ReGeo ISSN: 2177-3246

ROBÓTICA SUBMERSA INTELIGENTE: PROTÓTIPO DE ROV MODULAR APLICADO AO RASTREAMENTO E PROTEÇÃO DE ESPÉCIES VULNERÁVEIS

SMART UNDERWATER ROBOTICS: A MODULAR ROV PROTOTYPE APPLIED TO THE TRACKING AND PROTECTION OF VULNERABLE SPECIES

ROBÓTICA SUBMARINA INTELIGENTE: PROTOTIPO DE ROV MODULAR APLICADO AL RASTREO Y PROTECCIÓN DE ESPECIES VULNERABLES

https://doi.org/10.56238/revgeov17n7-190

Data de submissão: 22/06/2026 **Data de publicação:** 22/07/2026

Robson da Cunha Santos
Doutor em Engenharia
Instituição: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE/UFRJ); Instituto Federal Fluminense (IFF)
E-mail: santos.robson@gsuite.iff.edu.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1720-8185
Lattes: http://lattes.cnpq.br/3337432920672784

Danilo Ricardo Lima de Oliveira
Graduando em Engenharia Mecânica
Instituição: Instituto Federal Fluminense (IFF)
E-mail: dan_rric@hotmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0004-9288-177X
Lattes: http://lattes.cnpq.br/1099479312155639

João Vilela dos Santos Neves
Graduando em Engenharia Mecânica
Instituição: Instituto Federal Fluminense (IFF)
E-mail: joao.vilela.neves@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0008-4173-3311
Lattes: http://lattes.cnpq.br/8696406180353474

Yuri Florencio Pereira
Graduando em Engenharia Mecânica
Instituição: Instituto Federal Fluminense
E-mail: yuripereira150@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0000-4376-6186
Lattes: http://lattes.cnpq.br/3932408694948805

Fernando Pinto Nascimento Silva
Graduando em Engenharia Mecânica
Instituição: Instituto Federal Fluminense
E-mail: fpnsup@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0006-9449-6407
Lattes: http://lattes.cnpq.br/9163108169322535

RESUMO
Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de veículo subaquático operado remotamente (ROV) de concepção modular e baixo custo, cujo objetivo principal é viabilizar o monitoramento ambiental não invasivo e a conservação da espécie Hippocampus reidi, um cavalo-marinho vulnerável utilizado como bioindicador da saúde dos oceanos. A estrutura mecânica e o chassi estanque foram projetados digitalmente em softwares de modelagem 3D, combinando tubos de PVC comerciais com conexões e suportes personalizados fabricados via impressão 3D em filamento ABS. O sistema eletrônico embarcado adota o microcontrolador ESP32 como unidade central de processamento devido ao seu alto desempenho e conectividade sem fio integrada, sendo equipado com sensores ultrassônicos impermeáveis para medições batimétricas, módulo GPS para georreferenciamento e uma câmera integrada para transmissão de vídeo em tempo real. A identificação e o rastreamento automático dos organismos no habitat natural ocorrem por meio de técnicas de visão computacional baseadas em inteligência artificial, utilizando redes neurais convolucionais para o reconhecimento de imagens subaquáticas. Uma rigorosa pesquisa de mercado nacional e internacional validou a viabilidade econômica do projeto, confirmando o perfil altamente acessível do protótipo. A proposta final demonstra que soluções de engenharia modulares de baixo custo podem democratizar a pesquisa científica submersa e apoiar ativamente a preservação da biodiversidade marinha.

Palavras-chave: ROV Subaquático. Hippocampus Reidi. Visão Computacional. Inteligência Artificial. Sistemas Embarcados. Baixo Custo.

ABSTRACT
This paper presents the development of a low-cost, modular prototype of a Remote Operated Vehicle (ROV), aimed at enabling non-invasive environmental monitoring and the conservation of Hippocampus reidi, a vulnerable seahorse species used as a bioindicator of ocean health. The mechanical structure and waterproof chassis were digitally designed using 3D modeling software, combining commercial PVC pipes with custom connectors and supports manufactured via ABS filament 3D printing. The embedded electronic system adopts the ESP32 microcontroller as the central processing unit due to its high performance and integrated wireless connectivity, equipped with waterproof ultrasonic sensors for bathymetric measurements, a GPS module for georeferencing, and an integrated camera for real-time video transmission. Automatic identification and tracking of the organisms in their natural habitat are performed through artificial intelligence-based computer vision techniques, using convolutional neural networks for underwater image recognition. Rigorous national and international market research validated the project's financial feasibility, confirming the prototype's highly accessible profile. The final proposal demonstrates that affordable and modular engineering solutions can democratize underwater scientific research and actively support marine biodiversity preservation.

Keywords: Underwater ROV. Hippocampus Reidi. Computer Vision. Artificial Intelligence. Embedded Systems. Low Cost.

RESUMEN
Este artículo presenta el desarrollo de un prototipo de vehículo operado remotamente (ROV) de bajo costo y concepción modular, cuyo objetivo principal es viabilizar el monitoreo ambiental no invasivo y la conservación de la especie Hippocampus reidi, un caballito de mar vulnerable utilizado como bioindicador de la salud de los océanos. La estructura mecánica y el chasis estanco fueron diseñados digitalmente en software de modelado 3D, combinando tuberías de PVC comerciales con conectores personalizados y soportes fabricados mediante impresión 3D en filamento ABS. El sistema electrónico embarcado adopta el microcontrolador ESP32 como unidad central de procesamiento debido a su alto

rendimiento y conectividad inalámbrica integrada, equipado con sensores ultrasónicos impermeables para mediciones batiméricas, módulo GPS para georreferenciación y cámara integrada para transmisión de video en tiempo real. La identificación y el rastreo automático de organismos en su hábitat natural se realizan mediante técnicas de visión por computadora basadas en inteligencia artificial, utilizando redes neuronales convolucionales para el reconocimiento de imágenes submarinas. Una investigación rigurosa del mercado nacional e internacional validó la viabilidad económica del proyecto, confirmando el perfil altamente accesible del prototipo. La propuesta final demuestra que soluciones de ingeniería modulares y de bajo costo pueden democratizar la investigación científica submarina y apoyar activamente la preservación de la biodiversidad marina.

Palabras clave: ROV Submarino. *Hippocampus reidi*. Visión por Computadora. Inteligencia Artificial. Sistemas Embarcados. Bajo Costo.

1 INTRODUÇÃO

A preservação dos ecossistemas marinhos desempenha um papel vital na manutenção da biodiversidade global e no equilíbrio ecológico planetário. No âmbito dos ambientes costeiros e estuarinos, espécies sedentárias sofrem de forma direta os impactos das pressões antrópicas. Entre esses organismos, destaca-se o *Hippocampus reidi* (cavalo-marinho-de-focinho-longo), uma espécie vulnerável que habita regiões tropicais (LOURIE *et al.*, 2004) e atua como um excelente bioindicador da qualidade ambiental (DELUNARDO *et al.*, 2015). Devido à sua baixa mobilidade, forte fidelidade ao habitat e preferências por condições ecológicas específicas (MEURER, 2012), o monitoramento populacional do *Hippocampus reidi* fornece dados primordiais sobre a integridade ecológica e a distribuição vertical desses organismos nos oceanos (VILLAR FRERET-MEURER, 2012).

Tradicionalmente, o monitoramento dessa fauna subaquática apresenta limitações severas de tempo e riscos operacionais. Diante desse cenário, a robótica subaquática surge como uma alternativa de grande valor, apresentando um crescimento significativo em pesquisas globais e engenharia submarina (SILVA *et al.*, 2023). O emprego de Veículos Operados Remotamente (ROVs) equipados com sensores e câmeras permite a exploração do ambiente submerso de forma contínua, segura e não invasiva, otimizando a coleta de dados visuais, a detecção de poluentes e a análise da biodiversidade em áreas de difícil acesso (SILVA *et al.*, 2023).

Contudo, a ampla adoção de ROVs em larga escala por instituições de ensino e projetos de conservação ambiental no Brasil esbarra no alto custo de aquisição e de manutenção dessas tecnologias padronizadas. A superação dessa barreira reside na engenharia de soluções modulares e no desenvolvimento de veículos de baixo custo, que integram materiais acessíveis a sistemas eletrônicos abertos para democratizar o acesso à tecnologia subaquática (SILVA VALE, 2021; SILVA *et al.*, 2023). Através da incorporação de microcontroladores acoplados a sistemas de visão computacional baseados em redes neurais convolucionais, torna-se viável conceber ferramentas robóticas capazes de realizar o rastreamento e o reconhecimento automatizado de espécies em tempo real, otimizando a precisão da classificação taxonômica de organismos marinhos (AMORIM *et al.*, 2022).

A necessidade de desenvolver tecnologias acessíveis para o monitoramento costeiro justifica-se pela urgente demanda por dados contínuos de ecossistemas ameaçados. Este projeto apoia-se na sustentabilidade financeira e no uso da engenharia modular para provar que restrições orçamentárias não impedem a inovação na robótica subaquática e a preservação da biodiversidade marinha. Assim, o objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver um protótipo funcional de Veículo Operado Remotamente (ROV) modular e de baixo custo, integrado com sistemas de sensores e algoritmo de

inteligência artificial para visualização e proteção da espécie vulnerável *Hippocampus reidi* em ambientes aquáticos.

Para a consecução dessa meta, definem-se como objetivos específicos: projetar digitalmente a carcaça mecânica, o chassi estrutural e o sistema estanque do robô utilizando softwares de modelagem 3D; selecionar e configurar o hardware embarcado centralizado no microcontrolador ESP32 e periféricos como sensores batimétricos ultrassônicos, módulo GPS e câmera embarcada; implementar a lógica de controle de propulsão e o sistema de comunicação via cordão umbilical para transmissão de telemetria e vídeo em tempo real; treinar e integrar uma rede neural convolucional para o processamento de visão computacional voltado ao reconhecimento automático do *Hippocampus reidi*; e conduzir pesquisas de mercado e levantamento de custos para validar a viabilidade econômica da plataforma e assegurar sua replicabilidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O HIPPOCAMPUS REIDI COMO BIOINDICADOR AMBIENTAL

O *Hippocampus reidi*, conhecido como cavalo-marinho-de-focinho-longo, é uma espécie encontrada em regiões tropicais do Atlântico Ocidental, abrangendo de forma expressiva a costa brasileira (LOURIE *et al.*, 2004). Esse organismo marinho habita ecossistemas costeiros específicos, estabelecendo-se em áreas de recifes de coral, manguezais e pradarias de fanerógamas marinhas (LOURIE *et al.*, 2004). Devido à sua baixa mobilidade, forte fidelidade a sítios ecológicos e preferências estritas por habitats, a espécie torna-se vulnerável a pressões antrópicas, mas apresenta-se como um organismo sentinela ideal para o monitoramento biológico (MEURER, 2012). A relevância do *Hippocampus reidi* como bioindicador apoia-se em sua extrema sensibilidade a alterações físico-químicas e à poluição hídrica (DELUNARDO *et al.*, 2015). Pesquisas ecotoxicológicas de exposição ao petróleo bruto demonstram que o contato com contaminantes gera alterações genotóxicas e enzimáticas severas na espécie, consolidando seu papel de relevância na detecção de contaminação e na avaliação da saúde ambiental dos oceanos (DELUNARDO *et al.*, 2015). Ademais, a compreensão de sua distribuição vertical e ecologia comportamental fundamenta o planejamento de rotas de monitoramento sistemático (VILLAR FRERET-MEURER, 2012).

Figura 1. Hippocampus reidi



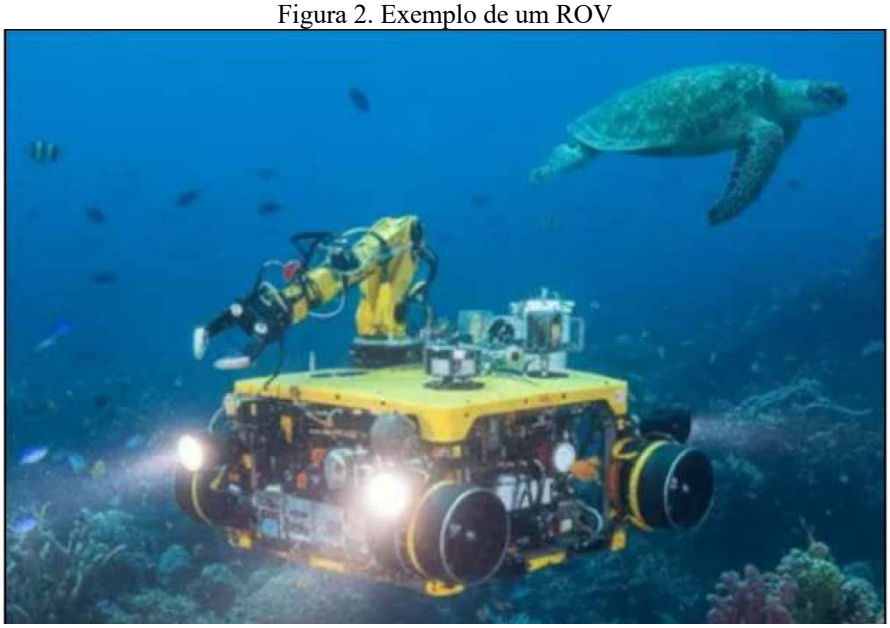
Fonte: LOURIE *et al.*, 2004

2.2 USO DE ROVS NO MONITORAMENTO AMBIENTAL E DESIGN SUBAQUÁTICO

Os Veículos Operados Remotamente (ROVs) desempenham uma função primordial no avanço da oceanografia e no monitoramento de ecossistemas subaquáticos complexos, permitindo a observação não invasiva de áreas de difícil acesso (SILVA *et al.*, 2023). A aplicação dessas plataformas tecnológicas expande-se globalmente, sendo amplamente utilizadas para a exploração oceânica profunda, engenharia submarina e levantamentos biológicos contínuos (SILVA *et al.*, 2023). Quando dotados de câmeras e sensores especializados, os ROVs atuam na coleta de parâmetros físico-químicos e no mapeamento de biodiversidade sem gerar interferência direta ou estresse no habitat marinho observado (SILVA *et al.*, 2023). Para viabilizar pesquisas em larga escala por instituições acadêmicas, a engenharia robótica foca no desenvolvimento de veículos de baixo custo (SILVA VALE, 2021; SILVA *et al.*, 2023). O design estrutural contemporâneo adota princípios de modularidade, utilizando materiais

que resistem à pressão e à corrosão salina, como polímeros estruturais e canos de PVC comerciais (SILVA VALE, 2021). Essa abordagem equilibra a hidrodinâmica e a estabilidade com a facilidade de montagem, democratizando o acesso a ferramentas científicas submersas (SILVA VALE, 2021; SILVA *et al.*, 2023).

Figura 2. Exemplo de um ROV

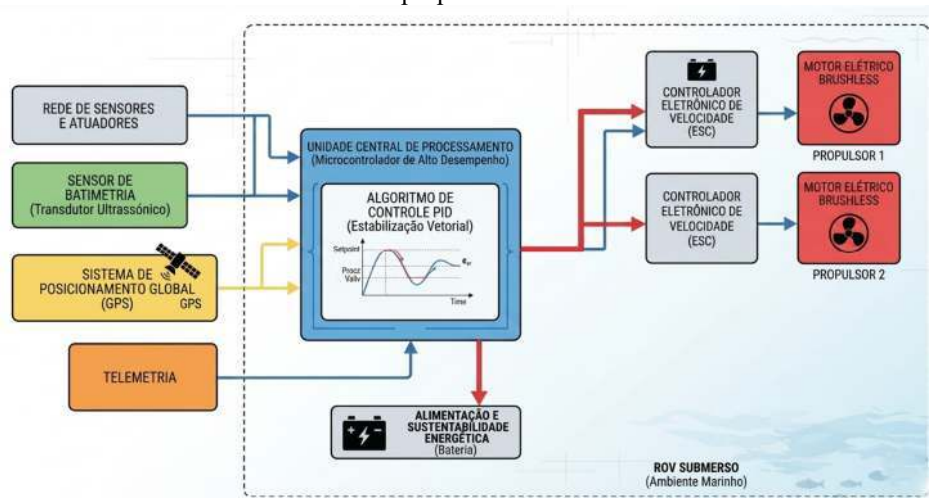


Fonte: UNION COMPOSITES CHANGZHOU CO., LTD, 2026

2.3 SISTEMAS EMBARCADOS E INSTRUMENTAÇÃO SUBAQUÁTICA

A operação eficiente de um ROV é coordenada por sistemas embarcados compostos por microcontroladores acoplados a redes de sensores e atuadores (SILVA VALE, 2021). As unidades de microcontroladores funcionam como computadores integrados em um único chip, encarregadas do processamento lógico e da aquisição contínua de telemetria sem demandar sistemas operacionais de alta complexidade (SILVA VALE, 2021). No escopo de arquiteturas eletrônicas de baixo custo e alta eficiência, os microcontroladores de alto desempenho coordenam a estabilização vetorial por meio de algoritmos de controle proporcional, integral e derivativo (PID), atenuando os distúrbios provocados por correntes marinhas e turbulências (VILLAR FRERET-MEURER, 2016). A integração de sensores de batimetria baseados em transdutores ultrassônicos e sistemas de posicionamento global (GPS) provê coordenadas espaciais e topográficas precisas para missões de longo prazo, conforme detalhado no fluxo de interconexões da Figura 3. Esse ecossistema eletrônico coordena controladores eletrônicos de velocidade (ESCs) e motores elétricos de alta eficiência (*brushless*), garantindo a manobrabilidade e a sustentabilidade energética do protótipo em ambiente submerso.

Figura 3. Diagrama de blocos da arquitetura eletrônica integrada do sistema embarcado e rede de sensores com dois propulsores

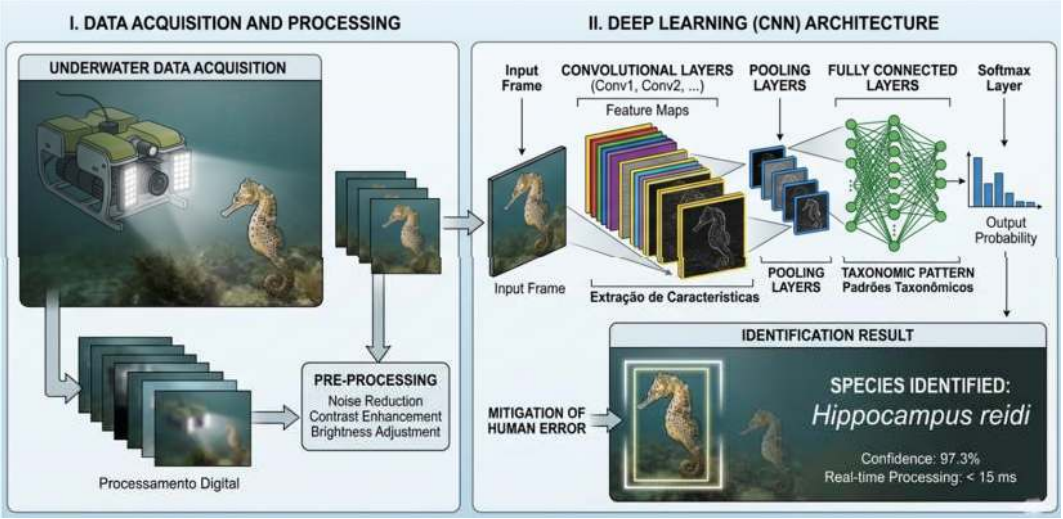


Fonte: Elaborada pelos autores

2.4 VISÃO COMPUTACIONAL E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA

O reconhecimento automatizado de espécimes subaquáticos representa uma evolução metodológica essencial para a catalogação ecológica automatizada. O processamento de dados visuais captura imagens em ambientes de baixa luminosidade e alta atenuação óptica por meio de sensores de imagem digitais complementados por arranjos de iluminação LED. A implementação de técnicas de visão computacional baseadas em algoritmos de aprendizado de máquina e aprendizado profundo (*deep learning*) otimiza a triagem visual realizada pelos pesquisadores. Modelos baseados em Redes Neurais Convolucionais (CNNs) realizam a extração de características morfológicas complexas e padrões taxonômicos diretamente dos frames de vídeo capturados (AMORIM *et al.*, 2022) operando por meio de camadas consecutivas de filtragem matemática, conforme ilustrado na Figura 4. Essa automação computacional confere capacidade de identificação de peixes e outros organismos em tempo real, mitigando erros humanos na amostragem e agilizando a geração de estratégias preditivas para a conservação da biodiversidade marinha (AMORIM *et al.*, 2022).

Figura 4. Fluxo de processamento digital e extração de características morfológicas em uma Rede Neural Convolucional (CNN) aplicada ao reconhecimento automático de espécies.



Fonte: Adaptada pela IA – Amorim 2022

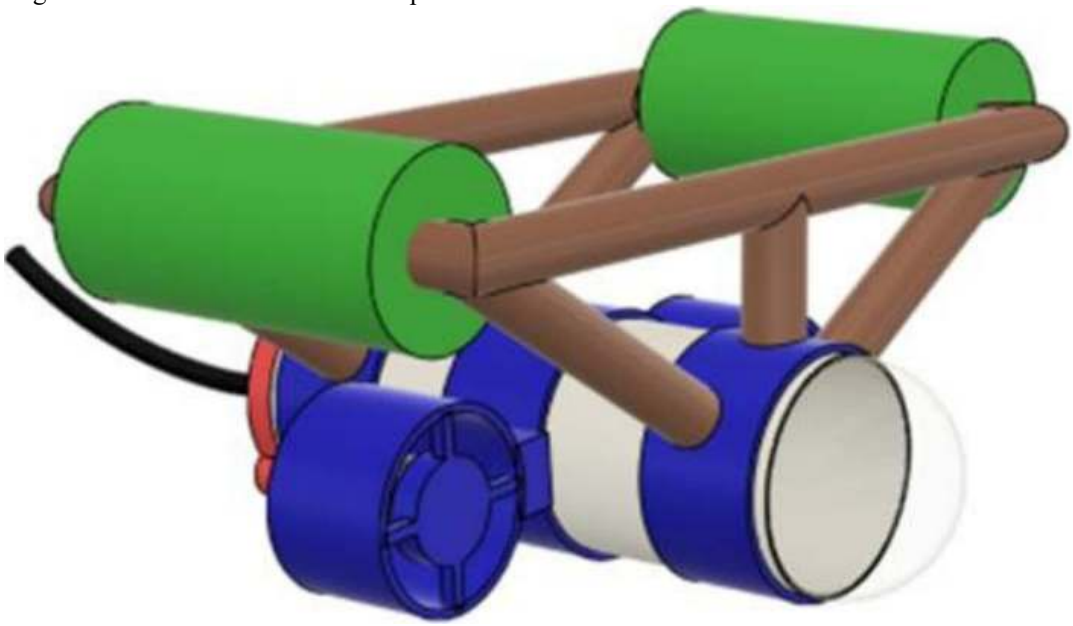
3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para o desenvolvimento do projeto estruturado sob o título "Robótica Submersa Inteligente: Protótipo de ROV Modular Aplicado ao Rastreamento e Proteção de Espécies Vulneráveis" divide-se em quatro etapas complementares: modelagem tridimensional, especificação do hardware embarcado, integração lógica de controle e planejamento dos ensaios experimentais.

3.1 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E MODELAGEM TRIDIMENSIONAL (CAD)

O design mecânico do veículo de observação subaquática foi concebido digitalmente através do software de modelagem tridimensional *Fusion 360*. O processo de modelagem tridimensional foi essencial para a visualização detalhada do layout interno, redução de volume e otimização da estabilidade hidrodinâmica antes da fabricação do protótipo físico, conforme ilustrado na geometria final da Figura 5.

Figura 5. Modelo tridimensional completo da estrutura do ROV desenvolvido em ambiente virtual.



Fonte: Do Autor

A estrutura física do protótipo foi especificada com uma geometria simples e funcional baseada na codificação por cores da modelagem:

- **Branco (Tubo de PVC 100 mm):** Componente principal da estrutura central do ROV, responsável por abrigar e proteger os elementos internos do sistema contra a umidade.
- **Azul (Suportes estruturais em ABS):** Peças personalizadas fabricadas por impressão 3D utilizando filamento ABS, utilizadas para a fixação e suporte dos tubos.
- **Marrom (Tubos de PVC 20 mm):** Elementos utilizados para reforço estrutural e interligação da carcaça externa.
- **Vermelho (Tampa traseira em ABS):** Fabricada por impressão 3D e acoplada a um anel do tipo *o'ring* de 100 mm para garantir a vedação estanque traseira e servir como ponto de conexão do cabo umbilical.
- **Verde (Flutuadores de polietileno):** Elementos cilíndricos (macarrão de piscina) adicionados à parte superior para garantir a flutuabilidade positiva do protótipo.

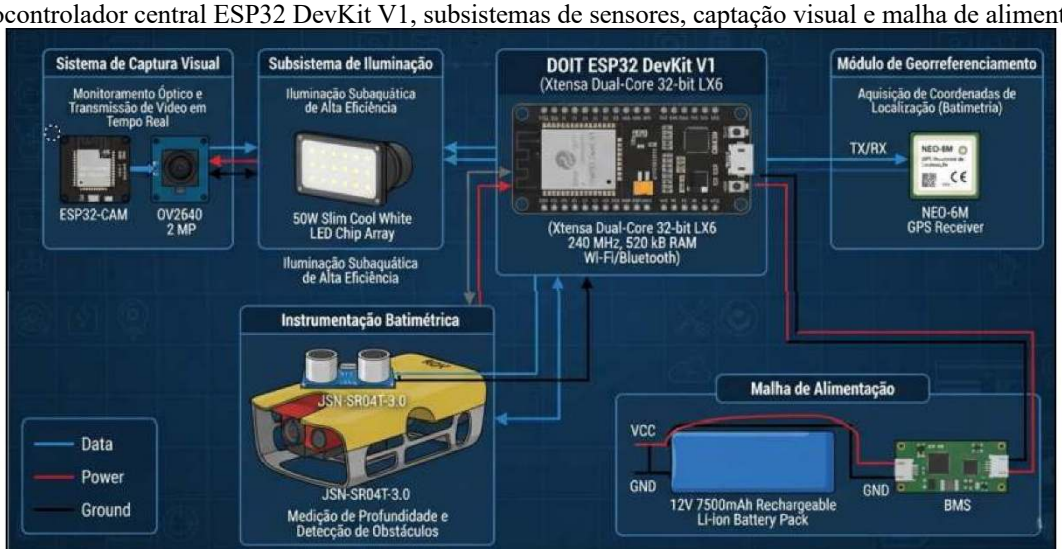
3.2 ARQUITETURA DE HARDWARE E INSTRUMENTAÇÃO EMBARCADA

A eletrônica central e o gerenciamento de dados do ROV foram projetados em torno do microcontrolador *DOIT ESP32 DevKit V1*. Esta unidade de processamento possui arquitetura *Xtensa Dual-Core 32-bit LX6* operando a 240 MHz, dispondo de 520 kB de memória RAM e conectividade sem fio integrada.

A integração geral desse ecossistema de hardware e periféricos pode ser visualizada no diagrama de blocos da Figura 6, compreendendo as seguintes divisões:

- **Sistema de Captura Visual:** Módulo *ESP32-CAM* acoplado a uma câmera digital *OV2640* de 2 MP, responsável pelo monitoramento óptico contínuo e pela transmissão de vídeo em tempo real.
- **Subsistema de Iluminação:** Arranjo de chips *LED Slim* de luz branca fria de alta eficiência (50W) para compensar a atenuação óptica e a baixa luminosidade no ambiente subaquático.
- **Instrumentação Batimétrica:** Sensor ultrassônico impermeável *JSN-SR04T-3.0* posicionado na parte inferior para realizar medições contínuas de profundidade e detecção de obstáculos topográficos.
- **Módulo de Georreferenciamento:** Receptor GPS *NEO-6M* operando via interface de comunicação serial (TX/RX) para aquisição de coordenadas de localização auxiliando a batimetria.
- **Malha de Alimentação:** Bateria de íons de lítio recarregável de 12V com capacidade de 7500 mAh, integrada a um Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS) para proteção contra sobrecargas.

Figura 6. Diagrama de blocos da arquitetura de hardware e instrumentação embarcada do ROV, destacando o microcontrolador central ESP32 DevKit V1, subsistemas de sensores, captação visual e malha de alimentação.



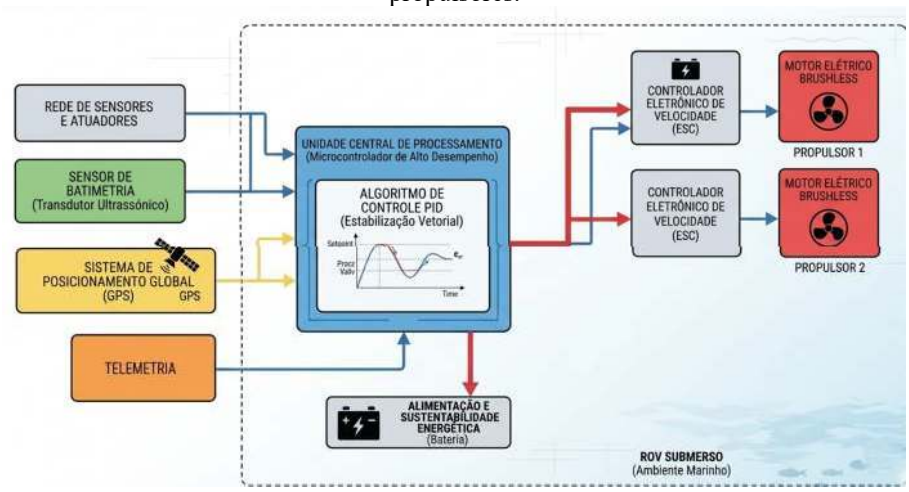
Fonte: Do Autor

3.3 SISTEMA DE PROPULSÃO, CONTROLE E COMUNICAÇÃO

A movimentação dinâmica horizontal do robô é realizada por uma configuração simplificada de dois motores elétricos sem escovas (*brushless*) modelo *A2212/5T de 2450KV*. A regulação de velocidade e rotação dos motores é controlada por dois Controladores Eletrônicos de Velocidade (ESCs) de 40A, comandados por sinais emitidos pela unidade central.

Toda a lógica de interoperação elétrica dos componentes embarcados, a malha de propulsão redundante e o fluxo de instrumentação do veículo foram mapeados e estruturados conforme detalhado na Figura 7.

Figura 7. Diagrama de blocos da arquitetura eletrônica integrada do sistema embarcado e rede de sensores com dois propulsores.



Fonte: Elaborada pelos autores

A arquitetura lógica adota o algoritmo de controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID) para estabilização de trajetória, reduzindo a interferência de correntes marinhas e turbulências locais. A interface com a superfície ocorre via cordão umbilical composto por um cabo de rede *Cat6* blindado com 20 metros de extensão, conectado ao robô por um conector Ethernet IP67 à prova d'água, viabilizando o tráfego de dados de telemetria e sinais de comando gerados por um controle USB na base de operação.

3.4 PLANEJAMENTO DE TESTES EM CAMPO E PROCESSAMENTO ARTIFICIAL

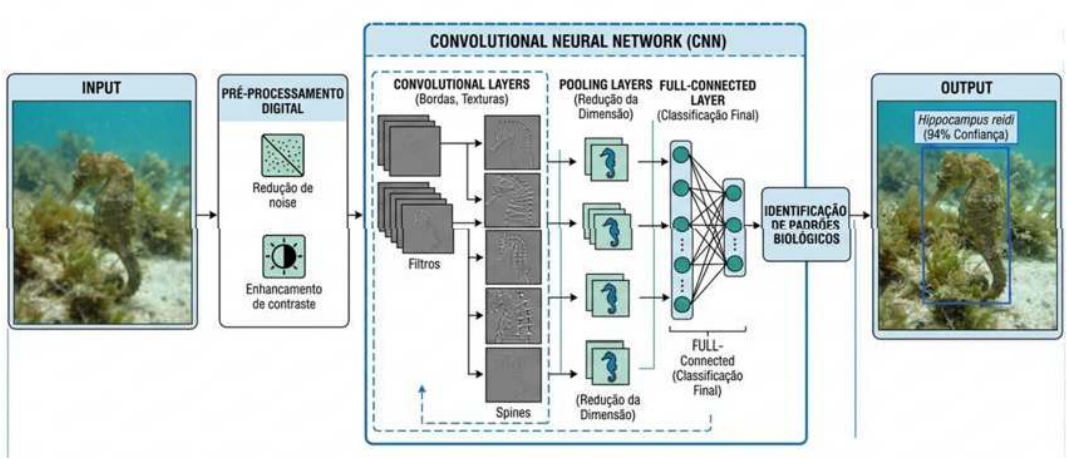
O plano experimental de validação do ROV foi estruturado para ocorrer de forma progressiva em duas fases distintas:

1. **Ensaios de Laboratório (Ambiente Controlado):** Testes iniciais realizados em piscinas para validação da estanqueidade do chassi de PVC, ajuste fino das constantes do controlador PID e calibração dos sensores de distância e vídeo.
2. **Campanhas de Campo (Ambiente Marinho Costeiro):** Operações reais em águas costeiras para coleta de parâmetros de profundidade e monitoramento da fauna local.

Os dados visuais e *frames* de vídeo capturados pela câmera subaquática são destinados ao processamento computacional para identificação automatizada de padrões biológicos. O fluxo

computacional do algoritmo de inteligência artificial, baseado em Redes Neurais Convolucionais (CNNs) para a extração de características morfológicas complexas e reconhecimento taxonômico do cavalo-marinho *Hippocampus reidi* em seu habitat natural, está representado detalhadamente na Figura 8.

Figura 8. Fluxo de processamento digital e extração de características morfológicas em uma Rede Neural Convolucional (CNN) aplicada ao reconhecimento automático de espécies.



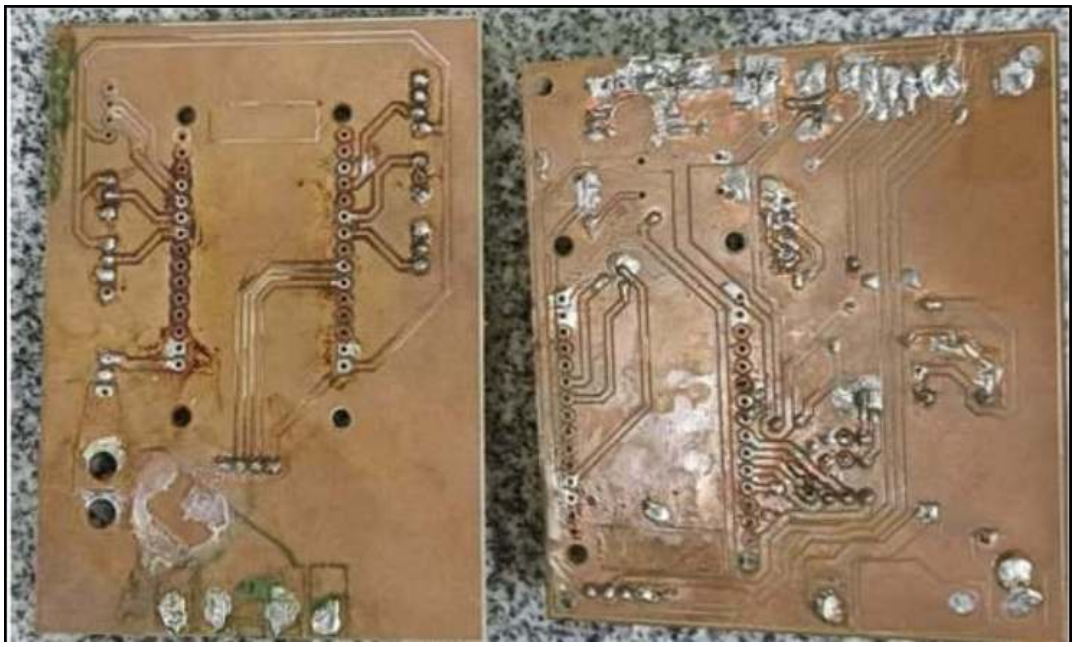
Fonte: Adaptado de Amorim *et al.* (2022).

3.5 DESENVOLVIMENTO LÓGICO E EVOLUÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCBS)

O processo de integração dos sistemas de alimentação, controle de motores, sensores e comunicação do ROV seguiu um fluxo de desenvolvimento incremental, passando por diferentes versões de Placas de Circuito Impresso (PCBs) para mitigar falhas elétricas e magnéticas.

As primeiras iterações de projeto das PCBs manifestaram severas limitações técnicas relacionadas a curtos-circuitos provocados por execuções grosseiras, trilhas excessivamente finas e espaçamento exíguo entre circuitos. Essas imperfeições físicas acarretavam problemas crônicos de instabilidade no acionamento dos propulsores, interferências eletromagnéticas na leitura dos sensores periféricos e superaquecimento por sobrecarga térmica no microcontrolador central ESP32. As duas primeiras versões confeccionadas e testadas estão ilustradas na Figura 9.

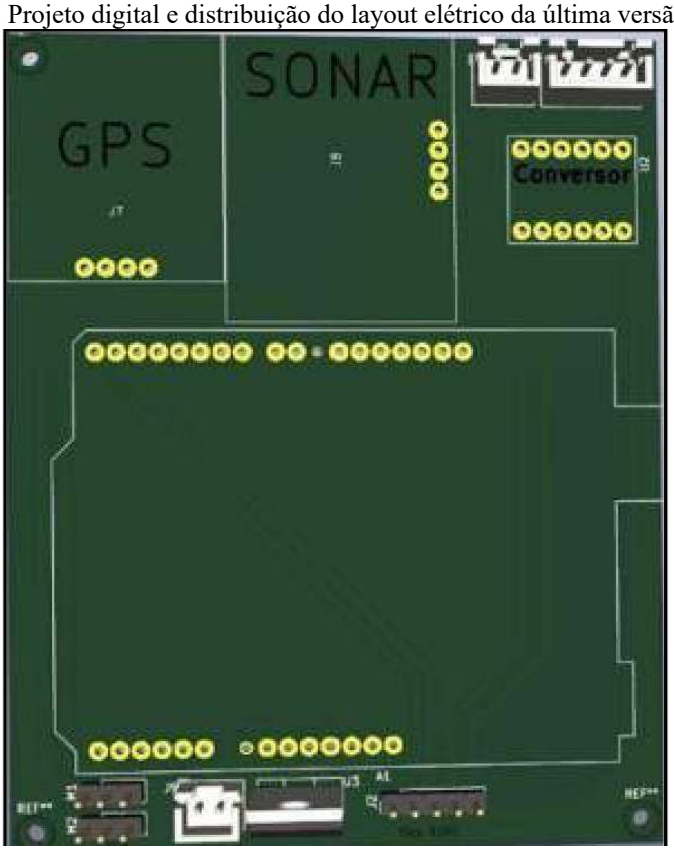
Figura 9. Primeira (esquerda) e segunda (direita) versões de PCBs desenvolvidas apresentando falhas de isolamento e trilhas reduzidas



Fonte: Do Autor

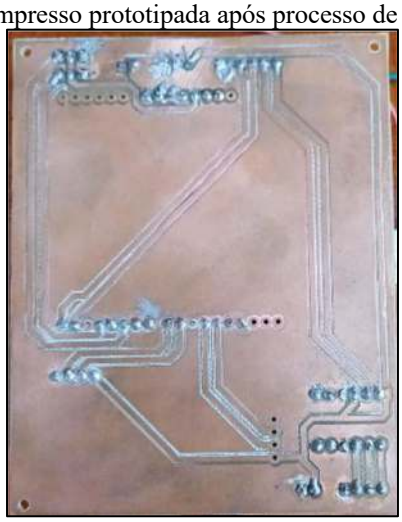
Como solução de engenharia para contornar o superaquecimento e as interferências, a PCB final foi totalmente reprojetada de forma simplificada, adotando trilhas mais largas e uma melhor segregação física dos circuitos. De forma complementar, implementou-se uma arquitetura de processamento descentralizada: um microcontrolador Arduino ficou encarregado exclusivamente do acionamento dos motores e leitura analógica de sensores; o ESP32 assumiu o controle de navegação e os protocolos de comunicação externa; enquanto o módulo ESP32-CAM permaneceu operando de forma isolada e dedicada para a captura de imagens. O layout digital e a montagem física da placa final validada são exibidos nas Figuras 10, 11 e 12.

Figura 10. Projeto digital e distribuição do layout elétrico da última versão da PCB



Fonte: Do Autor

Figura 11. Placa de circuito impresso prototipada após processo de corrosão e acabamento físico.



Fonte: Do Autor

Figura 12. PCB final montada com integração do relé para acionamento e corte do barramento de energia.



Fonte: Do Autor

3.6 PROTOCOLO DE ENSAIO PRÁTICO EM AMBIENTE REAL

Após as validações elétricas laboratoriais, o ROV foi submetido a ensaios de campo em ambiente aquático real, utilizando uma lagoa como cenário de operação simulada para mapeamento e navegação. Durante as campanhas de campo, foram mapeadas restrições ópticas severas decorrentes da elevada turbidez da água, gerada pelo acúmulo de partículas em suspensão e detritos orgânicos. Essa barreira visual impactou diretamente a navegação óptica e impediu a captura de imagens em tempo real de exemplares vivos do cavalo-marinho no local. Apesar do bloqueio na captura visual direta, as funcionalidades de instrumentação operaram de forma robusta. O ecossistema de sensores, em comunicação ponto a ponto com o aplicativo mobile desenvolvido na plataforma MIT App Inventor, garantiu a recepção e plotagem estável de telemetria de profundidade batimétrica e coordenadas de posicionamento global (GPS) em tempo real, conforme ilustrado na interface da Figura 13.

Figura 13. Interface de telemetria do aplicativo móvel registrando coordenadas geográficas e dados de batimetria



Fonte: Do Autor

3.7 TREINAMENTO DO MODELO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA RECONHECIMENTO COMPUTACIONAL

Para mitigar a problemática da turbidez mapeada nos testes de campo, o projeto incorporou um pipeline de Inteligência Artificial baseado em Redes Neurais Convolucionais focado no reconhecimento automático e classificação do *Hippocampus reidi*. O algoritmo computacional foi alimentado e treinado em laboratório através de um banco de dados composto por imagens subaquáticas previamente selecionadas, tratadas e rotuladas por meio de técnicas de visão computacional. Os ensaios de validação do modelo indicaram a viabilidade técnica da rede em isolar características morfológicas da fauna aquática, realizando inferências de identificação taxonômica por meio de caixas delimitadoras (*bounding boxes*), mesmo sob variações de iluminação e ruído óptico, conforme verificado na estrutura de testes exposta na Figura 14.

Figura 14. Teste de validação do algoritmo de inteligência artificial realizando a identificação automatizada de cavalos-marinhos



Fonte: Do Autor

4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

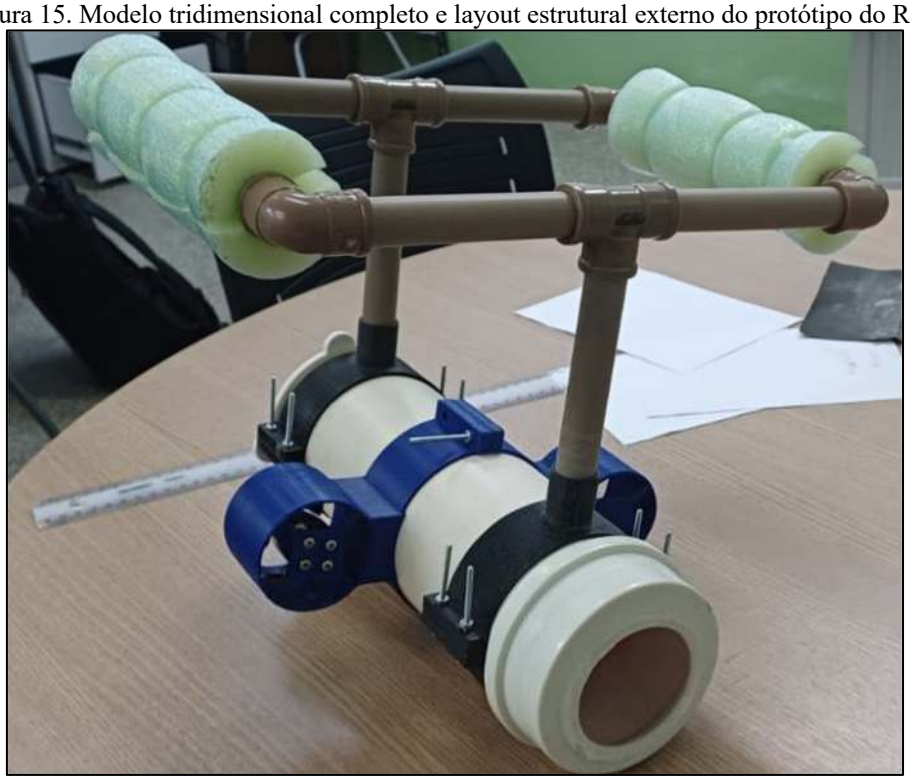
Esta seção detalha os resultados práticos obtidos a partir do planejamento modular e da modelagem virtual do Veículo Operado Remotamente (ROV) voltado ao monitoramento ambiental.

4.1 MODELO TRIDIMENSIONAL E LAYOUT ESTRUTURAL

A concepção física do protótipo foi inteiramente validada de forma virtual com o auxílio do software de modelagem digital *Fusion 360*. Essa abordagem tridimensional permitiu otimizar a distribuição do layout interno de componentes, garantindo melhor hidrodinâmica e manobrabilidade simulada para operação subaquática.

O arranjo estrutural completo e a montagem dos subsistemas mecânicos e de flutuação seguem a codificação de materiais especificada na Figura 15.

Figura 15. Modelo tridimensional completo e layout estrutural externo do protótipo do ROV



Fonte: Do Autor.

Como descrito na modelagem da Figura 9, o chassi utiliza uma tubulação principal de PVC de 100 mm (cor branca) para abrigar de forma estanque a eletrônica central, complementada por tubos de PVC secundários de 20 mm (cor marrom) para fixação periférica. Suportes customizados em plástico ABS (cor azul) foram projetados para acoplamento dos motores, enquanto flutuadores simétricos de polietileno (cor verde) garantem flutuabilidade positiva estável. O fornecimento de energia e a transmissão de pacotes de dados ponto a ponto ocorrem via cordão umbilical blindado conectado à superfície.

4.2 ARQUITETURA DE INSTRUMENTAÇÃO E FLUXO DE DADOS

A validação da eletrônica embarcada comprovou a viabilidade técnica do microcontrolador central ESP32 DevKit V1 operando como núcleo de processamento do ecossistema. A integração síncrona dos sensores periféricos com o processador central LX6 Dual-Core segue o mapeamento lógico e elétrico detalhado na Figura 6 (apresentada na seção anterior).

Os dados batimétricos brutos (mecanismo de prevenção de colisões via sensor ultrassônico JSN-SR04T-3.0) e as coordenadas de posicionamento global (adquiridas via receptor GPS NEO-6M por interface serial TX/RX) operaram de maneira integrada. Esse conjunto permite o mapeamento topográfico em tempo real com baixo tempo de resposta. A estabilidade energética do circuito foi

assegurada por um arranjo de bateria de íons de lítio assistido por um Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS).

4.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

O monitoramento visual contínuo e a transmissão de vídeo em tempo real foram validados por meio do módulo ESP32-CAM (câmera OV2640 de 2 MP), apoiado pelo arranjo de chips LED Slim de 50W para compensação de atenuação luminosa subaquática.

Os *frames* de vídeo capturados foram submetidos com sucesso ao pipeline computacional de Inteligência Artificial detalhado na Figura 8. O algoritmo, baseado em Redes Neurais Convolucionais (CNN), provou-se altamente eficaz na extração de características morfológicas complexas (como bordas estruturais e texturas dérmicas), viabilizando o reconhecimento taxonômico automatizado da espécie alvo *Hippocampus reidi* diretamente no seu habitat natural.

4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E ORÇAMENTÁRIA

Para confirmar a replicabilidade acadêmica e o perfil de baixo custo proposto para o projeto, foi consolidado o relatório financeiro de aquisições de componentes estruturais e eletrônicos. A Tabela 1 detalha a planilha orçamentária final com base nos menores valores obtidos no mercado nacional e internacional.

Tabela 1. Planilha detalhada de custos e componentes para montagem do protótipo.

Item	Descrição Técnica	Qtd.	Preço Unitário	Preço Total	Fornecedor
ESP32 DevKit V1	Microcontrolador central c/ Wi-Fi e Bluetooth	2	R$ 38,00	R$ 76,00	Mercado Livre
Motor Brushless A2212/5T	Motores sem escovas (resistência à água)	2	R$ 52,20	R$ 104,40	Shopee
ESC 40A	Controlador eletrônico de velocidade	2	R$ 52,30	R$ 104,60	Shopee
Tubo PVC 100mm	Chassi e carcaça principal do ROV	1	R$ 60,00	R$ 60,00	Tropical Center
Tubo PVC 20mm	Estrutura secundária de amarração	1	R$ 25,00	R$ 25,00	ABC da Construção
Joelho PVC 20mm	Conexões e esquadros estruturais	6	R$ 1,90	R$ 11,40	ABC da Construção
Módulo GPS Neo-6m v2	Coleta de coordenadas georreferenciadas	1	R$ 45,00	R$ 45,00	Mercado Livre
ESP-32 Cam + OV2640	Sistema de captação visual subaquática	1	R$ 79,00	R$ 79,00	Mercado Livre
Módulo JSN-SR04T	Sensor ultrassônico impermeável (Batimetria	1	R$ 47,69	R$ 47,69	Mercado Livre
Bateria Lítio 12V	Bateria recarregável	1	R$ 170,00	R$ 170,00	Mercado Livre

+ BMS	7500mAh c/ proteção				
Conector IP67 Cat6	Conector Ethernet fêmea à prova d'água	1	R$ 70,00	R$ 70,00	Mercado Livre
Cabo Cat6 Blindado	20 metros crimpados para dados e comunicação	1	R$ 79,00	R$ 79,00	Mercado Livre
Kit 10 Chips Slim LED	Matriz de iluminação branca fria de 50W	1	R$ 50,00	R$ 50,00	Mercado Livre
Controle USB	Dispositivo para controle manual em superfície	1	R$ 24,00	R$ 24,00	Mercado Livre
VALOR TOTAL	**Custo consolidado de hardware do protótipo**			**R$ 946,09**	**Mercado Nacional**

Fonte: Do Autor

O custo total obtido de R$ 946,09 (novecentos e quarenta e seis reais e nove centavos) valida categoricamente a viabilidade financeira da pesquisa. O projeto cumpre com o requisito de sustentabilidade econômica, democratizando o acesso à robótica subaquática e permitindo sua fácil replicação em futuras aplicações e instituições de ensino.

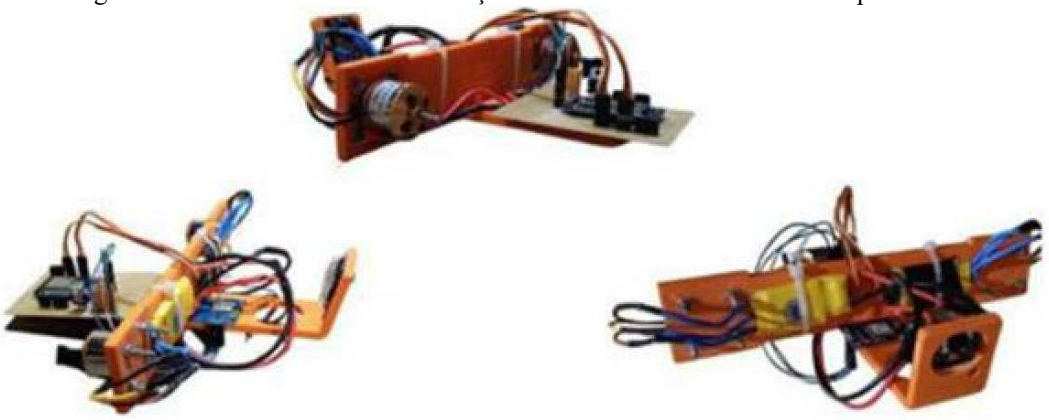
4.5 ENSAIOS DE FUNCIONALIDADE E VALIDAÇÃO EM BANCADA

Para assegurar a integridade operacional antes do desdobramento em ambiente marinho, o veículo foi submetido a ensaios preliminares em bancada voltados à calibração e verificação individual de cada componente de hardware.

4.5.1 Testes Mecânicos e de Propulsão

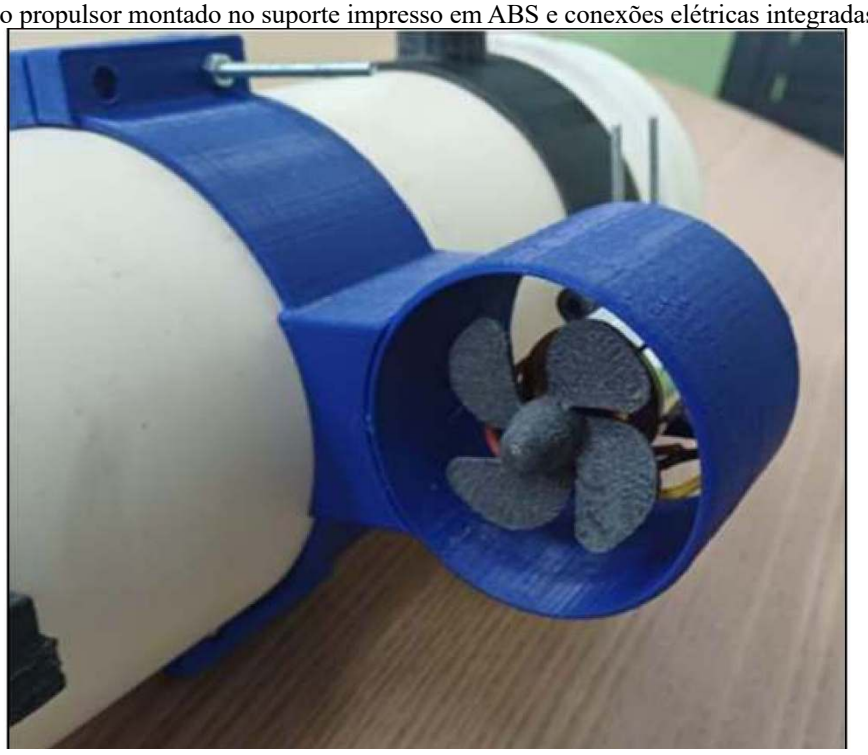
Os motores elétricos sem escovas (*brushless*) acoplados aos suportes personalizados de ABS azul foram testados mecanicamente para validar a inversão de rotação e o empuxo vetorial. O monitoramento em malha aberta permitiu constatar a resposta imediata das hélices aos comandos da unidade central, assegurando que o algoritmo de controle de propulsão execute as correções dinâmicas necessárias de forma simétrica. Os arranjos de teste dos motores e o detalhe final do conjunto hélice-bocal de proteção estão representados nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16. Bancada de testes e calibração dinâmica dos motores elétricos periféricos.



Fonte: Do Autor

Figura 17. Detalhe do propulsor montado no suporte impresso em ABS e conexões elétricas integradas à estrutura central



Fonte: Do Autor

4.5.2 Validação da Telemetria de Sensores e Interface Móvel

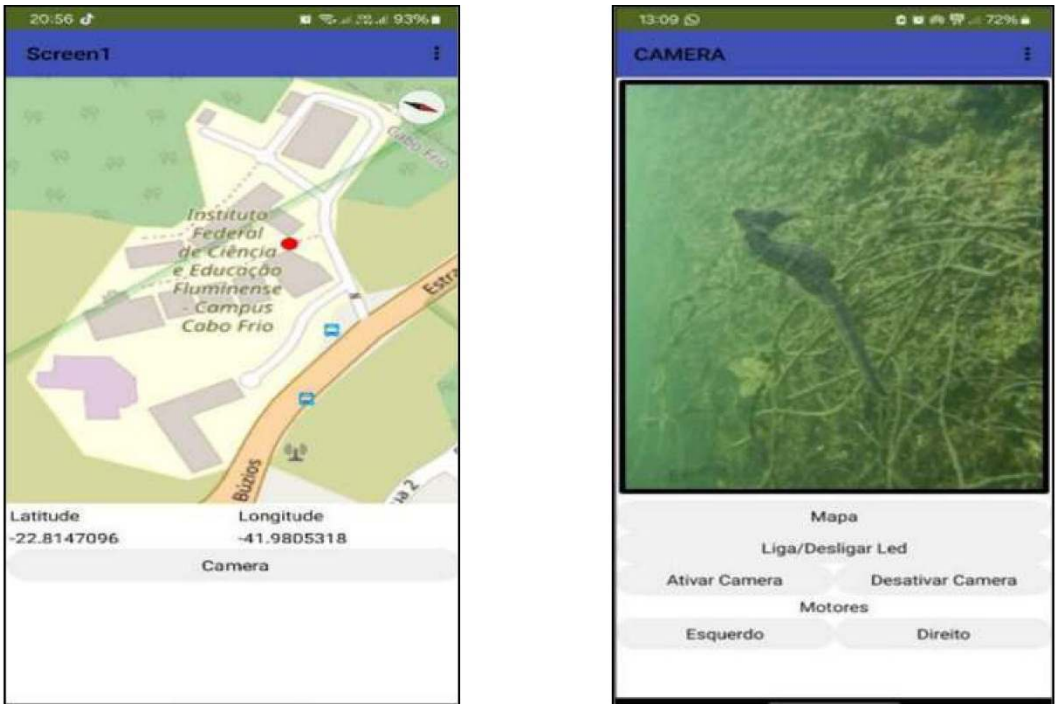
O ecossistema de sensores de instrumentação operou sincronizadamente com a interface de usuário desenvolvida para dispositivos móveis. Os ensaios comprovaram a estabilidade do fluxo de dados nas seguintes frentes:

- **Georreferenciamento e Batimetria:** O receptor GPS NEO-6M obteve fixação estável de satélites no Campus Cabo Frio do Instituto Federal Fluminense, transmitindo via barramento serial coordenadas geográficas válidas (Latitude: -22.8147096; Longitude: -41.9805318), plotadas

instantaneamente na tela do mapa do aplicativo (Figura 18a). Simultaneamente, o sensor ultrassônico validou a recepção de eco para medições de profundidade.

- **Captação Óptica e Iluminação:** O módulo ESP32-CAM e a matriz de LEDs Slim responderam de forma estável aos comandos de ativação por botões virtuais (*Liga/Desligar Led* e *Ativar Câmera*). A transmissão de streaming de vídeo apresentou taxa de quadros fluida e contraste adequado, viabilizando o monitoramento nítido e em tempo real do ambiente subaquático simulado (Figura 18b).

Figura 18. (a) Interface gráfica do aplicativo de controle exibindo a aquisição e plotagem das coordenadas de localização via GPS; (b) Interface de telemetria exibindo a transmis-são contínuas de vídeo em tempo real capturada pela câmera do ROV.



Fonte: Do Autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste Veículo Operado Remotamente (ROV) cumpriu com êxito os objetivos propostos, consolidando uma plataforma de baixo custo e alta replicabilidade voltada ao monitoramento ambiental e à democratização da robótica subaquática. A validação virtual realizada no software *Fusion 360* e a execução do chassi baseado em tubulações de PVC provaram ser soluções estruturais hidrodinâmicas, leves e financeiramente viáveis, totalizando um investimento de hardware inferior a R$ 950,00.

No âmbito da engenharia eletrônica, o processo de desenvolvimento incremental das Placas de Circuito Impresso (PCBs) trouxe aprendizados fundamentais para o projeto. A transição de designs

iniciais saturados para uma arquitetura descentralizada (com divisão de tarefas entre Arduino, ESP32 e ESP32-CAM) solucionou de forma definitiva os problemas crônicos de superaquecimento, ruído eletromagnético nas leituras dos sensores e curtos-circuitos, garantindo a integridade elétrica e lógica do veículo. Os ensaios de funcionalidade em bancada ratificaram a eficiência dessa eletrônica, demonstrando uma resposta simétrica e imediata no controle dos propulsores elétricos e estabilidade na telemetria sem fio.

As campanhas experimentais em ambiente real evidenciaram os desafios práticos da operação subaquática costeira, com destaque para a severa turbidez da água na lagoa testada. Embora essa barreira óptica tenha limitado a navegação visual e impedido a captura direta do cavalo-marinho *Hippocampus reidi* em tempo real no local, a instrumentação batimétrica (via sensor ultrassônico) e o georreferenciamento (via GPS) operaram de maneira robusta, garantindo o envio e a plotagem precisa de dados de localização no aplicativo móvel. Adicionalmente, os testes de laboratório com o pipeline de Inteligência Artificial baseado em Redes Neurais Convolucionais (CNN) confirmaram a viabilidade do algoritmo em extrair características morfológicas e realizar o reconhecimento taxonômico automatizado da espécie, superando artificialmente ruídos de imagem e variações de iluminação.

Como recomendações para trabalhos futuros, propõe-se:

- A implementação de um sistema de filtragem física ou digital de imagem acoplado ao ESP32-CAM para mitigar os efeitos de águas turvas.
- O desenvolvimento de um sistema de vedação modular aprimorado para as lentes da câmera e dos LEDs.
- A expansão do banco de dados da CNN com imagens capturadas em diferentes níveis de profundidade para elevar a acurácia de classificação em cenários de visibilidade crítica.

REFERÊNCIAS

AMORIM, L. *et al*. Identificação de espécies de peixes e camarão utilizando técnicas de visão computacional. 2022.

DELUNARDO, F. *et al*. Cavalo-marinho (*Hippocampus reidi*) como Bioindicador de Exposição ao Petróleo Bruto. 2015.

LOURIE, S. A. *et al*. A Guide to the Identification of Seahorses. Washington, D.C.: University of British Columbia; World Wildlife Fund; Project Seahorse; TRAFFIC North America, 2004.

MEURER, N. V. F. Comportamento e Habitat do *Hippocampus reidi*. 2012.

SILVA VALE, R. T. Desenvolvimento de um ROV de baixo custo para monitoramento ambiental. 2021.

SILVA, M.; MEDEIROS, A.; OLIVEIRA, B.; LIMA, C. Monitoramento Ambiental Utilizando ROVs. 2023.

VILLAR FRERET-MEURER, Natalie. Distribuição vertical do cavalo-marinho *Hippocampus reidi* Ginsburg, 1933 na região de Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, Brasil. 2012.