Desenvolvimento de um veículo subaquático operado remotamente, de baixo custo, para fins educacionais

Leonardo A. Nascimento Fontes* Benicio B. Cruz Stephanie K. Alves De Sousa* Fábio L. Sá Prudente* Phillipe C. Santos***

**Instituto Federal de Sergipe (IFS), Sergipe, Brasil.*
(Autor corresponde e-mail: leonardofontes05@hotmail.com).
***Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, Brasil.*

Abstract: This work presents the development of a prototype ROV (Remotely Operated Vehicle), a remotely operated underwater vehicle, for scientific study and research in the field of underwater robotics. Low-cost and readily available components were used in the elaboration of this project, facilitating its future replication. The physical structure of the vehicle was developed using PVC pipes, reinforcing the idea of using accessible materials, which becomes a distinguishing feature compared to similar works. Open-loop control algorithms were employed for propeller control, enabling coordinated movement of the vehicle in submerged environments.

Resumo: Este trabalho, apresenta o desenvolvimento de um protótipo de ROV (do inglês "Remotely Operadet Vehicle"), um veículo subaquático remotamente operado, para estudo científico e pesquisas no ramo de robótica subaquática. Para a elaboração deste projeto, foram utilizados componentes de baixo custo e de fácil acesso, o que facilitará sua replicação futura. A estrutura física do veículo foi desenvolvida utilizando canos de PVC, reforçando a ideia da utilização de materiais acessíveis, tornando-se um diferencial em relação a trabalhos semelhantes. Algoritmos de controle em malha aberta foram utilizados para o controle dos propulsores, para a execução de movimentos coordenados do veículo em ambiente submerso.

Keywords: Robotics; Vehicle; Control; ROV; Underwater..
Palavras-chaves: Robótica; Veículo; Controle; ROV; Subaquática.

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa e o desenvolvimento de veículos subaquáticos controlados remotamente (ROVs) têm sido fundamentais para a exploração dos ambientes submersos e para a expansão do conhecimento científico. No ramo de pequenos veículos para inspeção e monitoramento, destacam-se veículos como o Fifish (QYSEA, 2024) e o Trident (OpenROV, 2024), conhecidos por equilibrarem tamanho, potência e estabilidade. Porém, mesmo sendo veículos economicamente mais acessíveis em comparação com outros veículos de mesma atividade, seus valores, entre R$ 5.000 e R$ 20.000, tornam-se um empecilho para sua utilização em certos setores de pesquisa científica em robótica subaquática com orçamento limitado.

Nesse contexto, diante dos altos custos envolvidos, este projeto foi concebido com o objetivo de apresentar o desenvolvimento e a construção de um Mini ROV de baixo custo, em comparação com veículos da mesma categoria, e que fosse de fácil replicação, visando incentivar a colaboração e a troca de conhecimentos entre instituições acadêmicas.

⋆ Agradecimentos a (FAPITEC/SE) pelo aporte financeiro fornecido para a realização desse trabalho.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico apresenta os materiais e as opções de estrutura para o desenvolvimento do protótipo do veículo. Além disso, é detalhado a escolha adequada dos materiais e da estrutura é para garantia da funcionalidade, robustez e confiabilidade do veículo em seu ambiente de operação.

2.1 Estrutura do veículo

Para o desenvolvimento do frame do veículo, optou-se construir uma estrutura aberta, que deixa exposto os componentes internos, como os propulsores e a câmera de monitoramento, o que facilita manutenções e adaptações do protótipo, de acordo com a atividade subaquática desejada. Essa estrutura de ROV é comumente utilizada em pesquisas, explorações subaquáticas e outras aplicações que requerem flexibilidade na configuração do veículo para atender a necessidades específicas.

A estrutura foi inspirada por padrões de projetos anteriores, em que são escolhidas estruturas retangulares para garantir maior estabilidade em ambientes submersos Capocci (2017), conforme ilustrado na Fig.1. Para a elaboração da estrutura mecânica resistente, porém leve, o material utilizado foi o PVC, um polímero plástico utilizado devido à sua versatilidade. Composto principalmente por carbono,

hidrogênio e cloro, o PVC exibe propriedades mecânicas que variam de flexíveis a rígidas, resistentes à abrasão e a impactos.

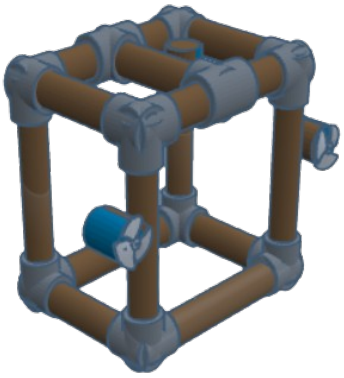

Figura 1. Modelo 3D da estrutura do veículo: Arquitetura open-frame.

O veículo foi projetado com a inclusão de lastro na parte inferior para o seu afundamento, conforme visualizado na Fig. 2. Foram construídos tubos preenchidos com pedras, posicionados na zona inferior do veículo, para o aumento da sua massa, para o afundamento controlado.

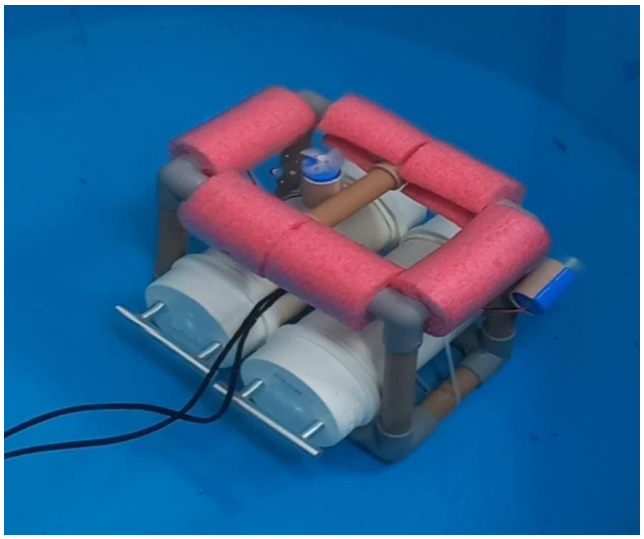

Figura 2. Primeira versão do protótipo: Lastros na parte inferior do veículo.

Com a adição de lastro na parte inferior do veículo, o aumento da massa total, resultou em um maior arrasto hidrodinâmico, afetando diretamente as movimentações verticais. Dessa forma, optou-se por retirar esse lastro, deixando o veículo totalmente vazado, o que reduziu seu peso. Com o objetivo de alcançar a flutuabilidade positiva desejada neste projeto, a estrutura do veículo foi modificada através da perfuração do frame, que permitiu a entrada de água na estrutura, aumentando a sua densidade, possibitando a retirada do lastro,o que resultou na diminuição do peso total do veículo. Além disso, foram incorporados materiais flutuantes, feitos de polietileno, na parte superior do veículo para a estabilização do protótipo. Essa abordagem permitiu ajustes na densidade total do ROV, o que garantiu que ele permanecesse estável e equilibrado na água. Na Fig. 3, está ilustrada a estrutura do veículo com essas correções.

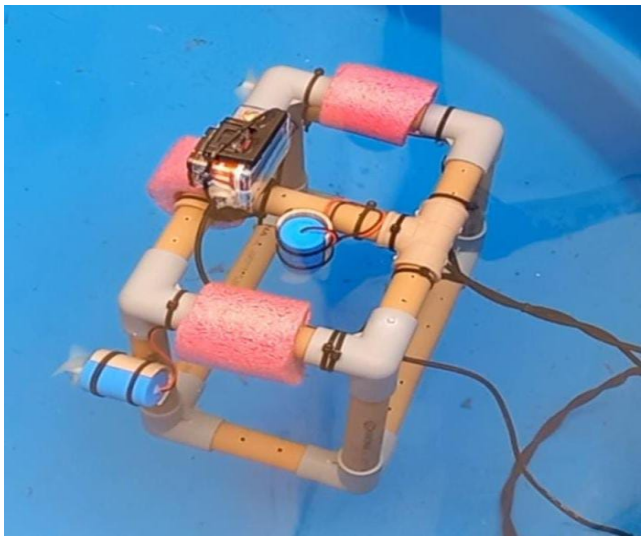

Figura 3. Segunda versão do protótipo: Adição de furos na estrutura, permitindo a retirada dos lastros.

Em um veículo subaquático com dois propulsores fixos horizontalmente, a movimentação é realizada através da variação da velocidade de cada propulsor, como citado em Cornerstonerobotics (2017). Se ambos os propulsores girarem na mesma direção, o veículo se moverá para frente ou para trás, dependendo da direção da rotação. Se os propulsores girarem em direções opostas, o veículo girará em torno do seu próprio eixo. A combinação de diferentes velocidades de rotação dos propulsores permite que o veículo se mova em qualquer direção.

2.2 Sistema de controle e comandos

Os componentes elétricos e a alimentação dos propulsores foram elaborados para atuar fora do veículo, com o controle, alimentação e monitoramento através do seu cordão umbilical, diferenciando-se de trabalhos semelhantes encontrados na revisão literária de veículos subaquáticos remotamente operáveis, como os apresentados no manual de ROVs (The ROV Manual) Christ (2013). Para a realização do controle horizontal e vertical do veículo, foram utilizados dois módulos joysticks, responsáveis pelas ações de comando do veículo. Através do diagrama de blocos ilustrado na Fig 4, é possível visualizar a malha de controle desenvolvida.

Abaixo, são listados como cada componente atua sequencialmente nesta malha de controle:

(1) **Joysticks**: Os joysticks são dispositivos de entrada que permitem ao usuário controlar um parâmetro ou coordenada de maneira contínua. Eles geram sinais analógicos correspondentes à posição eixos X e Y do joystick que enviam sinais analógicos de 0 a 5 V;
(2) **Microcontrolador**: Os sinais analógicos dos joysticks são enviados para o microcontrolador. Ele lê os sinais

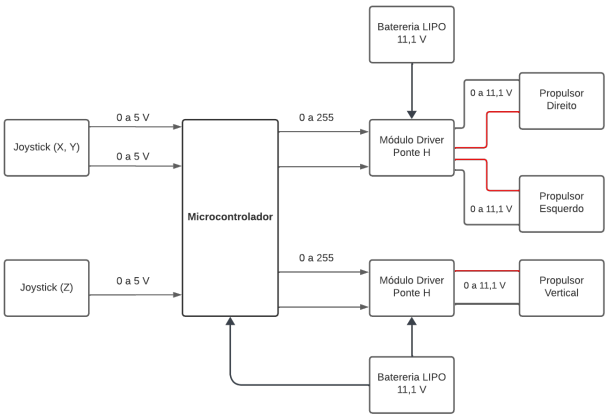

Figura 4. Diagrama de blocos: Malha de controle desenvolvida. .

analógicos dos joysticks e os converte em sinais digitais através da conversão analógica-digital (ADC), transformando um sinal analógico, como uma tensão, em um sinal digital;

(3) **Modúlo Driver Ponte H**: O microcontrolador, em seguida, envia os sinais digitais para a Ponte H, um circuito eletrônico contendo 4 transistores, que permite a um propulsor elétrico girar em qualquer direção. Além disso, a Ponte H possibilita o controle da velocidade do motor por meio da modulação da largura do pulso (PWM);

(4) **Propulsores**: Os propulsores elétricos são dispositivos que convertem energia elétrica em movimento, gerando empuxo para deslocar o veículo na água.

Além dos componentes que constituem a malha de controle, buscou-se a utilização de materiais que se enquadrassem como um protótipo de baixo custo, os quais estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Materiais e Custos para a elaboração do protótipo.

Materiais	Quantidade	Unid R$	Total R$
Câmera Atrio 720p	1	181,00	181,00
Fonte 12 V 2 A	1	12,00	12,00
Motor Thruster	3	53,10	159,30
Arduino Mega 2560	1	63,00	63,00
Módulo Joystick	2	11,00	22,00
Cotovelo 3 vias	8	2	16,00
Driver Motor	2	14,72	29,44
T de PVC 3/4	2	2	4,00
Tubulação PVC 3/4	2 m	4,5	9,00
Cabo Ethernet 8 vias	6 m	2,50	15,00
	TOTAL		510,74

3. ALGORITMOS DE CONTROLE EM MALHA ABERTA

Os robôs terrestres e aquáticos compartilham semelhanças em seus modelos cinemáticos básicos, utilizando coordenadas espaciais para definir posição, velocidade e aceleração, além de seguir trajetórias e realizar deslocamentos em resposta a comandos. No entanto, as diferenças fundamentais surgem nas características de locomoção e nas restrições ambientais. Enquanto os robôs terrestres movem-se em superfícies sólidas, enfrentando desafios como atrito e inclinação do terreno, os robôs subaquáticos, como ROVs, operam em ambientes aquáticos, onde a água introduz resistências distintas e a flutuabilidade e densidade tornam-se fatores cruciais. A cinemática de um ROV está diretamente relacionada ao número e à colocação dos propulsores, os quais definirão seu movimento e desempenho. Nesse protótipo, dois propulsores são posicionados paralelamente nas laterais do veiculo, para o deslocamento horizontal, o qual é descrito considerando a combinação da contribuição média dos dois propulsores fixos, resultando em uma velocidade linear. Enquanto um terceiro propulsor, um propulsor é posicionado verticalmente para o movimento vertical, para o controle da submersão e a imerção do veículo.

A malha de controle do veículo foi desenvolvida em malha aberta, a qual se caracteriza pela ausência de feedback do estado real dos propulsores, sendo executado um controle direto que segue as instruções de entrada fornecidas pelo usuário através dos joysticks. Ao realizar movimentos lineares, seja no eixo (X) ou no (Y) do joystick, é empregada uma ação de controle proporcional para o controle da velocidade e do sentido dos propulsores

3.1 Ação de controle aplicada para os propulsores laterais

Para a realização do controle das movimentações horizontais, foi realizado um mapeamento dos valores fornecidos em todos os pontos do joystick, como ilustrado na Fig 5. Através desse mapeamento mencionado, foi aplicada uma ação de controle através de uma combinação linear entre os valores de entrada dos eixos (X) e (Y) do joystick, por meio dos sinais analógicos provenientes, através de um algoritmo proporcional, Esses valores analógicos são combinados através de operações algébricas baseadas nas variações nos eixos do joystick.

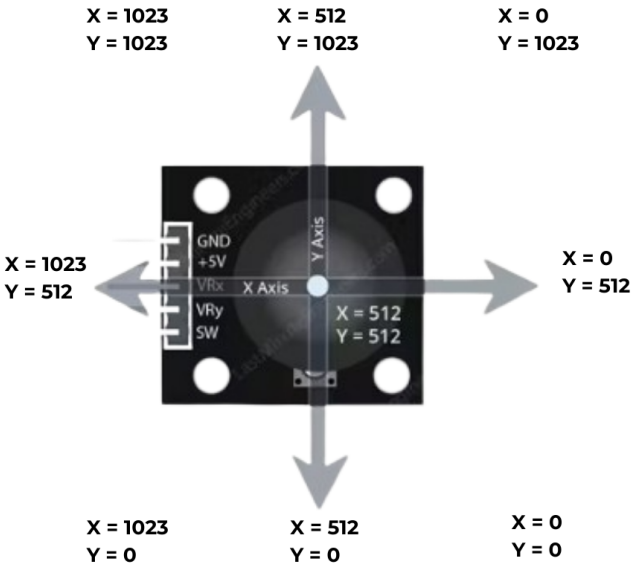

Figura 5. Mapeamento analógico: Sinais provenientes em ambos os eixos do joystick.

O controle da direção e das velocidades dos propulsores direito e esquerdo foi realizado com base na posição do joystick, por meio de sua variável de posição vertical (Y) e

horizontal (X), que envia sinais que variam de (0) a (1023), ambas com variação em torno de um ponto central (512). Com base na Equação 1 é determinada a velocidade e o sentido do motor direito.

$$MD = K \cdot (Y - 512) + K \cdot (X - 512) \tag{1}$$

A mesma lógica segue para a equação do motor esquerdo, porém com a constante K de forma negativa no segundo termo, para que de acordo com a movimentação do joystick seja possível controlar os propulsores com as mesmas velocidades, porém em sentidos opostos, essa relação pode ser visualizada através da Equação 2.

$$ME = K \cdot (Y - 512) - K \cdot (X - 512) \tag{2}$$

A constante K é utilizada nas equações dos propulsores direito e esquerdo para garantir que a amplitude dos valores esteja dentro de um intervalo manejável do sinal PWM, que varia de 0 a 255. Através da Equação 3, é realizado o cálculo de um fator de escala, onde (512) representa metade do valor máximo possível (1023).

$$k = \frac{512}{1023} = 0,5 \tag{3}$$

Assim, ao mover o joystick, é possível controlar as velocidades e os sentidos de rotação de cada propulsor, o que possibilita assim realizar movimentos combinatórios entre ambos os propulsores ou apenas um deles, o que possibilita ao veículo a capacidade de realizar diversos tipos de movimentos.

3.2 Ação de controle aplicada para o propulsor central

A ação de controle proporcional para o controle da profundidade do veículo é adaptada para proporcionar uma operação menos suscetível a oscilações no joystick, diminuindo a intervenção constante do operador. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo para permitir a regulação da velocidade e do tempo de ação e retorno do propulsor à sua inércia. O sistema de controle do propulsor central adota uma ação de controle proporcional que recebe valores analógicos de entrada do segundo módulo joystick, utilizando o eixo (X), conforme ilustrado na Figura 5. Esses valores analógicos são processados através de uma função proporcional.

Inicialmente, é realizado o ajuste do valor do propulsor central, MC, com base na entrada analógica do eixo denominado (Z), para evitar conflitos com algum termo mencionado no primeiro joystick. O termo $(Z - 512)$ centraliza a entrada (Z) em torno de 0, com uma variação de 0 a 1023. Este método incorporado ao controle pode ser representado pela Equação 4.

$$MC = (Z - 512) \cdot K_p \tag{4}$$

Nesta equação, MC representa o valor atualizado do propulsor central, K_p é uma constante proporcional que controla a agressividade do ajuste, e $(Z - 512)$ é a diferença entre a entrada atual e o valor centralizado do eixo Z. A multiplicação pelo ganho proporcional K_p ajusta a magnitude do ajuste realizado pelo controlador proporcional, proporcionando assim um controle mais preciso e suave da profundidade do veículo.

4. PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

Após uma série de testes, optou-se por separar o circuito e a alimentação do veículo, posicionando-os fora da estrutura submersa. Essa decisão proporcionou maior flexibilidade operacional, o que facilitou manutenções e atualizações no sistema de controle e comandos.

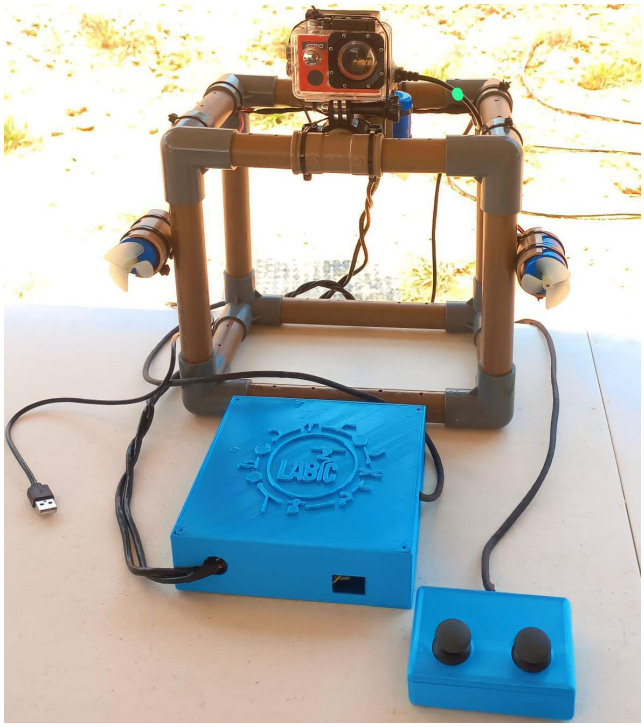

Figura 6. Versão final do protótipo: Sistema de controle e comandos ligados ao veículo através do cordão umbilical.

Para garantir a flutuabilidade positiva do veículo, foram realizadas adaptações estruturais na carcaça do veículo, criando furos estrategicamente posicionados para permitir a entrada controlada de água, facilitando sua emersão. Além disso, após o acoplamento da câmera de monitoramento, viu-se necessário utilizar flutuadores na parte superior do protótipo, para mantê-lo com a flutuabilidade desejada , ideal para movimentações verticais. Na Fig 6, é possível visualizar o protótipo desenvolvido, com seu painel de controle externo, cabo umbilical de controle e alimentação, e sua estrutura de PVC, incluindo os propulsores e a câmera de monitoramento. Na Tabela 2, estão destacadas as informações básicas do ROV, antes e depois da retirada do lastro

4.1 Sistema de controle e de monitoramento

Após a elaboração do protótipo com um painel de controle e sistema de alimentação externo, conectados via cordão umbilical com o veículo, foram confeccionadas estruturas para portar de forma segura os componentes eletrônicos e

Tabela 2. Informações do veículo com lastro e sem lastro

Informações	Com lastro	Sem lastro
Comprimento	28 cm	28 cm
Altura	25 cm	25 cm
Largura	30 cm	18 cm
Peso	6,70 kg	1,70 kg

as baterias, além de uma case para os módulos de joysticks, vistos na Figuras 7. As estruturas foram elaboradas através de modelagem 3D utilizando material polimérico.

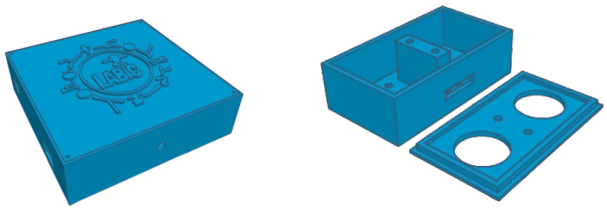

Figura 7. Modelo 3D do painel de controle

O sistema de monitoramento é essencial para o controle de um ROV, pois o controle é realizado fora do ambiente submerso e o operador necessita ter uma visão clara em tempo real do que está acontecendo debaixo d'água. Para isso, foi acoplacada uma câmera subaquática, cuja alimentação e transmissão de dados foram realizadas através do cabo umbilical do veículo, conforme pode ser visto na Fig. 8. Por meio de um monitor adjunto ao painel de controle, foi possível operar o veículo com base nas imagens fornecidas por essa câmera. Além disso, o sistema permitiu a realização de gravações e fotos com alta qualidade de resolução.

Figura 8. Sistema de monitoramento: Através da câmera acoplada ao veículo é possível realizar monitoramento em tempo real.

5. RESULTADOS

5.1 Resposta da ação de controle para os propulsores horizontais

O funcionamento dos propulsores laterais envolve a aplicação de uma ação de controle linear, que combina os valores provenientes dos eixos (X) e (Y) do joystick, por meio dos sinais analógicos recebidos através de um algoritmo proporcional. Esses valores analógicos são combinados linearmente por meio de operações algébricas baseadas nas variações nos eixos do joystick. Este processo permite que os propulsores laterais sejam controlados de maneira eficiente, podendo funcionar em conjunto ou separados, com as mesmas velocidades, velocidades diferentes, sentidos iguais ou opostos, de acordo com as movimentações no joystick realizadas pelo operador. Através da ilustração da Figura 9, é possível visualizar como as movimentações nos eixos do joystick contribuem com a velocidade e sentido de rotação dos propulsores.

Nesse gráfico, estão retratados os sinais analógicos de entrada, provenientes das movimentações nos eixos (X) e (Y) do joystick, nas cores amarelas e roxas, respectivamente, com a faixa de valores entre 0 e 1023, tendo seu valor central representando a inatividade, em aproximadamente 512. Nas cores vermelha e azul, são retratados os valores digitais de saída PWM dos motores direito e esquerdo, os quais, de acordo com os sinais de entrada recebidos, podem se sobrepor ou estar em sentidos opostos, o que se justifica pelo algoritmo proporcional desenvolvido para o controle simultâneo ou individual dos propulsores.

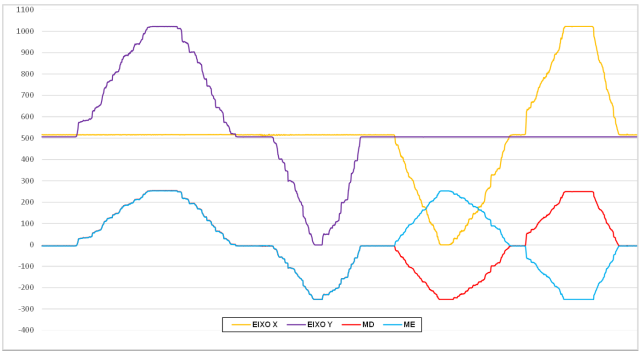

Figura 9. Respostas da ação de controle linear aplicada.

5.2 Resposta da ação de controle do propulsor central

A ação de controle proporcional também foi utilizada para o controle do propulsor central, sendo adaptada para um controle mais suave da velocidade do propulsor central. Através dos valores fornecidos por apenas um eixo de um joystick, responsável pelos movimentos verticais. Nesse sistema, inicialmente, foi realizada uma ação proporcional através dos valores analógicos fornecidos pelo joystick, multiplicados por um ganho proporcional, responsável por determinar a velocidade com que o sistema irá atuar. Essa equação foi desenvolvida para atuar de forma atenuante, para garantir que o sistema retorne após disturbios de controle aumente indefinidamente. No gráfico ilustrado na Figura 10, é possível visualizar os sinais analógicos de entrada, provenientes das movimentações no joystick para submersão e emersão do veículo, na cor (Azul). Em (Vermelho), os valores de saída, retratados por curvas dos valores PWM. Este gráfico, com semelhança a um gráfico exponencial, tem essa similaridade porque a variável de controle está sendo multiplicada simultaneamente pelo ganho proporcional atenuante, o que acarreta nessa curvatura "forçada". Essa abordagem proporciona um controle

mais preciso aos valores de entrada. Além disso, é posspviel visualizar os valores de saturação, destacados quando os valores atingem o máximo (1023) e o mínimo (0) dos sinais analógicos de entrada.

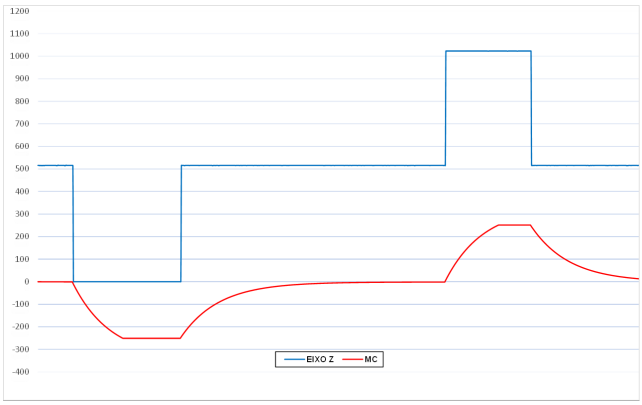

Figura 10. Respostas da ação de controle integrativa aplicada.

Os resultados obtidos se enquadram com o que foi planejado inicialmente, objetivos estes que consistiam na criação de um protótipo de veículo que fosse capaz de realizar movimentos em ambiente subaquático através de controle externo. Além disso, um dos objetivos específicos deste trabalho, foi a disseminação do projeto, impactando positivamente em pesquisa e engenharia e abrindo caminho para estudos subaquáticos mais acessíveis e sustentáveis. Na Fig.11 pode ser visualizada um dos momentos ao longo da realização deste projeto, nos quais o protótipo foi apresentado de formas teóricas e práticas para a sociedade, através de congressos e mostras científicas.

Figura 11. Apresentação do protótipo a comunidade.

6. CONCLUSÕES

Para a realização deste trabalho foi marcado pela revisão da literatura de veículos subaquáticos, com foco na elaboração de um protótipo de ROV de baixo custo, em relação a outros da mesma categoria. Essa análise bibliográfica aprofundada foi fundamental, pois proporcionou uma compreensão detalhada da classificação de veículos subaquáticos e do funcionamento intrínseco de cada elemento, essencial para garantir o desempenho adequado da estrutura como um todo. Para a realização dos testes do referido protótipo, foi elaborado um algoritmo de controle, com uma lógica simplificada, com o objetivo de gerenciar a movimentação dos propulsores elétricos usando módulos driver ponte H e a técnica PWM para o controle da velocidade dos propulsores, com as ações de controle realizadas através de dois módulos joysticks. No repositório disponível em Aprigio (2024), está documentado informações do protótipo, como dimensões do veículo, código de controle e arquivos de mídia.

7. AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos pela realização desse trabalho, são destinados ao Laboratório de Inovação e Criatividade (LABIC) e à Diretoria de Inovação e Criatividade (DINOVE) e pelo espaço, materiais e orientações fornecidos ao longo do desenvolvimento deste projeto. Também, agradece-se à Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE) pelo aporte financeiro fornecido apoio financeiro para a realização da pesquisa. Por fim, é essa gratidão ao Instituto Federal de Sergipe - IFS (Campus Lagarto) pelo suporte estrutural fornecido, bem como por seus funcionários e colaboradores, que desempenharam um papel fundamental no curso desta jornada.

REFERÊNCIAS

Aprigio, L. (2024). Desenvolvimento de um rov-de-baixo-custo. URL `https://github.com/leonardoaprigio/Desenvolvimento-de-um-ROV-de-baixo-custo`.

Capocci, R.e.a. (2017). Inspection-class remotely operated vehicles—a review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5, 13.

Christ, R.D.a.W. (2013). *The ROV manual: a user guide for remotely operated vehicles*. Butterworth-Heinemann.

Cornerstonerobotics (2017). Moving and maneuvering 2 cornerstone electronics technology and robotics iii. *http://cornerstonerobotics.org/curriculum/lessons$_{y}ear3/eriii12_{m}oving_{m}aneuvering2.pdfg$*, 5, 13.

OpenROV (2024). Openrov's trident redefining rov systems and their uses. URL `https://www.deeperblue.com/trident/`.

QYSEA (2024). Fifish v6 expert underwater rov robot with 6k uhd camera remote control undersea detection for viewing, recording, fishing, salvage work (v6 expert m100). URL `https://www.amazon.com.br/FIFISH-visualiza%C3%A7%C3%A3o-Protetor-contra-Impulso/dp/B09TRQWV8R`.