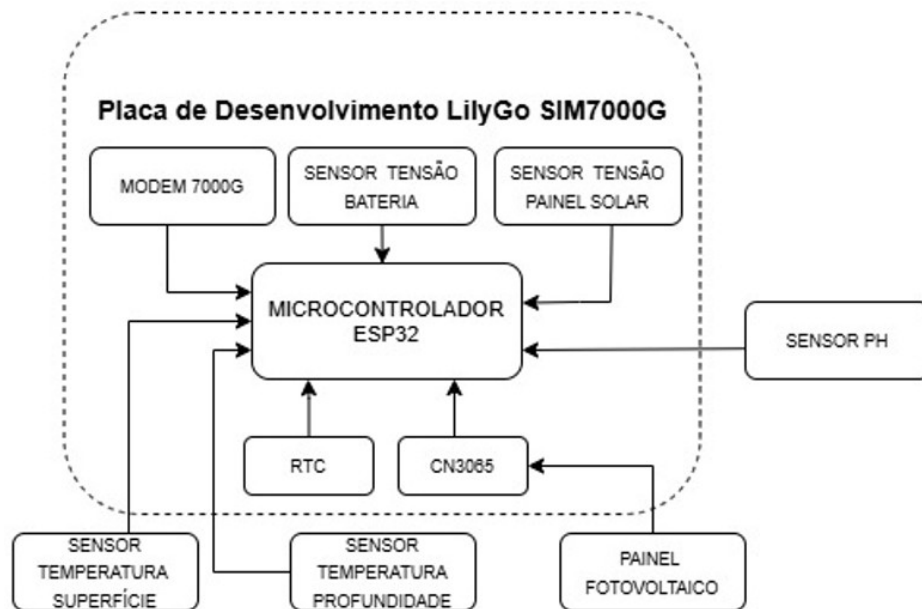
Figura 11 – Arquitetura geral



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 12 apresenta o diagrama de blocos dos componentes.

Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 2 – GPIOs utilizados no projeto

GPIO	Descrição	Função no Projeto
26	Modem Rx	Comunicação serial, recepção de dados do modem SIM7000G.
27	Modem Tx	Comunicação serial, transmissão de dados para o modem SIM7000G.
4	Modem PowerKey	Controle de energia do modem SIM7000G.
32	Sensor temperatura	Leitura da temperatura na profundidade.
33	Sensor temperatura	Leitura da temperatura na superfície.
35	Bateria	Monitoramento da tensão da bateria.
36	Painel fotovoltaico	Monitoramento da tensão do painel solar.
34	Sensor pH	Leitura analógica do sensor de pH.

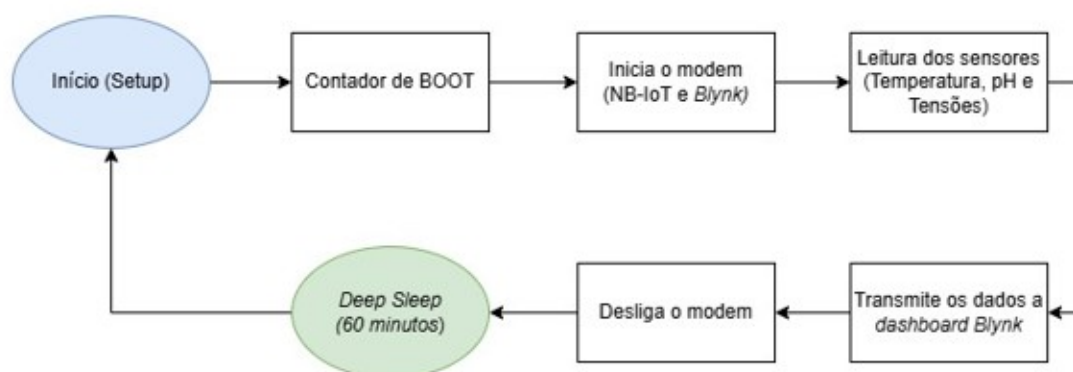
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Elementos de software

3.3.1 Algoritmo

No desenvolvimento do algoritmo para o microcontrolador, foi utilizada a *Integrated Development Environment (IDE)* do Arduíno para a escrita do código-fonte. A motivação da escolha dessa ferramenta foi devido à sua simplicidade, ampla comunidade de suporte e facilidade de integração com a ESP32. A *IDE* permite escrever, compilar e carregar o código no dispositivo de maneira eficaz, oferecendo uma ampla gama de bibliotecas *open source* que facilitam o desenvolvimento. A [Figura 13](#) apresenta o fluxograma do algoritmo. O código-fonte do sistema é apresentado no Apêndice A.

Figura 13 – Fluxograma do algoritmo



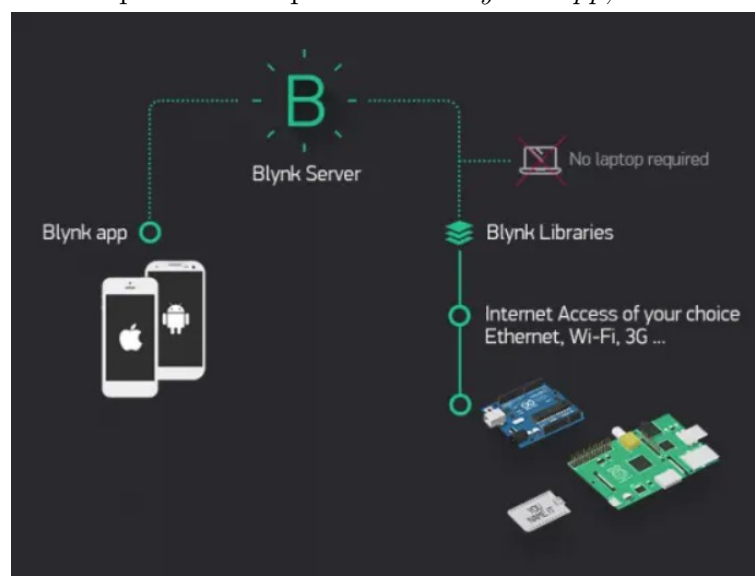
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.2 Plataforma *Dashboard Blynk*

A plataforma *Blynk*¹ é uma plataforma de monitoramento e controle de *hardware* programável, com ênfase em IoT, que facilita a criação de interfaces para o monitoramento e controle remoto de dispositivos conectados. A plataforma oferece uma interface de usuário acessível através de um aplicativo móvel e uma *dashboard* na web, com suporte a uma ampla gama de *hardware*, incluindo microcontroladores populares como ESP32, Arduino e Raspberry Pi. Sua arquitetura é composta por três componentes principais: *Blynk App*, *Blynk Server* e *Blynk Library*, conforme ilustrado na Figura 14 (EMBARCADOS, 2021). Entre as funcionalidades principais estão a criação de *widjets* customizáveis, comunicação em tempo real e automações.

A escolha da plataforma *Blynk* para este projeto foi baseada em sua simplicidade, eficiência e compatibilidade com o *hardware* utilizado, além de sua capacidade de oferecer soluções rápidas e flexíveis para aplicações em IoT. Um dos destaques é a facilidade de configuração inicial, onde o dispositivo é vinculado ao *Blynk Server* por meio de um *token* de autenticação gerado na criação do projeto na aplicação móvel ou na *dashboard* web. Esse token é inserido no algoritmo do microcontrolador, permitindo uma comunicação com o servidor.

Figura 14 – Arquitetura da plataforma *Blynk: App, Server e Libraries*



Fonte: EMBARCADOS (2018)

Neste projeto, a plataforma foi empregada para criar uma interface de usuário intuitiva e acessível, permitindo o monitoramento dos valores dos sensores. A integração com a placa LilyGo SIM7000G viabilizou a transmissão de dados dos sensores para o *Blynk Server*, de onde são disponibilizados em tempo real tanto no *Blynk App* quanto na *dashboard* web.

¹ <https://blynk.io/>

A plataforma eliminou a necessidade de infraestrutura local, como servidores físicos, banco de dados, reduzindo custos e tempo de implementação. A disponibilidade de documentação abrangente e de uma biblioteca de código *open source* também foi fator determinante pela escolha no projeto. Dessa forma, o *Blynk* se mostrou uma solução confiável e eficiente para o monitoramento remoto.

A escolha do *Blynk* como plataforma para o dashboard do sistema deve-se à sua facilidade de uso e integração direta com dispositivos IoT, permitindo a visualização dos dados de forma prática e acessível. No entanto, outras plataformas como Grafana e ThingsBoard oferecem maior flexibilidade para análise avançada de séries temporais, integração com bancos de dados robustos e maior personalização dos painéis. Para aplicações que exigem processamento mais detalhado dos dados, ferramentas como Python (Pandas, SciPy) ou R podem ser utilizadas para análises estatísticas e previsões.

3.3.2.1 Planos da plataforma *Blynk* e limitações do plano gratuito

A plataforma *Blynk* oferece diferentes planos de assinatura (Quadro 3) para atender a variadas necessidades, desde projetos pessoais até soluções empresariais. Cada plano possui recursos e capacidades específicas, que podem impactar diretamente o desenvolvimento e a operação de sistemas baseados na plataforma.

Neste trabalho, foi utilizado o plano gratuito devido à sua facilidade de acesso e por atender aos requisitos mínimos do projeto. Contudo, este plano apresenta limitações.

O plano gratuito suporta até 10 dispositivos e 10 *templates*, o que foi suficiente para este projeto, considerando que apenas um dispositivo (a placa LilyGo SIM7000G) foi utilizado. Entretanto, o armazenamento de dados históricos está limitado a 1 semana, restringindo análises mais longas de comportamento do sistema e dos parâmetros monitorados.

Além disso, o plano gratuito não permite personalização da interface do *dashboard*, limitando a experiência do usuário às opções básicas de *widgets* oferecidas. Apesar de suficientes para os objetivos do projeto, essa restrição reduz a flexibilidade para criar interfaces mais detalhadas ou adequadas a públicos específicos.

No escopo deste projeto, os recursos disponíveis foram suficientes para viabilizar o monitoramento dos parâmetros de qualidade da água. Contudo, futuros aprimoramentos ou expansões do sistema podem demandar a migração para um plano pago, como o *Pro*, para suprir demandas mais complexas, como maior capacidade de armazenamento ou integração avançada.

Quadro 3 – Comparativo dos planos do *Blynk*

Recurso	Gratuito	Pro	<i>Enterprise</i>
Número de dispositivos	Até 10	Até 500	Personalizado
Número de usuários	1	Até 500	Personalizado
<i>Templates</i> de dispositivos	Até 10	Até 50	Personalizado
Armazenamento histórico	1 semana	6 meses	Até 12 meses
<i>Widgets</i> disponíveis	Básicos	Avançados	Avançados
Servidor privado	Não disponível	Não disponível	Disponível
App personalizado	Não disponível	Não disponível	Disponível

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.3 Bibliotecas

Para o desenvolvimento do algoritmo, foram utilizadas bibliotecas de código aberto (*open source*), apresentadas no [Código 3.1](#), que oferecem flexibilidade, transparência e uma ampla comunidade de suporte. A biblioteca `<TinyGsmClient.h>` foi empregada para estabelecer a comunicação com o modem SIM7000G, enquanto a `<BlynkSimpleTinyGSM.h>` permitiu a integração com a plataforma Blynk. Para a leitura do sensor de temperatura DS18B20, foram utilizadas as bibliotecas `<OneWire.h>` e `<DallasTemperature.h>`, que simplificam a comunicação com o protocolo *OneWire* e o manuseio de sensores da família Dallas. O uso dessas bibliotecas *open source* permitiu uma implementação eficiente, reduzindo a complexidade do desenvolvimento e garantindo maior adaptabilidade ao sistema.

Código 3.1 – Bibliotecas utilizadas no algoritmo

```

1 #include <TinyGsmClient.h>
2 #include <BlynkSimpleTinyGSM.h>
3 #include <OneWire.h>
4 #include <DallasTemperature.h>

```

3.3.4 Configuração dos módulos

A configuração dos módulos define os pinos e parâmetros necessários para a operação do sistema. No exemplo do [Código 3.2](#), são especificados os **GPIO** para sensores, pinos de controle e comunicação, além de informações relacionadas à configuração de acesso à plataforma Blynk.

Código 3.2 – Configuração dos módulos

```

1 #define ONE_WIRE_BUS1 33 // Barramento OneWire do primeiro sensor de temperatura
2 #define ONE_WIRE_BUS2 32 // Barramento OneWire do segundo sensor de temperatura
3 #define MODEM_PWRKEY 4 // Pino de controle de energia do modem
4 #define MODEM_TX 27 // Pino TX do modem
5 #define MODEM_RX 26 // Pino RX do modem

```

```

6 #define BAT_ADC 35          // Pino ADC para leitura da tensão da bateria
7 #define SOLAR_ADC 36      // Pino ADC para leitura da tensão do painel solar
8 #define PH_ADC 34         // Pino ADC para leitura do sensor de pH
9 #define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL28uIeWnKy" // ID do template Blynk
10 #define BLYNK_TEMPLATE_NAME "T SIM7000" // Nome do template no Blynk
11 #define BLYNK_AUTH_TOKEN "6j89BoTK3BAqD_hDuDhTXL8CICKBUlpS" //Token de autenticação
    no Blynk

```

3.3.5 Leitura dos sensores

O Código 3.3 apresenta a implementação das funções que são utilizadas para coletar os valores de cada sensor e enviá-los a plataforma *dashboard*. Por padrão os sensores encontram-se em modo *deep sleep*, e são ativados quando o microcontrolador entram no modo *active mode*.

Código 3.3 – Leitura e envio das leituras dos sensores

```

1 // Lê e envia temperaturas dos sensores de temperatura DS18B20
2 void readTemperature() {
3     sensors1.requestTemperatures(); // Solicita leitura ao sensor no barramento 1
4     sensors2.requestTemperatures(); // Solicita leitura ao sensor no barramento 2
5     float temp1 = sensors1.getTempCByIndex(0); // Obtém temperatura do sensor 1
6     float temp2 = sensors2.getTempCByIndex(0); // Obtém temperatura do sensor 2
7     Blynk.virtualWrite(V2, temp1); // Envia temperatura do sensor 1 ao Blynk
8     Blynk.virtualWrite(V3, temp2); // Envia temperatura do sensor 2 ao Blynk
9 }
10
11 // Função genérica para ler tensões a partir de pinos ADC
12 float readVoltage(uint8_t pin) {
13     int vref = 1050; // Valor de referência ajustado para o ADC
14     uint16_t adcValue = analogRead(pin); // Lê o valor ADC do pino especificado
15     float voltage = ((float)adcValue / 4095.0) * 2.0 * 3.3 * (vref / 1000.0); //
    Converte para tensão
16     return voltage;
17 }
18
19 // Lê e envia tensões da bateria e do painel solar
20 void readTensao() {
21     float batteryVoltage = readVoltage(BAT_ADC);
22     float solarVoltage = readVoltage(SOLAR_ADC);
23     Blynk.virtualWrite(V0, batteryVoltage); // Envia tensão da bateria ao Blynk
24     Blynk.virtualWrite(V1, solarVoltage); // Envia tensão do painel solar ao Blynk
25 }
26
27 // Lê e calcula o valor do pH a partir do sensor
28 void readPH() {
29     for (int i = 0; i < 10; i++) {

```

```

30     buffer_arr[i] = analogRead(PH_ADC); //Lê valores do ADC para o sensor de pH
31     delay(30); // Atraso para estabilidade entre leituras
32 }
33 // Ordena os valores para descartar extremos
34 for (int i = 0; i < 9; i++) {
35     for (int j = i + 1; j < 10; j++) {
36         if (buffer_arr[i] > buffer_arr[j]) {
37             temp = buffer_arr[i];
38             buffer_arr[i] = buffer_arr[j];
39             buffer_arr[j] = temp;
40         }
41     }
42 }
43 // Calcula a média dos valores intermediários
44 avgval = 0;
45 for (int i = 2; i < 8; i++) avgval += buffer_arr[i];
46
47 float tensao = (float)avgval * 3.3 / 4095 / 6; // Converte ADC para tensão
48 float ph_act = -4.9628 * tensao + calibration // Calcula o valor do pH
49 Blynk.virtualWrite(V4, ph_act); //Envia valor do pH ao Blynk
50 delay(1000);
51 }

```

3.4 Orçamento do sistema

Nesta seção, são apresentados os custos associados ao desenvolvimento do sistema. A [Tabela 3](#) apresenta os custos dos componentes do projeto. Contemplam a aquisição de sensores, módulos de comunicação e demais componentes necessários para a construção do sistema, e insumos necessários ao desenvolvimento, e incluem impostos e transporte. Não incluem o custo de mão-de-obra necessária para a montagem do sistema, sua programação, calibração dos sensores e instalação no local.

A este custo, associa-se uma mensalidade recorrente de R\$8, referente ao plano de dados exclusivo para elementos IoT da operadora VIVO, resultando em um custo global de aquisição e operação bastante baixo. A escolha do plano gratuito da plataforma *Blynk* contribui para manter reduzidos os custos, eliminando a necessidade de assinaturas. Entretanto, a limitação do plano gratuito impõe restrições à quantidade de dados armazenados e funcionalidades disponíveis.

Tabela 3 – Custos dos componentes do projeto

Componente	Quantidade	Preço Unitário (R\$)
LILYGO® TTGO T-SIM7000G 16MB	1	303,98
Sensor de pH Arduino + Módulo PH4502C	1	209,20
Placa Solar 5V 400mA	2	86,95
Solução Tampão para Calibração pH 07 e pH 04	1	43,97
Solução Tampão para Calibração pH 10	1	45,34
Chip IoT Vivo 50MB (Plano Mensal)	1	8,00
Sensor de Temperatura DS18B20 à Prova d'Água	2	13,90
Kit Jumpers 20cm x 120 Unidades	1	27,90
Protoboard 830 Pontos	1	16,90
Resistores 47k Ω 1/4W	2	1,35
Real Time Clock RTC DS3231	1	14,90
Total Geral	-	R\$874,59

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na [Tabela 4](#), apresentam-se os valores para aquisição do sensor de OD e da caixa hermética utilizada para o acondicionamento do sistema. Estes elementos não foram adquiridos devido à limitação de recursos financeiros para o projeto. A caixa utilizada nos testes em ambiente real (Capítulo 4) foi obtida por empréstimo. Constata-se que, adicionando-se estes valores, o custo total básico do sistema atingiria R\$ 2.780,34, significativamente maior.

Tabela 4 – Custo sensor de OD

Componente	Quantidade	Preço Unitário (R\$)
Medidor de Oxigênio Dissolvido Analógico	1	1.800,50
Caixa hermética	1	105,25

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em resumo, o sistema desenvolvido demonstra ser financeiramente bastante competitivo em comparação com as soluções comerciais hoje disponíveis no mercado. Desta forma, apresenta um grande potencial.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização do sistema de medição

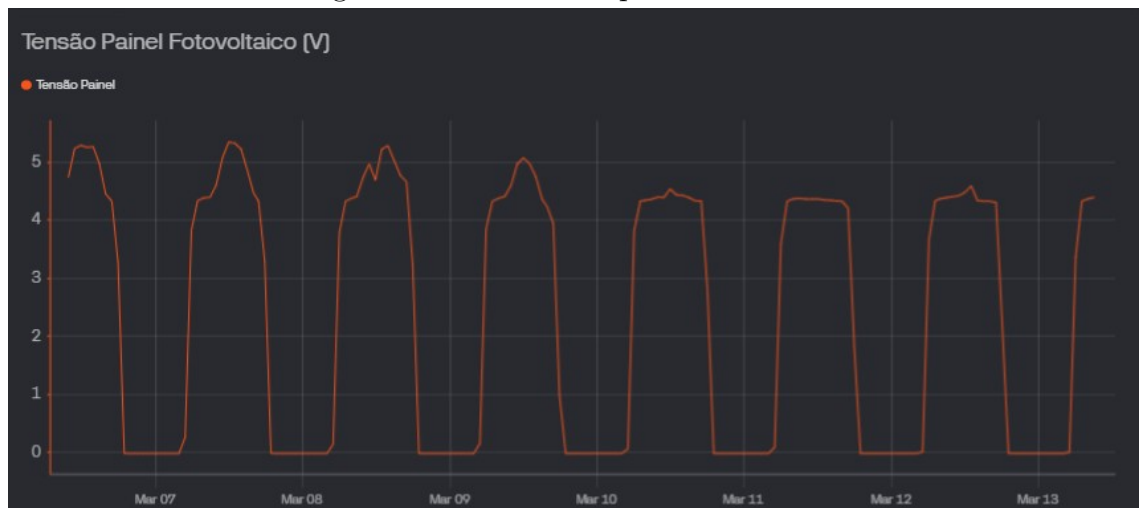
Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento e teste do sistema.

4.1.1 Comportamento do painel fotovoltaico

Conforme citado na Seção 3.1.3.1, foi realizada uma análise detalhada do comportamento do painel fotovoltaico.

A tensão V_{mp} gerada pelo painel fotovoltaico utilizado no projeto foi monitorada e analisada em condições reais de operação. Os dados foram coletados diretamente pelo sistema e apresentados na *dashboard* Blynk, que registrou os valores ao longo de um período de sete dias. Conforme mostrado na Figura 15, o comportamento do painel segue um ciclo diário característico, com tensões máximas em torno de 5V durante os períodos de maior incidência solar, e queda para valores próximos de zero durante a noite ou em condições de baixa irradiância.

Figura 15 – Tensão do painel fotovoltaico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um ensaio de caracterização dos módulos foi realizado, de forma a avaliar seu comportamento e eficiência. Os ensaios consistiram em medir a intensidade de radiação incidente sobre o módulo, medindo-se simultaneamente a tensão e corrente elétrica fornecida pelo módulo. Para a medição da irradiância, utilizou-se um piranômetro (Instruterm modelo MES-100) (INSTRUTERM, 2024) com incerteza de medição típica de

$\pm 10\text{W}/\text{m}^2$. Para as medições de tensão e corrente, utilizou-se o multímetro alicate modelo AD-7930, da fabricante Icel, com erro para tensão contínua de $\pm(0,5\% + 3\text{d})$ e para corrente contínua de $\pm(3,0\% + 10\text{d})$ (ICEL, 2017).

Na Tabela 5 são apresentados os valores obtidos experimentalmente para o módulo utilizado. Os resultados indicam que os módulos apresentam um comportamento típico, podendo-se constatar como a potência gerada é bastante reduzida em condições de baixa irradiância solar. Constata-se que, para o valor de irradiância de $400\text{ W}/\text{m}^2$, a tensão no painel solar cai para $4,34\text{V}$, insuficiente para atender o módulo carregador CN3065. A eficiência de conversão de energia (razão entre a potência elétrica gerada e a taxa de energia radiativa incidente - Seção 3.1.3.1) resultou em torno de 16% a 19%, valor considerado bom para um mini-módulo de baixo custo.

Tabela 5 – Valores de medição do painel solar.

Irradiância (W/m^2)	Voc (V)	Isc (A)	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)
400	5,15	0,28	4,34	0,21	0,91
800	5,52	0,41	4,79	0,36	1,25
1140	5,56	0,75	4,85	0,45	2,18
1290	5,66	0,78	4,88	0,52	2,54

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2 Consumo energético do sistema

Para avaliar a autonomia energética do sistema, estimou-se o consumo médio do sistema a partir da duração da bateria utilizada, que apresentou uma durabilidade de aproximadamente 100 horas, entre o período de 06/01 às 17h e 10/01 às 20h. A bateria possui uma capacidade nominal de 2600 [mA.h] , conforme especificado pelo fabricante.

O consumo médio do sistema foi calculado dividindo a capacidade nominal da bateria pelo tempo de operação:

$$\text{Consumo médio por hora} = \frac{\text{Capacidade da bateria}}{\text{Duração em horas}} \quad (4.1)$$

$$\text{Consumo médio por hora} = \frac{2.600\text{ mA h}}{100\text{ h}} \approx 26\text{ mA.h/h.} \quad (4.2)$$

Para determinar o consumo médio por dia, o valor diário foi multiplicado por 24 horas:

$$\text{Consumo médio por dia} = \text{Consumo médio por hora} \cdot \text{horas por dia} \quad (4.3)$$

$$\text{Consumo médio por dia} = 26\text{ mA} \cdot 24\text{ horas} \approx 624\text{ mA.h/dia.} \quad (4.4)$$

Com base nesses cálculos, o consumo médio do sistema foi estimado em aproximadamente 26 mA.h por hora, considerando os ciclos de operação com leituras e transmissões, além dos períodos em *deep sleep*. Esses valores refletem o comportamento real do sistema durante os testes práticos, incluindo sensores e modem conectados, sem o uso do painel solar para recarga.

4.1.2.1 *Power Modes* da ESP32

O microcontrolador ESP32 oferece quatro modos de operação tipo *sleep modes* (SYSTEMS, 2024), essenciais para projetos de IoT que requerem baixo consumo energético, descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Modos de operação da ESP32

Power Mode	Descrição	Consumo	RTC Ativo
<i>Active Mode</i>	O processador está ativo, executando tarefas. Periféricos como Wi-Fi e Bluetooth podem estar ligados. É o modo de maior consumo.	95 mA a 240 mA	Sim
<i>Modem Sleep</i>	Wi-Fi, Bluetooth e rádio desativados.	15 mA a 50 mA	Sim
<i>Light Sleep</i>	A CPU é pausada, mas a RAM é mantida. Periféricos, como Wi-Fi, podem ser configurados para despertar o dispositivo.	0,8 mA	Sim
<i>Deep Sleep</i>	Apenas o RTC (Real-Time Clock) interno e partes específicas do sistema permanecem ativos. GPIOs ou temporizador no algoritmo podem reativar o dispositivo.	10 μ A a 150 μ A	Sim
<i>Hibernation</i>	Estado de menor consumo possível. O RTC interno da ESP32 é desligado. Apenas um RTC externo pode ser usado para despertar o dispositivo. Nenhum estado na RAM é preservado.	5 μ A	Não

Fonte: Elaborada pelo autor.

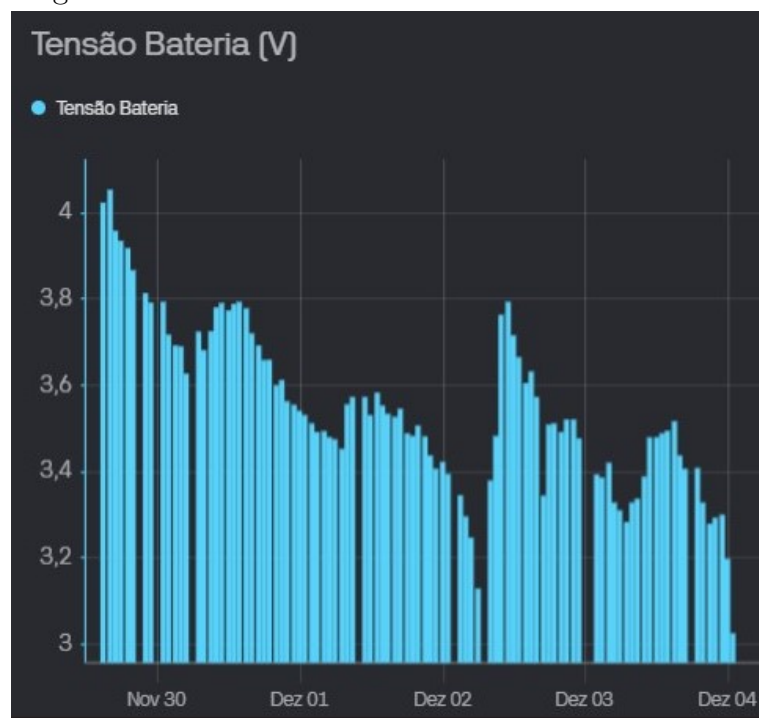
O modo *Deep Sleep* é ideal para aplicações com intervalos de operação predeterminados, como a execução de tarefas a cada 60 minutos, por exemplo. Nesse modo, o RTC

interno permanece ativo, permitindo o agendamento de atividades sem a necessidade de interações externas para despertar o sistema. Por ser eficiente em termos de consumo de energia e atender aos requisitos funcionais do projeto, como a não desativação do *RTC*, o modo *Deep Sleep* mostrou-se o mais adequado para o presente projeto.

O modem demanda um consumo de energia de cerca de 195 mA em transmissão típica, sendo o principal responsável pelo consumo de energia do sistema. Por isso, o uso do *sleep mode* mostrou-se essencial para aumentar a autonomia do dispositivo.

No início do desenvolvimento, foi utilizado o modo *Active Mode* para o funcionamento do sistema. Nesse estado, foi observado que o consumo de energia da bateria era elevado, resultando em uma descarga rápida, principalmente em dias nublados, com baixa incidência de energia solar, onde não ocorre a recarga da bateria pelo painel fotovoltaico. Essa característica evidenciou que o modo era inadequado para as demandas do projeto, que requer maior eficiência energética e uma operação prolongada com autonomia. A *Figura 16* ilustra o comportamento da tensão da bateria ao longo de um intervalo de tempo de aproximadamente 5 dias, podendo-se observar a rápida degradação da condição de carga da bateria nesta condição.

Figura 16 – Consumo da bateria no modo *Active Mode*



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.3 Autonomia energética do sistema

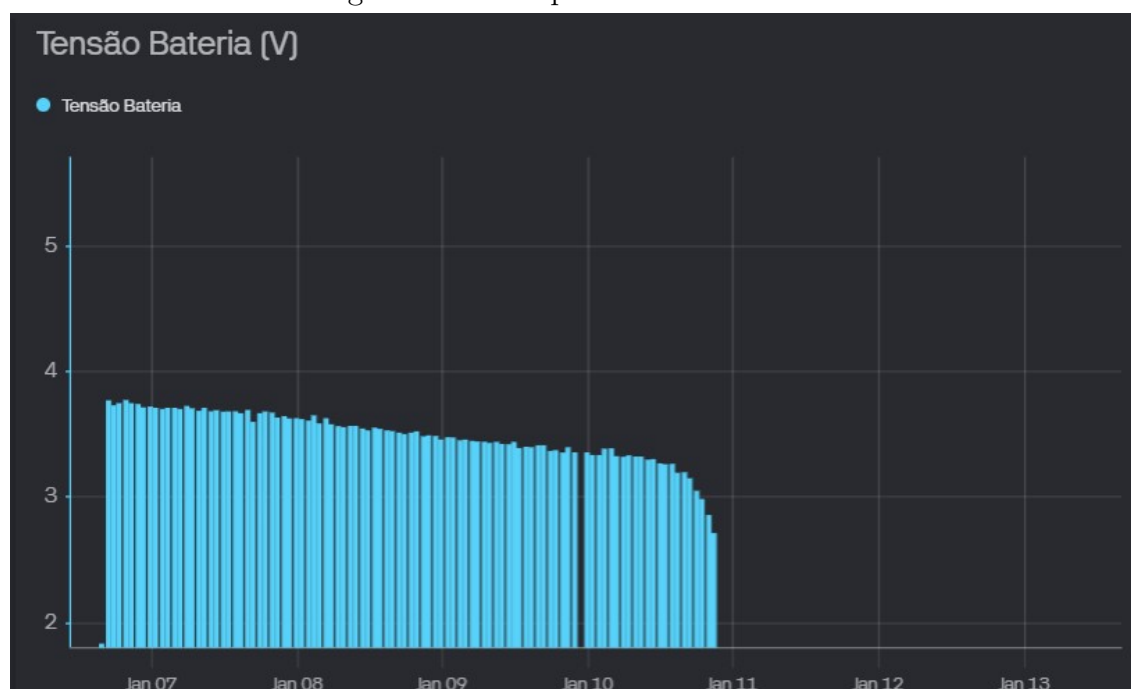
Foi realizado um ensaio para determinação da autonomia energética do sistema de medição. O ensaio foi realizado em bancada, contemplado apenas um ciclo da bateria,

com três sensores externos (dois de temperatura e um de pH) e dois sensores internos (monitoramento da tensão da bateria e do painel solar), com leituras realizadas a cada 1 hora. As informações coletadas foram transmitidas por meio do modem NB-IoT para a plataforma *Blynk*, com cinco mensagens enviadas por hora, totalizando aproximadamente 500 transmissões. Durante o período, o painel solar foi propositalmente desconectado, para permitir a avaliação do desempenho do sistema exclusivamente com energia da bateria. Esta configuração buscou simular condições climáticas adversas, como dias nublados e chuvosos, em que os painéis fotovoltaicos não seriam capazes de fornecer energia necessária para a recarga.

A bateria utilizada no sistema apresentou uma autonomia de aproximadamente 4 dias e 3 horas (99h), com início de operação em 06/01 às 17:00, com tensão inicial de 3,7 V indicando carga máxima, e término em 10/01 às 20:00, atingindo 2,71 V, valor já insuficiente para manter o funcionamento, conforme ilustrado na Figura 17.

Os resultados indicam uma boa autonomia e demonstram a eficiência energética do sistema, conseguindo manter a operacionalidade mesmo em condições sem recarga.

Figura 17 – Comportamento da bateria



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.4 Consumo de dados do sistema

Nesta seção, é apresentado o consumo de dados do sistema durante o período de testes. O sistema enviou mensagens regularmente, com tráfego de dados diário registrado nos cinco primeiros dias de operação. Os valores estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Consumo de dados por dia

Dia	Consumo (kB)
1	36,50
2	39,50
3	36,30
4	38,10
5	38,20

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para determinar o tamanho médio de cada mensagem enviada pelo sistema, utilizamos o consumo diário total de dados e o número de mensagens enviadas por dia. Sabendo que o sistema enviou 120 mensagens por dia, o tamanho médio de cada mensagem foi calculado da seguinte forma:

$$\text{Tamanho médio por mensagem} = \frac{\text{Consumo total por dia (kB)}}{\text{Número de mensagens por dia}} \quad (4.5)$$

Calculando para cada dia:

$$\begin{aligned} \text{Dia 1: } & \frac{36,50 \text{ kB}}{120} \approx 0,30 \text{ kB/mensagem,} \\ \text{Dia 2: } & \frac{39,50 \text{ kB}}{120} \approx 0,33 \text{ kB/mensagem,} \\ \text{Dia 3: } & \frac{36,30 \text{ kB}}{120} \approx 0,30 \text{ kB/mensagem,} \\ \text{Dia 4: } & \frac{38,10 \text{ kB}}{120} \approx 0,32 \text{ kB/mensagem,} \\ \text{Dia 5: } & \frac{38,20 \text{ kB}}{120} \approx 0,32 \text{ kB/mensagem.} \end{aligned}$$

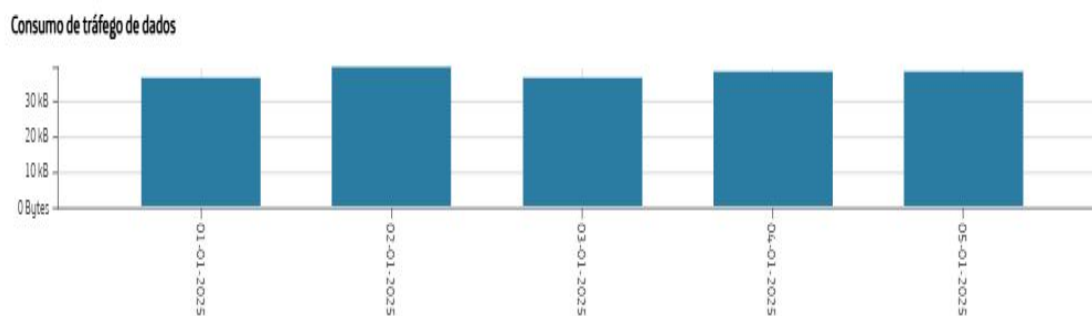
A média do tamanho de cada mensagem foi obtida considerando os cinco dias de operação:

$$\text{Tamanho médio por mensagem (média dos dias)} = \frac{\sum \text{Tamanhos médios por dia}}{\text{Número de dias}} \quad (4.6)$$

$$\text{Tamanho médio por mensagem} = \frac{0,30 + 0,33 + 0,30 + 0,32 + 0,32}{5} \approx 0,31 \text{ kB/mensagem.} \quad (4.7)$$

O gráfico da Figura 18 apresenta a variação do consumo de dados ao longo dos dias.

Figura 18 – Consumo diário de tráfego de dados do sistema



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base nos cálculos, o tamanho médio de cada mensagem enviada pelo sistema foi estimado em aproximadamente 0,31 kB.

Os resultados evidenciam que o sistema apresenta baixo consumo de dados, o que é essencial tanto para garantir o baixo consumo de energia requerido para sua operação auto-suficiente (visto que o modem é o elemento de maior consumo) quanto para garantir um baixo custo quanto à utilização dos serviços de telefonia móvel.

4.2 Testes de validação do sistema de medição

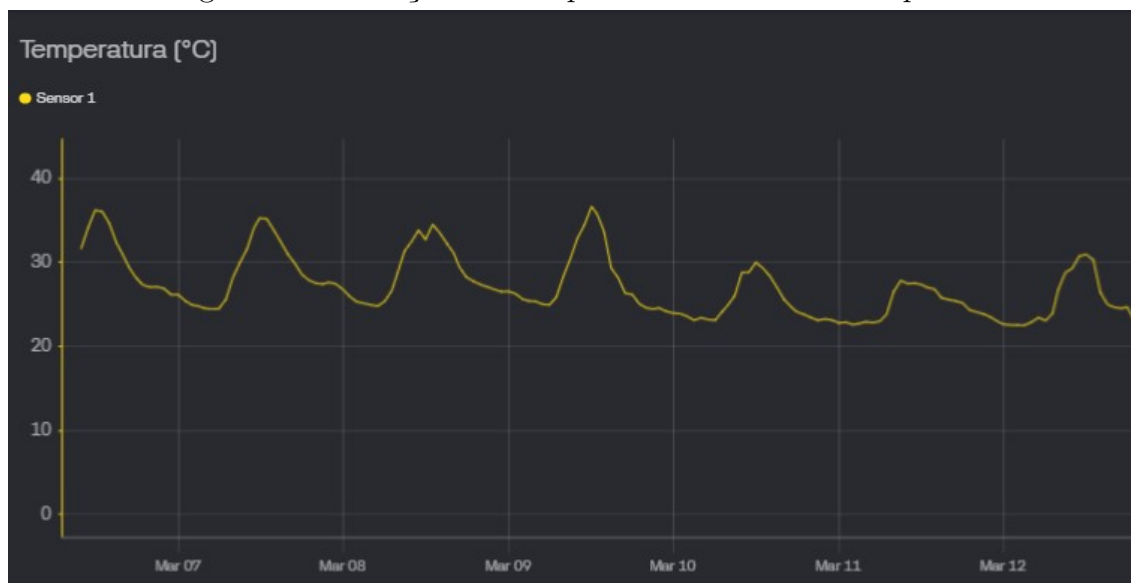
Para validar a solução proposta, foram realizados testes tanto em bancada quanto em uma aplicação real de piscicultura em operação ativa. Esses testes permitiram avaliar o desempenho do sistema em diferentes condições, de forma a avaliar sua efetividade e confiabilidade.

4.2.1 Testes em bancada

Nesta etapa, todos os sensores e o painel fotovoltaico foram integrados ao sistema. O líquido monitorado foi água potável. A temperatura ambiente do local de teste foi alterada por meio de um condicionador de ar, de forma a representar diferentes condições ambientais, simulando cenário próximos às condições reais. O estado da bateria foi monitorado de forma a avaliar o funcionamento contínuo e autônomo do dispositivo proporcionado pela energia solar. Os testes compreenderam o monitoramento dos sinais por períodos de vários dias.

Nas Figuras 19 e 20 observa-se a variação da temperatura ao longo do período de testes, respectivamente na superfície e em profundidade, evidenciando-se um padrão cíclico diário, acompanhando as variações de temperatura do ar ambiente, com picos durante o dia e redução durante a noite.

Figura 19 – Medições de temperatura do sensor de superfície



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 – Medições de temperatura do sensor de profundidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 21 pode-se observar que a medição do pH da solução ao longo do período de teste demonstra grande estabilidade, mantendo-se próxima de 7, com pequenas oscilações influenciadas pela temperatura.

Na Figura 22 apresenta-se a variação da tensão da bateria ao longo do período de teste, evidenciando-se os ciclos de carga e descarga. A tensão oscila entre valores em torno de 4V, indicando o funcionamento do sistema de recarga por energia solar fotovoltaica. As quedas de tensão sugerem períodos de consumo maior, enquanto os picos refletem a recarga da bateria, demonstrando a alternância entre uso e reposição de energia.

Figura 21 – Medições de pH



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – Tensão da bateria

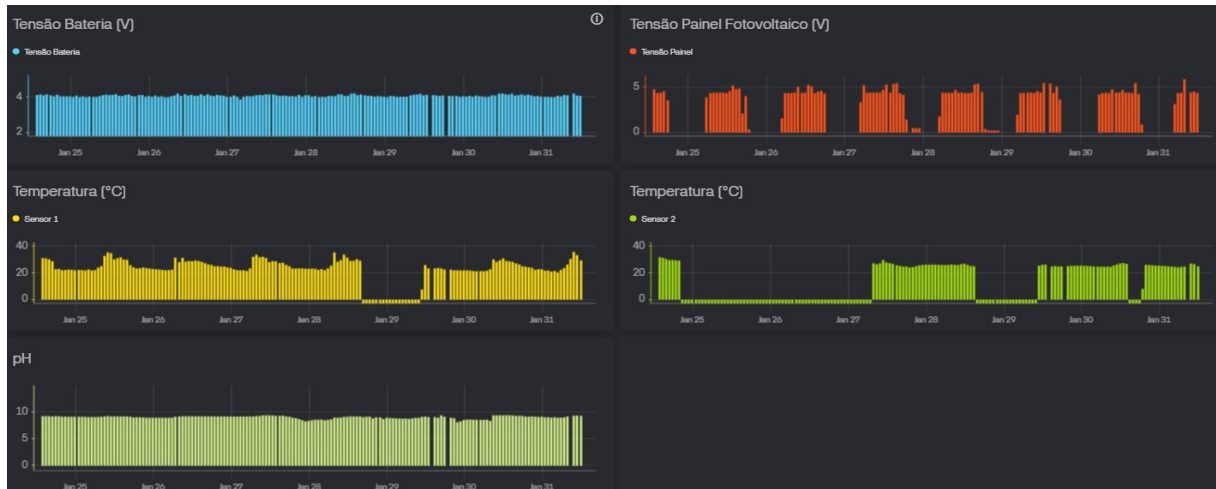


Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme já apresentado na [Figura 15](#), a tensão nos painéis fotovoltaicos apresentam um comportamento típico, com aumento de tensão ao amanhecer, a manutenção de valores acima de 4V durante as horas de maior insolação, e queda de tensão ao anoitecer, refletindo a disponibilidade de luz solar. O valor de tensão cai a zero durante a noite, conforme esperado, indicando ausência de geração. As variações nos valores de pico indicam a influência dos fatores climáticos (nebulosidade).

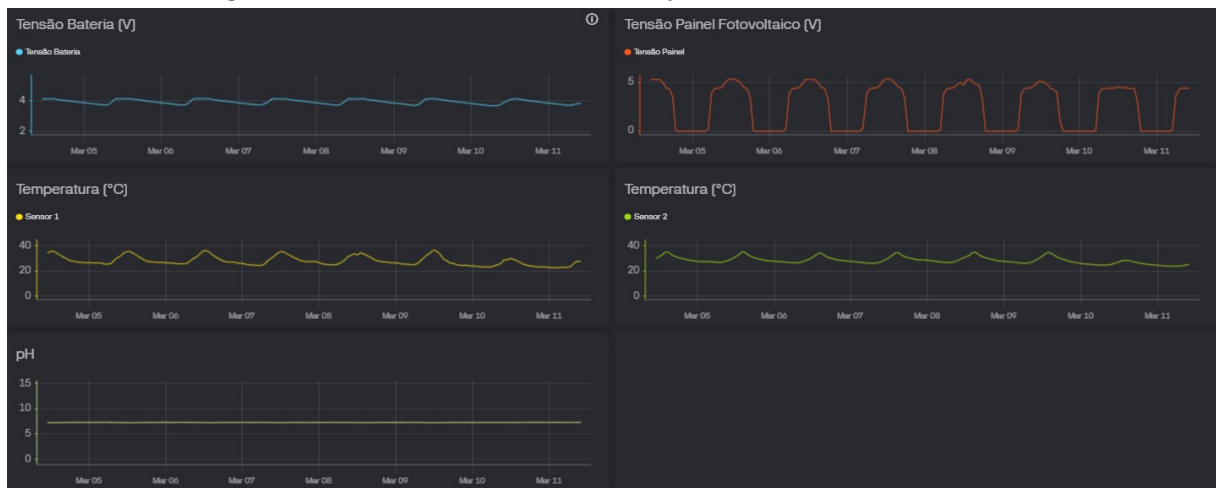
As Figuras 23 e 24 apresentam o aspecto do *dashboard* durante as medições dos testes em bancada, com gráfico de barras ou em linhas, respectivamente. Cabe salientar que o *dashboard* é capaz de proporcionar diferentes configurações de visualização, que podem ser customizadas ao gosto do usuário.

Figura 23 – Visão da *dashboard Blynk* dos testes em bancada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Visão da *dashboard Blynk* dos testes em bancada



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.2 Testes em ambiente real

A etapa de validação em campo foi realizada nos tanques de produção de tilápias da empresa Vegetal Brasil, localizada em Palhoça, Santa Catarina (coordenadas geográficas 27°53'45.8"S 48°41'53.8"W). A Figura 25 apresenta uma visão geral do açude de criação de peixes (tilápias) utilizado para os testes em campo. Os tanques-rede de cultivo das tilápias pode ser observado ao fundo.

Na Figura 26 observa-se o protótipo do sistema de medição fixado em plataforma sobre o açude, durante a realização das medições em campo. Observa-se que a placa LilyGo, a bateria e respectivas interconexões encontram-se devidamente acondicionados

em caixa hermética, desta forma adequadamente protegidos em relação ao ambiente. Os sensores são mergulhados na água, nas profundidades pré-determinadas. Os painéis fotovoltaicos ficam posicionados sobre a caixa, em posição horizontal. Pode-se constatar que, durante os testes em campo, houve precipitação relativamente intensa, não tendo sido observados nenhum dano aos componentes eletrônicos.

Figura 25 – Açude de criação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 – Protótipo do projeto



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os testes consistiram no monitoramento em tempo real da qualidade da água (temperaturas e pH). Durante o período de testes, a temperatura ambiente foi de aproximadamente 32°C.

Conforme ilustrado na [Figura 27](#), os valores coletados demonstram que a temperatura superficial da água a 10 cm de profundidade se manteve em torno de 28°C, enquanto na profundidade de 70 cm a temperatura apresentou valores próximos de 27°C. O pH registrado foi de aproximadamente 7,5, condições consideradas ideais para a criação de tilápias, conforme descrito no [Capítulo 2](#). Evidencia-se, também, a elevada estabilidade destas grandezas físicas.

Figura 27 – Medidas em campo



Fonte: Elaborada pelo autor.

A medição da tensão na bateria e da tensão dos painéis fotovoltaicos indicam um comportamento típico, semelhante aos obtidos nos testes em bancada.

Pode-se constatar na [Figura 27](#) uma intermitência das medições durante os testes, com significativas lacunas de dados, consequência da perda de pacotes de transmissão devido a intempéries e/ou perda de sinal. Trata-se de uma limitação importante, que no entanto não chega a comprometer o monitoramento, devido à relativa estabilidade das grandezas físicas de interesse. Não obstante, evidencia uma necessidade de melhoramento no projeto, como, por exemplo, a implementação de um procedimento de armazenamento interno de dados, de forma a eliminar as lacunas. Este tipo de solução será particularmente importante caso se queira utilizar os dados para análises mais complexas, ou para se obter um histórico completo das condições ambientais ao longo de um período de criação.

5 CONCLUSÃO

O projeto "Sistema Autossuficiente de Monitoramento Remoto de Qualidade da Água em Açudes para Piscicultura" foi desenvolvido com o objetivo de fornecer uma solução inovadora para o monitoramento contínuo e remoto das condições de água em pisciculturas. O sistema foi idealizado para atender às necessidades de operação remota, eficiência energética, baixo custo e confiabilidade, especialmente em cenários onde o acesso à infraestrutura convencional é limitado.

A prova de conceito, que consistia em demonstrar a viabilidade de um sistema remoto, autônomo e acessível, foi plenamente atingida. A integração de sensores de boa precisão, conectividade remota por tecnologia sem fio e alimentação por energia solar resultou em um sistema funcional capaz de operar de forma independente em ambientes rurais. Durante os testes em campo, os parâmetros monitorados (temperatura e pH) apresentaram valores adequados para a criação de tilápias, comprovando a eficácia da solução proposta e a boa qualidade da água no açude para a criação dos peixes.

Mesmo enfrentando perdas ocasionais de pacotes de dados devido a intempéries e à instalação em campo aberto, o sistema se mostrou eficiente na coleta e transmissão das informações. Essa característica reforça a necessidade de novos projetos para atender às demandas do setor aquícola, contribuindo para práticas mais sustentáveis e produtivas. O desenvolvimento deste sistema demonstra a importância da inovação tecnológica de soluções viáveis e de baixo custo acessíveis para o agronegócio.

5.1 Trabalhos futuros

O estudo evidenciou que várias melhorias podem ser implementadas para aprimorar a efetividade e aplicabilidade do sistema. Desta forma, apresenta-se a seguir sugestões para trabalhos futuros:

- **Desenvolvimento de uma *dashboard* e banco de dados próprios:** criar uma plataforma personalizada para armazenamento e visualização dos dados, reduzindo a dependência de serviços de terceiros e permitindo análises mais complexas e abrangentes (por exemplo, análise de séries temporais).
- **Projeto de uma placa de circuito impresso (PCI):** projetar e confeccionar uma PCI dedicada para substituir a montagem em *protoboard*, incluindo o desenho do diagrama esquemático completo em *software* apropriado, garantindo maior robustez, confiabilidade e compactação do hardware.

- **Design do produto:** desenvolver um acondicionamento físico adequado para o sistema, visando facilitar a instalação e garantir a proteção dos componentes eletrônicos contra fatores ambientais.
- **Ampliação do conjunto de sensores:** implementar sensores adicionais, como o de concentração de oxigênio dissolvido e o de turbidez da água, para proporcionar um monitoramento mais completo e preciso dos parâmetros da piscicultura.
- **Teste com operadoras:** realizar testes com outras operadoras de telefonia móvel, de forma a identificar possíveis melhorias no processo de transmissão de dados.
- **Durabilidade do sistema:** efetuar testes por períodos prolongados, visando avaliar a eficácia e precisão dos sensores, sua degradação ao longo do tempo, e necessidade de recalibração.
- **Armazenamento interno de dados:** implementar um *buffer* interno na ESP32 para armazenar e retransmitir os dados, de forma a contornar o problema da perda de pacotes de dados.

REFERÊNCIAS

- AGRISHOW. *Aquicultura: vale a pena começar uma produção?* 2024. Disponível em: <https://digital.agrishow.com.br/pecuaria/aquicultura-vale-pena-comecar-uma-producao>. Acesso em: 08 julho 2024. 19
- ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. [S.l.]: Manole, 2008. 73, 74
- ANALYTICS, I. *LPWAN market 2024*. 2024. Disponível em: <https://iot-analytics.com/lpwan-market/>. Acesso em: 28 julho 2024. 25, 26
- ANATEL. *Certificado de Homologação*. 2021. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/datasheet/certificados-anatel/SIM7000G-Certificado-ANATEL.pdf>. Acesso em: 17 dezembro 2024. 34
- AQUANATIVA. *MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DE CARGAS e VIVEIROS na Piscicultura: pH, Nitrogênio, Oxigênio Dissolvido e Temperatura*. 2024. Disponível em: <https://www.aquanativa.com.br/aplicacoes/monitoramento-piscicultura-tempo-real.html>. Acesso em: 08 julho 2024. 17
- BOKINGKITO, P. B.; LLANTOS, O. E. Design and implementation of real-time mobile-based water temperature monitoring system. *Procedia Computer Science*, v. 124, p. 698–705, 2017. ISSN 1877-0509. 4th Information Systems International Conference 2017, ISICO 2017, 6-8 November 2017, Bali, Indonesia. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917329757>. 21
- CANALRURAL. *Piscicultura brasileira cresce 3,1% em 2023*. 2023. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/aves-e-suinos/peixes/piscicultura-brasileira-cresce-31-em-2023/>. 19
- CONNECTARAGRO. *Aplicações do NB-IoT na área agrícola*. 2021. Disponível em: <https://blog.conectaragro.com.br/como-funciona-e-caracteristicas-do-nb-iot/>. Acesso em: 28 julho 2024. 26
- CONSONANCE. *Lithium Ion Battery Charger for Solar-Powered Systems*. 2024. Disponível em: https://raw.githubusercontent.com/SeedDocument/Lipo_Rider_Pro/master/res/DSE-CN3065.pdf. Acesso em: 10 dezembro 2024. 32, 33, 37
- DATATERM. *NB-IoT e CAT-M1: Os poderosos protocolos de comunicação entre máquinas*. 2022. Disponível em: <https://datatem.com.br/nb-iot-e-lte-m/>. Acesso em: 28 julho 2024. 25
- DFROBOT. *Sensor de pH*. 2020. Disponível em: https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU_SEN0161-V2. Acesso em: 04 agosto 2024. 35, 36
- DIGIINTERNATIONAL. *What Is NB-IoT? Narrowband IoT Applications*. 2024. Disponível em: <https://www.digi.com/blog/post/nb-iot>. Acesso em: 08 agosto 2024. 25

EMBARCADOS. *Introdução ao Blynk*. 2018. Disponível em: <https://embarcados.com.br/introducao-ao-blynk-app/>. Acesso em: 24 julho 2024. 41

EMBARCADOS. *Conheça as principais Tecnologias de comunicação sem fio*. 2021. Disponível em: <https://embarcados.com.br/tecnologias-de-comunicacao-sem-fio/>. Acesso em: 23 janeiro 2021. 24, 41

EMBRAPA. *A Importância de Monitorar a Qualidade da Água na Piscicultura*. 2017. Accessed: 31 Julho 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1354377/1752280/Import%C3%A2ncia+Monitorar+Qualidade+%C3%81gua+Piscicultura.pdf/d685903a-b6b0-473f-9bce-2d14387b00e0?version=1.0>. 20, 21, 22, 23

EMBRAPA. *Manual de qualidade da água para aquicultura*. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1354377/1743436/Manual+Qualidade+%C3%81gua+Aquicultura.pdf/674c0a9a-2844-43e2-9462-04fddd387529?version=1.0#:~:text=%2D%20Quanto%20mais%20alta%20for%20a,em%20%C3%A1guas%20com%20menos%20Oxig%C3%AAnio>. Acesso em: 31 julho 2024. 21

EMBRAPA. *Publicação aborda o manejo alimentar na piscicultura*. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/77900637/publicacao-aborda-o-manejo-alimentar-na-piscicultura#:~:text=A%20publica%C3%A7%C3%A3o%20cita%20uma%20estimativa,sobre%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%202020>. Acesso em: 01 julho 2024. 19

EMERY, W. J.; THOMSON, R. E. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. 4. ed. [S.l.]: Elsevier, 2024. 74

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 45). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 23, n. 1, p. 1–9, 2015. 38

ICEL. *AD-7930*. 2017. Disponível em: <http://www.icel-manaus.com.br/manual/AD-7930%20manual%20de%20instru%C3%A7%C3%B5es.pdf>. Acesso em: 11 dezembro 2024. 48

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). *VIM 2012. Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados*. Duque de Caxias: [s.n.], 2012. 73

INSTRUTERM. *MES-100*. 2024. Disponível em: https://www.instrutherm.com.br/medidor-de-energia-solar-digital-portatil-mod-mes-100?utm_medium=CampaignTestMedium&utm_source=CampaignTestSource&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAsOq6BhDuARIsAGQ4-ziLvXK5Yrr24f0a0FamE8ZVZ7cZjl7FyB5-zZ5B-ByggxuEhXSbWwcB. Acesso em: 11 dezembro 2024. 47

LILYGO. *LilyGO-T-SIM7000G*. 2023. Disponível em: <https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGO-T-SIM7000G>. Acesso em: 08 julho 2024. 29, 30, 31

ONU, B. *Como as Nações Unidas apoiam os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil*. 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 08 julho 2024. 19

RETROARCHYOSHI. *RTC clock accuracy / clock source*. 2022. Disponível em: <https://esp32.com/viewtopic.php?t=27770>. Acesso em: 09 dezembro 2024. 33

ROSA, T. *Benefícios socioeconômicos da piscicultura para a sociedade brasileira*. 58 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Faculdade de Medicina Veterinária, UniAGES, Paripiranga, 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/20451>. 19, 20

SANTOS, C. C. d. A. d. *Parâmetros da qualidade de água na piscicultura de água doce*. 39 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Faculdade de Agronomia e Zootecnia, UFMT, Cuiabá, 2018. Disponível em: <http://bdm.ufmt.br/handle/1/124>. 17

SANTOS, I. B. dos et al. Internet das coisas (iot) aplicada ao agronegócio: Projeto e implementação de um gateway de iot sobre a plataforma arduino para simplificar a automatização da aquicultura / automation of agrobusiness processes aided by the internet of things (iot): Design and implementation of an iot gateway on the arduino platform to simplify the automation of aquaculture. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 11, p. 26983–27004, Nov. 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/4899>. 24

SEIA. *Solar Technologies*. 2022. Disponível em: <https://www.seia.org/initiatives/solar-technologies>. Acesso em: 04 agosto 2024. 27

SIMCOM. *SIM7000 Series AT Command*. 2018. Disponível em: . Acesso em: 17 dezembro 2024. 34

SYSTEMS, E. *ESP32 Series*. 2024. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 09 dezembro 2024. 49

TECHGROUND. *Piscicultura: tudo o que você precisa saber sobre esse ramo no Brasil*. 2023. Disponível em: <https://techground.com.br/piscicultura-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-e-#:~:text=A%20piscicultura%20no%20Brasil%20%C3%A9,mais%20consome%20peixe%20no%20mundo>. Acesso em: 01 julho 2024. 17

TELECO. *Motivos para incluir peixe na dieta*. 2013. Disponível em: [https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialltevoz1/pagina_3.asp#:~:text=Essa%20t%C3%A9cnica%20%C3%A9%20utilizada%20no,downlink%20\(ALMEIDA%2C%202013\)](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialltevoz1/pagina_3.asp#:~:text=Essa%20t%C3%A9cnica%20%C3%A9%20utilizada%20no,downlink%20(ALMEIDA%2C%202013)). Acesso em: 08 agosto 2024. 25

UFRJ. *Protocolo NB IoT*. 2021. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2023-1/trabalhos/Grupo20/#intro>. Acesso em: 28 julho 2024. 25

UNIMED. *Motivos para incluir peixe na dieta*. 2021. Disponível em: <https://www.unimed.coop.br/viver-bem/alimentacao/beneficios-de-consumir-peixes-regularmente>. Acesso em: 01 julho 2024. 19

USINAINFO. *Sensor de temperatura*. 2023. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-temperatura/sensor-de-temperatura-ds18b20-a-prova-d-agua-1m-com-adaptador-8687.html?search_query=sensor+de+temperatura&results=262. Acesso em: 04 agosto 2024. 36, 37, 73

VUOLO, J. H. *Fundamentos da Teoria de Erros*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996. 73, 74

XINYUAN-LILYGO. */SIM7000 Hardware Design*. 2022. Disponível em: http://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGO-T-SIM7000G/blob/master/docs/SIM7000/SIM7000%20Hardware%20Design_V1.07.pdf. Acesso em: 13 março 2025. 34

Apêndices

APÊNDICE A – ALGORITMO DO PROJETO

Código A.1 – Algoritmo do projeto

```
1 #define TINY_GSM_MODEM_SIM7000 // Define o modelo do modem como SIM7000
2 #define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL28uIeWnKy" // ID do template Blynk
3 #define BLYNK_TEMPLATE_NAME "T SIM7000" // Nome do template no Blynk
4 #define BLYNK_AUTH_TOKEN "6j89BoTK3BAqD_hDuDhTXL8CICKBUlpS" //Token de autenticação
   o no Blynk
5
6 #include <TinyGsmClient.h> // Biblioteca para comunicação com o modem.
7 #include <BlynkSimpleTinyGSM.h> // Biblioteca Blynk para modems TinyGSM
8 #include <OneWire.h> // Biblioteca para comunicação OneWire
9 #include <DallasTemperature.h> // Biblioteca para sensores de temperatura Dallas
10
11 // Configurações para sensores de temperatura DS18B20
12 #define ONE_WIRE_BUS1 33 // Barramento OneWire do primeiro sensor de temperatura
13 #define ONE_WIRE_BUS2 32 // Barramento OneWire do segundo sensor de temperatura
14
15 // Instâncias dos barramentos OneWire
16 OneWire oneWire1(ONE_WIRE_BUS1);
17 OneWire oneWire2(ONE_WIRE_BUS2);
18
19 // Instâncias da biblioteca DallasTemperature para cada barramento
20 DallasTemperature sensors1(&oneWire1);
21 DallasTemperature sensors2(&oneWire2);
22
23 // Variável persistente para contar reinicializações do sistema (mantida durante o
   Deep Sleep)
24 RTC_DATA_ATTR int bootCount = 0;
25
26 // Configurações para o sensor de pH
27 float calibration_value = 19.6550; // Valor de calibração do sensor de pH
28 int buffer_arr[10]; // Buffer para armazenar leituras do ADC para o sensor de pH
29 unsigned long int avgval = 0; // Variável para armazenar a média das leituras do pH
30 int temp; // Variável auxiliar para ordenação
31
32 // Configurações de hardware do modem SIM7000G
33 #define MODEM_PWRKEY 4 // Pino de controle de energia do modem
34 #define MODEM_TX 27 // Pino TX do modem
35 #define MODEM_RX 26 // Pino RX do modem
36 #define BAT_ADC 35 // Pino ADC para leitura da tensão da bateria
```

```

37 #define SOLAR_ADC 36          // Pino ADC para leitura da tensão do painel solar
38 #define PH_ADC 34           // Pino ADC para leitura do sensor de pH
39
40 // Configuração de serial para monitoramento
41 #define SerialMon Serial     // Serial para saída do monitor serial
42 #define SerialAT Serial1    // Serial para comunicação com o modem
43
44 // Credenciais de conexão ao Blynk e à rede
45 char auth[] = BLYNK_AUTH_TOKEN; // Token de autenticação do Blynk
46 char apn[] = "smart.m2m.vivo.com.br"; // APN para conexão de dados (substituir
    conforme a operadora)
47 char user[] = "";           // Usuário da APN (se necessário)
48 char pass[] = "";           // Senha da APN (se necessário)
49
50 // Instância do modem
51 TinyGsm modem(SerialAT);
52
53 void setup() {
54     Serial.begin(115200); // Inicializa a comunicação serial para monitoramento
55     pinMode(MODEM_PWRKEY, OUTPUT); // Configura o pino de controle do modem
56     digitalWrite(MODEM_PWRKEY, LOW); // Garante que o modem comece desligado
57     sensors1.begin(); // Inicializa o sensor de temperatura no barramento 1
58     sensors2.begin(); // Inicializa o sensor de temperatura no barramento 2
59
60     // Incrementa o contador de reinicializações
61     bootCount++;
62     Serial.printf("Sistema acordado! Reinicialização #%d\n", bootCount);
63
64     // Lê dados dos sensores e envia ao Blynk
65     sendSensorData();
66
67     // Configura o ESP32 para entrar em Deep Sleep por 1 hora
68     Serial.println("Entrando em Deep Sleep por 1 hora...");
69     esp_sleep_enable_timer_wakeup(3600L * 1e6); // Define o tempo de Deep Sleep em us
70     esp_deep_sleep_start(); // Inicia o modo Deep Sleep
71 }
72
73 void loop() {
74     // Vazio - a lógica do programa ocorre no setup() devido ao uso de Deep Sleep
75 }
76
77 // Liga o modem e conecta à rede NB-IoT e ao Blynk
78 void startModem() {
79     SerialMon.println("Iniciando modem...");
80     digitalWrite(MODEM_PWRKEY, HIGH); // Liga o modem
81     delay(3000); // Aguarda o modem inicializar

```

```

82 SerialAT.begin(9600, SERIAL_8N1, MODEM_RX, MODEM_TX); // Inicializa a comunica
    ção serial com o modem
83 modem.restart(); // Reinicia o modem para garantir o estado inicial
84
85 if (modem.gprsConnect(apn, user, pass)) { // Conecta à rede móvel
86     SerialMon.println("Conectado à rede NB-IoT");
87     Blynk.config(modem, auth); // Configura o Blynk com o modem
88     if (Blynk.connect()) { // Conecta ao Blynk
89         SerialMon.println("Conectado ao Blynk");
90     } else {
91         SerialMon.println("Falha ao conectar ao Blynk");
92     }
93 } else {
94     SerialMon.println("Falha ao conectar à rede NB-IoT");
95 }
96 }
97
98 // Desliga o modem para economizar energia
99 void stopModem() {
100     Blynk.disconnect(); // Encerra a conexão com o Blynk
101     modem.sendAT("+CPOWD=1"); // Comando AT para desligar o modem
102     delay(1000); // Aguarda o desligamento completo
103     SerialAT.end(); // Finaliza a comunicação serial com o modem
104     digitalWrite(MODEM_PWRKEY, LOW); // Desliga o pino de energia do modem
105     SerialMon.println("Modem desligado!");
106 }
107
108 // Lê e envia temperaturas dos sensores de temperatura DS18B20
109 void readTemperature() {
110     sensors1.requestTemperatures(); // Solicita leitura ao sensor no barramento 1
111     sensors2.requestTemperatures(); // Solicita leitura ao sensor no barramento 2
112
113     float temp1 = sensors1.getTempCByIndex(0); // Obtém temperatura do sensor 1
114     float temp2 = sensors2.getTempCByIndex(0); // Obtém temperatura do sensor 2
115
116     Serial.printf("Temperatura Sensor 1: %.2fC\n", temp1);
117     Serial.printf("Temperatura Sensor 2: %.2fC\n", temp2);
118
119     Blynk.virtualWrite(V2, temp1); // Envia temperatura do sensor 1 ao Blynk
120     Blynk.virtualWrite(V3, temp2); // Envia temperatura do sensor 2 ao Blynk
121 }
122
123 // Função genérica para ler tensões a partir de pinos ADC
124 float readVoltage(uint8_t pin) {
125     int vref = 1050; // Valor de referência ajustado para o ADC
126     uint16_t adcValue = analogRead(pin); // Lê o valor ADC do pino especificado

```

```

127     float voltage = ((float)adcValue / 4095.0) * 2.0 * 3.3 * (vref / 1000.0); //
        Converte para tensão
128     return voltage;
129 }
130
131 // Lê e envia tensões da bateria e do painel solar
132 void readTensao() {
133     float batteryVoltage = readVoltage(BAT_ADC);
134     float solarVoltage = readVoltage(SOLAR_ADC);
135
136     Blynk.virtualWrite(V0, batteryVoltage); // Envia tensão da bateria ao Blynk
137     Blynk.virtualWrite(V1, solarVoltage); // Envia tensão do painel solar ao Blynk
138
139     Serial.printf("Tensão da Bateria: %.2f V\n", batteryVoltage);
140     Serial.printf("Tensão do Painel Solar: %.2f V\n", solarVoltage);
141 }
142
143 // Lê e calcula o valor do pH a partir do sensor
144 void readPH() {
145     for (int i = 0; i < 10; i++) {
146         buffer_arr[i] = analogRead(PH_ADC); //Lê valores do ADC para o sensor de pH
147         delay(30); // Atraso para estabilidade entre leituras
148     }
149     // Ordena os valores para descartar extremos
150     for (int i = 0; i < 9; i++) {
151         for (int j = i + 1; j < 10; j++) {
152             if (buffer_arr[i] > buffer_arr[j]) {
153                 temp = buffer_arr[i];
154                 buffer_arr[i] = buffer_arr[j];
155                 buffer_arr[j] = temp;
156             }
157         }
158     }
159     // Calcula a média dos valores intermediários
160     avgval = 0;
161     for (int i = 2; i < 8; i++) avgval += buffer_arr[i];
162
163     float tensao = (float)avgval * 3.3 / 4095 / 6; // Converte ADC para tensão
164     float ph_act = -4.9628 * tensao + calibration // Calcula o valor do pH
165
166     Blynk.virtualWrite(V4, ph_act); //Envia valor do pH ao Blynk
167     delay(1000);
168 }
169
170 // Função principal para enviar dados dos sensores
171 void sendSensorData() {
172     startModem(); // Liga o modem e conecta ao Blynk

```

```
173     readTemperature(); // Lê e envia a temperatura dos sensores de temperatura
174     readTensao(); // Lê e envia as tensões do painel e da bateria
175     readPH(); Lê e envia a temperatura dos sensor de PH
176     stopModem(); // Desliga o modem para economizar energia
177 }
```

APÊNDICE B – CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE PH

A calibração do sensor de pH é essencial para garantir medições precisas e confiáveis, assegurando a eficácia do monitoramento.

Para a calibração, foram utilizadas três soluções padrão com valores de pH conhecidos: 4, 7 e 10, a uma temperatura de 20 °C. A tensão correspondente a cada solução foi medida utilizando um multímetro comum, com resolução de 0,01 V, e os valores obtidos foram utilizados para construir a relação matemática entre o pH e a tensão de saída do sensor.

A relação entre o pH (y) e a tensão de saída do sensor (x) foi determinada utilizando o método dos mínimos quadrados. Este método permite ajustar uma função (no presente caso, linear) aos dados experimentais, minimizando o erro quadrático total entre os valores observados (y_i) e os valores previstos (\hat{y}_i).

A equação linear ajustada tem o seguinte formato:

$$y = a \cdot x + b \quad (\text{B.1})$$

onde:

- a é o coeficiente angular (inclinação da reta);
- b é o coeficiente linear (interseção com o eixo y).

Os coeficientes a e b foram calculados a partir das fórmulas:

$$a = \frac{n \sum(x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (\text{B.2})$$

$$b = \frac{\sum y_i - a \sum x_i}{n} \quad (\text{B.3})$$

onde n é o número de pontos de dados. Aplicando-se o método aos valores medidos, obtém-se:

- $a = -4,9628$;
- $b = 19,655$.

Dessa forma, a equação final que relaciona o pH com a tensão de saída do sensor é dada a seguir:

$$\text{pH} = -4,9628 \cdot \text{Tensão} + 19,655 \quad (\text{B.4})$$

Pode-se constatar que a relação entre a tensão e o valor de pH é inversamente proporcional: à medida que a tensão diminui, o valor de pH aumenta. O erro padrão da estimativa (EPE) resultou em 0,365, e o erro máximo foi de 4,25% para a faixa de calibração considerada. Os dados experimentais e os valores calculados pela equação ajustada estão apresentados na [Tabela 8](#).

Tabela 8 – Valores de calibração do sensor de pH a partir da tensão.

Tensão [V]	pH		
	Ref. [-]	Calc. [-]	Erro [-]
3,18	4	3,873	-0,127
2,49	7	7,298	0,298
1,90	10	10,226	0,226

Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo foi implementado no sistema, permitindo que a leitura analógica de tensão pelo microcontrolador seja convertida em valores de pH. Na [Figura 28](#), observa-se o comportamento das medições do sensor para uma solução de referência com valor de pH igual a 10, e ilustra a estabilidade das leituras ao longo do tempo, com pequenas variações ao redor das 06:00, devido a fatores ambientais (temperatura da solução).

Durante o desenvolvimento, a resolução do [ADC](#) foi configurada em 12 *bits*, permitindo um intervalo de 0 a 4095 valores discretos, resultando em uma maior precisão na conversão do sinal analógico em valores digitais. Essa maior resolução do sinal medido é importante pois possibilita a detecção de variações sutis na tensão lida pelo sensor, que por sua vez traduzem variações no valor do pH.

Figura 28 – Leitura do sensor de pH



Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE C – INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

A terminologia empregada nesta seção segue a normatização brasileira, bem como as demais normas internacionais presentemente aplicáveis à ciência da metrologia (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), 2012); (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008); (VUOLO, 1996).

Pelas características intrínsecas ao processo de mensuração, as grandezas físicas apresentadas no presente trabalho foram divididas em dois grupos. As grandezas qualificadas como primárias são aquelas cujo valor é determinado por um procedimento de medição específico, empregando-se um sistema de medição (SM) apropriado. As grandezas qualificadas como derivadas são aquelas cujo valor é determinado por um procedimento de cálculo definido por um modelo matemático apropriado, a partir dos valores das grandezas primárias e/ou de outras grandezas secundárias.

C.1 Grandezas físicas primárias

As grandezas físicas primárias medidas pelo sistema de medição compreendem a tensão elétrica e a temperatura. Apesar de serem grandezas dinâmicas (isto é, que apresentam variação ao longo do processo de medição), não foi realizado ensaio para determinar a repetibilidade das medições. Desta forma, para estas medições, a incerteza de medição foi determinada apenas a partir de erro do tipo B (métodos não-estatísticos) (VUOLO, 1996).

Conforme descrito no [Capítulo 3](#), o microcontrolador ESP32 realiza medições de tensão elétrica, como a grandeza física primária dos sensores de temperatura e pH, e para monitorar diretamente a tensão fornecida pelos painéis fotovoltaicos.

Dadas as características do conversor analógico-digital do microcontrolador ESP32 (Seção 3.1.1.6), de 12 bits, para a faixa de medição dos valores de tensão gerados pelo painel fotovoltaico e pelo sensor de pH (0 a 5 V), a resolução da medição foi estimada em 1,221 mV. Devido ao fato de não se haver realizado medidas estatísticas, a incerteza de medição foi estimada como sendo igual ao valor da resolução.

Para a medição de temperatura, o sensor DS18B20 trabalha em uma faixa de tensão de 3,3 a 5 V (USINAINFO, 2023), para uma faixa de temperatura de -10°C a +85°C, resultando em uma razão aproximada de 55,88°C/V. Assim, tomando por base a resolução de medição de tensão, a resolução de medição de temperatura foi estimada

em 0,0682°C. Porém, como se trata de um tipo de medição sujeito a muitos fatores não-controlados, e devido ao fato de não se haver realizado medidas estatísticas, a incerteza de medição foi estimada em 0,5°C, baseado em dados típicos obtidos na literatura (EMERY; THOMSON, 2024).

A Tabela 9 apresenta a síntese dos resultados obtidos.

Tabela 9 – Incertezas de medição: grandezas primárias.

Grandeza Física	Tipo de Medição	SM	Unidade Física	Faixa de Medição	Res	IM ±
Tensão elétrica	Direta	ESP32	[V]	0 a 5	0,001221	0,001
Temperatura	Direta	DS18B20	[°C]	-10 a +85	0,068	0,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

C.2 Grandezas físicas derivadas

Em relação às grandezas físicas derivadas, ou seja, calculadas em função das grandezas físicas primárias ou de outras grandezas derivadas, foi aplicado o método de propagação de incertezas (VUOLO, 1996);(ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Neste caso, enquadra-se a medição de pH, devido ao procedimento de calibração empregado, descrito no Apêndice B. Na medição desta variável, o valor de tensão originário do sensor é convertido em um valor numérico na escala de pH (0 a 14). A propagação da incerteza de medição de tensão, baseado na Equação B.4, resulta em uma resolução de aproximadamente 0,006 unidades. Por sua vez, o erro padrão da estimativa da regressão (Apêndice B), resulta em 0,365 unidades, sendo, portanto, predominante. A Tabela 10 apresenta a síntese dos resultados obtidos.

Tabela 10 – Incertezas de medição: grandezas derivadas.

Grandeza Física Derivada	Cálculo	Unidade Física	Im	EPE	IM ±	Valor Típico	IM Percentual ±
pH	Equação B.4	Escala Numérica	0,006	0,365	0,365	7	5,2%

Fonte: Elaborada pelo autor.