

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
MESTRADO EM ENGENHARIA MINERAL**

**MARINA DE ROSSO SEIXAS**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM VEÍCULO DE SUPERFÍCIE NÃO  
TRIPULADO, PARA O MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-  
QUÍMICOS DE CORPOS HÍDRICOS**

**Caçapava do Sul**

**2024**

**MARINA DE ROSSO SEIXAS**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM VEÍCULO DE SUPERFÍCIE NÃO  
TRIPULADO, PARA O MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-  
QUÍMICOS DE CORPOS HÍDRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mineral.

Orientador: Dr. Thiago Henrique  
Lugokenski

**Caçapava do Sul**

**2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

S462p Seixas, Marina de Rosso  
Projeto e Construção de um Veículo de Superfície Não Tripulado, para o Monitoramento dos Parâmetros Físico-Químicos de Corpos Hídricos / Marina de Rosso Seixas.  
76 p.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIA MINERAL, 2024. "Orientação: Thiago Henrique Lugokenski."

1. Veículo de Superfície Não Tripulado.
2. Monitoramento Ambiental.
3. Recursos Hídricos.
4. Sustentabilidade. I. Título.

**MARINA DE ROSSO SEIXAS**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM VEÍCULO DE SUPERFÍCIE NÃO  
TRIPULADO, PARA O MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-  
QUÍMICOS DE CORPOS HÍDRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mineral.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em: 19 de setembro de 2024.

Banca examinadora:

---

Prof. (Doutor). (Thiago Henrique Lugokenski)  
Orientador  
(Unipampa)

---

Prof. (Doutor). (Caroline Wagner)  
(Unipampa)

---

Prof. (Doutor). (José Waldomiro Jimenez Rojas)  
(Unipampa)



Assinado eletronicamente por **THIAGO HENRIQUE LUGOKENSKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2024, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1521408** e o código CRC **9195E3A1**.

Dedico esta dissertação ao meu marido,  
Celso Varella, que foi meu pilar de apoio e  
inspiração ao longo de toda essa jornada.

Com amor e gratidão.

## AGRADECIMENTO

A conclusão desta dissertação foi possível graças ao apoio e a dedicação de muitas pessoas, às quais expresso meus sinceros agradecimentos.

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar força, sabedoria e fé para enfrentar cada desafio ao longo desta jornada.

Agradeço ao meu orientador Dr. Thiago Henrique Lugokenski, pela orientação, conselhos e suporte durante todo o processo de pesquisa e escrita desta dissertação. Sua contribuição foi essencial, não apenas pela sua orientação, mas também pelo apoio financeiro pessoal na construção do protótipo.

Agradeço à Universidade Federal do Pampa (Unipampa), Campus Caçapava do Sul pelo apoio institucional ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Aos patrocinadores, expresso minha profunda gratidão. A empresa SkyDrones Tecnologia Aviônica, através de seu CEO Ulf Bogdawa. A Empresa Usinainfo Eletrônica e Robótica ([www.usinainfo.com.br](http://www.usinainfo.com.br)). E a Pampatec de Alegrete, com especial agradecimento ao Emerson Rizzatti.

Em especial, agradeço ao meu esposo Celso B. Varella Neto, que se dedicou incondicionalmente em todas as etapas da construção do drone aquático. Ele esteve ao meu lado em cada desafio, oferecendo não apenas suporte emocional, mas também contribuindo diretamente com seu conhecimento e habilidades. Seu comprometimento incansável e seu entusiasmo contagiante foram essenciais para que este projeto se concretizasse.

Agradeço também ao meu sogro, Julio Cesar Varella, cuja ajuda na construção da parte estrutural/mecânica do protótipo foi essencial. Sou profundamente grata pela sua generosidade e paciência ao compartilhar seu tempo e conhecimento.

À minha família, meu filho Arthur Varella, minha mãe Terezinha, minha irmã Tarcila e minha afilhada Maria Eduarda, por seu amor, compreensão e apoio constante. Vocês foram a força motriz que me impulsionou a continuar, mesmo nos momentos mais desafiadores.

A todos vocês, meu mais profundo agradecimento.

## RESUMO

A crescente preocupação com a gestão sustentável dos recursos hídricos decorre do aumento da poluição e das mudanças climáticas, que afetam a qualidade da água, a saúde humana e os ecossistemas aquáticos. Dados da ONG SOS Mata Atlântica mostram que, em 2023, 15% dos 129 rios monitorados nas bacias do bioma Mata Atlântica ainda não apresentam condições adequadas para uso, evidenciando a fragilidade dos ambientes aquáticos. Esse cenário é agravado pelos impactos da mineração, que gera sedimentos contaminados com substâncias tóxicas como arsênio, chumbo e cianeto, aumentando os riscos de poluição. Adicionalmente, o rompimento de barragens de rejeitos, como em Mariana (MG), provoca contaminação dos rios, assoreamento, mortalidade de peixes e destruição da vegetação ciliar, afetando diretamente as comunidades que dependem desses recursos. Para enfrentar esses desafios, tecnologias como os Veículos de Superfície Não Tripulados (USVs) oferecem soluções eficientes para a coleta de dados em tempo real, especialmente em áreas de difícil acesso. Este trabalho apresenta a construção de um protótipo de USV desenvolvido para monitorar parâmetros físico-químicos de corpos d'água, utilizando uma abordagem prática e econômica. O protótipo foi desenvolvido para operar em diferentes ambientes aquáticos, desde reservatórios até rios e lagos, mesmo sob condições adversas. Durante os testes, o USV coletou dados em 1.371 pontos ao longo de aproximadamente uma hora, sendo 976 pontos obtidos de forma dinâmica, com uma taxa de amostragem de 1 ponto a cada 1,5 segundos. Essa capacidade de amostragem dinâmica representa um avanço significativo em relação aos métodos tradicionais de coleta manual, destacando a eficiência e versatilidade do protótipo. O USV oferece uma ferramenta acessível e replicável, que facilita a identificação de alterações na qualidade da água, permitindo respostas rápidas a contaminações e implementações de ações corretivas. A integração futura de tecnologias avançadas como transmissão de dados em alta velocidade e Inteligência Artificial amplia ainda mais seu potencial no monitoramento ambiental.

Palavras-Chave: Veículo de Superfície Não Tripulado, Monitoramento Ambiental, Recursos Hídricos, Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The growing concern for sustainable water resource management stems from increased pollution and climate change, which affect water quality, human health, and aquatic ecosystems. Data from the ONG SOS Mata Atlântica shows that, in 2023, 15% of the 129 rivers monitored in the watersheds of the Mata Atlântica biome still do not present suitable conditions for use, highlighting the fragility of aquatic environments. This scenario is further exacerbated by the impacts of mining, which generates sediments contaminated with toxic substances such as arsenic, lead, and cyanide, increasing pollution risks. Additionally, the collapse of tailings dams, as seen in Mariana (MG), causes river contamination, siltation, fish mortality, and the destruction of riparian vegetation, directly affecting the communities that rely on these resources. To address these challenges, technologies such as Unmanned Surface Vehicles (USVs) offer efficient solutions for real-time data collection, especially in hard-to-reach areas. This work presents the construction of a USV prototype developed to monitor the physicochemical parameters of water bodies, using a practical and cost-effective approach. The prototype was designed to operate in various aquatic environments, from reservoirs to rivers and lakes, even under adverse conditions. During testing, the USV collected data from 1,371 points over approximately one hour, with 976 points obtained dynamically at a sampling rate of 1 point every 1.5 seconds. This dynamic sampling capability represents a significant advancement over traditional manual collection methods, highlighting the efficiency and versatility of the prototype. The USV provides an accessible and replicable tool that facilitates the identification of water quality changes, enabling quick responses to contamination and the implementation of corrective actions. The future integration of advanced technologies such as high-speed data transmission and Artificial Intelligence further enhances its potential in environmental monitoring.

Keywords: Unmanned Surface Vehicle, Environmental Monitoring, Water Resources, Sustainability



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição dos recursos hídricos e populacionais no Brasil por região...	15
Figura 2 - Pontos de monitoramento com as respectivas classificações de qualidade. .....	18
Figura 3 - Mapa de pontos da Rede Nacional de monitoramento de qualidade da água.....	21
Figura 4 - Diferentes arranjos de USVs (A) Monocasco, (B) catamarã e (C) trimarã. .....	29
Figura 5 - Bloco diagrama do sistema de orientação, controle e navegação.....	32
Figura 6 - Painel isotérmico.....	35
Figura 7 - Molde em papel cartão do protótipo do catamarã.....	35
Figura 8 - [A] Modelo 3D Leme; [B] Modelo 3D suporte servomotor.....	36
Figura 9 - Diagrama de Blocos do Hardware para controle e gerenciamento do USV. .....	37
Figura 10 - [A] Painel isotérmico em fase de corte; [B] Painel Isotérmico recortado.	40
Figura 11 - [A] Aplicação massa tapa furo; [B] Lixamento.....	41
Figura 12 - [A] Revestimento papel alumínio; [B] Revestimento papel pardo.....	41
Figura 13 - [A] Aplicação da manta de fibra de vidro; [B] Aplicação do véu de fibra de vidro.....	42
Figura 14 - [A] Vista superior do protótipo pintado; [B] Vista inferior do protótipo pintado.....	42
Figura 15 - [A] caixa hermética; [B] lemes; [C] motor propulsão; [D] eixo cardan; [E] controlador eletrônico de velocidade; [F] banco de capacitores; [G] servomotor leme. .....	43
Figura 16 - Controlador PixHawk 2.4.8.....	44
Figura 17 - [A] Sonda pH; [B] Sonda Temperatura; [C] Sonda turbidez;.....	44
Figura 18 - [A] Placa Arduino MEGA 2560; [B] Placa de expansão customizada montada sobre o Arduino MEGA 2560, com conectores para as placas condicionadoras dos sensores.....	45
Figura 19 - [A] Placa Raspberry Pi Zero W; [B] Placa de expansão USB.....	46
Figura 20 - Hardware de Controle de Navegação e Aquisição de Dados Ambientais e de Geolocalização. [A] Arduino/Coletor dados dos sensores Ambientais; [B] Condicionador da sonda pH; [C] Condicionador do sensor de turbidez; [D] Fonte	

alimentação baterias Li-Íon; [E] Pixhawk / Placa Controladora; [F] Módulo GPS e Antena; [G] Raspberry Pi Zero W / Computador Complementar.....	47
Figura 21 - Fluxograma Firmware Arduino, coletor dados ambientais.....	48
Figura 22 - Fluxograma Software Computador Complementar.....	49
Figura 23 - Protótipo do USV em teste: A – flutuabilidade; B - estanqueidade.....	50
Figura 24 - Modelo 3D das hélices, posição instalação e sentido de rotação.....	51
Figura 25 - Primeiros testes reais em campo. [A, B, C e D] Diferentes posições de visualização do protótipo, durante os testes de aceleração e guinada.....	53
Figura 26 - Ajustes de tensão da placa condicionadora de sinais.....	55
Figura 27 - Calibração Conjunto pH – [A] Instrumental durante o processo de calibração; Sonda inserida nas soluções [B] pH 7.0, [C] 4.0 e [D] 10,0.....	56
Figura 28 - Mapa de localização da área de estudo.....	58
Figura 29 - Imagens aéreas (Drone) do corpo D'água estudado. [A] Linhas de fluxo (correnteza) primária na cor roxa e fluxo secundário cor amarela. [B] Regiões em verde destacam a presença de galhos de árvores submersos.....	59
Figura 30 - Testes Protótipo: [A] Ajustes pré levantamento de dados reais. [B] protótipo pronto para testes.....	60
Figura 31 - Testes Protótipo: aquisição de dados ambientais em campo.....	61
Figura 32 - Mapa de Pontos: Polígono Vermelho delimitação do corpo d'água. Pontos Azul – Coleta estática; Pontos Magenta – Coleta Dinâmica;.....	63
Figura 33 - Mapa de Temperatura;.....	63
Figura 34 - Mapa de Pontos, turbidez elevada;.....	64
Figura 35 - Imagem aérea do corpo d'água. Regiões circundadas em vermelho demonstram regiões mais rasas nas margens ao sul, sudeste e leste.....	65
Figura 36 - Amostras d'água cristalina, turbidez 0 NTU, conforme dados do sensor de turbidez acoplado ao protótipo.....	65

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivo Geral.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Recursos Hídricos.....	15
2.2 Poluição das Águas.....	16
2.3 Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais.....	19
2.4 Indicadores da Qualidade da Água.....	21
2.4.1 Índice de Qualidade das Águas (IQA).....	22
2.5 Coleta de Dados – Monitoramento da Qualidade da Água.....	24
2.5.1 Coleta de Dados – Desafios no Monitoramento da Qualidade da Água. .	25
2.6 Técnicas Inovadoras no Monitoramento da Qualidade da Água.....	27
2.7 Arquitetura de um Veículo Aquático Não Tripulado.....	29
2.7.1 Caracterização da Arquitetura Naval.....	29
2.7.2 Materiais para Construção Naval.....	30
2.7.3 Controle de Direção e Velocidade.....	31
2.7.4 Orientação, Navegação e Controle.....	32
2.7.5 Coleta de Dados – Sensores e Sistema de Aquisição.....	32
2.7.6 Estação de Controle e Monitoramento.....	33
3 METODOLOGIA.....	34
3.1 Desenvolvimento do Protótipo.....	34
3.1.1 Mecânica – Planejamento e Projeto do Casco.....	34
3.1.2 Mecânica – Planejamento e Projeto do Sistema de Direção e Velocidade	
.....	35
3.1.3 Sistemas Embarcados.....	36
3.1.3.1 <i>Hardware</i> .....	36
3.1.3.2 <i>Firmware/Software</i> .....	38
3.2 Calibração dos Sensores.....	38
4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	40
4.1 Construção do Protótipo.....	40

4.1.1 Mecânica - Construção do Casco.....	40
4.1.2 Mecânica - Construção do Sistema de Direção e Velocidade.....	42
4.1.3 Sistemas Embarcados - Construção do Hardware.....	43
4.1.4 Sistemas Embarcados – Desenvolvimento do Firmware/Software.....	46
4.2 Testes em Ambiente Controlado.....	49
4.3 Testes em Ambiente Real 1 – Análise Funcionalidades e Comportamento.....	52
4.4 Calibração dos Sensores.....	54
4.4.1 Calibração do Sensor de pH.....	54
4.5 Testes em Ambiente Real 2 – Coleta de dados.....	57
4.5.1 Localização da Área de Estudo.....	57
4.5.2 Coleta de Dados.....	59
4.5.3 Processamento dos Dados Ambientais.....	61
4.5.4 Análise dos Resultados de Campo.....	64
4.6 Discussão dos Resultados.....	66
4.7 Considerações.....	67
5 CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIAS.....	70

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão sustentável dos recursos hídricos tornou-se uma preocupação crescente devido ao aumento da poluição e às mudanças climáticas, que afetam diretamente a qualidade da água, impactando a saúde humana e os ecossistemas aquáticos. Estudos realizados pela ONG SOS Mata Atlântica, que desde 2015 monitoram a qualidade da água nas bacias hidrográficas da Mata Atlântica, revelam que, em 2023, dos 129 rios monitorados, 15% dos recursos hídricos ainda não apresentam condições adequadas para diversas atividades, como agricultura, indústria e abastecimento. Esses dados ressaltam a fragilidade das condições ambientais e a necessidade urgente de estratégias eficazes para a preservação dos recursos hídricos.

Essa questão se agrava ainda mais com o impacto das atividades de mineração sobre os recursos hídricos. Segundo a ELAW (2010), os sedimentos gerados durante a mineração frequentemente carregam substâncias tóxicas, como arsênio, chumbo, cádmio, cromo e níquel, além do cianeto, utilizados no processo de lixiviação. Esses contaminantes elevam significativamente os riscos de poluição, comprometendo ainda mais a qualidade da água.

Outro impacto relevante nos recursos hídricos ligado à extração mineral é o rompimento de barragens de rejeitos. Um exemplo marcante desse tipo de desastre ocorreu com a ruptura da barragem do Fundão, em Mariana (MG), que resultou na devastação do vale do Rio Doce. Os rompimentos de barragens têm diversas consequências para os recursos hídricos, incluindo a contaminação dos rios por metais pesados, o assoreamento, a alta mortalidade de peixes, a destruição da vegetação de mata ciliar e a interrupção dos sistemas públicos de abastecimento de água (Zonta & Trocate, 2016). Esses impactos não apenas comprometem a qualidade da água, mas também afetam diretamente a biodiversidade e a saúde das comunidades que dependem desses recursos.

Diante desse cenário, o monitoramento contínuo e preciso dos parâmetros físico-químicos dos corpos d'água é essencial para a identificação precoce de contaminações e para a implementação de políticas públicas que assegurem a preservação desses recursos. Entretanto, obter dados confiáveis em tempo real, especialmente em áreas de difícil acesso ou de alta periculosidade, representa um

desafio significativo para pesquisadores e gestores ambientais.

Nesse contexto, a tecnologia emergiu como uma aliada fundamental na coleta e análise de dados ambientais, permitindo o desenvolvimento de soluções inovadoras para o monitoramento da qualidade da água. Entre essas inovações, destacam-se os Veículos de Superfície Não Tripulados (Unmanned Surface Vehicles – USV), embarcações semi ou completamente autônomas que oferecem uma abordagem eficiente para a aquisição de dados em diferentes ambientes aquáticos. Equipados com sensores especializados, esses veículos permitem a medição de diversos parâmetros, proporcionando uma visão detalhada e abrangente das condições dos corpos d'água monitorados.

Este trabalho se concentra no desenvolvimento e na construção de um protótipo de USV com capacidade para coletar parâmetros físico-químicos de corpos d'água de forma eficiente e em tempo real. A escolha por tecnologias acessíveis e de baixo custo visa tornar a solução economicamente viável, sem comprometer a precisão e a qualidade dos dados obtidos. O protótipo foi projetado para operar em diversos ambientes aquáticos, desde reservatórios até rios e lagos, incluindo locais de acesso limitado e condições adversas. A flexibilidade do design do USV permite a adaptação para diferentes sensores e a operação em condições variadas, ampliando o alcance da coleta de dados ambientais.

A construção e a implementação do USV adotaram uma abordagem prática e acessível, focando na escolha de componentes disponíveis no mercado brasileiro. O software e o hardware desenvolvidos foram customizados para garantir que o veículo pudesse operar com eficácia em diferentes cenários ambientais. Além disso, foram realizados testes rigorosos em campo, que permitiram validar o desempenho do protótipo e ajustar suas funcionalidades conforme necessário, assegurando sua capacidade de gerar dados confiáveis para a análise ambiental.

### **1.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo projetar, desenvolver, construir e testar um Veículo de Superfície Não Tripulado (USV) de baixo custo, fácil manutenção e operação, com a capacidade de coletar informações de forma semi-autônoma de alguns parâmetros do Índice da Qualidade da Água.

## **1.2 Objetivos Específicos**

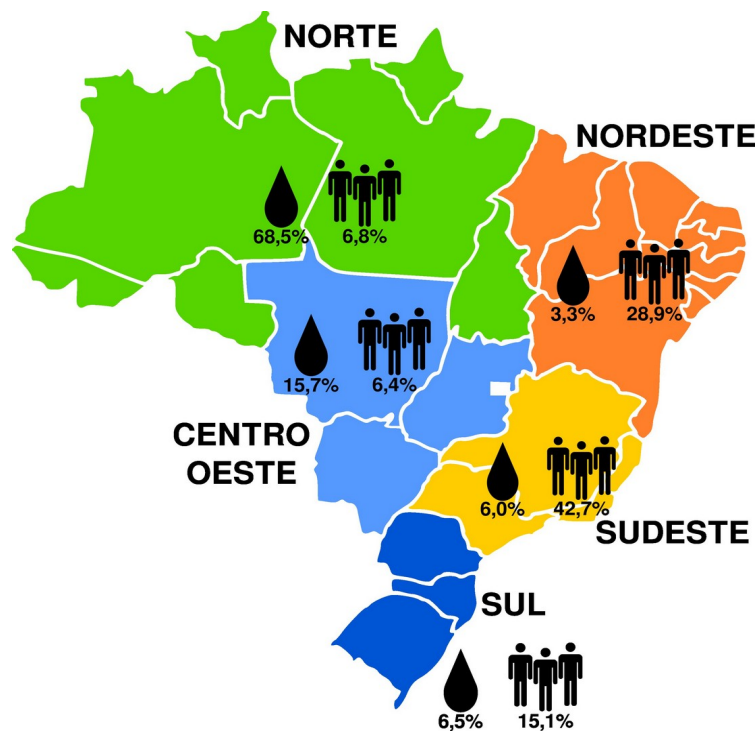
- a) Realizar testes de bancada no protótipo do Veículo de Superfície Não Tripulado (USV) desenvolvido para certificar que todos os componentes estarão funcionais e conforme as especificações;
- b) Calibrar em laboratório todos os sensores ambientais, de modo, a garantir a correta amostragem dos parâmetros físico-químicos;
- c) Realizar testes reais em campo, a fim de comprovar a agilidade e a eficácia do protótipo projetado e construído nesta pesquisa;
- d) Gerar mapas dos parâmetros da qualidade da água coletados em campo;

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Recursos Hídricos

Os recursos hídricos são limitados e têm um papel essencial no desenvolvimento econômico e social de uma região. Em escala global, o uso da água tem aumentado cerca de 1% ao ano nos últimos 40 anos, devido ao crescimento populacional, ao desenvolvimento socioeconômico e às mudanças nos padrões de consumo (Unesco, 2023). No Brasil, os recursos hídricos superficiais constituem metade do total disponível na América do Sul e representam 12% dos recursos hídricos globais (Unesco, 2002). Apesar de possuir uma das maiores reservas de água doce do mundo, o Brasil enfrenta disparidades na distribuição desse recurso em seu território (Figura 1), onde cerca de 68,5% dos recursos hídricos estão alocados na região Norte, a qual possui uma baixa densidade populacional, deste modo, contrastando com as regiões Sul e Sudeste que juntas representam 57,8% da população, contemplando apenas 12,5% dos recursos hídricos, demonstrando assim a necessidade de se compreender melhor os recursos hídricos disponíveis (Augusto *et al*, 2012).

Figura 1 - Distribuição dos recursos hídricos e populacionais no Brasil por região.



Fonte: Modificado de Augusto *et al*, 2012.



## 2.2 Poluição das Águas

Os recursos hídricos são de suma importância, pois são utilizados com diversas finalidades, entre os quais se destacam: o abastecimento de água, irrigação, aquicultura, geração de energia e navegação, porém nas últimas décadas este recurso vem sendo ameaçado, sofrendo grandes impactos (Moraes e Jordão, 2002).

A qualidade das águas é o resultado da influência de diversos fatores, tanto naturais como antrópicos. Entre os fatores naturais estão o regime de chuvas, o escoamento superficial, a geologia e a cobertura vegetal. Por sua vez, os impactos antrópicos incluem fontes pontuais e difusas de contaminação. Estas últimas surgem a partir de atividades como o lançamento de efluentes, manejo inadequado dos solos e a liberação de cargas contaminantes na superfície ou subsuperfície.

De acordo com a Resolução Conama, nº 420, de 28 de dezembro de 2009

Contaminação é a presença de substância(s) química(s) no ar, água ou solo, decorrentes de atividades antrópicas, em concentrações tais que restrinjam a utilização desse recurso ambiental para os usos atual ou pretendido, definidas com base em avaliação de risco à saúde humana, assim como aos bens a proteger, em cenário de exposição padronizado ou específico;

Segundo a Política Nacional do Meio Ambiente, Lei nº 6.938/81, poluição é a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que prejudiquem direta ou indiretamente a saúde, a segurança e o bem-estar da população. Quando aplicada aos recursos hídricos, ocorre a degradação de um elemento fundamental para a vida: a água (Meller *et al.*, 2017). E conforme Vianna (2015), a poluição hídrica é a alteração das propriedades físico-químicas da água, inviabilizando a exploração de seus benefícios.

As fontes de poluição hídrica podem ser física, química ou biológica. A poluição física decorre, por exemplo, do aumento da turbidez que pode ser decorrente de atividades minerárias, bem como pela elevação da temperatura dos corpos hídricos, os quais são receptores de água do sistema de resfriamento de usinas ou complexos industriais. Já a poluição química ocorre através de alteração da composição da água, por meio do esgoto doméstico rico em gordura, detergentes, além de compostos orgânicos contendo nitrogênio e fósforo, enquanto os efluentes industriais contribuem com os metais pesados, cianetos e outras

substâncias tóxicas e os empreendimentos agrícolas contribuem com grandes quantidades de resíduos orgânicos ricos em fertilizantes e pesticidas. A poluição de origem biológica se dá pelo aumento de espécies patogênicas no corpo d'água, onde a principal causa é a ausência de uma educação sanitária abrangente (De Fillipo, 2000).

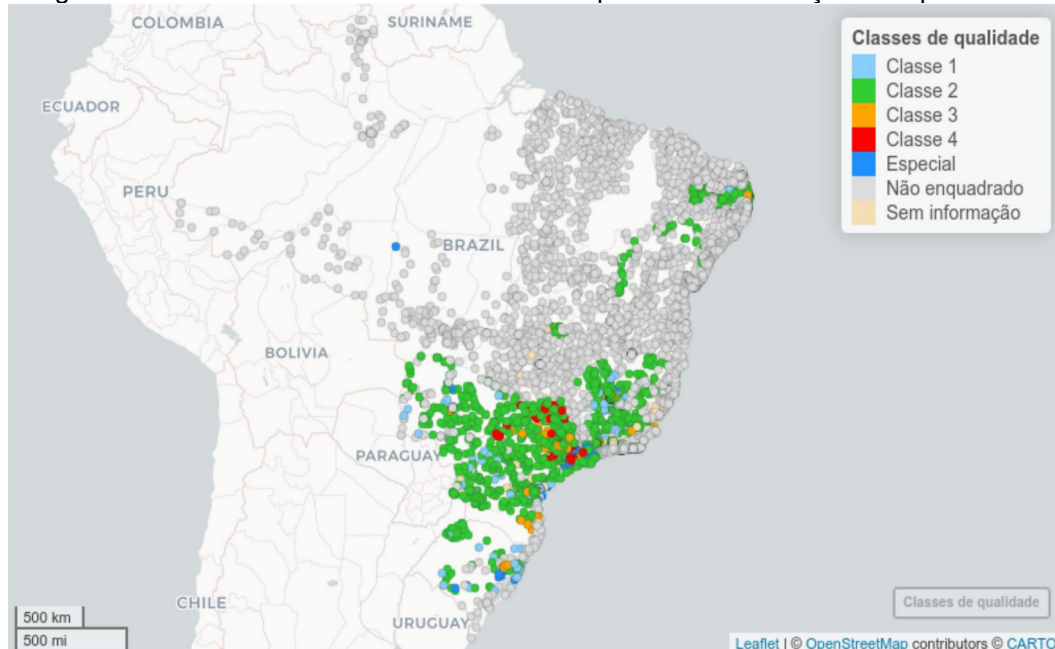
Por muitos anos, os rios foram utilizados como o destino final para o descarte de diversos tipos de resíduos, com a crença de que a água os diluiria e resolveria os problemas. No entanto, essa prática levou a uma deterioração gradual da qualidade das águas e ao aumento dos custos com tratamento para consumo humano. Diante dessa situação, tornou-se absolutamente necessário criar legislações com o objetivo de proteger, preservar e estabelecer limites máximos para poluentes (Stein, 2017).

Frente ao desafio da poluição hídrica, o poder público por meio da Política Nacional do Meio Ambiente (Lei no 6.938/81), criou um importante instrumento de Gestão dos Recursos Hídricos, que foi o enquadramento dos corpos de água em classes, de acordo com seus usos predominantes. Essa estratégia visa garantir que as águas tenham uma qualidade adequada para atender aos usos mais exigentes a que se destinam, ao mesmo tempo em que contribuem para a redução dos custos relacionados ao combate à poluição hídrica (Meller, *et al.*, 2017). A classificação e os padrões de poluentes presentes em cada classe foram estabelecidos em legislações, como a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005 e a Resolução CONAMA nº 430/2011.

No território brasileiro, as águas doces, salobras e salinas foram classificadas de acordo com a qualidade necessária para diferentes usos. Essa classificação leva em consideração os parâmetros da água, de modo, que quanto melhores forem esses parâmetros, melhor será a classificação atribuída (classe 1). Por outro lado, à medida que a qualidade da água se deteriora, sua classificação também diminui, classes 3 e 4 para águas doces e classes 2 e 3 para águas salinas e salobras (Stein, 2017). Assim, de modo, a demonstrar um panorama nacional relativo a classificação da qualidade da água doce nos trechos onde se encontram os pontos de monitoramento das redes operadas pelas UFs (Unidades da Federação), a ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2024a) compilou um mapa (Figura 2) contendo os pontos monitorados e as suas respectivas classificações,

conforme aprovado pelos conselhos hídricos e com base na Resolução CONAMA nº 357/2005.

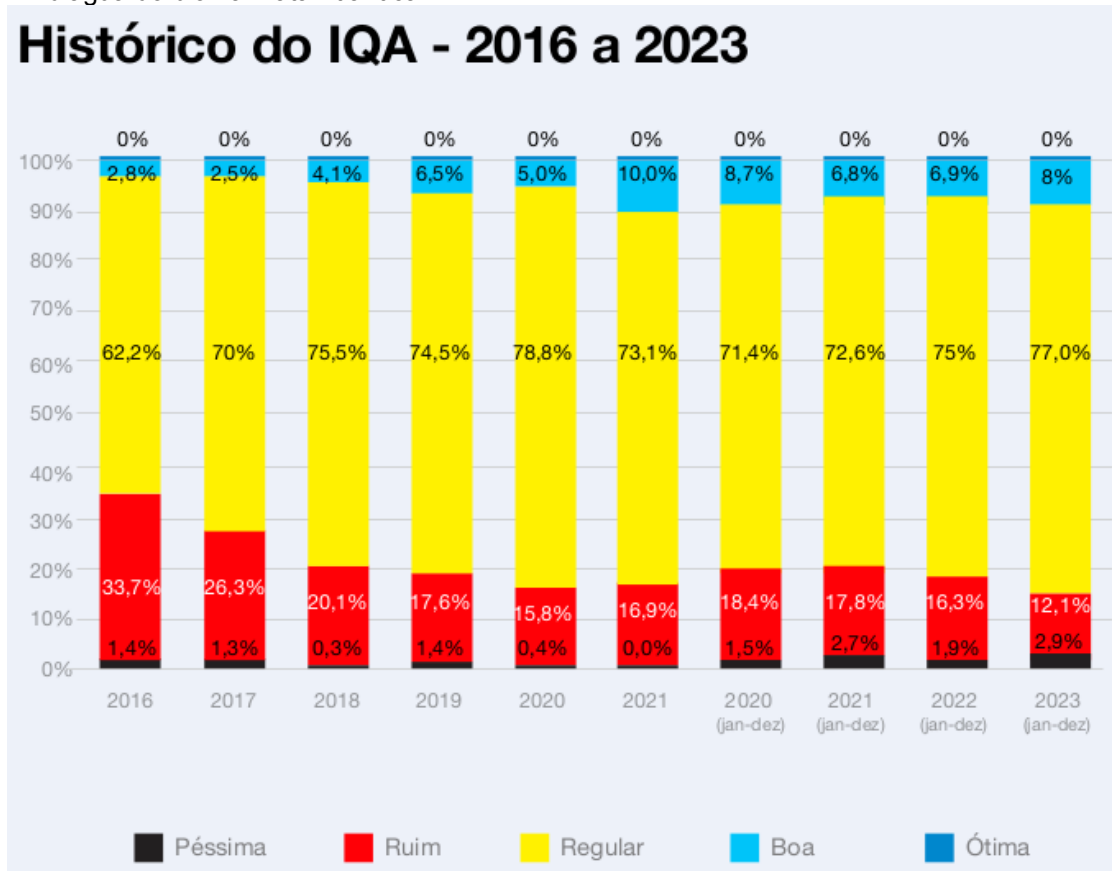
Figura 2 - Pontos de monitoramento com as respectivas classificações de qualidade.



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024a

Enquanto isto, a ONG SOS Mata Atlântica, por meio do seu “Programa Observando os Rios”, vem compilando um retrato da qualidade da água em bacias hidrográficas da Mata Atlântica desde 2015. No ano de 2023, no período de janeiro a dezembro, foram realizadas 1101 análises, em 174 pontos de coleta, de 129 rios e corpos d’água, em 80 municípios, de 16 estados do bioma Mata Atlântica. Dos pontos monitorados, 8% estão com qualidade boa; 77% apresentaram qualidade regular; 12,1%, ruim e 2,9%, péssima. De todos os pontos monitorados, nenhum apresentou uma qualidade considerada ótima. Cerca de 15% dos pontos dos rios analisados não apresentam condições adequadas para o uso, em agricultura, indústria, abastecimento humano, dessedentação de animais, lazer e esportes. Este estudo apresenta um quadro de alerta em relação aos rios da Mata Atlântica, pois apesar da queda do somatório da porcentagem de qualidade de água ruim e péssima, de 18,2% para 15% conforme apresentado no Gráfico 1, o quadro de alerta em relação aos rios da Mata Atlântica persiste, evidenciando a fragilidade das condições ambientais da maioria dos rios monitorados nos estados desse bioma. (SOS Mata Atlântica, 2024).

Gráfico 1 – Média Histórica do IQA – 2016 a 2023 dos pontos monitorados nos rios e corpos d'água do bioma Mata Atlântica.



### 2.3 Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais

Conforme a ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2023a), "o monitoramento é o conjunto de práticas que visam o acompanhamento de determinadas características de um sistema, sempre associado a um objetivo."

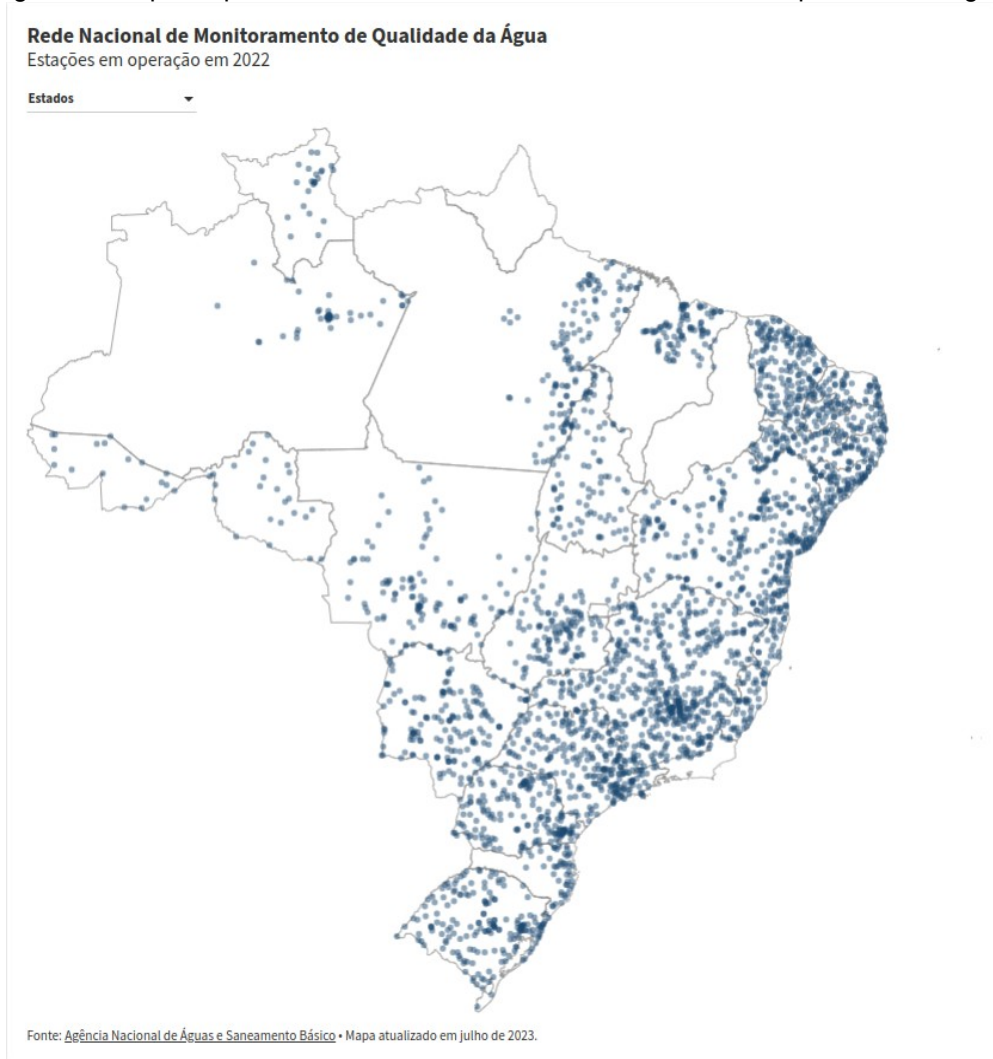
O monitoramento da qualidade das águas envolve o acompanhamento das modificações nas características físicas, químicas e biológicas do recurso hídrico, tanto aquelas decorrentes de atividades antrópicas, quanto de fenômenos naturais (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023a). Diversos componentes físicos, químicos e biológicos influenciam a qualidade da água, e certas variáveis fornecem dados que indicam a presença de poluição, enquanto outras possibilitam o rastreamento da origem das fontes poluentes. A qualidade da água é variável ao longo do tempo, tornando-se essencial estabelecer uma rotina de monitoramento para identificar padrões especiais e mudanças ao longo desse período (Bittencourt; Paula, 2014).

As práticas relacionadas ao monitoramento englobam a coleta de dados e amostras em locais específicos, seguindo uma programação de coleta em intervalos regulares de tempo. Essas ações têm como objetivo principal de produzir informações que possam ser empregadas na avaliação e definição das atuais condições da qualidade da água (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023a).

A Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) e a Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade de Água (RNQA) são as principais fontes de dados para o monitoramento da qualidade da água no Brasil. A RHN é focada principalmente no monitoramento quantitativo, mas também registra parâmetros básicos de qualidade, tais como pH, temperatura, oxigênio dissolvido, entre outros. Para isso, utilizam sondas multiparamétricas. Já a RNQA abrange parâmetros adicionais que exigem coleta de amostras e análises laboratoriais, sendo operacionalizada pelo Programa Qualiágua, coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e executado pelas Unidades da Federação (UFs). A Figura 3 apresenta um mapa que contempla os pontos de monitoramento os quais integram a rede de monitoramento de qualidade da água, sendo essenciais para a obtenção de informações abrangentes sobre a qualidade da água em todo o país, auxiliando na gestão e conservação desse recurso vital (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024b).

A nível nacional, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, através da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) possuía, em 2022, mais de 23 mil estações sob responsabilidades de diversas entidades, enquanto a ANA gerencia diretamente 2836 estações pluviométricas e 1944 estações fluviométricas os quais possibilitam uma avaliação adequada dos aspectos relacionados ao gerenciamento da quantidade de água. Sendo que nos últimos anos, o quantitativo de pontos de monitoramento da RNQA praticamente dobrou, passando de 1.486 em 2016 para 2.933 pontos em 2022, que devido a pandemia global de Covid-19, impossibilitou a implantação de novas estações em 2021, processo que foi retomado em 2022 (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico , 2024b).

Figura 3 - Mapa de pontos da Rede Nacional de monitoramento de qualidade da água.



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2024b

## 2.4 Indicadores da Qualidade da Água

Os indicadores da qualidade da água têm um papel fundamental na avaliação e monitoramento dos recursos hídricos. Eles oferecem informações objetivas sobre a condição da água, permitindo a detecção de contaminações e problemas ambientais. Esses indicadores são essenciais para proteger a saúde pública, assegurar o fornecimento de água potável, preservar a biodiversidade dos ecossistemas aquáticos e guiar políticas públicas e ações de conservação. Estes indicadores, também conhecidos como parâmetros de qualidade de água, são extremamente úteis para avaliar a adequação da água em relação as diversas finalidades (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023b).

### 2.4.1 Índice de Qualidade das Águas (IQA)

A qualidade físico-química e microbiológica das águas, pode ser obtida quantitativamente através da utilização do *Índice de Qualidade das Águas* (IQA), criado em 1970, nos Estados Unidos da América pela “*National Sanitation Foudation*” e adaptada pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) em 1975 e posteriormente adotado pelos outros estados brasileiros (Lopes; Pereira; Magalhães Jr, 2007).

Conforme Bittencourt e Paula (2014) “O IQA também é aplicado para avaliar a qualidade da água bruta para abastecimento público, sendo que a maioria de seus parâmetros são indicadores de contaminação causada pelo lançamento de esgotos domésticos.”

O IQA é calculado por meio do produto ponderado (Fórmula 1) de nove parâmetros, considerados os mais representativos para a caracterização da qualidade das águas, onde cada um possui um peso(w) (Tabela 1), o qual foi fixado conforme sua importância para o aspecto global da qualidade da água (Agência Nacional de Águas, 2023b).

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

onde:

**IQA** = Índice de Qualidade das Águas. Número entre 0 e 100;

**qi** = qualidade do parâmetro i. obtido por meio da curva média específica de qualidade;

**wi** = peso atribuído ao parâmetro, em função de sua importância na qualidade da água, entre 0 e 1.

Tabela 1 – Parâmetros de Qualidade da Água (IQA).

PARÂMETRO DE QUALIDADE DA ÁGUA	PESO (W)
Oxigênio dissolvido	0,17
Coliformes termotolerantes	0,15
Potencial hidrogeniônico – pH	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO5,20	0,10
Temperatura da água	0,10
Nitrogênio total	0,10
Fósforo total	0,10
Turbidez	0,08
Resíduo total	0,08

Fonte: Agência Nacional de Águas (2023b)

Onde os nove parâmetros que compõem o IQA, de acordo com Agência

Nacional de Água e Saneamento Básico (2023b), são abaixo descritos:

1) **Oxigênio Dissolvido:** é o primeiro elemento da tabela e possui o maior peso, pois é vital, uma vez que vários organismos precisam do mesmo para respirar, onde em águas poluídas por esgotos apresentam baixa concentração, uma vez que o mesmo é consumido no processo de decomposição de matéria orgânica;

2) **Coliformes Termotolerantes:** estão presentes no trato intestinal de animais de sangue quente e em grandes números indicam a possível existência de microrganismos patogênicos que são responsáveis pela transmissão de algumas doenças de veiculação hídrica, como exemplo: disenteria bacilar, febre tifoide, cólera;

3) **Potencial Hidrogeniônico (pH):** o mesmo afeta o metabolismo de várias espécies aquáticas, podendo também aumentar o efeito de substâncias químicas tóxicas, tais como os metais pesados;

4) **Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO):** representa a quantidade de oxigênio dissolvido necessária para oxidar a matéria orgânica através da decomposição microbiana aeróbica, onde altos valores são ocasionadas pela grande presença de material orgânico, principalmente proveniente de lixo doméstico, assim, ocasionando a diminuição do oxigênio dissolvido na água, o que pode provocar a mortandade de peixes e a eliminação de outros organismos;

5) **Temperatura da Água:** influência nos parâmetros físico-químicos da água, como sua tensão superficial e a viscosidade. Onde organismos aquáticos são afetados quando a temperatura está fora dos limites de tolerância térmica, impactando no crescimento e reprodução de tais organismos;

6) **Nitrogênio Total:** ocorrem em diferentes formas (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato), onde os nitratos são tóxicos aos seres humanos e em altas concentrações causam uma doença letal em crianças. E devido ao nitrogênio ser um nutriente em processos biológicos, seu lançamento em grandes quantidades, juntos a outros nutrientes como o fósforo, causam crescimento excessivo das algas, o que pode prejudicar o abastecimento público, preservação da vida aquática e recreação;

7) **Fósforo Total:** da mesma forma que o nitrogênio, o fósforo é um importante nutriente para os processos biológicos e o seu excesso podem causar um crescimento excessivo de algas, processo conhecido como eutrofização. Diferente,



são as fontes de fósforo, porém destacam-se os esgotos domésticos;

8) **Turbidez:** representa o total de sólidos em suspensão e sua principal fonte é a erosão de solos, atividades de mineração, onde em valores elevados se faz necessário uma quantidade maior de coagulantes para o tratamento da água, aumentando os custos de tratamento, também afetando a preservação de organismos aquáticos.

9) **Resíduo Total:** pode causar assoreamento, gerando problemas para navegação, aumentando também os riscos de enchentes, causando danos à vida aquática, pois ao se depositarem no leito, destroem organismos que vivem nos sedimentos e que servem de alimento para outros organismos.

## **2.5 Coleta de Dados – Monitoramento da Qualidade da Água**

O monitoramento da qualidade da água possui distintas abordagens: a coleta direta nos corpos hídricos, e a análise laboratorial das amostras coletadas. Em campo, utilizam-se dispositivos como sondas multiparâmetros e medidores portáteis, que permitem uma medição prática de parâmetros como pH, oxigênio dissolvido, temperatura, turbidez e condutividade elétrica, entre outros. Por outro lado, em laboratório, empregam-se equipamentos de bancada e métodos analíticos padronizados para avaliar parâmetros como nitrogênio total, fósforo total, DBO e coliformes, entre outros (CETESB e ANA, 2011).

O processo de coleta e preservação de amostras é complexo, e para isto é fundamental ter profissionais bem treinados e capacitados, com conhecimento técnico e científico sólidos. Além disso, a coleta precisa ser feita com critérios rigorosos para garantir resultados confiáveis, uma vez que, uma amostra representa o próprio ambiente que está sendo estudado (CETESB e ANA, 2011).

Diante disto, em 2011, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) por meio da Resolução nº 724 de 03/10/2011 estabeleceu como referência técnica o guia intitulado “Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos (CETESB e ANA, 2011)” o qual contém diretrizes e métodos, com o objetivo de promover a harmonização dos procedimentos de coleta e preservação de amostras de águas no Brasil, utilizando técnicas padronizadas e reconhecidas. Isso é essencial para o sucesso das análises laboratoriais subsequentes e facilita a comparação e análise conjunta dos dados de

monitoramento, melhorando os diagnósticos da qualidade das águas superficiais do país.

No “Guia Nacional de Preservação e Coleta de Amostras” (CETESB e ANA, 2011) e no documento “Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano” (Ministério da Saúde, 2016) estão expressas as etapas e apresentadas aqui de forma resumida:

a) Planejamento e seleção dos pontos de coleta. Nesse estágio, são considerados fatores como os principais usos da água na região, as características da bacia hidrográfica e as possíveis fontes de contaminação, a fim de garantir uma amostragem representativa e abrangente.

b) Medição in situ de parâmetros como temperatura, pH, oxigênio dissolvido e outros. Essas medições fornecem informações imediatas e auxiliam na compreensão das condições da água no momento da coleta.

c) Coleta das amostras de água em diferentes pontos e profundidades, visando capturar a variabilidade espacial e temporal da qualidade da água.

d) Preservação adequada das amostras, pois é essencial para evitar alterações em suas características até que sejam analisadas em laboratório.

e) Transporte para o laboratório sob condições controladas para garantir a integridade.

f) Realização de análises laboratoriais que abrangem uma série de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, permitindo determinar a presença e concentração de substâncias e microrganismos indicadores da qualidade da água.

g) Interpretação dos resultados obtidos, comparando-os com os padrões estabelecidos por órgãos reguladores. Essa comparação permite avaliar a conformidade da água em relação aos usos preconizados e identificar possíveis problemas nos corpos hídricos analisados.

### **2.5.1 Coleta de Dados – Desafios no Monitoramento da Qualidade da Água**

O monitoramento da qualidade da água doce é uma meta importante da comunidade internacional, conforme estabelecido no indicador 6.3.2 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que visa garantir a boa qualidade do ambiente aquático (Agência Nacional de Águas, 2022).

Segundo Pule, Yahya e Chuma (2017) “um dos maiores desafios no

monitoramento da qualidade da água é a necessidade de coletar um grande número de amostras para garantir análises precisas e confiáveis”. Isso implica custos operacionais elevados, demanda por recursos financeiros consideráveis e pessoal qualificado, além de potenciais atrasos logísticos.

Conforme o “Guia Nacional de Preservação de Amostras”, elaborado pela CETESB em conjunto com a ANA (CETESB e ANA, 2011):

Deve-se ter sempre presente que o tempo e os custos envolvidos se elevam sensivelmente, à medida que se exijam informações mais detalhadas que possam implicar no aumento do número de parâmetros de avaliação, número de amostras, frequência de amostragem, ou utilização de tecnologia mais avançada.

Outros obstáculos também contribuem para dificultar a realização de um monitoramento eficiente da qualidade da água. Entre eles: infraestrutura inadequada, como a falta de laboratórios bem equipados e pessoal treinado; escassez de recursos financeiros, os quais podem limitar a capacidade de conduzir programas abrangentes e frequentes de monitoramento; logística, especialmente em áreas remotas e com desafios climáticos.

Stein (2017) acrescenta que “Infelizmente, nem todos os Estados brasileiros possuem condições de monitorar a qualidade de suas águas, seja pelo elevado custo da logística envolvida ou pela ausência de pessoal capacitado para a tarefa”. Nesse contexto, a avaliação da qualidade das águas no Brasil, um país de proporções continentais, enfrenta desafios significativos. A ausência de sistemas de monitoramento em várias Unidades da Federação e a diversidade das redes de monitoramento em todo o país contribuem para lacunas na supervisão. Isso inclui variações no número de parâmetros examinados e na frequência de coleta de dados (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2023c, 2023d). Essas dificuldades podem levar, em algumas circunstâncias, à interrupção das campanhas de monitoramento devido à falta de recursos financeiros. Essas interrupções podem se estender por longos períodos, criando lacunas que não podem ser preenchidas retrospectivamente (Stein, 2017).

Informações a respeito da qualidade e quantidade das águas superficiais são críticas para diversas aplicações, onde a falta de dados robustos e confiáveis continuam a ser um desafio. No entanto, existem oportunidades para se explorar métodos não tão convencionais, como o uso de dados obtidos por veículos não

tripulados (UAVs), deste modo, preenchendo as lacunas de dados com informações quase em tempo real e de alta resolução (Sibanda *et al.*, 2021). Green *et al.* (2019), concluíram que os Veículos Aéreos não Tripulados (*Unmanned Aerial Vehicle – UAV*), popularmente conhecidos como drones, avançaram de um simples brinquedo, para uma plataforma séria, com um potencial elevado para pesquisa, possibilitando a coleta de diferentes tipos de dados (imagens e outros sensores), com uma ampla gama de aplicações ambientais.

## **2.6 Técnicas Inovadoras no Monitoramento da Qualidade da Água**

Em diferentes trabalhos (Toledo e Nicolella, 2002; Ceretta, 2004; Bueno, Galbiatti e Borges, 2005; Lopes, Pereira e Magalhães jr, 2007; Bárbara *et al.*, 2010; Andrietti *et al.*, 2016; Lima, Mamede e Neto, 2018; Souza *et al.*, 2019; Silva, Ferreira e Matos, 2021) voltados aos estudos da qualidade da água, as metodologias utilizadas na aquisição dos parâmetros são similares, coleta manual de amostras pontuais para posterior análise em laboratório e/ou a utilização de kits para uso *in-situ*, evidenciando que nestes 10 últimos anos pelo menos, o emprego de novas tecnologias no Brasil, tais como o uso de estações de monitoramento autônomas e drones (aéreos e aquáticos) ainda é muito baixo.

As primeiras aplicações de drones se deu na década de 1940. Em seu estágio inicial, tais aeronaves não tripuladas foram concebidas com finalidades militares, desempenhando o papel de máquinas de combate aéreo de baixo custo e risco reduzido para atividades militares ofensivas. A evolução tecnológica e a simplificação das regulamentações restritivas, conduziram os drones a desempenharem um papel preponderante como fonte relevante de informações geoespaciais. Particularmente, no período entre 2012 e 2014, os Estados Unidos da América promoveram modificações em suas regulamentações, permitindo o emprego dos Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs) para uma variedade de propósitos além do âmbito militar. Este contexto ressalta a transformação dos veículos aéreos não tripulados, ao longo do tempo, de dispositivos predominantemente militar para recursos valiosos na aquisição de dados espaciais (Sibanda *et al.*, 2021).

Os Veículos Não Tripulados (UVs) podem ser operados de maneira remota por um piloto ou possuir a capacidade de navegar autonomamente, seguindo

trajetórias predefinidas ou sistemas de automação mais avançados. Essa categoria de veículos abrange diversas modalidades, abrangendo aeronaves não tripuladas (Unmanned Aerial Vehicle ou System - UAV, UAS, também conhecidas como "drones"), veículos terrestres não tripulados (Unmanned Ground Vehicle - UGV), veículos de superfície não tripulados (Unmanned Surface Vehicles - USV) e veículos subaquáticos não tripulados (Unmanned Underwater Vehicles - UUV), cada um adaptado a um ambiente específico: ar, solo, água (Balestrieri *et al.*, 2021).

O emprego dos Veículos Não Tripulados proporciona uma maneira segura, fácil e eficiente no monitoramento dos parâmetros físico-químicos da água se comparado com as técnicas tradicionais (Lally *et al.*, 2019). Mesmo sendo uma aplicação, relativamente recente, Sibanda *et al.* (2021) observaram um aumento substancial no interesse pelo uso de drones para monitoramento. Especificamente, constataram um crescimento notável nos estudos relacionados ao emprego dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para o mapeamento e monitoramento da qualidade e quantidade da água. Esse aumento de interesse pode ser atribuído ao avanço contínuo das tecnologias de drones e sensores, assim como à flexibilização das regulamentações restritivas associadas a essas tecnologias. Para Burgués e Marco (2020) a versatilidade dos drones se reflete em sua rápida adoção por parte das esferas científicas, industriais e regulatórias, reforçando seu papel crucial nas iniciativas de monitoramento e pesquisa ambiental.

Alguns autores (Lally *et al.*, 2019; Shelare *et al.*, 2021) concordam que a maior desvantagem no momento é a pequena carga útil que os drones aéreos comerciais conseguem carregar, impactando no volume de água a ser coletada. Deste modo, não fornecendo um nível de confiabilidade necessário para resolver problemas associados aos programas de monitoramento da água. Surgindo assim, uma demanda por veículos autônomos capazes de explorar tanto superfícies aquáticas, quanto subaquáticas, a fim de aprofundar a compreensão desses ambientes. Cano (2022) destaca, que desta necessidade resultou no desenvolvimento dos “*Unmanned Underwater Vehicles*” (UUV), “*Unmanned Surface Vehicles*” (USV) e “*Remotely Operated Vehicles*” (ROV). Sendo que os drones aquáticos (USV – *Unmanned Surface Vehicle*) são formidáveis para o monitoramento de corpos hídricos, pois além de serem seguros, confiáveis e

eficientes, também possuem grande autonomia e capacidade de carga útil (Bertram, 2008; Manley, 2008).

Porém, Cheng *et al.* (2021) e Bolbot *et al.* (2023) concordam que os USVs oferecem vantagens significativas em várias aplicações, incluindo monitoramento ambiental, vigilância e segurança em ambientes marítimos e de água doce, mas ainda enfrentam vários obstáculos que dificultam sua adoção generalizada. Entre esses obstáculos estão barreiras regulatórias, preocupações com segurança cibernética e, em ambientes de água doce, desafios adicionais como a presença de vegetação densa, variações rápidas no nível d'água, poluição, entre outros, que podem afetar os sensores e a navegação autônoma.

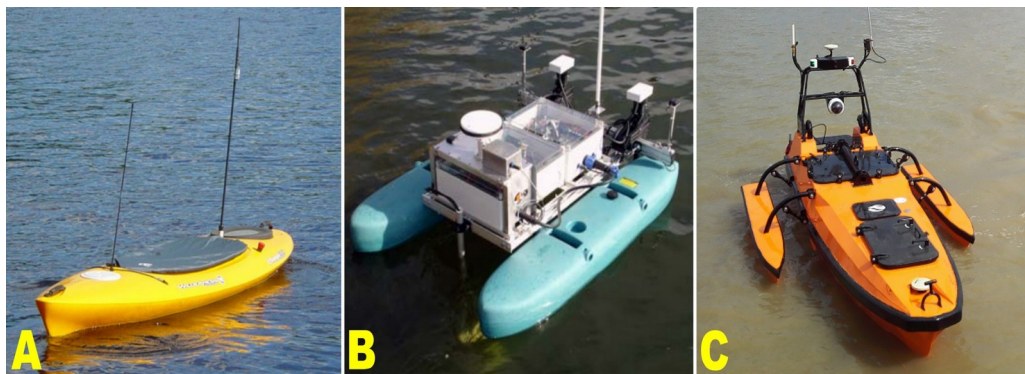
## 2.7 Arquitetura de um Veículo Aquático Não Tripulado

Segundo os trabalhos de Silva *et al.* (2009), Silver (2013), Carlson *et al.* (2019), Silva (2019) e Jan (2020), a construção de um veículo de superfície não tripulado (USV) é constituído por diversas etapas, que vai desde a seleção dos materiais, seleção e construção do casco da embarcação, até a implementação dos sistemas de propulsão, controle, orientação e navegação autônoma nos modelos mais completos.

### 2.7.1 Caracterização da Arquitetura Naval

Os Veículos de Superfície Não Tripulados (USVs) podem ser construídos seguindo diferentes arranjos estruturais, sendo eles, monocasco (Caiaque), catamarã e trimarã, conforme a Figura 4 (Mohammed, 2018; Silva, 2019; Da Silva, 2019).

Figura 4 - Diferentes arranjos de USVs (A) Monocasco, (B) catamarã e (C) trimarã.



Fonte: [A] – Curcio, Leonard e Patrikalakis (2005), [B] – Silva *et al.* (2009), [C] – OceanAlpha (2024).

Cada um dos arranjos apresentam vantagens e desvantagens específicas. No que tange ao espaço disponível, observa-se que o monocasco oferece uma área bastante limitada, enquanto, tanto o catamarã quanto o trimarã proporcionam maior espaço utilizável. No que concerne ao custo de produção, levando em consideração a complexidade construtiva e a quantidade de materiais, destaca-se que o monocasco se evidencia pela sua vantagem econômica devido à menor complexidade e custos mais baixos. Quanto à estabilidade, verifica-se que o trimarã é ligeiramente mais estável que o catamarã, ao passo que o monocasco é notavelmente menos estável. A geometria de casco múltiplo resulta em um centro de gravidade mais baixo, maior estabilidade lateral, o que contribui para uma navegação mais eficiente, maior estabilidade e velocidade. (Mohammed, 2018; Da Silva, 2019).

### **2.7.2 Materiais para Construção Naval**

Conforme Galante (2003), Tonin e Young (2007) e Pereira (2010), na área naval, três categorias de materiais utilizados na produção de embarcações se destacam: a madeira, que tem desempenhado um papel histórico na construção naval desde os seus primórdios; os metais, especialmente o aço e o alumínio, que tiveram sua adoção generalizada iniciada com a Revolução Industrial na Inglaterra, adotada em grande escala para a substituição da madeira; por último, emergem os materiais compósitos, com destaque para a fibra de vidro como a principal referência. O aço é amplamente utilizado na indústria naval, especialmente em embarcações de grande porte, pois apresenta a vantagem de ser extremamente resistente e economicamente mais acessível em relação a outros materiais disponíveis. No entanto, o aço também possui a desvantagem de exibir baixa resistência à corrosão em ambientes de águas salgadas. Além disso, seu peso elevado em comparação com o alumínio e materiais compósitos, torna seu uso inviável em embarcações de pequeno porte. As ligas de alumínio na indústria naval, por sua vez, abrangem diversas áreas, desde a construção de cascos e estruturas até a fabricação de componentes específicos e são valorizadas na indústria naval por suas características superiores em comparação com outros materiais, incluindo baixa densidade, alta relação resistência à tração/peso, resistência à corrosão específica e manutenção da tenacidade em baixas temperaturas, porém com custo

de fabricação mais elevado. Em relação as fibras de vidro, essas possuem reduzido teor alcalino, demonstram notável capacidade de resistência à tração e exibem rigidez em relação à flexão. Adicionalmente, é ressaltada a notável capacidade de resistir a temperaturas elevadas e ao compará-las com materiais como aço ou alumínio, evidencia-se a baixa densidade específica das fibras de vidro, demonstrando assim as vantagens destas fibras, desde a sua produção até suas propriedades mecânicas e térmicas.

E por último, a madeira é empregada na produção de embarcações devido à sua disponibilidade, resistência e facilidade de manuseio, além disso, incluindo sua resistência à fadiga e concentração de tensões, bem como sua capacidade de atuar como isolante térmico, conforme destaca, Tonin e Young (2007). Entretanto, o seu uso em embarcações, na estrutura e casco, estão sendo gradualmente substituído por outros tipos de materiais (Galante, 2003).

### **2.7.3 Controle de Direção e Velocidade**

O controle de direção e velocidade na maioria dos Veículos de Superfície Não Tripulados (USVs) é proporcionado por um leme e pelo sistema de propulsão (conjunto motor e hélice), respectivamente (Liu *et al.*, 2016). Os motores empregados nos sistemas de propulsão podem ser de diferentes tipos. Conforme discutido por Çoban e Oktay (2018) e Townsend *et al.* (2020), os tipos mais comuns compreendem motores de combustão interna, que utilizam combustíveis fósseis, e motores elétricos, alimentados por diferentes fontes de energia (baterias, painéis solares e outros). Em ambos os estudos, ressalta-se que os motores a combustão são preferíveis em veículos militares e comerciais, enquanto os motores elétricos encontram aplicação principal em veículos menores e mais leves, devido à sua vantagem em termos de peso, eficiência, manutenção e por tenderem a ser mais confiáveis. A hélice é uma peça chave do sistema de propulsão, pois ao receber a energia mecânica rotativa provida pelo motor, proporciona a força necessária para impulsionar o avanço da embarcação. Durante a conversão desta energia rotativa em força propulsora, ocorre a dissipação da energia devido ao contato viscoso com a água e ao arraste induzido pela força de sustentação gerada pelas lâminas (Tonacio, 2014). O leme é o mecanismo de manobra das embarcações, o mesmo funciona como uma asa no ar. O leme cria forças e movimentos que afetam a

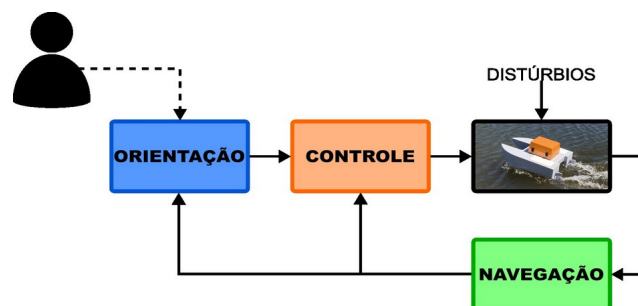


rotação lateral para frente/trás do barco em torno do eixo longitudinal e a rotação em torno do eixo vertical (Heins, Jones e Taunton, 2017; Valter, 2019);

#### 2.7.4 Orientação, Navegação e Controle

Conforme Liu *et al.* (2016), os sistemas de orientação, navegação e controle são componentes vitais, constituídos de computadores e software embarcados e juntos são responsáveis por gerir todos os sistemas dos Veículos de Superfície Não Tripulados. O sistema de orientação calcula os valores de referência, para que o sistema de controle por meio de técnicas específicas (Controlador Proporcional Integral Derivativo - PID) possa cumprir uma tarefa de manobra predefinida. Essas manobras são geridas, atuando sobre o controle de direção e velocidade. Tal controle requer medidas ou estimativa da posição e do rumo da embarcação. A posição é obtida por meio de sistemas GNSS, enquanto o rumo é obtido de unidades inerciais, normalmente compostas por acelerômetros, giroscópios e magnetômetros (Caccia *et al.*, 2008; Kurowski *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016). A Figura 5 apresenta um diagrama de bloco simplificado do sistema de orientação, navegação e controle empregado na maioria dos Veículos de Superfície Não Tripulados.

Figura 5 - Bloco diagrama do sistema de orientação, controle e navegação.



Fonte: Modificado de Kurowski *et al.*, (2015).

#### 2.7.5 Coleta de Dados – Sensores e Sistema de Aquisição

Os sensores são dispositivos capazes de transformar grandezas físicas (temperatura, aceleração, potencial hidrogeniônico - pH, entre outros) em sinais elétricos, pois raramente, estes são de natureza elétrica, possibilitando assim a digitalização, armazenamento e o processamento. Os sistemas de aquisição, por sua vez são compostos por circuitos eletrônicos discretos e por um microcomputador em um único chip, também conhecido por microcontrolador, o qual é capaz de

executar tarefas bem definidas (software exclusivo - *firmware*), como exemplo, a aquisição de dados provenientes dos sensores (digitalização), armazenamento e o envio dos dados através de diferentes protocolos e meios físicos (Varella Neto, 2017; Chen *et al.*, 2021).

A coleta de dados em Veículos de Superfície Não Tripulados depende dos tipos de tarefas a serem realizadas por estes. Pois além dos sensores empregados nas tarefas de Orientação, Controle e Navegação, o veículo pode carregar diversos tipos de sensores, tais como, sensores ambientais para o monitoramento da qualidade da água (temperatura, turbidez, pH, condutividade e outros), ecobatímetros para levantamentos batimétricos e outros (Liu *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2021; Francis e Traykovski, 2021).

#### **2.7.6 Estação de Controle e Monitoramento**

A estação de controle e monitoramento é um equipamento normalmente locado em terra ou em veículos de suporte. Ela funciona principalmente por meio de tecnologia sem fio e é fundamental para o envio de missões e configurações de parâmetros quando o veículo em modo autônomo, ou para controlar a velocidade e a direção, quando em modo manual, por meio de rádio controle. Também é muito utilizada para a recepção em tempo real dos dados adquiridos por todos os sensores presentes no veículo, tanto das informações de navegação e saúde funcional, bem como, das informações dos sensores ambientais, batimétricos e outros quando presentes (Liu *et al.*, 2016).

### **3 METODOLOGIA**

É de conhecimento geral que os recursos hídricos são essenciais para a saúde e o bem-estar da humanidade, tornando fundamental o monitoramento constante da qualidade da água. A abordagem metodológica adotada incluiu as etapas de planejamento e projeto do protótipo, abrangendo 'Mecânica', 'Sistemas Embarcados Hardware' e 'Sistemas Embarcados Firmware/Software'.

#### **3.1 Desenvolvimento do Protótipo**

Baseado nas referências bibliográficas, especialmente no trabalho de Jan (2020), o projeto e o desenvolvimento de um Veículo de Superfície Não Tripulado pode ser subdividido em duas etapas principais: mecânica e sistemas embarcados (hardware, software, firmware e sensores ambientais).

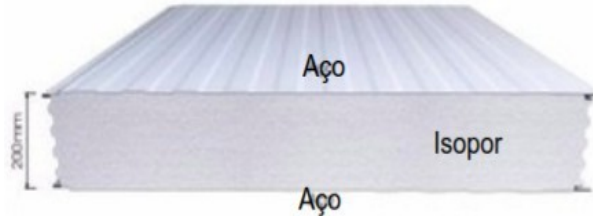
##### **3.1.1 Mecânica – Planejamento e Projeto do Casco**

O casco é uma das principais partes de uma embarcação, responsável por fornecer sustentação, flutuabilidade e proteção a todos os componentes. Com base no modelo proposto por Jan (2020) e conforme explanado na seção 2.7.1 (Caracterização da Arquitetura Naval), optou-se pela arquitetura de duplo casco (catamarã) devido à sua grande estabilidade, espaço útil e menor custo e complexidade em comparação com um trimarã. Para atender às demandas do projeto e conforme explicado na seção 2.7.2 (Materiais para Construção Naval), decidiu-se pelo uso de fibra de vidro, chapas de aço e EPS (isopor) em substituição à madeira, garantindo rigidez, durabilidade, flutuabilidade e relativo baixo custo na construção do casco. No mercado nacional existe um compósito que une a rigidez e a durabilidade do aço, com a leveza e a flutuabilidade do EPS. Este material é o painel isotérmico (Figura 6), amplamente utilizado na construção de câmaras frias e adequado para a construção do casco.

Com a arquitetura naval e os materiais definidos, foram feitos vários moldes em tamanhos diferentes, todos no formato de catamarã, até chegar a um modelo (Figura 7) que atendesse aos requisitos técnicos do projeto. As dimensões finais (~0,90 m de comprimento, ~0,65 m de largura e ~0,25 m de altura) foram escolhidas para garantir que o protótipo fosse leve e compacto. Essas medidas permitem que uma única pessoa manuseie e transporte o equipamento com facilidade, otimizando

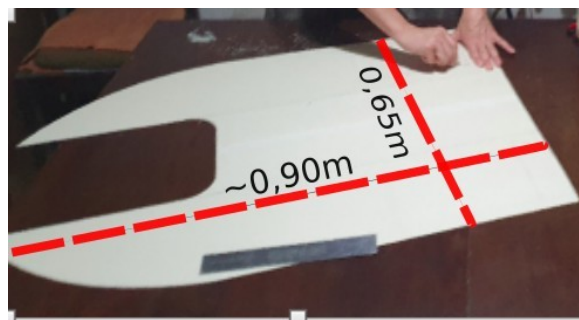
a mobilidade em campo sem comprometer a funcionalidade ou a eficiência.

Figura 6 - Painel isotérmico



Fonte: International Refrigeração, 2024.

Figura 7 - Molde em papel cartão do protótipo do catamarã.



Fonte: Autor

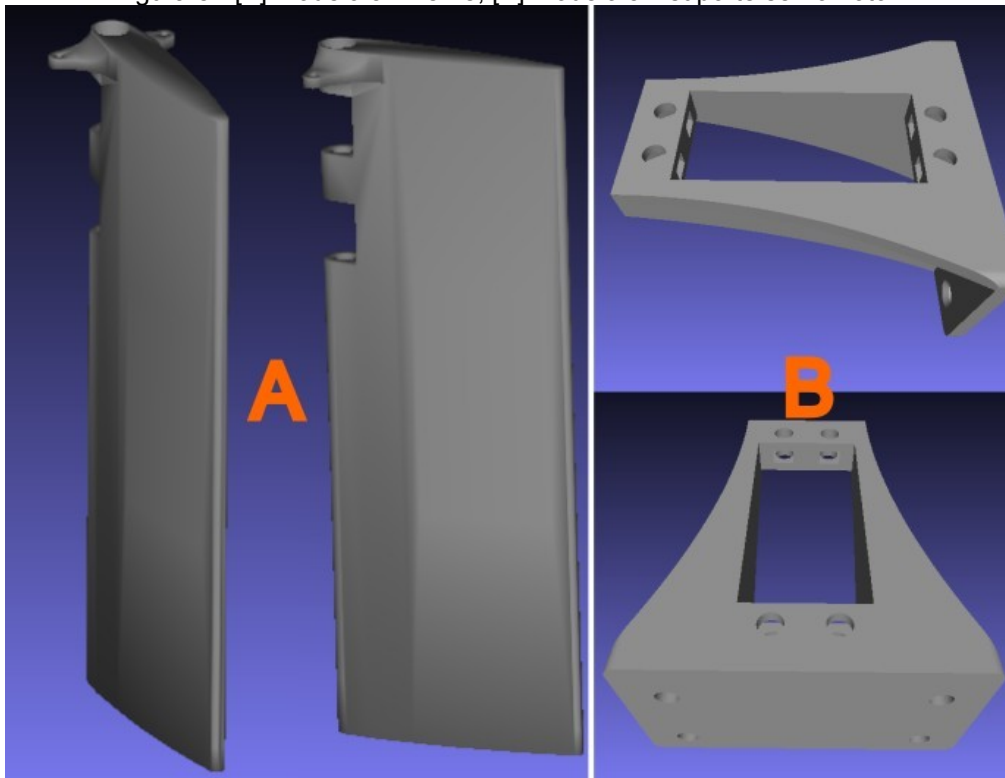
### 3.1.2 Mecânica – Planejamento e Projeto do Sistema de Direção e Velocidade

Conforme o projeto de Jan (2020) e o explicado na seção 2.7.3 (Controle de Direção e Velocidade), optou-se pela utilização de um conjunto motor/hélice/leme, para cada um dos cascos do catamarã. O motor escolhido é do tipo elétrico, "brushless", à prova d'água, amplamente utilizado em nautimodelismo. Juntamente com o motor, foi adquirido um controlador eletrônico de velocidade (ESC), responsável por controlar os motores. Além disso, adotou-se a utilização de um banco de capacitores ligados à alimentação do ESC para proteger tanto as fontes de alimentação quanto os próprios ESCs durante acelerações ou frenagens bruscas.

A hélice é um dos componentes essenciais do projeto, onde o diâmetro e o número de pás influenciam em parâmetros como empuxo, consumo de energia e aquecimento dos motores. Foram adquiridos três conjuntos de hélices de diferentes tamanhos (diâmetros 30, 36 e 42 mm), cada uma com três pás. Cada conjunto inclui duas hélices com sentidos de rotação opostos. Para a transmissão da energia rotativa fornecida pelos motores, foram utilizados eixos de hélice específicos para nautimodelos e eixos cardan, responsáveis pelo acoplamento entre os eixos dos motores e os eixos de hélice.

O leme é um componente importante, pois é responsável pela direção da embarcação. Para a movimentação dos lemes, foram escolhidos servomotores com engrenagens metálicas e torque suficiente. Para os lemes e suportes dos servomotores, optou-se por modelos prontos desenvolvidos por Jan (2020). A Figura 8 mostra os modelos 3D do leme (A) e do suporte do servomotor (B), disponíveis na internet na página do projeto de Jan (2020).

Figura 8 - [A] Modelo 3D Leme; [B] Modelo 3D suporte servomotor.



Fonte: Modificado de Jan (2020).

### 3.1.3 Sistemas Embarcados

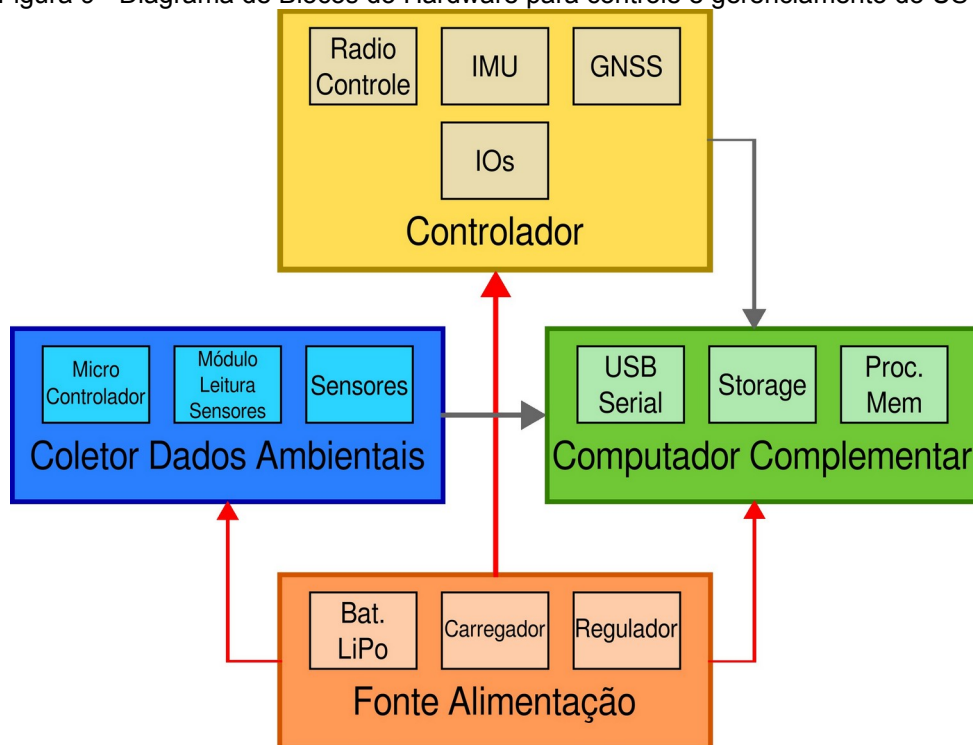
Os sistemas embarcados são dispositivos ou conjuntos de dispositivos eletrônicos que desempenham funções específicas, com capacidade de coleta, processamento e armazenamento de dados. Devido à complexidade e à natureza multidisciplinar do desenvolvimento dos sistemas embarcados (hardware, firmware e software), contou-se com a consultoria do especialista M.E. Celso Bairros Varella Neto. Ele forneceu suporte e desenvolveu essas etapas a partir das especificações do projeto e das funções solicitadas.

#### 3.1.3.1 Hardware

O hardware, de forma geral, refere-se ao conjunto de equipamentos e

componentes eletroeletrônicos integrados em dispositivos, que podem ou não requerer processamento computacional. No contexto de um Veículo de Superfície Não Tripulado (USV) para monitoramento ambiental, é necessário o uso de diferentes hardwares interconectados para viabilizar o controle de direção e velocidade (controle sem fio e/ou semi-autônomo), além da coleta de dados dos sensores ambientais e de posicionamento. A Figura 9 apresenta um diagrama de blocos do hardware proposto para atender às demandas do protótipo do Veículo de Superfície Não Tripulado projetado nesta pesquisa, com foco no monitoramento dos parâmetros físico-químicos de corpos d'água.

Figura 9 - Diagrama de Blocos do Hardware para controle e gerenciamento do USV.



Fonte: Autor

De acordo com o diagrama de blocos, o "Controlador" (IOs: Input/Output System, IMU: Inertial Measurement Unit) destacado em amarelo é responsável por gerenciar todas as funções de controle de direção e velocidade, bem como a navegação (manual via rádio controle ou autopilotado). A construção deste tipo de dispositivo é altamente complexa e foge do escopo deste trabalho, portanto, o uso de um modelo comercial é o mais indicado.

O "Coletor de Dados Ambientais", destacado em azul no diagrama de blocos, abrange todos os aspectos da coleta de informações ambientais. Ele foi projetado

com base em três parâmetros do Índice de Qualidade da Água (IQA): potencial hidrogeniônico (pH), temperatura e turbidez. Para a coleta desses parâmetros ambientais provenientes dos sensores, é necessário empregar um dispositivo conhecido como microcontrolador. Essencialmente, um microcontrolador é um computador em um único chip, com hardware limitado, projetado para executar tarefas específicas, como a conversão dos sinais analógicos (tensão, corrente) provenientes dos sensores, o pré-processamento dos dados para armazenamento e/ou transmissão, bem como outras tarefas, se necessário.

O "Computador Complementar", destacado em verde, é empregado na integração dos diversos blocos e é responsável por tomar decisões e realizar ações com base nos dados recebidos dos blocos "Controlador" e "Coletor de Dados Ambientais". Devido ao espaço e aos requisitos energéticos limitados, o uso de computadores compactos é necessário. Assim, a utilização de um "Computador de Placa Única (SBC)" é a mais indicada, pois, além de atender aos aspectos limitantes, possui características computacionais suficientes para a demanda do projeto. O uso de um modelo comercial é o mais indicado.

O bloco "Fonte de Alimentação", destacado em laranja, é encarregado de fornecer energia para os demais blocos. Para permitir escalabilidade, proteção e segurança, o uso de baterias recarregáveis e controladores de carga e descarga é imprescindível.

### **3.1.3.2 Firmware/Software**

De acordo com o diagrama de blocos do hardware apresentado na seção 3.1.3.1, Figura 9, três blocos (Controlador, Coletor de Dados Ambientais e Computador Complementar) possuem necessidades computacionais. Dentre esses, dois blocos (Controlador e Coletor de Dados Ambientais) se destacam por exigir um tipo especial de software, conhecido como "firmware", que é armazenado diretamente no dispositivo eletrônico e controla todas as suas funções. O Computador Complementar, por sua vez, exige não apenas um sistema operacional completo, mas também um software customizado para gerenciar todas as atividades do Veículo de Superfície Não Tripulado.

## **3.2 Calibração dos Sensores**

Conforme apresentado na subseção 2.7.5, os sensores convertem grandezas

físicas em sinais elétricos, e, devido à natureza de cada tipo de sensor, seus componentes podem ser suscetíveis a desgastes, o que provoca a deriva do sinal elétrico. Assim, a calibração é imprescindível para que os valores registrados reflitam fielmente os valores amostrados.

A metodologia de calibração depende do tipo de resposta do sensor, mas para sensores com resposta linear geralmente envolve o uso de padrões conhecidos, como soluções tampão para pH ou outros referenciais adequados para diferentes tipos de sensores.

O procedimento consiste em comparar os valores medidos pelos sensores com os valores conhecidos dos padrões, gerando um gráfico de correlação entre eles. Devido à natureza linear da resposta desses sensores, é possível aplicar a técnica de regressão linear para determinar a curva de calibração. Essa equação ajusta os valores medidos e garante maior precisão nas leituras, assegurando que os sensores forneçam dados confiáveis ao longo das campanhas de monitoramento.



## 4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta a construção do protótipo, a condução e a análise dos testes, abrangendo desde a experimentação em ambiente controlado até a coleta de amostras em campo com o protótipo do Veículo de Superfície Não Tripulado. Também detalha o processo de calibração dos sensores ambientais e o subsequente processamento dos dados, incluindo a geração de mapas e a interpretação dos resultados.

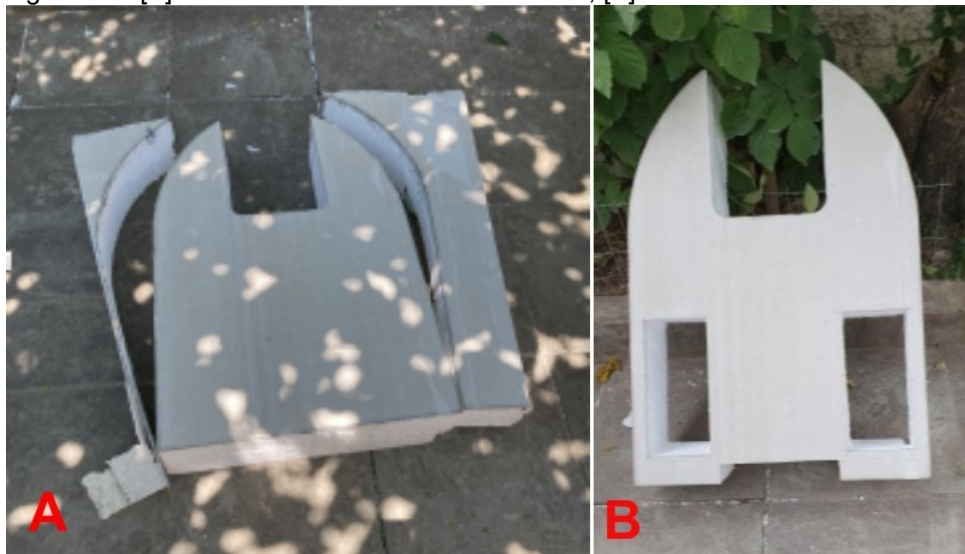
### 4.1 Construção do Protótipo

Nesta seção será abordada a construção propriamente dita do protótipo, seguindo as definições do projeto, desenvolvidas na metodologia (seção 3).

#### 4.1.1 Mecânica - Construção do Casco

A construção do casco começou com o recorte do material escolhido (painel isotérmico), conforme o desenho/molde apresentado na Figura 10.

Figura 10 - [A] Painel isotérmico em fase de corte; [B] Painel Isotérmico recortado.



Fonte: Autor

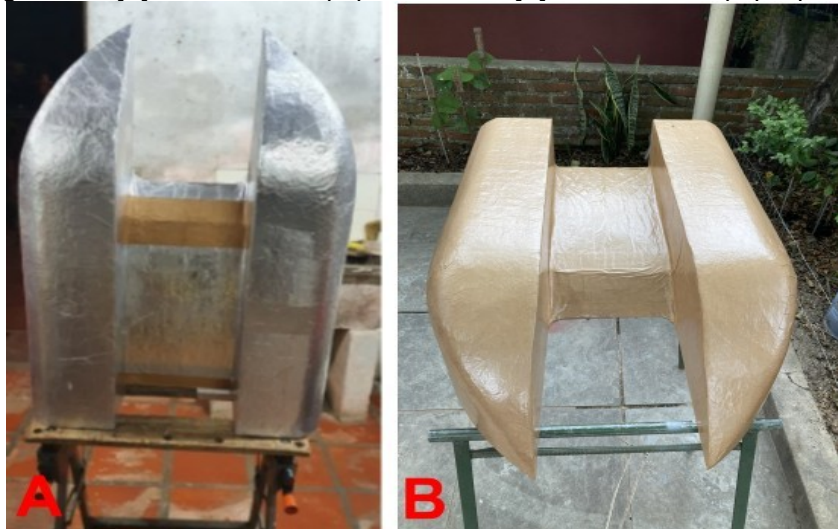
Sobre o EPS (isopor), aplicou-se massa tapa furo e realizou-se o lixamento para modelar a parte inferior, suavizando-a conforme apresentado na Figura 11. A pré-laminação é uma etapa intermediária e essencial para proteger o isopor. Nesta fase, foram utilizadas várias técnicas comuns em modelismo: aplicação de várias camadas de cola branca diluída em água, seguida pela aplicação de papel alumínio e papel pardo, conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 11 - [A] Aplicação massa tapa furo; [B] Lixamento.



Fonte: Autor

Figura 12 - [A] Revestimento papel alumínio; [B] Revestimento papel pardo.



Fonte: Autor

A laminação é o processo pelo qual se aplica fibra de vidro e resina, seguido pela polimerização. O protótipo foi laminado (Figura 13) utilizando uma combinação de manta (maior gramatura) e véu (menor gramatura, para acabamento) de fibra de vidro e resina poliéster. Esse processo é essencial para proporcionar proteção extra ao isopor e garantir a estanqueidade. Todo o processo foi realizado de forma artesanal, com o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), como luvas de borracha, óculos de segurança e máscara.

Figura 13 - [A] Aplicação da manta de fibra de vidro; [B] Aplicação do véu de fibra de vidro.



Fonte: Autor

Após 24 horas, tempo necessário para a cura total da fibra de vidro, a estrutura recebeu três camadas de tinta/fundo na cor cinza (Figura 14).

Figura 14 - [A] Vista superior do protótipo pintado; [B] Vista inferior do protótipo pintado.



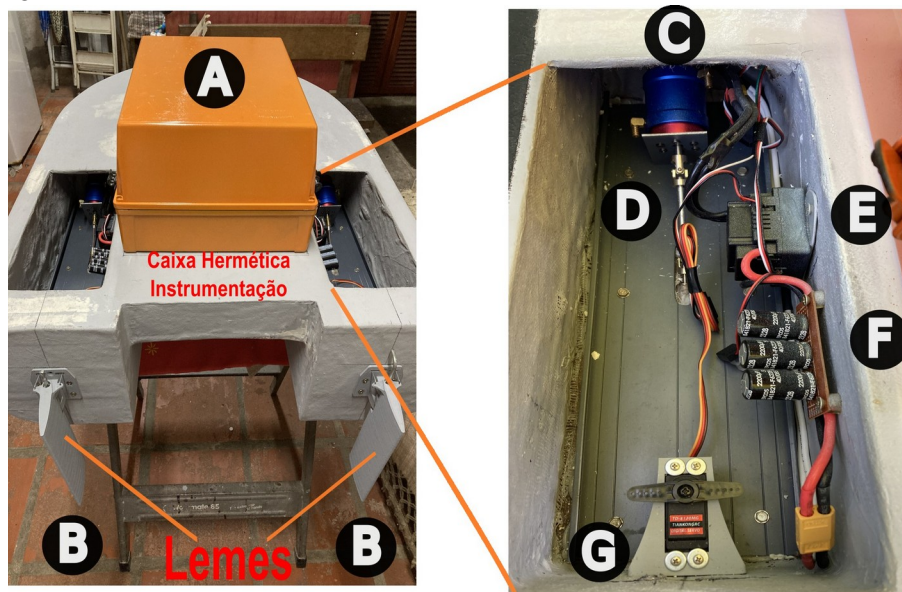
Fonte: Autor

#### 4.1.2 Mecânica - Construção do Sistema de Direção e Velocidade

Com base no projeto do sistema de controle de direção e velocidade, os componentes (motores de propulsão, ESCs, servomotores, hélices, eixos, capacitores, fios, conectores e caixa hermética) foram adquiridos no mercado nacional, enquanto alguns foram impressos em 3D (lemes e suportes dos servomotores). A caixa hermética foi fixada sob a parte superior do casco, na área útil, e vedada com cola PU. Os motores de propulsão, ESCs, bancos de capacitores, suportes e servomotores foram instalados nos respectivos compartimentos dos motores em ambos os lados do casco, e a conexão entre os motores e as hélices

foram realizadas por meio dos eixos. Na parte externa traseira, foram instalados os suportes e os lemes. A Figura 15 apresenta um compilado dos componentes instalados em seus respectivos locais. Os suportes dos motores de propulsão, ESCs e bancos de capacitores foram construídos artesanalmente.

Figura 15 - [A] caixa hermética; [B] lemes; [C] motor propulsão; [D] eixo cardan; [E] controlador eletrônico de velocidade; [F] banco de capacitores; [G] servomotor leme.



Fonte: Autor

#### 4.1.3 Sistemas Embarcados - Construção do Hardware

Conforme mencionado na seção 3.1.3.1, o hardware proposto para o protótipo do Veículo de Superfície Não Tripulado é composto por quatro grandes dispositivos. O principal e um dos mais importantes é o "Controlador" (flight controller). Embora existam diversas opções disponíveis no mercado, o alto custo de aquisição de modelos comerciais profissionais os tornam inviáveis para o propósito do protótipo. Portanto, optou-se pelo uso de um modelo mais simples ("PixHawk", Figura 16), amplamente utilizado em modelismo e gentilmente doado pela empresa Gaúcha "SKYDrones", que atende perfeitamente às necessidades do projeto.

O segundo e mais importante bloco é o "Coletor de Dados Ambientais". Este bloco foi projetado com base em três parâmetros da qualidade da água (pH, temperatura e turbidez). Os sensores foram escolhidos devido ao seu custo relativamente baixo, facilidade de aquisição no mercado nacional e simplicidade de uso e integração ao sistema. A Figura 17 apresenta uma compilação dos sensores e

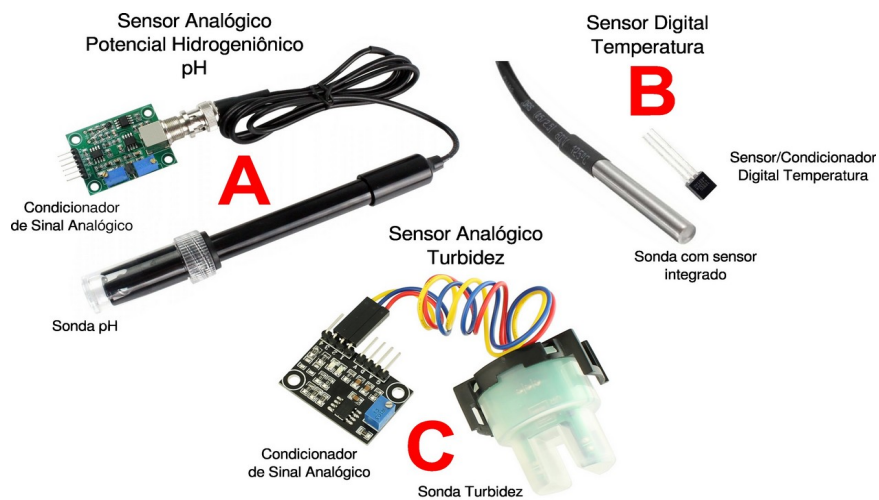
sondas adquiridas, enquanto a Tabela 2 sintetiza as características de cada sonda/sensor.

Figura 16 - Controlador PixHawk 2.4.8



Fonte: Modificado de: Robocraze (2024).

Figura 17 - [A] Sonda pH; [B] Sonda Temperatura; [C] Sonda turbidez;



Fonte: Modificado de: [A], [C] Usinainfo (2024a, 2024b), [B] Makerhero (2024).

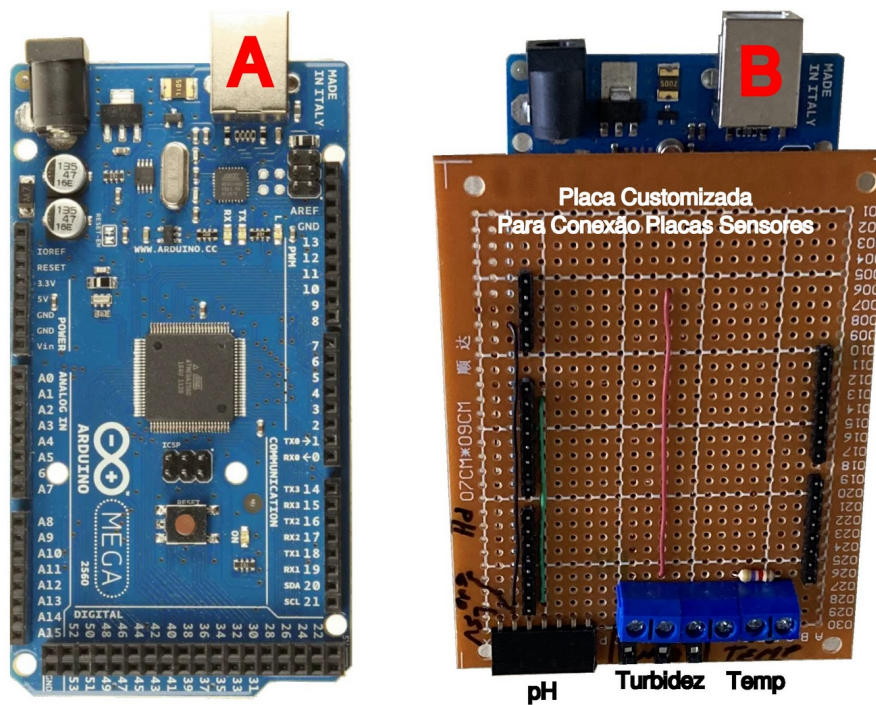
Tabela 2 – Modelo e características dos sensores ambientais.

Propriedade	Modelo Sonda/Sensor	Características
pH	PH-4502C	Faixa: 0,0 a ~14.0 pH Resposta: 5 segundos Saída: Analógica (0 a 5 V) Alimentação: 5 V
Temperatura	DS18B20	Faixa: -55°C a +125°C Resposta: 750 milissegundos Saída: Digital protocolo 1-wire Alimentação: 3 a 5 V
Turbidez	ST100	Faixa: 0 a 3000 NTU Resposta: < 500 milissegundos Saída: Analógica (0 a 4.5 V) Alimentação: 5 V

Fonte: Modificado de: [A], [C] Usinainfo (2024a, 2024b), [B] Makerhero (2024).

Como os dados provenientes do conjunto sonda/sensor têm natureza elétrica analógica, optou-se pelo uso da plataforma Arduino (Mega 2560), que possui um sistema de conversão analógica digital (ADC). Além disso, a escolha se baseou na ampla disponibilidade no mercado nacional, na facilidade de programação e na integração com os sensores adquiridos. A Figura 18 apresenta o Arduino juntamente com uma pequena placa de expansão construída artesanalmente para possibilitar a conexão das placas condicionadoras das sondas/sensores ao Arduino.

Figura 18 - [A] Placa Arduino MEGA 2560; [B] Placa de expansão customizada montada sobre o Arduino MEGA 2560, com conectores para as placas condicionadoras dos sensores.



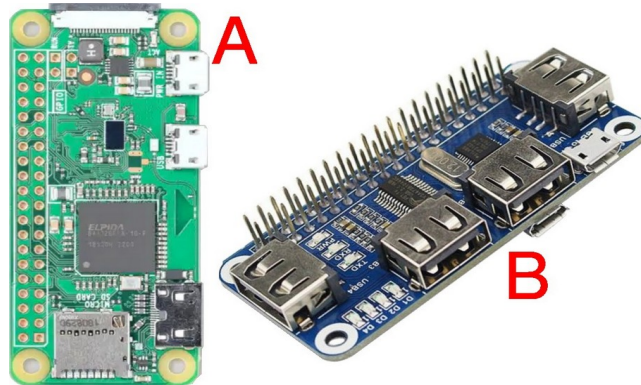
Fonte:[A] Techzeero (2024); [B] Autor.

O “Computador Complementar”, devido às suas características limitantes em termos de tamanho e consumo de energia, optou-se pela placa Raspberry Pi, modelo “Zero W”. Esta placa possui dimensões e peso reduzidos, baixo consumo de energia, portas USB, WiFi/BLE, armazenamento via cartão de memória e poder computacional suficiente para o projeto. A Figura 19 apresenta a “Raspberry Pi Zero W” juntamente com uma placa de expansão USB usada para interconectar a placa Controladora e o Coletor de Dados Ambientais.

Com base nas especificações dos três principais blocos (“Controlador”,

“Coletor de Dados Ambientais” e “Computador Complementar”), foram adquiridas baterias recarregáveis, modelo Li-Ion de 3,7V e 2200 mAh, juntamente com um circuito controlador de carga, carregador e proteção contra sobrecarga e descarga.

Figura 19 - [A] Placa Raspberry Pi Zero W; [B] Placa de expansão USB.



Fonte: Modificado de: [A] Raspberry Pi (2024); [B] Saravati (2024).

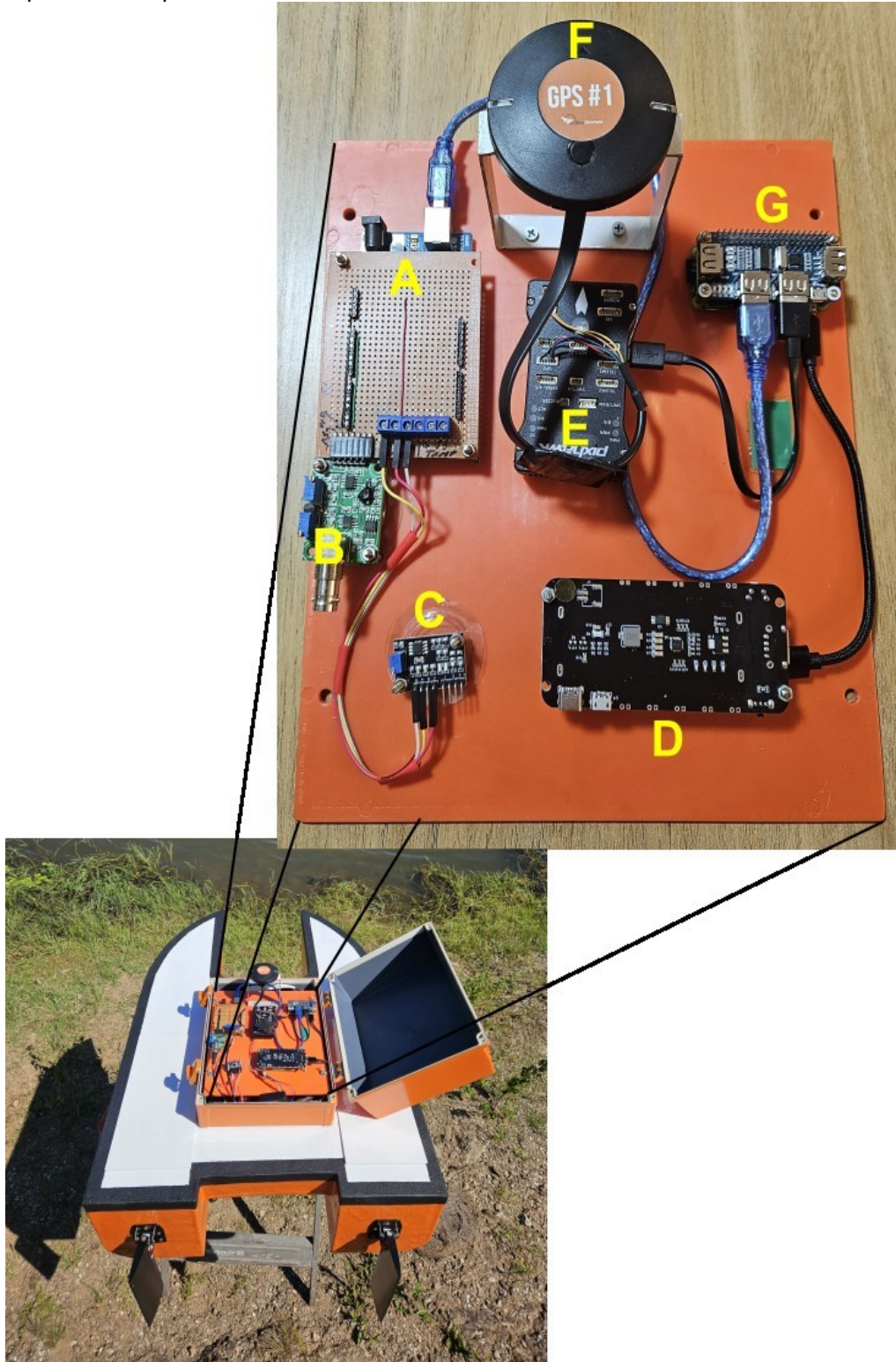
Todos os dispositivos (“Controlador”, “Coletor de Dados Ambientais”, “Computador Complementar” e “Fonte de Alimentação”) e periféricos (cabos, fios e conectores) foram fixados em uma base apropriada, com isolamento elétrico adequado, e interconectados por meio de comunicação serial (UART) através da porta USB, conforme o diagrama de blocos apresentado na seção 3.1.3.1 (Figura 9). A Figura 20 apresenta o hardware de controle de navegação e aquisição de dados construído para o protótipo e instalado na caixa hermética.

#### 4.1.4 Sistemas Embarcados – Desenvolvimento do Firmware/Software

Conforme descrito na seção 4.1.2 (Figura 16), o hardware selecionado para o bloco “Controlador” é a placa “Pixhawk”, que utiliza um firmware de código aberto chamado “Ardupilot”. Este firmware é destinado ao uso em veículos não tripulados (multirotores, asa fixa, carros, embarcações e outros) e permite o controle manual ou automático. O firmware (versão ArduRover V4.2.3) já veio instalado e configurado na placa Pixhawk cedida pela empresa “SkyDrones”.

No que diz respeito ao “Coletor de Dados Ambientais”, utilizou-se uma placa Arduino e desenvolveu-se um firmware customizado exclusivamente para realizar a leitura dos sensores, processar os dados coletados e enviá-los através da porta serial por meio de uma conexão USB. A Figura 21 ilustra o fluxograma do firmware desenvolvido, programado na linguagem C++ utilizando a IDE do Arduino, versão 2.3.0.

Figura 20 - Hardware de Controle de Navegação e Aquisição de Dados Ambientais e de Geolocalização. [A] Arduino/Coletor dados dos sensores Ambientais; [B] Condicionador da sonda pH; [C] Condicionador do sensor de turbidez; [D] Fonte alimentação baterias Li-Íon; [E] Pixhawk / Placa Controladora; [F] Módulo GPS e Antena; [G] Raspberry Pi Zero W / Computador Complementar.

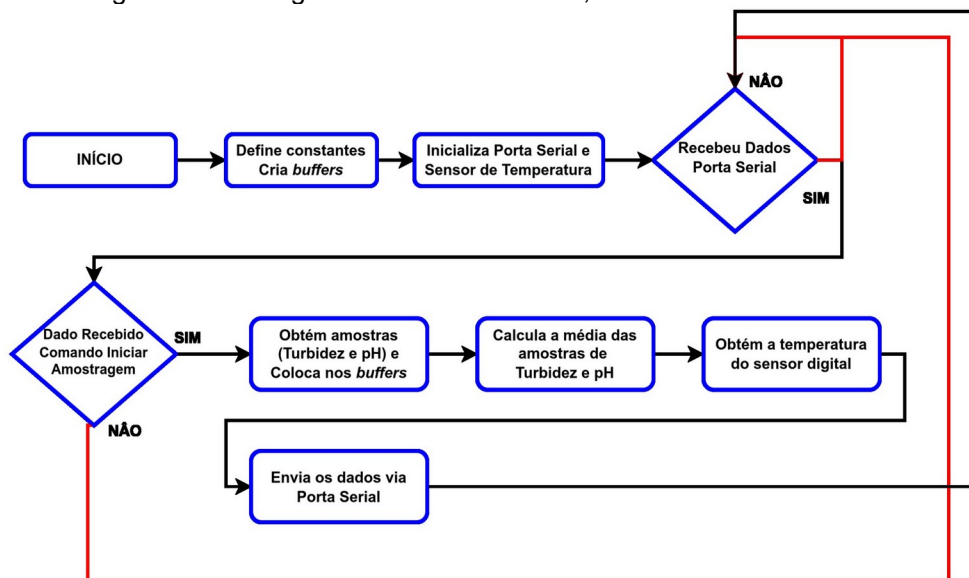


Fonte: Autor



O fluxograma (Figura 21) demonstra que constantes são definidas para armazenar valores de configuração que não devem ser alterados durante a execução do firmware. Além disso, são criados buffers para armazenar os dados coletados pelos sensores. Após a inicialização do sensor de temperatura e a ativação da porta de comunicação serial, o Arduino entra em um loop infinito, aguardando o recebimento de comandos pela porta serial. Quando um comando válido é recebido, o Arduino coleta amostras dos sensores de pH e turbidez via conversor analógico-digital, armazena-as no buffer, calcula a média, obtém a informação do sensor de temperatura por meio do canal digital e envia os valores (média do pH e turbidez, e temperatura) através da porta serial. Em seguida, o loop recomeça, aguardando um novo comando.

Figura 21 - Fluxograma Firmware Arduino, coletor dados ambientais.



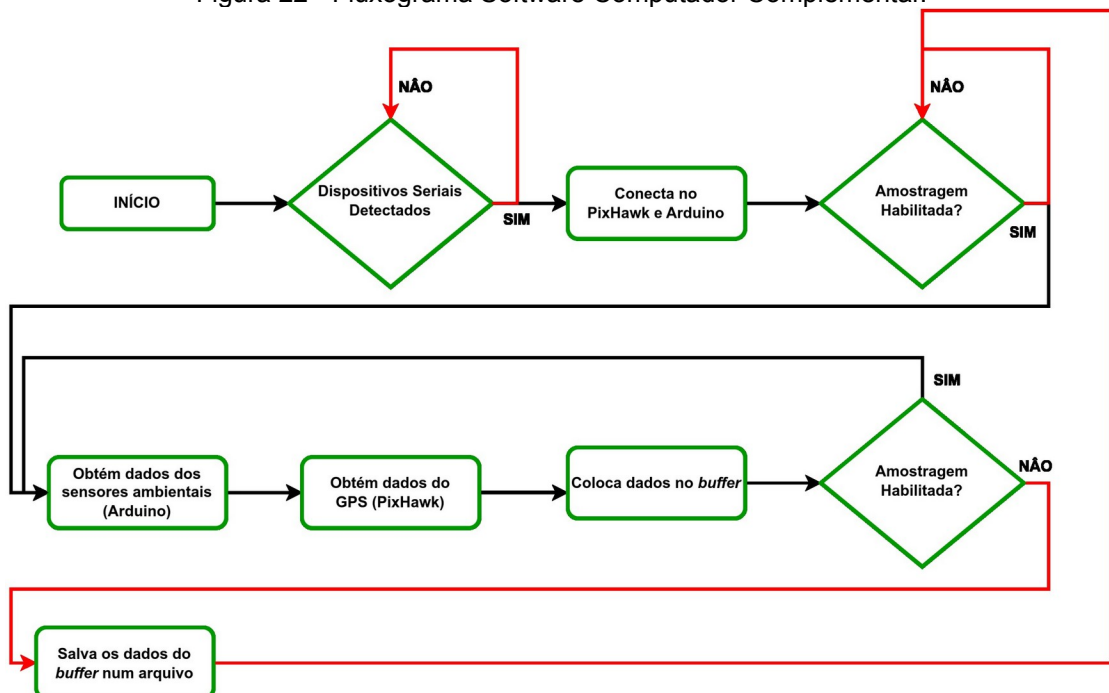
Fonte: Autor

Conforme descrito na seção 4.1.2, o "Computador Complementar" selecionado foi uma placa Raspberry Pi, modelo "Zero W" (Figura 16). Devido ao seu processador avançado e aos diversos recursos disponíveis, é necessário o uso de um sistema operacional (SO). Nesse sentido, a "Fundação Raspberry Pi" oferece o "Raspberry Pi OS", um sistema operacional GNU/Linux com um conjunto rico de funcionalidades.

Para a integração dos blocos, foi desenvolvido um software específico utilizando a linguagem de programação Python. A escolha dessa linguagem se deve às diversas bibliotecas gratuitas disponíveis, que facilitam a expansão de

funcionalidades. A Figura 22 apresenta o fluxograma do software desenvolvido. Após a inicialização, o software aguarda que os dispositivos (Arduino - Coletor de Dados Ambientais e Pixhawk - Controladora) sejam inicializados e reconhecidos pelo sistema operacional do computador complementar. Em seguida, o software estabelece uma conexão serial com cada dispositivo e espera um comando para iniciar a amostragem, recebido via Pixhawk. Quando a amostragem é habilitada, o software envia um comando ao Arduino para iniciar a coleta de dados dos sensores e aguarda a resposta. Simultaneamente, solicita ao Pixhawk os dados de posicionamento por satélite (latitude e longitude) do USV no momento da aquisição. Esses dados são associados aos dados dos sensores e armazenados no buffer. O software verifica se a amostragem está habilitada e, se estiver, repete o processo, incrementando os novos dados no buffer. Se a amostragem estiver desabilitada, o software salva os dados do buffer em um arquivo de texto, com os campos separados por vírgula, permitindo o processamento e análise posterior.

Figura 22 - Fluxograma Software Computador Complementar.



Fonte: Autor

## 4.2 Testes em Ambiente Controlado

Os testes em ambiente controlado foram realizados utilizando uma caixa de água de 500 litros, completamente cheia, para avaliar a flutuabilidade,

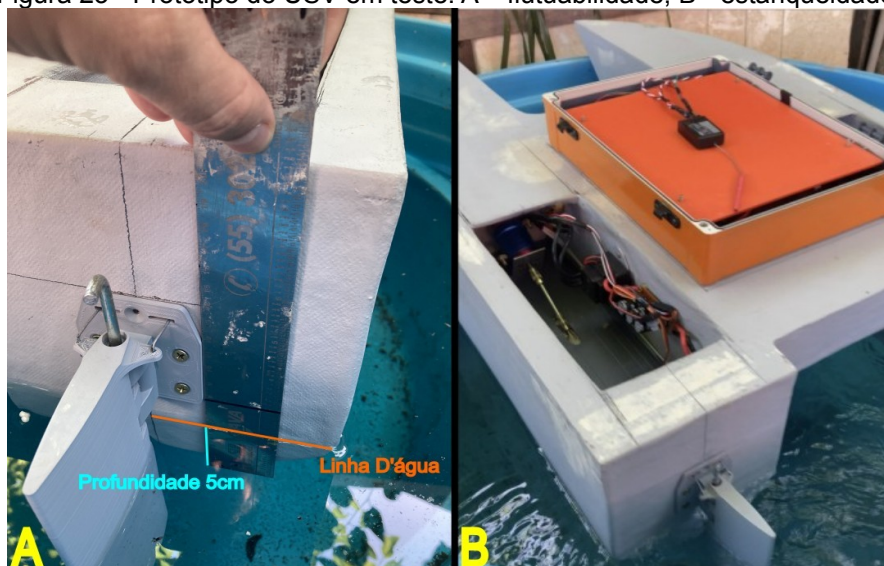
impermeabilidade e segurança do protótipo.

O protótipo foi colocado sobre a superfície da água, já equipado com seus principais componentes: motores de propulsão, controladores eletrônicos de velocidade (ESCs), bancos de capacitores, baterias e receptor de rádio controle. O objetivo era avaliar como a estrutura se comportaria em uma condição de repouso prolongado, garantindo que o sistema fosse seguro e estável antes de testes em ambientes reais.

A medição da flutuação (Figura 23-A) foi realizada com o auxílio de uma régua, posicionada ao lado do protótipo para registrar a profundidade do casco em relação à superfície da água. O afundamento observado foi de aproximadamente 5 centímetros, um valor considerado satisfatório para garantir a estabilidade do veículo e preservar sua capacidade de manobra. Essa medição foi feita periodicamente durante as duas horas, confirmando que o nível de flutuação permaneceu constante e dentro da faixa de segurança.

A estanqueidade do casco foi avaliada visualmente e de forma tátil (Figura 23-B), para detectar qualquer entrada de água no interior do protótipo. O monitoramento incluiu a observação da presença de bolhas de ar na água, sinais de umidade na parte interna e possíveis vazamentos. Durante todo o período de teste, não foram detectados vazamentos, bolhas ou umidade interna, confirmando a impermeabilidade do casco.

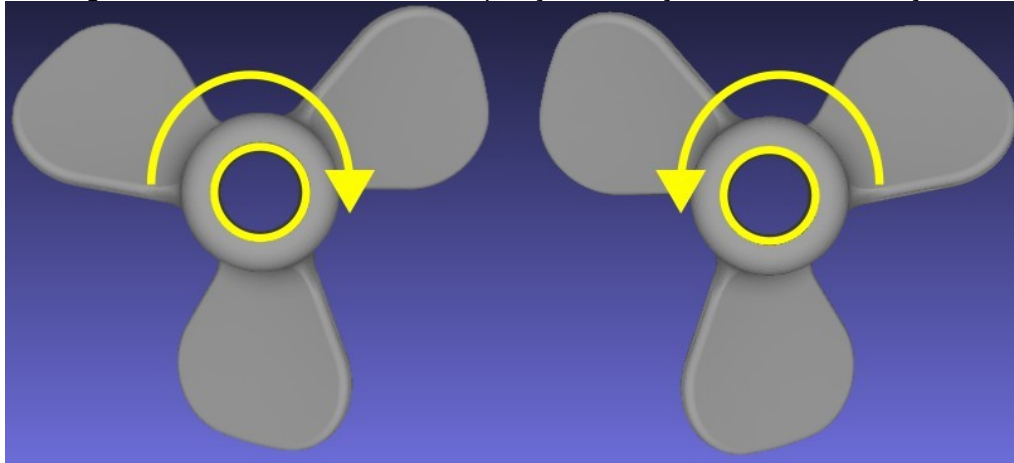
Figura 23 - Protótipo do USV em teste: A – flutuabilidade; B - estanqueidade.



Fonte: Autor

No mesmo ensaio, foram realizados ajustes no sentido de rotação dos motores de propulsão, pois cada par de hélices adquirido possui sentidos de rotação opostos (Figura 24). Esse ajuste foi necessário para garantir que o protótipo se movimentasse adequadamente.

Figura 24 - Modelo 3D das hélices, posição instalação e sentido de rotação.



Fonte: Modificado de Jan (2020).

Durante os ajustes do protótipo, foram testados três conjuntos de hélices de diferentes tamanhos: 30 mm, 36 mm e 42 mm de diâmetro, cada uma com três pás e com sentidos de rotação opostos. O objetivo era avaliar o desempenho em termos de aquecimento dos motores, consumo de corrente e vibração.

Em termos de aquecimento, os motores foram monitorados com termômetro digital e mantidos em uma mesma velocidade rotação por um período de 10 minutos, onde as hélices de 36 mm mantiveram os motores dentro de uma faixa de temperatura segura, sem apresentar aquecimento excessivo. Já as hélices de 30 mm causaram um baixo aquecimento, enquanto as de 42 mm resultaram em um aumento significativo de temperatura, que poderiam comprometer o desempenho dos motores em operações mais longas sem um sistema de refrigeração ativo.

Quanto ao consumo de corrente, foi utilizado um amperímetro para realizar as medidas. As hélices de 36 mm também se destacaram, mostrando eficiência energética ao demandar menos esforço dos motores para gerar o empuxo necessário. Por outro lado, as hélices de 30 mm não exigiram tanta corrente, mas não conseguiram movimentar o protótipo satisfatoriamente, e as de 42 mm apresentaram um consumo elevado, o que poderia afetar a autonomia do sistema.

Por fim os testes de vibração foram realizados por meios empíricos sentido a

vibração na estrutura do protótipo e pelo ruído gerado. As hélices de 36 mm apresentaram vibração moderada, enquanto as hélices menores, de 30 mm, tiveram baixa vibração. Por outro lado as hélices de 42 mm causaram vibrações e ruídos significativos, que poderiam gerar instabilidades e danos ao longo do tempo.

Com base nesses resultados, o conjunto de 36 mm foi escolhido como a melhor opção para o protótipo, oferecendo o equilíbrio ideal entre desempenho, eficiência e estabilidade.

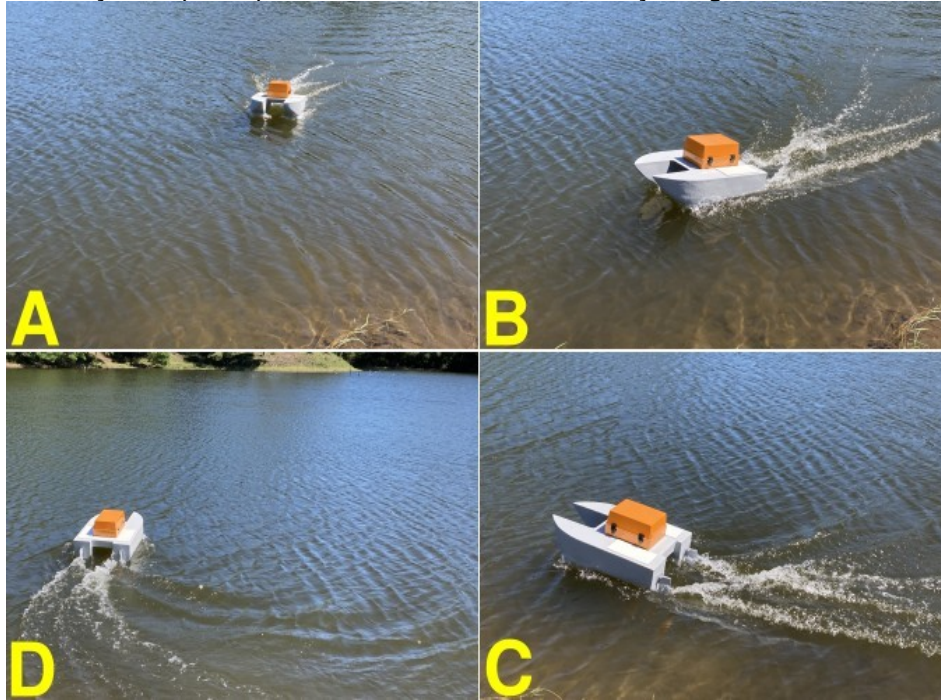
#### **4.3 Testes em Ambiente Real 1 – Análise Funcionalidades e Comportamento**

O protótipo do Veículo de Superfície Não Tripulado (USV), tanto durante seu desenvolvimento quanto nos testes e ajustes realizados em ambiente controlado (seção 4.2), demonstrou confiabilidade e segurança, permitindo a realização dos primeiros testes em ambiente real. Foram reavaliados a fluutuabilidade e a estanqueidade, bem como a manobrabilidade, a velocidade de cruzeiro conforme comandos do controle remoto e a duração das baterias.

Os testes foram realizados em um ambiente lótico com correnteza branda, próximo à cidade de Caçapava do Sul/RS, para garantir a segurança do protótipo e dos envolvidos. As baterias foram carregadas ao máximo permitido. O protótipo foi colocado na água e mantido em movimento (Figura 25) durante o maior tempo possível, conforme a autonomia das baterias. Durante o período, foram realizadas acelerações e desacelerações para encontrar a velocidade de cruzeiro ideal, que permitisse ao protótipo cobrir a maior parte do ambiente aquático com estabilidade e segurança. Também foram realizados testes de guinada, tanto suaves quanto abruptas, para validar a estabilidade e a manobrabilidade do protótipo. O teste foi encerrado quando as baterias se esgotaram. Devido aos testes de acelerações e guinadas, as baterias duraram cerca de 1 hora, sendo possível adicionar mais baterias para aumentar a autonomia do veículo.

Os testes confirmaram que a fluutuabilidade e a estanqueidade em condições reais de campo são consistentes com os resultados obtidos em ambiente controlado. A linha d'água não atingiu nem a metade da altura do casco, mesmo em condições dinâmicas. Não foram encontrados vestígios de água ou umidade, tanto nos compartimentos dos motores quanto na caixa hermética que abriga o instrumental eletrônico.

Figura 25 - Primeiros testes reais em campo. [A, B, C e D] Diferentes posições de visualização do protótipo, durante os testes de aceleração e guinada.



Fonte: Autor

Os testes de aceleração e desaceleração mostraram que, com o acelerador (stick) posicionado entre 5% e 10%, a embarcação se movia de forma satisfatória para a frente, mantendo estabilidade mesmo durante guinadas. A velocidade de cruzeiro observada ( $\sim 1,25$  m/s – 4,55 km/h) é adequada para a aquisição de dados, pois garante baixo consumo de bateria e quase nenhum aquecimento dos motores. Com um deslocamento estimado de 4.500 metros lineares por hora. Com o acelerador abaixo de 5%, foram observadas variações na velocidade de rotação dos motores, o que tornava a navegação impraticável e gerava vibrações mecânicas que poderiam comprometer a integridade dos motores e eixos. Com o acelerador acima de 10%, a embarcação atingiu uma velocidade considerável ( $\sim 3,14$  m/s – 11,3 km/h), apresentando instabilidades durante guinadas abruptas, aumento do consumo de bateria e uma redução drástica na autonomia. O aquecimento dos motores se tornou significativo, tornando necessária a instalação de um sistema de refrigeração ativo. Além disso, a alta velocidade não é adequada para a coleta de informações ambientais neste projeto devido ao tempo de resposta dos sensores.

A alimentação do sistema de propulsão e direção é fornecida por duas baterias LiPo de 3000 mAh e 14,8 V (4S) conectadas em paralelo, totalizando 6000

mAh. Com a carga total, essas baterias permitiram um funcionamento satisfatório por aproximadamente 1 hora. Esse período incluiu diversos testes de aceleração, desaceleração e guinadas bruscas, que aumentaram o consumo de energia. Considerando que o consumo de energia durante a coleta de dados reais seria menor, esse conjunto de baterias é adequado para atender às necessidades de aquisição de dados. É importante ressaltar que é possível adicionar mais baterias ou substituir por baterias de maior capacidade para estender o tempo de operação.

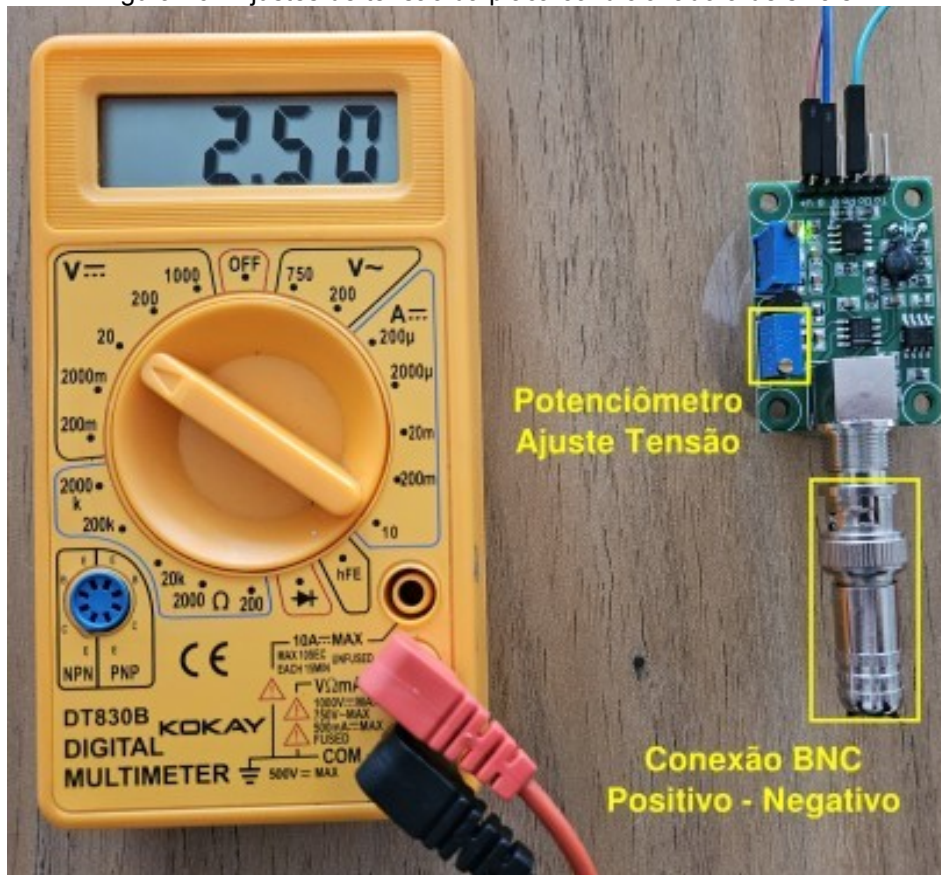
#### **4.4 Calibração dos Sensores**

A calibração dos sensores é essencial para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados coletados pelo protótipo. Os sensores de pH, temperatura e turbidez são fundamentais para o cálculo do índice de qualidade da água. Embora os fabricantes forneçam equações de calibração para sensores de temperatura, pH e turbidez, é importante observar que o sensor de pH requer calibração recorrente devido ao envelhecimento e desgaste do eletrodo de vidro. Em contraste, os sensores de temperatura e turbidez, que são calibrados na fábrica e não sofrem desgaste significativo dos componentes, não necessitam de calibração adicional. A calibração correta do sensor de pH garante que os valores registrados reflitam com precisão as condições ambientais reais, eliminando erros e assegurando a integridade dos dados.

##### **4.4.1 Calibração do Sensor de pH**

Conforme apresentado na seção 3.1.3.1 (Hardware), o conjunto do sensor de pH é composto por duas partes: o condicionador de sinais e a sonda de pH. Antes da calibração, ajustou-se a tensão da placa condicionadora de sinais para minimizar a variação dos níveis medidos de pH, conforme indicado no manual. Para este ajuste, os polos negativo e positivo do conector BNC foram interligados, e um multímetro foi conectado à saída analógica PO. A tensão foi ajustada para 2,5V por meio do potenciômetro POT1 (Figura 26). Esse ajuste garante que os níveis de pH de 0 a 7 sejam representados de 5,0V a 2,5V, enquanto os níveis de pH de 7 a 14 serão representados de 2,5V a 0V.

Figura 26 - Ajustes de tensão da placa condicionadora de sinais.



Fonte: Autor

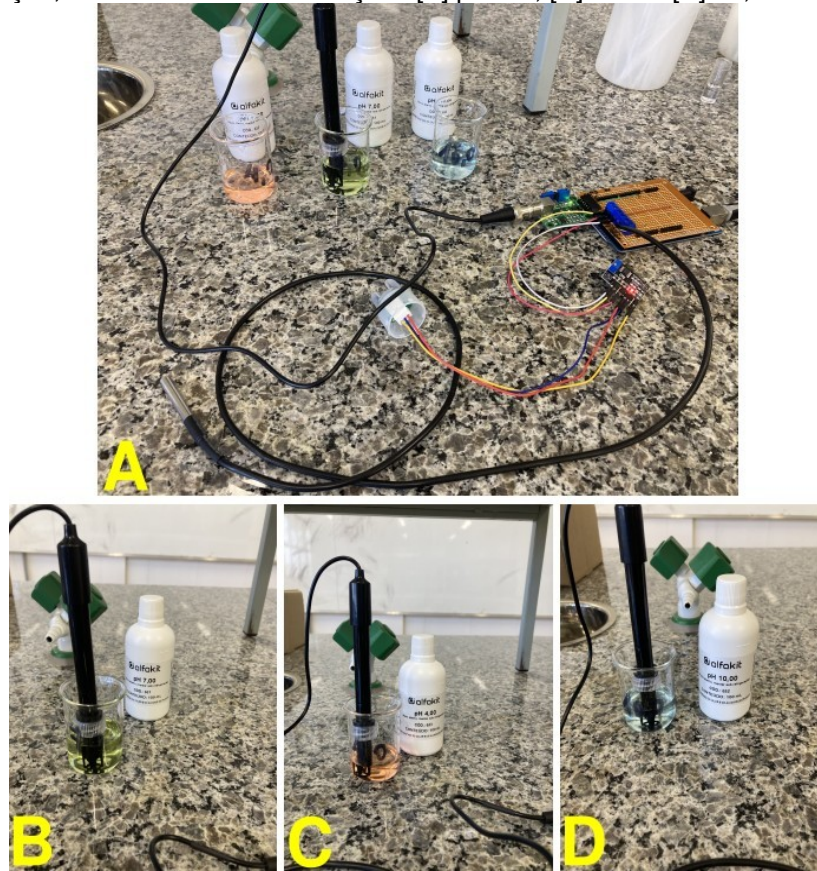
Embora o fabricante do sensor de pH disponibilize a fórmula de calibração no manual (Fórmula 2), a calibração personalizada garante uma fórmula exclusiva para o sensor utilizado no protótipo, assegurando maior confiabilidade nos dados registrados.

$$pH = -5.70 * pHVoltage + 21.34 \quad (2)$$

Para calibrar o sensor de pH, seguiu-se a metodologia explicada na seção 3.2, onde foram usadas três soluções de calibração com pH 4.0, 7.0 e 10.0, cada uma em um béquer separado. A sonda de pH foi lavada com água destilada para remover quaisquer resquícios da solução de armazenamento. Em seguida, a sonda foi imersa na solução de pH 7.0 e deixada estabilizar por cinco minutos. Após esse período, os valores foram registrados por dois minutos. O processo foi repetido com as outras duas soluções, após a sonda ser limpa com água destilada e seca (Figura 27).



Figura 27 - Calibração Conjunto pH – [A] Instrumental durante o processo de calibração; Sonda inserida nas soluções [B] pH 7.0, [C] 4.0 e [D] 10,0.



Fonte: Autor

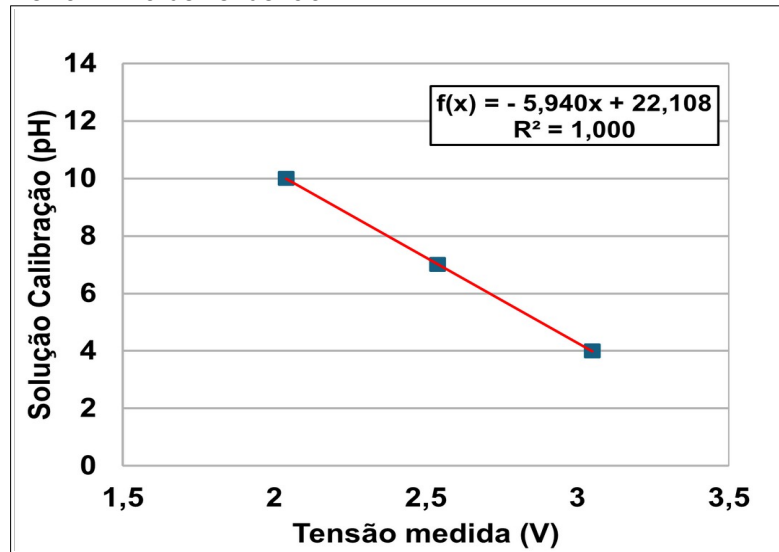
Os dados coletados durante o processo foram organizados em uma tabela (Tabela 2), permitindo observar uma variação nos níveis de tensão, que são inversamente proporcionais às variações do pH das soluções de calibração. Foi gerado um gráfico de pontos e, por meio da análise visual do gráfico (Gráfico 2), em conjunto com a fórmula de calibração (Fórmula 2), constatou-se uma relação linear entre os valores de pH e as tensões medidas. Assim, aplicou-se a técnica de regressão linear para obter a fórmula de calibração (Fórmula 3) específica para o sensor utilizado neste projeto. O coeficiente de determinação encontrado foi 1, indicando um ajuste perfeito ao modelo de regressão linear.

Tabela 2 – Valores das soluções pH de calibração versus a média das tensões registradas.

<b>Calibração Sonda pH</b>	
Solução Calib (pH)	Tensão Medida (V)
7.0	2.54
4.0	3.05
10.0	2.04

Fonte: Autor

Gráfico 2 – Calibração pHmetro - Quadrado Azul: pH solução calibração x Tensão medida; Linha Vermelha: Linha de Tendência



Fonte: Autor

$$pH = -5.94 * pHVoltage + 22.108 \quad (3)$$

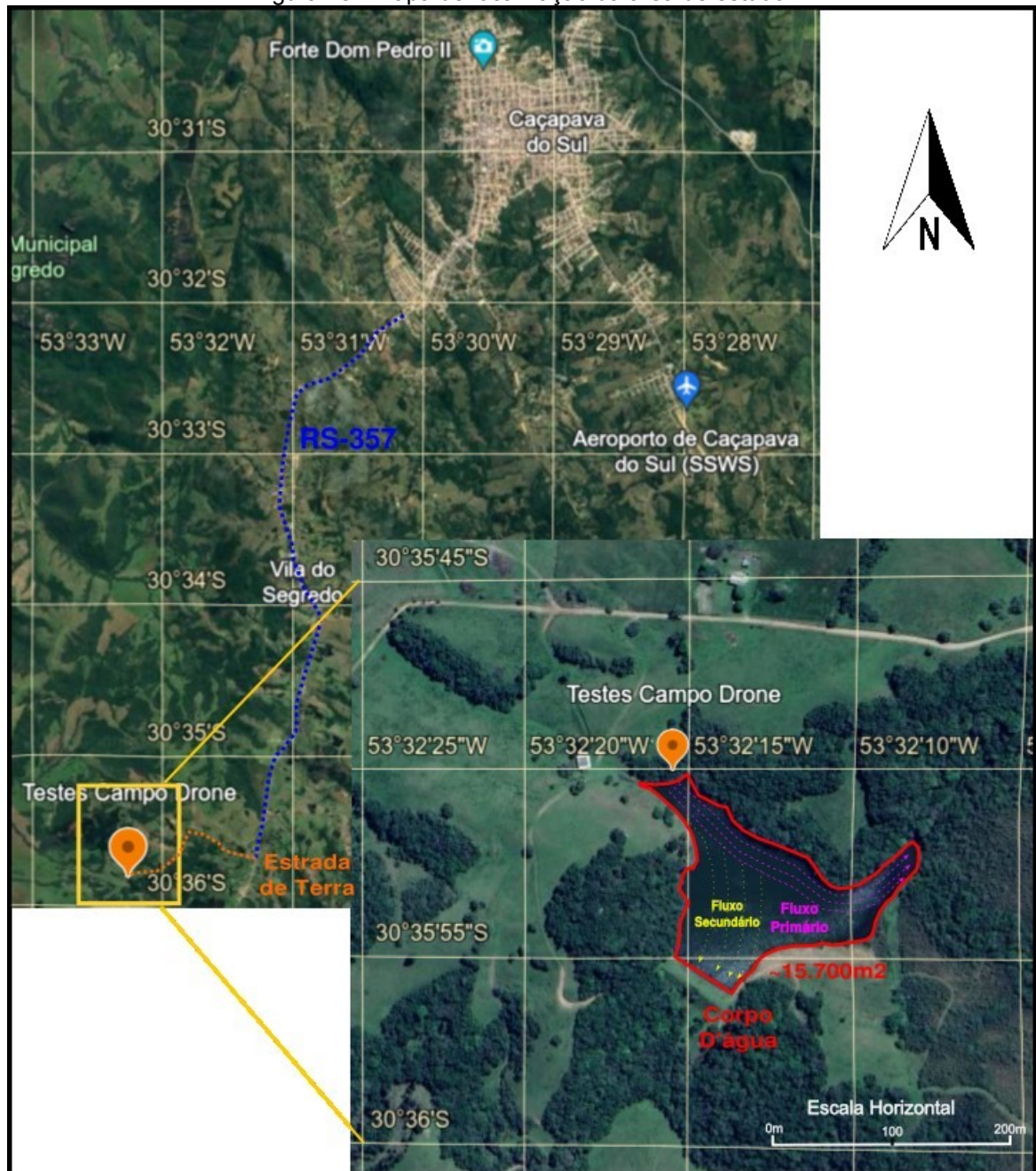
#### 4.5 Testes em Ambiente Real 2 – Coleta de dados

Com a conclusão dos testes iniciais, ajustes e calibrações, o protótipo foi submetido a testes em campo para a coleta de dados em condições reais de uso. Esta fase consistiu em quatro etapas distintas: "Escolha da Área de Estudo", "Coleta de Dados", "Processamento dos Dados Ambientais" e "Análise dos Resultados de Campo". Cada etapa desempenhou um papel fundamental no processo de pesquisa, desde a seleção cuidadosa da área de estudo até a análise metódica dos dados coletados.

##### 4.5.1 Localização da Área de Estudo

A área de testes escolhida está localizada aproximadamente a 13 km a sudoeste da cidade de Caçapava do Sul (Rio Grande do Sul/Brasil), próximo à Vila São José, na "Coxilha São José" (Figura 28). O acesso à área é misto: 10 km pela rodovia RS-357 (pontilhado azul) em direção a Lavras do Sul e 3 km adicionais por estrada de terra (pontilhado laranja). O corpo d'água na área de estudo tem aproximadamente 15.700 m<sup>2</sup>, apresenta características lóxicas brandas e o fluxo primário é de noroeste para nordeste. Visualmente, o corpo d'água possui características cristalinas, com vegetação sobrenadante nas margens e galhos de árvores na porção oeste/noroeste (Figura 29).

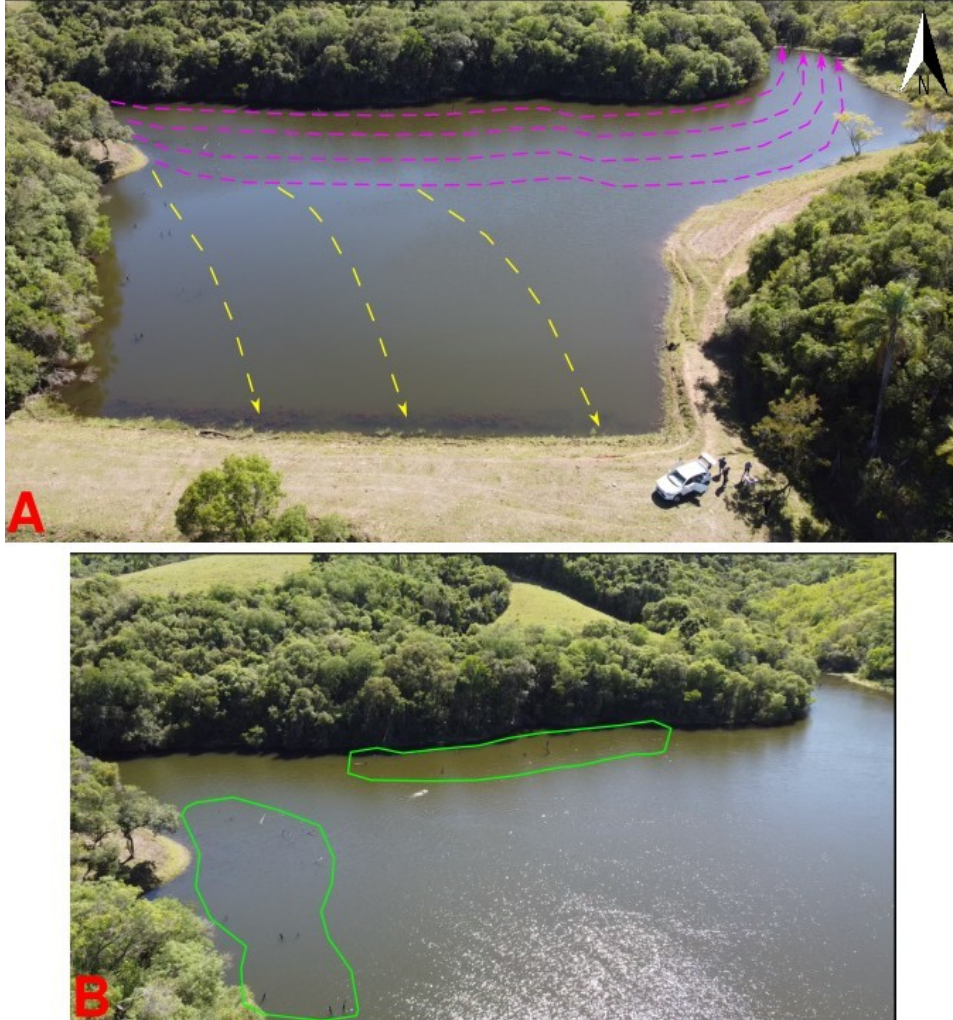
Figura 28 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autor, Modificado de Google Earth (2024).

Embora o protótipo tenha sido projetado para operar em diversos ambientes aquáticos, a escolha desta área para os testes reais de coleta de dados levou em conta duas características importantes. Primeiramente, a área útil do corpo d'água foi considerada para garantir que o protótipo pudesse navegar livremente e mapear uma quantidade significativa do ambiente aquático. Além disso, a proximidade com a cidade de Caçapava do Sul/RS facilitaria possíveis reparos emergenciais no protótipo, se necessário.

Figura 29 - Imagens aéreas (Drone) do corpo D'água estudado. [A] Linhas de fluxo (correnteza) primária na cor roxa e fluxo secundário cor amarela. [B] Regiões em verde destacam a presença de galhos de árvores submersos.



Fonte: Autor

#### 4.5.2 Coleta de Dados

As atividades de coleta de dados em campo com o protótipo do Veículo de Superfície Não Tripulado ocorreram no dia 03/02/2024. Porém, nos dias que precederam os testes de campo, foram realizados ajustes finais, que incluíram a pintura do drone (cor laranja, com detalhes em preto e branco), o reaperto dos parafusos dos eixos (hélice e cardan), a carga completa e testes das duas baterias, e a checagem dos sistemas de controle de direção e velocidade, bem como do sistema de coleta de dados ambientais e funcionamento dos sensores.

A estratégia de aquisição de dados adotada baseou-se nos tempos de resposta dos sensores de temperatura e turbidez, ambos inferiores a 1 segundo

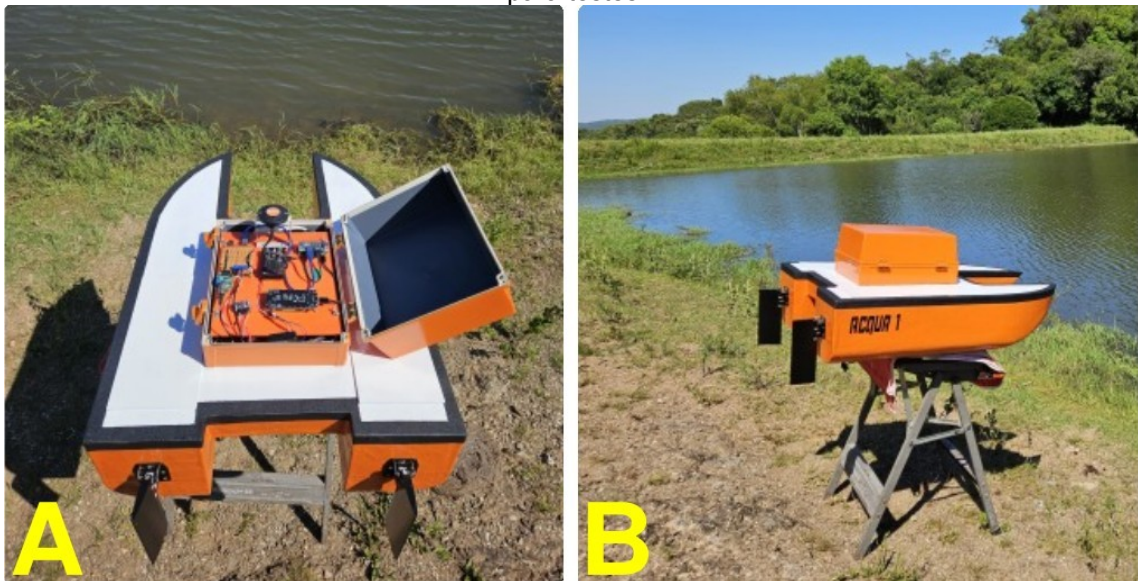
(conforme Tabela 2, seção 4.1.2). Foram escolhidas duas abordagens: pontos estáticos e coleta dinâmica.

Na abordagem de pontos estáticos, o protótipo deve ser posicionado em um local fixo, com os motores desligados, movendo-se apenas pela correnteza. Uma amostragem de aproximadamente 15 segundos é realizada. Após finalizada, um novo ponto é selecionado, e o processo é reiniciado.

Na coleta dinâmica, o protótipo deve ser mantido em movimento com velocidade de cruzeiro (aceleração entre 5% e 10%, aproximadamente 1,25 m/s – 4,55 km/h), navegando livremente pelo corpo d'água para tentar cobrir a maior parte do ambiente aquático e adquirindo dados ao longo de todo o trajeto.

Na data prevista para o levantamento de dados, o tempo estava ensolarado, sem nuvens, e a temperatura média era de 32°C. Após realizar os ajustes finais (Figura 30-A), o protótipo estava pronto para iniciar os testes (Figura 30-B). Ele foi colocado na água às 10h15min, conforme mostra a Figura 31. Foram coletados 1465 pontos, dos quais 1371 válidos, distribuídos em 20 regiões estáticas e 6 dinâmicas. Na coleta dinâmica, foram registrados aproximadamente 1 ponto a cada 1,5 segundos.

Figura 30 - Testes Protótipo: [A] Ajustes pré levantamento de dados reais. [B] protótipo pronto para testes



Fonte: Autor

Figura 31 - Testes Protótipo: aquisição de dados ambientais em campo.



Fonte: Autor

#### 4.5.3 Processamento dos Dados Ambientais

A visualização espacial é essencial, pois permite uma análise abrangente e integrada entre os dados ambientais georreferenciados (GNSS do USV) adquiridos com o protótipo do Veículo de Superfície Não Tripulado e o meio ambiente da área de estudo. O processamento dos dados foi realizado utilizando o software *QGIS*, uma ferramenta gratuita de sistemas de informações geográficas que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados, além do *Google Earth* para visualização em ambiente web.

Os dados adquiridos foram reunidos em um único arquivo, contendo a latitude, longitude, temperatura e turbidez de cada um dos 1.371 pontos, conforme exemplificado na Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela exemplo com 10 amostras de dados reais coletados utilizando o protótipo do USV desenvolvido no âmbito desta pesquisa, contendo as coordenadas geográficas (Latitude e Longitude, datum wgs84) e dados ambientais (Temperatura e Turbidez).

Latitude (GD)	Longitude (GD)	Temperatura (°C)	Turbidez (NTU)
-30.5981797	-53.5361826	28.50	337.38
-30.5981861	-53.5361793	28.50	269.35
-30.5981952	-53.5361767	28.50	354.25
-30.5982052	-53.5361730	28.50	337.38
-30.5982135	-53.5361707	28.50	696.20
-30.5982220	-53.5361690	28.50	727.53
-30.5982294	-53.5361684	28.50	536.31
-30.5982374	-53.5361684	28.50	404.54
-30.5982452	-53.5361696	28.50	387.83
-30.5982524	-53.5361714	28.50	1227.46

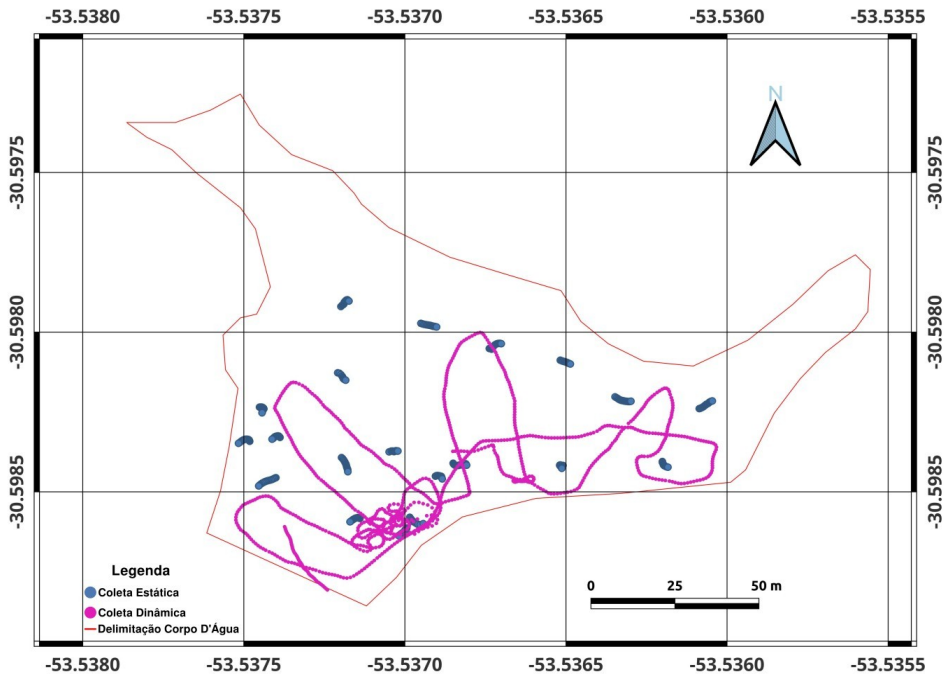
Fonte: Autor

Utilizando o Google Earth, a área de estudo foi identificada e o perímetro do corpo d'água foi delimitado em forma de polígono. Essa delimitação foi exportada no formato KML. No QGIS, foi criado um novo projeto com o DATUM padrão definido como WGS84. A delimitação do corpo d'água e os dados tabelados foram importados e plotados no QGIS. A Figura 32 apresenta o mapa com a delimitação do corpo d'água destacada em vermelho, os pontos coletados de forma estática em azul e os pontos adquiridos de forma dinâmica em magenta. Observa-se que o protótipo navegou por grande parte do corpo d'água, embora algumas áreas não tenham sido acessadas devido a galhos de árvores submersos, que poderiam comprometer a integridade física do protótipo, e à falta de visibilidade necessária para pilotá-lo com segurança.

Ao analisar quantitativamente os dados obtidos, verificou-se que a temperatura da água variou entre 27 °C e 28,5 °C em toda a área amostrada. A turbidez apresentou valores acima de 0 NTU em apenas 24 dos 1.371 pontos amostrados. Para compreender melhor a distribuição da temperatura no corpo d'água, os dados foram interpolados utilizando o método "Nearest Neighbor". Esse método foi escolhido por ser robusto e simples, especialmente considerando que os dados de temperatura não apresentaram grandes variações. A Figura 33 mostra um mapa com a temperatura interpolada; nas regiões sem pontos amostrados, a interpolação foi removida para evitar interpretações errôneas. A Figura 34 exibe um mapa com os 24 pontos que apresentaram turbidez elevada. Para facilitar as análises, foi importada uma imagem de satélite do Google Earth no projeto do QGIS.

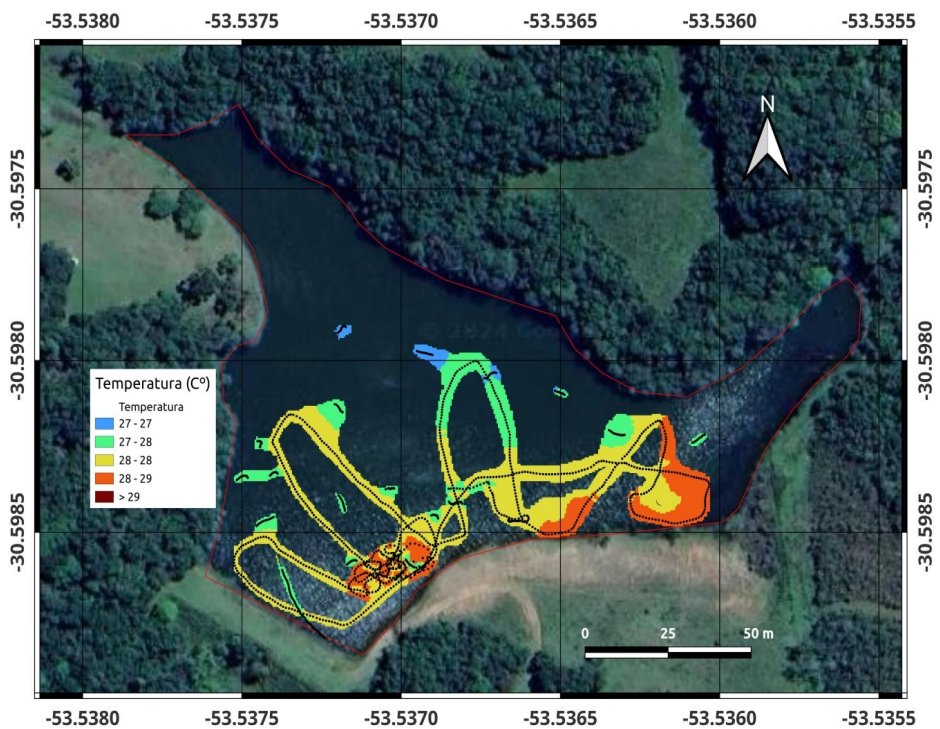
Figura 32 - Mapa de Pontos: Polígono Vermelho delimitação do corpo d'água. Pontos Azul – Coleta estática; Pontos Magenta – Coleta Dinâmica;

### Mapa de Pontos



Fonte: Autor

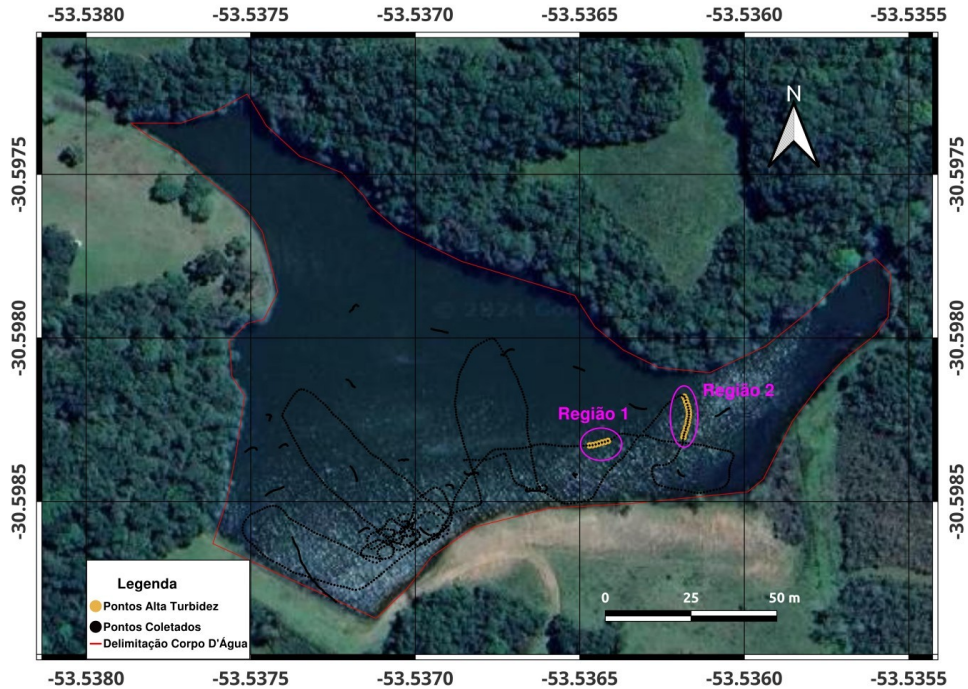
Figura 33 - Mapa de Temperatura;  
**Mapa de Temperatura**



Fonte: Autor; Imagem Satélite Google Earth, 2024.



Figura 34 - Mapa de Pontos, turbidez elevada;  
**Mapa de Pontos Turbidez Elevada**



Fonte: Autor; Imagem Satélite Google Earth, 2024.

#### 4.5.4 Análise dos Resultados de Campo

Após a coleta e o processamento rigoroso dos dados ambientais, a interpretação das informações torna-se fundamental. A análise permite identificar padrões, anomalias e tendências significativas, contribuindo para um melhor entendimento das condições ambientais da área de estudo.

A análise do mapa de temperatura (Figura 33) revela que as temperaturas mais elevadas (28 °C a 28,5 °C) estão localizadas nas margens e porções rasas das regiões leste, sudeste e sul. Essas observações são corroboradas pelas imagens aéreas da área estudada (Figura 35), que mostram seções rasas que absorvem mais luz solar, resultando em maior aquecimento da água. Nas regiões centrais, com profundidade de aproximadamente 8 metros (segundo informações fornecidas pelo proprietário da área de estudo), e nas áreas oeste, noroeste e norte, onde a vegetação densa oferece mais sombra e o fluxo de água é maior, as temperaturas são mais amenas, variando entre 27 °C e 27,5 °C.

Em relação à turbidez, a análise das imagens aéreas (Figura 35) e das amostras de água (Figura 36) indica que a água possui características cristalinas. Esses dados são corroborados pelo sensor de turbidez do protótipo, que registrou

aproximadamente 1,75% dos pontos amostrados com turbidez acima de 0 NTU, como mostrado no mapa de turbidez elevada (Figura 34). Na região 1, os valores de turbidez variaram de 437 a 2278 NTU, enquanto na região 2, variaram de 269 a 1227 NTU, com os valores mais altos concentrados ao sul. A análise conjunta com a temperatura indica que as regiões com anomalias de turbidez estão em áreas mais rasas e quentes, com maior fluxo de água, o que favorece a suspensão de partículas e aumenta a turbidez. Vale ressaltar que a presença significativa de turbidez em apenas dois pontos pode estar relacionada à dinâmica do corpo d'água, que pode criar e deslocar partículas em suspensão ao longo do tempo. No entanto, essa análise está além do escopo desta pesquisa.

Figura 35 - Imagem aérea do corpo d'água. Regiões circundadas em vermelho demonstram regiões mais rasas nas margens ao sul, sudeste e leste.



Fonte: Autor;

Figura 36 - Amostras d'água cristalina, turbidez 0 NTU, conforme dados do sensor de turbidez acoplado ao protótipo.



Fonte: Autor;

#### 4.6 Discussão dos Resultados

Os dados obtidos durante os testes em campo foram significativos, evidenciando a eficácia e a utilidade do protótipo para o monitoramento ambiental. O USV demonstrou eficiência ao coletar dados em 1.371 pontos ao longo de aproximadamente uma hora, dos quais 976 foram obtidos de forma dinâmica, com uma taxa de amostragem de 1 ponto a cada 1,5 segundos, totalizando cerca de 25 minutos de amostragem contínua. Essa abordagem dinâmica não só ressalta a alta eficiência do USV, mas também destaca sua versatilidade em comparação com os métodos convencionais de coleta manual, que costumam ser morosos e dependem de coletas ponto a ponto em testes estáticos. Diversos estudos (Hanisch e Nordi, 2015; Adu-Manu et al., 2017; Demetillo e Taboada, 2019; Vasudevan e Baskaran, 2021) indicam que a lentidão e as limitações das abordagens manuais reforçam a vantagem dos métodos automatizados. Assim, a capacidade do USV de coletar dados de forma dinâmica e em larga escala, com um tempo de amostragem reduzido, representa um avanço significativo na eficiência da coleta de dados ambientais.

A grande quantidade de dados coletados ao longo do corpo d'água possibilitou a criação de mapas detalhados, proporcionando uma compreensão mais precisa dos parâmetros monitorados. Esses mapas são valiosos para a visualização e análise espacial, oferecendo uma representação detalhada das variáveis ambientais em diferentes locais e facilitando a identificação de padrões e anomalias. Os testes confirmaram que o USV é capaz de fornecer dados confiáveis, que podem ser utilizados para monitorar a qualidade da água de forma contínua e em grande escala. A análise dos mapas revelou que as temperaturas mais elevadas estavam localizadas nas margens e nas áreas mais rasas, onde o aquecimento solar é mais intenso. As temperaturas variaram de 27 °C a 28,5 °C, sendo mais amenas nas regiões centrais e nas áreas com maior profundidade e vegetação densa. Em relação à turbidez, a água apresentou características cristalinas, com turbidez elevada detectada em apenas 1,75% dos pontos amostrados, principalmente nas áreas mais rasas e com maior fluxo de água. Esses resultados indicam que o USV é eficaz na identificação de variações térmicas e de turbidez, contribuindo para uma análise abrangente e detalhada das condições ambientais.

#### 4.7 Considerações

Os resultados gerais indicam que o protótipo do USV é uma ferramenta robusta e confiável para a coleta de dados ambientais. A construção sólida, a escolha adequada da arquitetura naval, dos materiais e dos sistemas eletrônicos, além da validação em ambientes controlados e em condições reais, demonstram a viabilidade do uso do USV em estudos ambientais. A possibilidade de ajustes futuros, como a adição de mais baterias para aumentar a autonomia e a incorporação de diferentes tipos de sensores ambientais, abre caminho para aprimoramentos contínuos, garantindo a versatilidade e a eficiência do USV em diversas condições de campo.

A construção de um protótipo totalmente funcional e de baixo custo envolveu extensa pesquisa e a seleção rigorosa de componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos. A fabricação artesanal de várias peças, juntamente com o desenvolvimento de software e firmware customizados, representou desafios significativos. A calibração do sensor de pH revelou-se uma limitação crítica, decorrente do desgaste natural dos componentes da sonda e da manipulação inadequada, que resultou na perda da solução tampão e no armazenamento incorreto da sonda, mesmo que por um curto período. Esses fatores levaram à falha do sensor de pH, impossibilitando a coleta de dados de pH do corpo d'água estudado.

Adicionalmente, a coleta de dados em condições reais destacou oportunidades para aprimorar o sistema de orientação do protótipo. A ausência de visualização em tempo real do trajeto limitou a cobertura completa do corpo d'água, evidenciando a necessidade de melhorias para otimizar a eficiência e a abrangência do USV em levantamentos ambientais. A implementação de um sistema de navegação e monitoramento em tempo real pode potencializar a capacidade do protótipo de mapear áreas maiores e fornecer dados mais abrangentes e precisos.

Em resumo, o desenvolvimento e testes do protótipo USV apresentaram resultados positivos e coerentes com os objetivos iniciais do projeto, confirmando sua aplicabilidade em levantamentos ambientais e abrindo perspectivas para futuras melhorias e expansões de funcionalidade.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo principal o desenvolvimento de um Veículo de Superfície Não Tripulado (USV) para monitorar os parâmetros físico-químicos de corpos d'água. O projeto integrou design e implementação, utilizando tecnologias acessíveis e de baixo custo, resultando em um protótipo eficiente e versátil. O USV foi projetado para operar em diversos ambientes aquáticos, medindo parâmetros como temperatura, pH e turbidez em tempo real, além de ter capacidade de adaptação para outros sensores. Com um custo final de aproximadamente R\$ 12.500,00, o projeto demonstrou a viabilidade econômica de desenvolver tecnologias avançadas para monitoramento ambiental mesmo com recursos financeiros limitados.

Durante os testes, o protótipo coletou dados em 1.371 pontos ao longo de aproximadamente uma hora, sendo que 71,2% desses pontos foram obtidos de forma dinâmica. Essa abordagem permitiu uma taxa de amostragem de 1 ponto a cada 1,5 segundos, evidenciando a alta eficiência do USV em comparação com métodos tradicionais de coleta manual. A capacidade do USV de cobrir grandes áreas e fornecer dados precisos de forma rápida ressalta seu potencial transformador no monitoramento ambiental.

A implementação bem-sucedida do protótipo representa uma contribuição significativa para o monitoramento ambiental. O USV oferece uma solução semi-autônoma e econômica para a coleta de dados em corpos d'água, permitindo análises precisas e a geração de mapas detalhados em 2D e 3D. A análise dos dados revelou que o USV é eficaz na identificação de variações térmicas e de turbidez, destacando seu potencial para contribuir com a sustentabilidade e a preservação dos recursos hídricos. Sua versatilidade possibilita aplicações em diversas áreas, incluindo gestão de reservatórios, monitoramento de rios e lagos, e detecção precoce de mudanças na qualidade da água.

Para trabalhos futuros, recomenda-se aprimorar o sistema de sensores ambientais e integrar tecnologias avançadas de comunicação e inteligência artificial. Essas melhorias podem aumentar a eficiência do USV, possibilitando uma cobertura mais ampla em menor tempo e uma análise de dados mais precisa. O desenvolvimento do USV representa um avanço significativo no monitoramento

ambiental, oferecendo uma solução prática e de baixo custo para a coleta de dados em corpos d'água. Este trabalho ressalta a importância das inovações tecnológicas na preservação dos recursos hídricos e na promoção de um ambiente mais sustentável, com potencial para impactar positivamente a gestão ambiental e a saúde pública.

## REFERÊNCIAS

ADU-MANU, Kofi. S; et al. Water Quality Monitoring Using Wireless Sensor Networks: Current Trends and Future Research Directions. **ACM Transactions on Sensor Networks**. v. 13, n. 1, jan. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021**. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: <<https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/apresentacao>>. Acesso em: 08 ago. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **ODS 6 no Brasil Visão da ANA sobre os Indicadores**. Brasília: ANA, 2ª Ed. 2022. Disponível em: <[https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c93c5670-f4a7-4de6-85cf-c295c3a15204/attachments/ODS6\\_Brasil\\_ANA\\_2ed\\_digital\\_simples.pdf](https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c93c5670-f4a7-4de6-85cf-c295c3a15204/attachments/ODS6_Brasil_ANA_2ed_digital_simples.pdf)>. Acesso em: 23 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Portal da Qualidade das Águas**: Rede Nacional – Redes de Monitoramento. Brasília: ANA, 2023a. Disponível em: <<https://portalpnqa.ana.gov.br/rede-nacional-rede-monitoramento.aspx>>. Acesso em: 23 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Portal da Qualidade das Águas**: Indicadores de Qualidade – índice de Qualidade das Águas (IQA). Brasília: ANA, 2023b. Disponível em: <<https://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>>. Acesso em: 23 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Portal da Qualidade das Águas**: Avaliação de Qualidade - Introdução. Brasília: ANA, 2023c. Disponível em: <<https://portalpnqa.ana.gov.br/avaliacao.aspx>>. Acesso em: 24 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Portal da Qualidade das Águas**: O que é PNQA?. Brasília: ANA, 2023d. Disponível em: <<https://portalpnqa.ana.gov.br/pnqa.aspx>>. Acesso em: 24 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Qualidade da Água Superficial no Brasil**: Monitoramento e Enquadramento. Brasília: ANA, 2024a. Disponível em: <<https://qualidadedaagua.ana.gov.br/index.html>>. Acesso em: 21 maio. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023**. Brasília: ANA, 2024b. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjunturainforme2023.pdf>>. Acesso em: 21 maio. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Perguntas Frequentes: O que são Drones?** Brasília. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/aceso-a-informacao/perguntas-frequentes>> Acesso em: 24 jan. 2024.

ANDRIETTI, Grasiane; et al. Índices de qualidade da água e de estado trófico do rio Caiabi, MT. **Revista de Ambiente & Água**. v. 11, n. 1, p. 162-175, jan./mar. 2016.

ARDUPILOT. **Mission Planner: Loading Firmware**. 2024. Disponível em: <<https://ardupilot.org/planner/docs/common-loading-firmware-onto-pixhawk.html>> Acesso em: 09 abril. 2024.

AUGUSTO, Lia G da S; et al. O Contexto Global e Nacional Frente aos Desafios do Acesso Adequado à Água para Consumo Humano. **Revista Ciência & Saúde Coletiva**. v. 17, n. 6, p. 1511-1522, 2012.

BALESTRIERI, Eulalia et al. **Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview**. *Sensors*, v. 21, n. 4, feb, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041518> Disponível em <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1518#B4-sensors-21-01518%20Drones%20aquaticos%20https://www.oceanalpha.com/>> Acesso em: 24 jan. 2024.

BÁRBARA, Viníciu F., et al. Monitoramento sazonal da qualidade da água do rio Araguari/AP. **Revista Biociências**. v. 16, n. 1, p. 57-72, 2010.

BERTRAM, Volker. **Unmanned surface vehicles – A survey**. 2008.

BITTENCOURT, Cláudia; PAULA, Maria. A. S de. **Tratamento de Água e Efluentes: Fundamentos de Saneamento Ambiental e Gestão de Recursos Hídricos**. Editora Saraiva, 2014.

BOLBOT, Victor. et al. Small Unmanned Surface Vessels – A Review and Critical Analysis of Relations to Safety and Safety Assurance of Larger Autonomous Ships. In: **Journal of Marine and Engineering** 11, no. 12: 2387, 2023, DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11122387> Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2077-1312/11/12/2387>> Acesso em: 26 jan. 2024

BRASIL. Ministério da Saúde. Diretriz Nacional do Plano de Amostragem da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano. Brasília, 2016. Disponível em:<[https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretriz\\_nacional\\_plano\\_amostragem\\_agua.pdf](https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretriz_nacional_plano_amostragem_agua.pdf)>. Acesso em: 23 jan. 2024.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Lei. 6.938/81. Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília (DF). Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6938.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm)> Acesso em: 23 jan. 2024.

BRASIL. Resolução ANA nº 724, de 03 de outubro de 2011. **Diário Oficial da União**, n. 201, p. 105, Brasília, DF, 19 out. 2011.



BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**, n. 053, p. 58-63, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União**, p. 81-84, Brasília, DF, 30 dez. 2009.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial da União**, n. 92, p. 89, Brasília, DF, 16 mai. 2011.

BUENO, Lara F; GALBIATTI, João A; BORGES, Maurício J. Monitoramento de variáveis de qualidade da água do horto Ouro-Verde – Conchal – SP. **Revista de Engenharia Agrícola**. v. 25, n. 3, p. 742-748, set./dez. 2005.

BURGUÉS, Javier; MARCO, Santiago. Environmental chemical sensing using small drones: A review. **Science of The Total Environment**. v. 748, 2020.

CACCIA, Massimo. et al. Basic navigation, guidance and control of an Unmanned Surface Vehicle. **Autonomous Robots**. v. 25, p. 349-365, aug. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10514-008-9100-0> Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10514-008-9100-0>> Acesso em: 27 jan. 2024.

CANO, Éric. V. **Métodos de Interpolação da Batimetria Adquirida por Veículo de Superfície Não Tripulado**. 2022. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Campo Grande, 2022

CARLSON, Daniel F., et al. An affordable and portable autonomous surface vehicle with obstacle avoidance for coastal ocean monitoring. **HardwareX**. v. 5, 2019.

CERETTA, Maristela, C. **Avaliação dos aspectos da qualidade da água na sub-bacia hidrográfica do arroio Cadena – município de Santa Maria – RS**. 2004.

CHENG, Yuwei. et al. Are We Ready for Unmanned Surface Vehicle in Inland Waterways? The USVInland Multisensor Dataset and Benchmark. In: **IEEE Robotics and Automation Letters**, vol. 6, no. 2, p. 3964-3970, Abril 2021, DOI: <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3067271> Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9381638>> Acesso em: 26 jan. 2024

CHEN, Wei. *et al.* The Mobile Quality Monitoring System Based on Low-Power Wide Area Network and Unmanned Surface Vehicle. **Hindawi – Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 2021, oct, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/1609612> Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2021/1609612/>> Acesso em: 29 jan. 2024.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB); AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos**. Brasília,

2011. Disponível em <<https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/bitstreams/bee35dfc-e725-41c9-9f6c-463c8e065967/download>>. Acesso em: 23 jan. 2024.

CURCIO, J. LEONARD, J. PATRIKALAKIS, A. SCOUT – a low coast autonomous surface platform for research in cooperative autonomy. In: **PROCEEDINGS OF OCEANS 2005 MTS/IEEE**. 2005. Washington, DC. DOI: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2005.1639838> Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1639838>> Acesso em: 26 jan. 2024

ÇOBAN, S. OKTAY, T. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) According to Engine Type. **Journal of Aviation**. v. 2, n. 2, p. 177-184, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.30518/jav.461116> Disponível em <<https://dergipark.org.tr/en/pub/jav/issue/38945/461116>> Acesso em: 26 jan. 2024.

DA SILVA, Camila. P. F. **Estimativa da Resistência ao Avanço de um Catamarã com Abordagem Computacional Baseada em CFD**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.

DE FILLIPO, Rodrigo. Impactos ambientais sobre os ecossistemas aquáticos. **Informe Agropecuário**. v. 21, n. 202, p. 45-53, jan./fev. 2000.

DEMETILLO, Alexander. T. TABOADA, Evelyn. B. Real-Time Water Quality Monitoring For Small Aquatic Area Using Unmanned Surface Vehicle. **Engineering, Technology & Applied Science Research**. v. 9, n. 2, p. 3959-3964, 2019.

ELAW. Environmental Law Alliance Worldwide - ELAW. **Guidebook for evaluating mining project EIAs**. Eugene, OR: Environmental Law Alliance Worldwide, 2010.

FRANCIS, Holly. TRAYKOVSKI, Peter. Development of Highly Portable Unmanned Surface Vehicle for Surf Zone Bathymetric Surveying. **Journal of Coastal Research**. v. 37, n. 5, p. 933-945, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-20-00143.1> Disponível em: <<https://meridian.allenpress.com/jcr/article-abstract/37/5/933/466481/Development-of-a-Highly-Portable-Unmanned-Surface>> Acesso em: 29 jan. 2024.

GALANTE, H. A. **Seleção de Materiais no Design e Indústria Náuticos**. 2003. Dissertação (Mestre em Engenharia de Materiais) – UEMG – UFOP – CETEC. Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2003.

GLORIA, Lucivania P; HORN, Bruna C; HILGEMANN, Maurício. Avaliação da qualidade da água de bacias hidrográficas através da ferramenta do índice de qualidade da água – IQA. **Revista Caderno Pedagógico**. v. 14, n. 1, p. 103-119, 2017.

GOOGLE. **Google Earth Web** <http://earth.google.com> 10.56.0.2. 2023. Vila São José, Caçapava do Sul, RS. Coordenadas 30°35'53"S e 53°32'13"W, Elevação 309m. Data da Visualização 26 de Janeiro de 2024.

GREEN, David R., et al. Chapter 21 - Using low-cost UAVs for environmental monitoring, mapping, and modelling: examples from the coastal zone. In: **Coastal Management: Global Challenges and Innovations**. Academic Press, 2019. p. 465-501.

HANISH, Werner; FREIRE-NORDI, Cristina. S. Monitoramento Remoto em Tempo Real de Mananciais Visando Às Florações de Cianobactérias. In: POMPÊO, Marcelo; et al. (org.). **Ecologia de Reservatórios e Interfaces**. São Paulo: Instituto de Biociências IB/USP, 2015. p. 190-211. Disponível em: [https://ecologia.ib.usp.br/reservatorios/PDF/Livro\\_todo.pdf](https://ecologia.ib.usp.br/reservatorios/PDF/Livro_todo.pdf). Acesso em: 31 jul. 2024.

HEINS, Peter. H. JONES, Bryn, L. TOUNTON, Dominic, J. Design and validation of an unmanned surface vehicle simulation model. **Applied Mathematical Modelling**. v. 48, p. 749-774, 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.02.028> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X17301245> Acesso em: 27 jan. 2024.

INTERNATIONAL REFRIGERAÇÃO. **Painel Isotérmico – EPS**. 2024. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.internationalrefrigeracao.com.br/portal/index.php/solucoes/camara-frigorifica/painel-isotermico/painel-isotermico-eps> Acesso em: 30 jan. 2024.

JAN. **Building a self-driving boat (ArduPilot Rover)**. Instructables, out. 2020. Disponível em: <https://www.instructables.com/Building-a-Self-Driving-Boat-ArduPilot-Rover/>. Acesso em: 09 de jul. 2021.

KUROWSKI, Martin. et al. Guidance, Navigation and Control of Unmanned Surface Vehicles. **Automatisierungstechnik**. v. 63, jan. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/auto-2014-1173> Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/276126952\\_Guidance\\_Navigation\\_and\\_Control\\_of\\_Unmanned\\_Surface\\_Vehicles](https://www.researchgate.net/publication/276126952_Guidance_Navigation_and_Control_of_Unmanned_Surface_Vehicles) Acesso em: 27 jan. 2024.

LALLY, H T. et al. Can drones be used to conduct water sampling in aquatic environments?: A review. **Science of The Total Environment**. v. 670, p. 569-575, 2019.

LIMA, Berthyer P; MAMEDE, George L; Neto, Iran E L. Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 23, n. 1, p. 127-135, jan./fev. 2018.

LIU, Zhixiang. et al. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. In: **Annual Reviews in Control**. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018> Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/301831885\\_Unmanned\\_surface\\_vehicles\\_An\\_overview\\_of\\_developments\\_and\\_challenges](https://www.researchgate.net/publication/301831885_Unmanned_surface_vehicles_An_overview_of_developments_and_challenges) Acesso em: 26 jan. 2024.

LOPES, Frederico. W. de A; PEREIRA, José. A. A; MAGALHÃES Jr, Antônio. P. **Avaliação do índice de qualidade da água (IQA) na bacia do Ribeirão de**

**Carrancas / MG**, In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2007, São Paulo.

MAKERHERO. **Sensor de Temperatura DS18B20 a Prova D'Água**. 2024. Disponível em: <<https://www.makehero.com/produto/sensor-de-temperatura-ds18b20-a-prova-dagua/>> Acesso em: 04 abril. 2024.

MANLEY, Justin E. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. **Oceanic Engeneering Society (OES) at the MTS/IEEE OCEANS**, 2008. Quebec. Disponível em: <<https://www.ieeeoes.org/history/080515-175.pdf>> Acesso em: 15 janeiro. 2024.

MELLER, Guilherme. S; FÜRSTENAU, Karina. de O; STEIN, Ronei. T; MACHADO, Vanessa. de S. **Controle da Poluição**. 1ed.Porto Alegre: SAGAH Educação S.A., 2017, v. 1, p. 119-133.

MOHAMMED, Moulasaheb. **Mechanical Design and State of the Art for Unmanned Surface Vehicle (USV) or Autonomous Surface Craft (ASC)**. 2018. Universität Siegen, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Siegen, 2018.

MORAES, Danielle. S. L; JORDÃO, Berenice. Q. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. **Revista de Saúde Pública**. v. 36, p. 370-374, 2002.

OCEANALPHA. **M80 USV Conducts the Underwater Topographic Survey in The Antarctica**. December 2017. 1 fotografia. Disponível em: <[https://www.oceanalpha.com/application\\_cases/m80-usv-conducts-the-underwater-topographic-survey-in-the-antarctica/](https://www.oceanalpha.com/application_cases/m80-usv-conducts-the-underwater-topographic-survey-in-the-antarctica/)> Acesso em: 26 jan. 2024.

PEREIRA, Jorge. M. M. V. **Estudo das Ligas de Alumínio Aplicadas em Construção Naval Nomeadamente na Resistência à Corrosão em Estruturas Navais Soldadas**. 2010. Dissertação (Mestrado Engenharia dos Materiais) – Universidade Nova de Lisboa – Departamento de Ciências dos Materiais, 2010.

PULE, Mompoloki; YAHYA, Abid; CHUMA, Joseph. Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. **Journal of Applied Reserach and Technology**, v. 15, n. 6, p. 562-570, dec, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.07.004>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642317301037>> Acesso em: 23 jan. 2024.

RASPBERRY PI. **Raspberry Pi Zero W**. 2024. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-w/>> Acesso em: 07 abril. 2024.

ROBOCRAZE. **Pixhawk 2.4.8 Drone Flight Controller PX4 32 Bit Autopilot**. 2024. Disponível em: <<https://robocraze.com/products/pixhawk-2-4-8-drone-flight-controller-px4-32-bit-autopilot>> Acesso em: 07 abril. 2024.

SARAVATI. **HUB Hat USB 4 Portas para Raspberry Pi**. 2024. Disponível em: <<https://www.saravati.com.br/hub-hat-usb-4-portas-para-raspberry-pi.html>> Acesso em: 07 abril. 2024.

SHELARE, Sagar, D. et al. Advances in water sample collections with a drone – A review. **Materials Today: Proceedings**. 2021.

SIBANDA, Mbulisi. et al. Application of Drone Technologies in Surface Water Resources Monitoring and Assessment: A Systematic Review of Progress, Challenges, and Opportunities in Global South. **Drones**, v. 5, n. 3, aug, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5030084> Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2504-446X/5/3/84>> Acesso em: 24 jan. 2024.

SILVA, Igor, dos S. **Desenvolvimento de um Veículo Aquático Não Tripulado Empregado como Plataforma de Testes de Sistemas de Navegação**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, São Paulo, 2019.

SILVA, Júlia P de O; FERREIRA, Gessé P; MATOS, Jaqueline B. Monitoramento dos aspectos físico-químicos da qualidade da água na praia Lagunar dos Palmeiras (Rio de Janeiro). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**. v. 9, n. 1, p. 113-130, 2021.

SILVA, Sérgio R., et al. Synthetic Aperture Techniques for Sonar Systems. **Advances in Sonar Technology**. 2009. Disponível em <<https://www.intechopen.com/chapters/6015>> Acesso em: 25 jan. 2024.

SILVER, J. **Making an autonomous boat using a raspberry pi (WIP)**. Instructables, jan. 2013. Disponível em: <<https://www.instructables.com/Making-an-autonomous-boat-with-a-Raspberry-Pi-a-/>>. Acesso em: 09 de jul. 2021.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Observando os rios: O Retrato da Qualidade da Água nas Bacias Hidrográficas da Mata Atlântica**. 2023. Disponível em: <<https://cms.sosma.org.br/wp-content/uploads/2023/03/SOSMAObservando-os-Rios-2023.pdf>> Acesso em: 23 jan. 2024.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Observando os Rios 2024: O retrato da qualidade da água nas bacias hidrográficas da Mata Atlântica**. 2024. Disponível em <<https://www.sosma.org.br/sobre/relatorios-e-balancos>> Acesso em: 01 maio. 2024.

SOUZA, Diego G., et al. Aplicação de técnicas de análise exploratória no monitoramento da qualidade da água do rio Cuiá, João Pessoa-PB. **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**. v. 15, n. 1, p. 131-145, jan./abr. 2019.

STEIN, Ronei. T. **Manejo de Bacias Hidrográficas**. Editora Sagah, 2017.

TECHZEERO. **Arduino Mega**. Disponível em <<https://techzeero.com/wp-content/uploads/2023/09/ardunio-Mega-1024x538.webp>>

Acesso em: 07 abril. 2024.

TOLEDO, Luís G; NICOLELLA, Gilberto. Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. **Revista Scientia Agricola**. v. 59, n. 1, p. 181-186, jan./mar. 2002.

TONACIO, V. C. **Avaliação de Propulsores Navais em Relação a Eficiência e Excitação de Vibração**. 2014. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2014.

TONIN, D. Young, G. P. **Projeto, Simulação e Construção de Flutuadores Hidrodinâmicos de Baixo Custo para Prática de Remo Adaptável**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2007.

TOWNSEND, A., *et al.* A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements. **Heliyon Open access**. v. 6, n. 11, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05285> Disponível em <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7672221/pdf/main.pdf> Acesso em: 26 jan. 2024.

UNESCO. **Gestão de água no Brasil**. 2002. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129870> Acesso em: 16 maio. 2024.

UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2023: parcerias e cooperação para a água; fatos, dados e exemplos de ação**. 2023. Disponível em: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384659\\_por](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384659_por) Acesso em: 16 maio. 2024.

USINAINFO. **Sensor de pH Arduino + Módulo de Leitura BNC PH4502C**. 2024a. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/outros-sensores-arduino/sensor-de-ph-arduino-modulo-de-leitura-5316.html> Acesso em: 04 abril. 2024.

USINAINFO. **Sensor de Turbidez ST100 + Módulo de Leitura - ORIGINAL**. 2024b. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/outros-sensores-arduino/sensor-de-turbidez-arduino-st100-modulo-de-leitura-original-4539.html> Acesso em: 04 abril. 2024.

USV (UNMANNED SURFACE VEHICLE), APPLICATIONS AND ADVANTAGES. In: **Embention**. 2015. Disponível em: <https://www.embention.com/news/usv-unmanned-surface-vehicle-applications-and-advantages/>. Acesso em: 05 de julho de 2021.

VALTER, Rafael, P. **Estudo Numérico da Relevância de Parâmetros Construtivos de Lemes na Manobrabilidade de um Nautimodelo**. 2019. Monografia (Bacharel Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande

do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2019.

VARELLA NETO, Celso B. **Desenvolvimento e construção de um sismógrafo para monitoramento de vibrações e pressão acústica.** 2017. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, São Paulo, 2017.

VASUDEVAN, Shriram. K. BASKARAN, Balraj. An improved real-time water quality monitoring embedded system with IoT on unmanned surface vehicle. **Ecological Informatics.** v. 65. Nov, 2021.

VIANNA, Anderson M. Poluição ambiental, um problema de urbanização e crescimento desordenado das cidades. **Revista SUSTINERE.** v. 3, n. 1, p. 22-42, jan./jun. 2015.

ZONTA, Marcio. TROCATE, Charles. (Eds.). Antes fosse mais leve a carga: reflexões sobre o desastre da Samarco/Vale/BHP. Marabá: **Editorial Iguana**, 2016, v. 2.

YAAKOB, O. et al. Development of unmanned surface vehicle(USV) for sea patrol and environmental monitoring. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON MARINE TECHNOLOGY**, 2012, Kuala Terengganu. Anais...

YAN, Rj. et al. Development and missions of unmanned surface vehicle. **Journal of Marine Science and Application.** v. 9, p. 451–457, March/December 2010.