

DESENVOLVIMENTO DE UM VEÍCULO SUBMARINO AUTÔNOMO DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO MANUFATURA ADITIVA

Development of a low-cost autonomous underwater vehicle using additive manufacturing

Emerson Coelho Mendonça¹, Adams Soares Teles², Vilson Berilli Mendes³

Resumo: Este artigo apresenta uma proposta de construção de um veículo submarino autônomo em formato de torpedo, a partir de materiais de baixo custo e de fácil aquisição. A arquitetura de *hardware* é distribuída em módulos que se comunicam por meio de uma rede CAN. Os dispositivos eletrônicos de controle e acionamento dos lemes horizontal e vertical foram acomodados em um casco fabricado por manufatura aditiva (impressão 3D). Os componentes eletrônicos utilizados são comerciais e podem ser facilmente adquiridos no mercado. Os testes preliminares mostram a viabilidade de se obter um veículo com estanqueidade, estabilidade a um custo bem abaixo dos oferecidos no mercado.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Veículo submarino autônomo. Baixo custo.

Abstract: This article presents a proposal to build an autonomous underwater vehicle in torpedo shape, from low cost and easy to acquire materials. The hardware architecture is distributed in modules that communicate through a CAN network. The electronic control and drive devices for the horizontal and vertical rudders have been accommodated in a hull manufactured by additive manufacturing (3D printing). The electronic components used are commercial and can be easily purchased on the market. Preliminary tests have shown the feasibility of obtaining a vehicle that is watertight, stable at a cost well below those offered on the market.

Keywords: Additive manufacturing. Autonomous underwater vehicle. Low cost.

1. Encarregado da Divisão de Sistemas Inerciais - Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: emerson.coelho@marinha.mil.br

2. Ajudante da Divisão de Sistemas Inerciais - Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: adams@marinha.mil.br

3. Ajudante da Divisão de Mecânica Aplicada - Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: vilson.mendes@marinha.mil.br

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, cresce a importância de projetos de desenvolvimento e produção de itens de emprego dual (aplicação civil e militar) (BRASIL, 2017). Nesse contexto, incluem-se os Veículos Submarinos Autônomos (VSA), que possuem diversas aplicações, tais como monitoramento ambiental, coleta de dados oceanográficos, teste de sensores, inspeção de dutos submarinos, levantamento hidrográfico/geológico de recursos submarinos/fluviais, desenvolvimento e validação de projeto e análise do hélice submarino, obtenção de dados hidrodinâmicos e de manobras típicas de embarcações, entre outras.

Em aplicações militares navais, o uso de *Unmanned Surface Vehicle* (USV) e de *Unmanned Underwater Vehicle* (UUV) denota forte vantagem tática, uma vez que representam uma extensão do navio de guerra e podem ser componentes essenciais para o sucesso das missões da força naval, permitindo aumentar a capacidade operacional da frota, estendendo o potencial de vigilância e intervenção (BRASIL, 2015).

Com o avanço da tecnologia, os veículos autônomos têm se tornado capazes de desempenhar atividades cada vez mais diversas, reduzindo a exposição da vida humana às situações de risco e permitindo ampliar o conhecimento acerca do ambiente marinho (DUNBABIN; MARQUES, 2012).

Desde o final da década de 1980, com o surgimento da manufatura aditiva (MA), diversas empresas aeroespaciais têm utilizado sistemas cujas peças são confeccionadas utilizando essa tecnologia. Nos últimos anos, os rápidos avanços da MA levaram à popularização dessa tecnologia, tornando-a acessível não apenas a grandes empresas.

A MA, também conhecida como impressão 3D, consiste na criação de um objeto físico por impressão, camada sobre camada, a partir de um modelo ou desenho digital 3D. Essa tecnologia possui ampla gama de utilizações e é capaz de criar produtos complexos com rapidez e baixo custo, proporcionando desenvolvimento acelerado e reduzindo o ciclo protótipo-produto. A MA oferece flexibilidade aos projetistas na construção de estruturas complexas, cuja fabricação por métodos convencionais é mais difícil e com custos mais elevados.

Embora as impressoras 3D sejam mais utilizadas na fase de prototipagem de produtos, em muitos casos, também é

possível se obter produtos impressos por MA com acabamento e estruturas confiáveis, de modo que possam ser utilizados como produto final.

Khaleed et al. (2019) analisaram o desempenho de uma hélice produzida por impressão 3D em plástico ABS. Ao submeter o produto a uma análise de tensão-deformação utilizando o método dos elementos finitos, concluíram que esse material é viável para a construção da hélice, uma vez que ela se comportou dentro do limite de escoamento durante os ensaios da carga aplicada, equivalente à ação dos esforços gerada pela água atuando sobre o corpo.

Champion, Jamshidi e Joordens (2016) utilizaram peças impressas por MA dentro de uma montagem embarcada em um *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) — em português, VSA — na construção de uma caixa para fixar e armazenar sensores, em que o principal desafio proposto foi assegurar a estanqueidade da caixa de junção durante a execução das manobras pelo veículo.

Entretanto, nota-se que a literatura carece de trabalhos que contemplem a construção de um VSA com peças estruturais confeccionadas integralmente por impressão 3D. Nesse contexto, levando em consideração o surgimento de novas tecnologias, este trabalho apresenta uma proposta inovadora na produção de um VSA com fabricação acelerada e de baixo custo, agregando o conhecimento científico em uma aplicação tecnológica, em área de interesse da Defesa e do Poder Marítimo, sem excluir a possibilidade de aplicação dual em benefício da sociedade.

2. OBJETIVOS

A impressão completa de um casco submarino resistente, estanque e estável utilizando a tecnologia de MA impõe alguns desafios e restrições, sobretudo quanto ao tamanho do casco a ser construído.

Este trabalho teve como objetivo apresentar uma proposta de construção, por meio da MA, de um VSA de modo a ser uma plataforma de teste submarina confiável, de baixo custo, fácil operação e logística de transporte, podendo ser operado por uma única pessoa. A proposta visou ainda subsidiar o desenvolvimento de sistemas inerciais de navegação, sistemas acústicos submarinos, sistemas de transmissão de dados e sistemas de controle e de guiagem.

3. METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas técnicas de modelagem, *softwares* de programação, sensores, equipamentos, impressora 3D e diversos materiais. Os projetos mecânico e eletrônico foram elaborados pela observação de veículos submarinos comerciais e trabalhos publicados na comunidade científica.

4. CONCEPÇÃO MECÂNICA

Este veículo foi inspirado em artefatos existentes no mercado, por exemplo, o VSA REMUS 100, fabricado pela empresa *Hydroid*, uma subsidiária da *Kongsberg Maritime*, conforme pode ser observado na Figura 1.

O protótipo possui casco estanque, sem partes inundadas e é dividido em quatro seções.

A primeira seção possui formato hemisférico, com diâmetro menor de 62 mm e diâmetro maior de 150 mm. Internamente, há uma superfície plana formada pelo tronco,



Figura 1. REMUS 100.

em que está alocado o módulo de navegação e que, futuramente, também facilitará a fixação dos instrumentos e dos sensores. Essa seção possui ainda um orifício que conduz a pressão externa até o sensor de pressão.

Na segunda seção, acomodam-se os módulos de controle de energia e de motores, além das baterias de alimentação.

Na terceira seção, estão localizados quatro servo-motores para controle das superfícies hidrodinâmicas. Cada eixo desses motores possui um selo mecânico estanque.

Por fim, na quarta seção, está localizado o motor de propulsão.

O formato desse protótipo, bastante semelhante a um torpedo moderno, se faz útil para estudos sobre hidrodinâmica e controle de artefatos bélicos com essas características. Nesse sentido, ele pode ser empregado tanto como modelo reduzido para levantamento dos parâmetros hidrodinâmicos desse tipo de armamento quanto como alvo submerso em exercícios navais de guerra submarina, tendo em vista que, em função do seu baixo custo, as perdas seriam minimizadas. As principais medidas do casco montado podem ser observadas na Figura 2.

O projeto mecânico foi modelado utilizando-se o *software* *ONSHAPE*, um *Computer-Aided Design* (CAD) focado principalmente em modelagem tridimensional mecânica. Apesar de ser um *software* livre, ele é usualmente utilizado para *design* de produtos e máquinas em muitas indústrias, incluindo eletrônicos de consumo, dispositivos mecânicos, dispositivos médicos, peças de máquinas e equipamentos

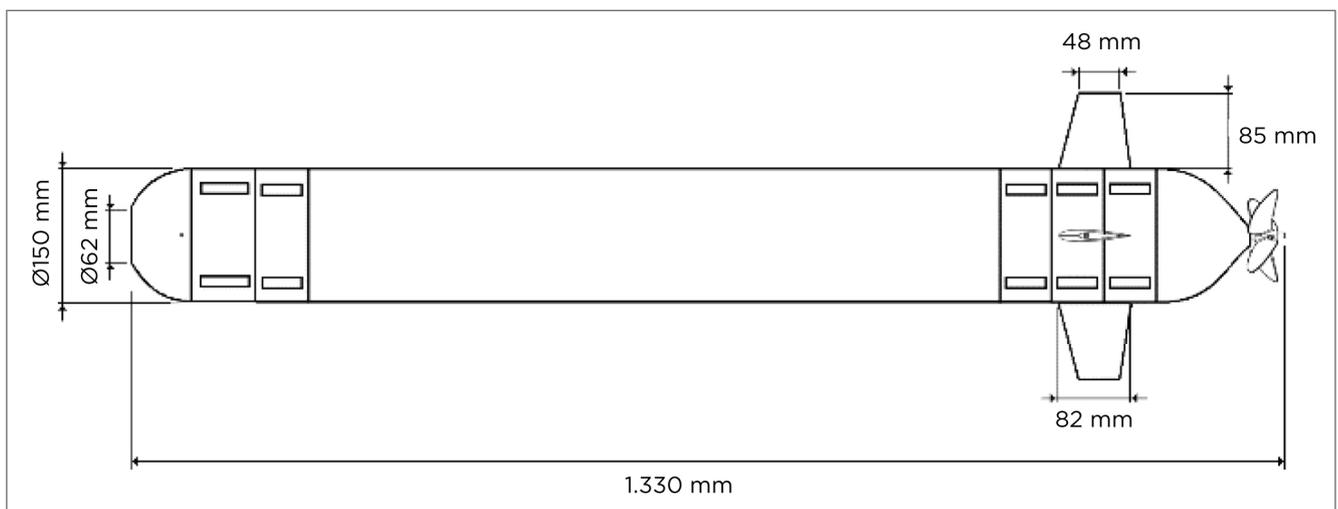


Figura 2. Representação das principais dimensões.

industriais fabricados por impressão 3D. O *software* faz uso extensivo da computação em nuvem.

Todas as seções do casco são unidas por parafusos não corrosivos e anéis de vedação formando um casco inteiramente estanque, coeso e resistente, com comprimento aproximado de 1.400 mm e 160 mm de diâmetro. Na atual configuração, para navegação em meio não salino, o protótipo possui peso total de cerca de 24 kg e fluutuabilidade levemente positiva. Os eixos de rotação das superfícies de controle e da hélice de propulsão possuem selos mecânicos de cerâmica que contribuem com a estanqueidade. Para o ajuste de trim, as baterias são manualmente deslocadas no sentido longitudinal do veículo.

5. CONCEPÇÃO DE SOFTWARE E HARDWARE ELETRÔNICO

O veículo é constituído de uma arquitetura distribuída em três módulos: navegação, comunicação e motores. Esses módulos estão interligados por uma rede CAN, na qual trafega dados e comandos para o VSA. Cada módulo tem como núcleo microcontroladores ARM.

No módulo de navegação, foi instalado um *Raspberry*, computador de placa única (*Single Board Computer*) que se conecta por meio de uma interface serial ao microcontrolador, recebendo

sinais dos sensores de GPS, aceleração, giroscópio, bússola magnética e de pressão. Esse computador também possui ligação direta ao barramento CAN, possibilitando o envio e a recepção de comando e dados provenientes dos outros módulos. Por meio do protocolo de administração remota *Secure Socket Shell* (SSH), é feita a programação desse computador. Mais detalhes técnicos a respeito do *hardware* utilizado podem ser encontrados em Ebyte (2018), Raspberry Pi Foundation (2020) e Silva Junior (2020).

O módulo de energia recebe a alimentação das baterias chumbo-ácidas e faz o controle e a distribuição aos demais módulos. Um *link* rádio possibilita a comunicação com o exterior, podendo enviar e receber comando e dados das missões pré-programadas.

Por fim, os motores das superfícies de controle e propulsão estão ligados ao microcontrolador por acionadores de potência, constituindo o módulo de motores. Esse módulo possui um tacômetro magnético acoplado ao eixo de propulsão.

No diagrama da Figura 3, é possível observar a composição e a arquitetura dos três módulos descritos.

A Figura 4 mostra o veículo parcialmente desmontado, em que é possível observar as quatro seções e os três módulos: navegação, comunicação e acionamento de motores.

Os componentes utilizados na fabricação do veículo são de fácil obtenção no mercado e possuem baixo custo. A estrutura estanque do casco foi construída, em sua maior

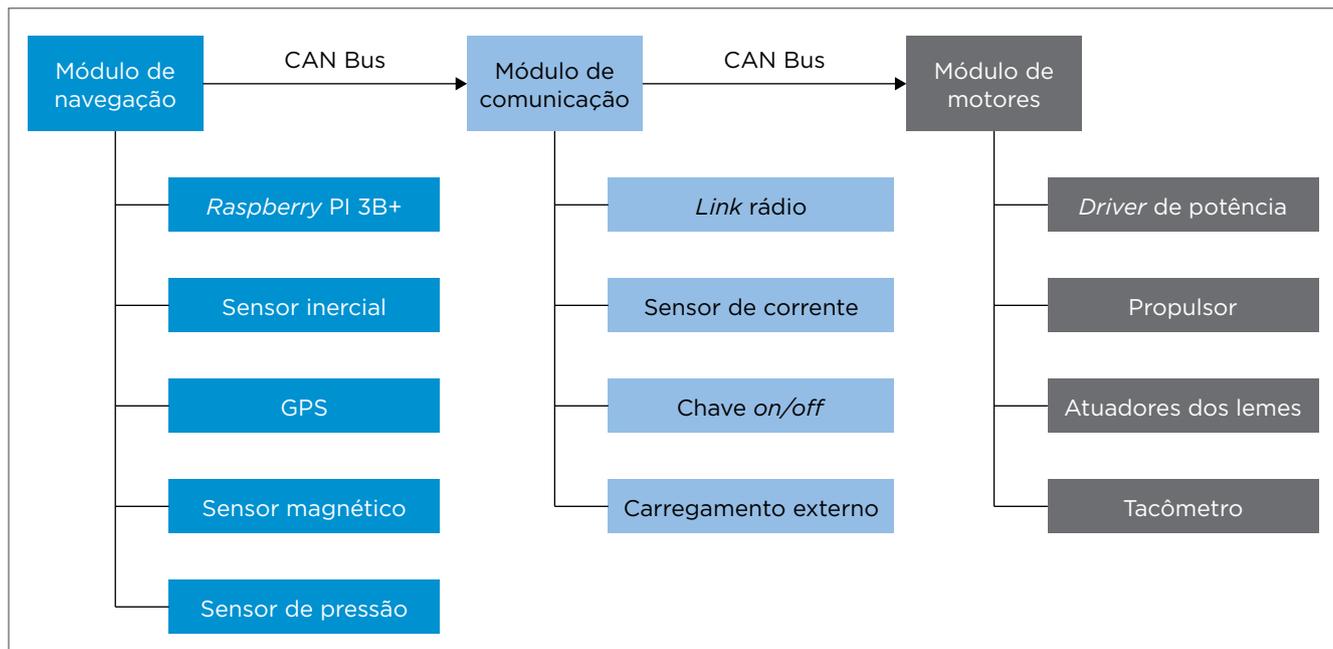


Figura 3. Diagrama de blocos dos módulos de navegação, comunicação e acionamento de motores do veículo.

parte, por meio da MA, na qual foram utilizados filamentos plásticos de *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) e *Polylactic Acid* (PLA).

O sistema de alimentação possui um conjunto de quatro baterias chumbo-ácidas, seladas e recarregáveis com tensão nominal de 12 volts. Esse conjunto de baterias proporciona autonomia de até 3 horas de uso contínuo ao veículo. O carregamento é realizado de forma externa ao casco.

Os comandos e a programação do veículo são realizados por meio de conexão SSH e *link* rádio utilizando a tecnologia LoRa, que permite comunicação a longas distâncias, com consumo mínimo de energia. Esse módulo fornece comunicação *wireless* serial no padrão UART baseado em um chip dedicado.

Na Figura 5, é possível observar tanto a vista externa quanto a vista interna do casco montado, bem como os módulos de navegação, comunicação e acionamento dos motores.

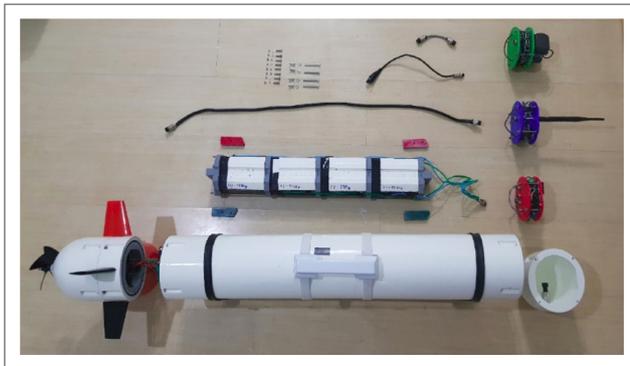


Figura 4. Veículo parcialmente desmontado.

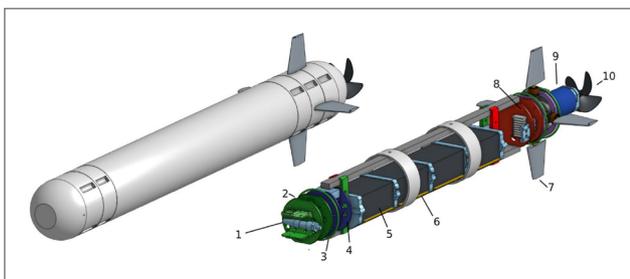


Figura 5. Visões externa e interna ao casco resistente: (1) sensor de pressão; (2) módulo de navegação; (3) anel o-ring; (4) módulo de energia; (5) unidade de bateria; (6) lastro fixo; (7) leme; (8) módulo motores; (9) motor de propulsão; (10) hélice.

6. CONSTRUÇÃO

Para a materialização das seções, foi utilizada a impressora 3D Creality Ender 3, ilustrada na Figura 6, a qual apresenta baixo custo e boa qualidade de impressão. Como essa impressora possui volume útil de $220 \times 220 \times 250$ mm, foi necessário que a concepção mecânica do protótipo fosse constituída de peças cujo volume máximo estivesse dentro do limite útil.

Essa impressora utiliza a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), que se popularizou a partir de 2009 por meio da facilidade na aquisição dos componentes eletrônicos de baixo custo e das licenças *opensource*, viabilizando diversas soluções mecânicas.

Basicamente, essa tecnologia funciona por extrusão do material fundido por meio de um bico aquecido que é montado em uma cabeça móvel. A cabeça extrusora move-se sobre uma placa plana (dimensões x e y), depositando o seu material em um leito de fabricação. Após a conclusão da camada, o bocal aquecido move-se em relação à placa plana (eixo z), formando gradualmente diversas camadas transversais do material.

Em função de o material utilizado apresentar uma temperatura de transição vítrea de aproximadamente 60°C , foi necessário aplicar tinta de cor branca, visando à redução da absorção térmica por radiação.



Figura 6. Creality Ender 3.

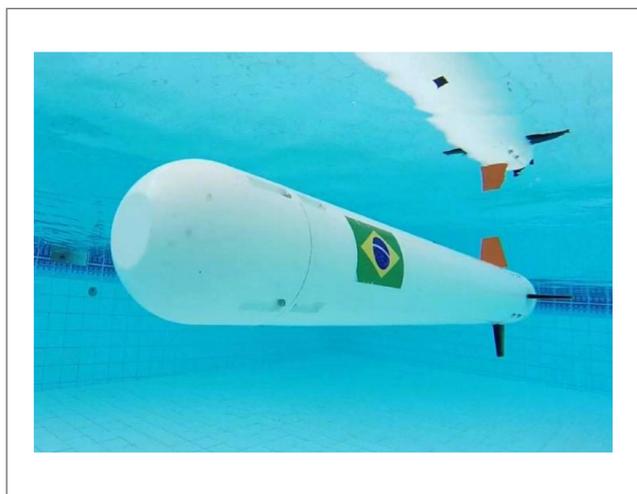


Figura 7. Testes de piscina.

7. ENSAIOS

Os primeiros ensaios foram realizados em uma piscina para testes, conforme ilustrado na Figura 7, para a verificação e a comprovação da estanqueidade do casco. O veículo foi posto manualmente, submerso na água, por um período de uma hora. Decorrido esse tempo, verificou-se que não houve infiltração de água nas juntas, nos eixos rotativos e nas seções do casco, comprovando assim sua estanqueidade.

No segundo momento, o veículo foi submetido a testes para verificar a necessidade de ajustes quanto ao lastro. Uma vez que sua flutuabilidade positiva o impedia de submergir, placas de chumbo foram adicionadas na parte inferior interna do casco de modo a equilibrar e conferir flutuabilidade neutra.

Após a correção na trimagem, diversas manobras foram realizadas e o veículo foi capaz de executá-las tanto no plano vertical quanto no plano horizontal. Os dados coletados durante a execução de uma manobra circular são apresentados na Figura 8.

Observando o primeiro gráfico da Figura 8, é possível constatar que o veículo mantém estabilidade no movimento de rolagem, uma vez que, posteriormente à fase transitória, o ângulo de *Roll* se manteve em torno de 2 a 3°.

Durante a manobra, o veículo iniciou a submersão a partir de $t = 20$ s e, em seguida, retomou a profundidade inicial, conforme pode ser observado no segundo gráfico.

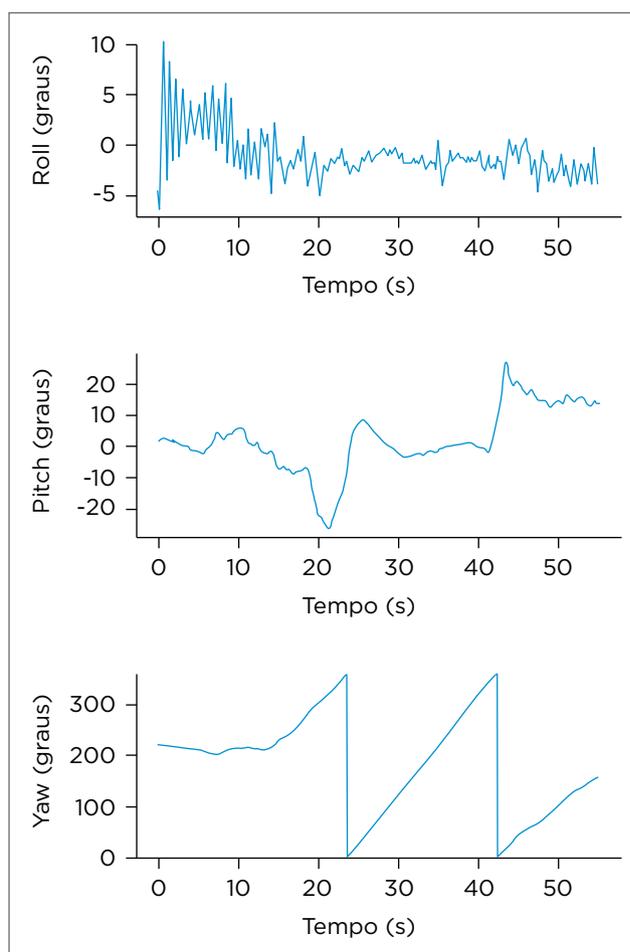


Figura 8. Variação no tempo dos ângulos de *Roll*, *Pitch* e *Yaw* durante teste de trajetória circular.

Por fim, no terceiro gráfico, no qual é ilustrado o ângulo de direção, é possível observar a variação de *Yaw*, bem como a saturação na transição do ângulo 360°/0°.

8. CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados nos testes em laboratório e em piscina, é possível ratificar que o funcionamento do sistema embarcado proposto atente ao propósito do projeto. Os testes também comprovam que o veículo é capaz de executar manobras nos planos vertical e horizontal, ratificando a proposta inicial deste trabalho.

A garantia de se obter um casco estanque e resistente fabricado por MA aponta um futuro promissor e com grandes

possibilidades de diversas aplicações dessa tecnologia, tendo em vista que, por meio de MA, é possível produzir peças com geometrias complexas e custo bem abaixo em relação ao da fabricação mecânica tradicional.

Com um esforço concentrado no desenvolvimento de materiais, *design*, estrutura e tecnologia de impressão, a utilização da MA terá aplicação crescente na produção de componentes

de VSA. Por conseguinte, não há dúvida de que a MA esculpuiu efetivamente o seu nicho nessa área da aplicação e continuará a crescer no futuro.

Portanto, a partir dessa plataforma, será possível impulsionar e subsidiar o desenvolvimento de novos subsistemas de aplicação naval, bem como o aperfeiçoamento da robótica submarina.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Marinha do Brasil. *Estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil*. Brasil: Marinha do Brasil, 2017.

BRASIL. Ministério da Defesa. *MD41-M-01*. Doutrina de Mobilização Militar. Brasil: Ministério da Defesa, 2015.

CHAMPION, B.T.; JAMSHIDI, M.O.; JOORDENS, M.A. 3D Printed Underwater Housing. *2016 World Automation Congress*, p. 1-6, 2016. <https://doi.org/10.1109/WAC.2016.7582993>

DUNBABIN, M.; MARQUES, L. Robotics for Environmental Monitoring. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, v. 19, n. 1, p. 20-23, 2012.

EBYTE. E32-433T30D-user manual. SX1278 433MHz 1W DIP Wireless Module. Datasheet. EBYTE, 2018.

KHALEED, H.M.T. et al. Novel Approach to Manufacture an AUV Propeller by Additive Manufacturing and Error Analysis. *Applied Sciences*, v. 9, n. 20, p. 4413, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9204413>

RASPBERRY PI FOUNDATION. SSH - Raspberry Pi Documentation. Raspberry Pi Foundation. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/documentation/remote-access/ssh/>. Acesso em: 11 ago. 2020.

SILVA JUNIOR, Vidal Pereira da. Conheça a tecnologia LoRa e o protocolo LoRaWAN. *Embarcados*, 2020. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/conheca-tecnologia-lora-e-o-protocolo-lorawan/>. Acesso em: 22 jul. 2020.