

COMUNICAÇÕES ACÚSTICAS SUBMARINAS

NO CONTEXTO DOS VEÍCULOS AUTÔNOMOS SUBMARINOS

PERSPECTIVAS E APLICAÇÕES

Capitão de Fragata FÁBIO BARBOSA LOUZA

Encarregado da Divisão de Comunicações Submarinas - IEAPM
PhD. Eng. Telecomunicações, Universidade do Algarve (Portugal)
e MSc. Applied Marine Physics, University of Miami (EUA)

Capitão-Tenente (EN) ANTÔNIO WALKIR SIBANTO CALDEIRA

Ajudante da Divisão de Comunicações Submarinas - IEAPM
Msc. Eng. de Defesa, Instituto Militar de Engenharia

Primeiro-Tenente (QC-CA) RODRIGO SCARABOTTO GODINHO

Enc. da Divisão de Acústica e da Divisão de Análise Acústica - CASOP
Mestrando em Acústica Submarina pelo IEAPM

FONTE: www.globenewswire.com
Composição Fotográfica: 1ºSG Severiano

INTRODUÇÃO

Em um mundo cada vez mais robotizado, o emprego de veículos autônomos submarinos tem-se tornado tendência mundial. Também conhecidos como AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), esses veículos têm sido empregados em vasta gama de aplicações civis e militares. Diferentemente dos ROVs (*Remotely Operated Vehicle*), veículos submersíveis controlados por meio de um cabo umbilical, por um operador na superfície, os AUVs podem realizar atividades no ambiente submarino de maneira completamente autônoma. Existe uma ampla gama de AUVs disponíveis no mercado, de diferentes dimensões, peso, autonomia, e configurações de equipamentos de bordo. Dependendo da missão planejada, os veículos podem carregar uma série de sensores embarcados,

como câmeras, termistores, fluorômetros, ecobatímetros, sensores inerciais, hidrofones, entre outros. Versáteis, os AUVs são sistemas autopropulsados movidos a bateria, capazes de operar por longas distâncias e a grandes profundidades.

Dessa forma, esses veículos têm sido utilizados mundialmente para ampliar os conhecimentos sobre o mar, com a coleta de dados acústicos, biológicos e oceanográficos, bem como na batimetria 3D do leito marinho. No setor de Óleo e Gás, destacam-se as atividades de inspeção em estruturas submersas de plataformas, válvulas de cabeça de poço, e oleodutos/gasodutos. Na área militar, podem ser empregados em sistemas de defesa de porto, realizando patrulhas furtivas, além de missões de busca e salvamento, inspeção e detecção

de dispositivos explosivos, minagem e varredura e outros tipos de missões (CARVALHO, 2016).

Entretanto, apesar de sua versatilidade, navegando com trajetórias pré-programadas, os AUVs possuem limitações importantes relacionadas às comunicações submarinas, dentre elas, o consumo de baterias com a transmissão de sinais de alta potência, a imprecisão da navegação e localização, bem como a fragilidade do sistema de comando e controle do veículo. Diferentemente dos sistemas que empregam ondas eletromagnéticas, como os radares, GPS e comunicações rádio, sistemas acústicos confiáveis e robustos requerem a solução de diversos desafios em razão das complexidades envolvidas na propagação do som no mar: baixa velocidade do som (1500 m/s) comparada com a velocidade da luz, a variabilidade temporal e espacial dos perfis de velocidade do som, o multicaminhamento do sinal que gera “ecos” indesejáveis, a limitação em banda de frequências que reduz a taxa de dados, e o efeito Doppler que distorce as frequências do sinal de comunicação de acordo com a velocidade do veículo.

Nesse contexto, este artigo mostra visão geral do emprego das comunicações acústicas submarinas sob a ótica dos veículos autônomos, apresenta o modem acústico desenvolvido na Marinha do Brasil, suas principais aplicações, possibilidades de emprego e outras perspectivas de interesse naval.

Principais aplicações das Comunicações Acústicas Submarinas para os AUV:

- navegação e localização: redução das imprecisões posicionais;
- comando e controle: alteração da missão programada;
- telemetria de dados ambientais adquiridos pelos sensores do veículo; e
- telemetria de dados do AUV: posição, rumo, velocidade, profundidade e bateria.

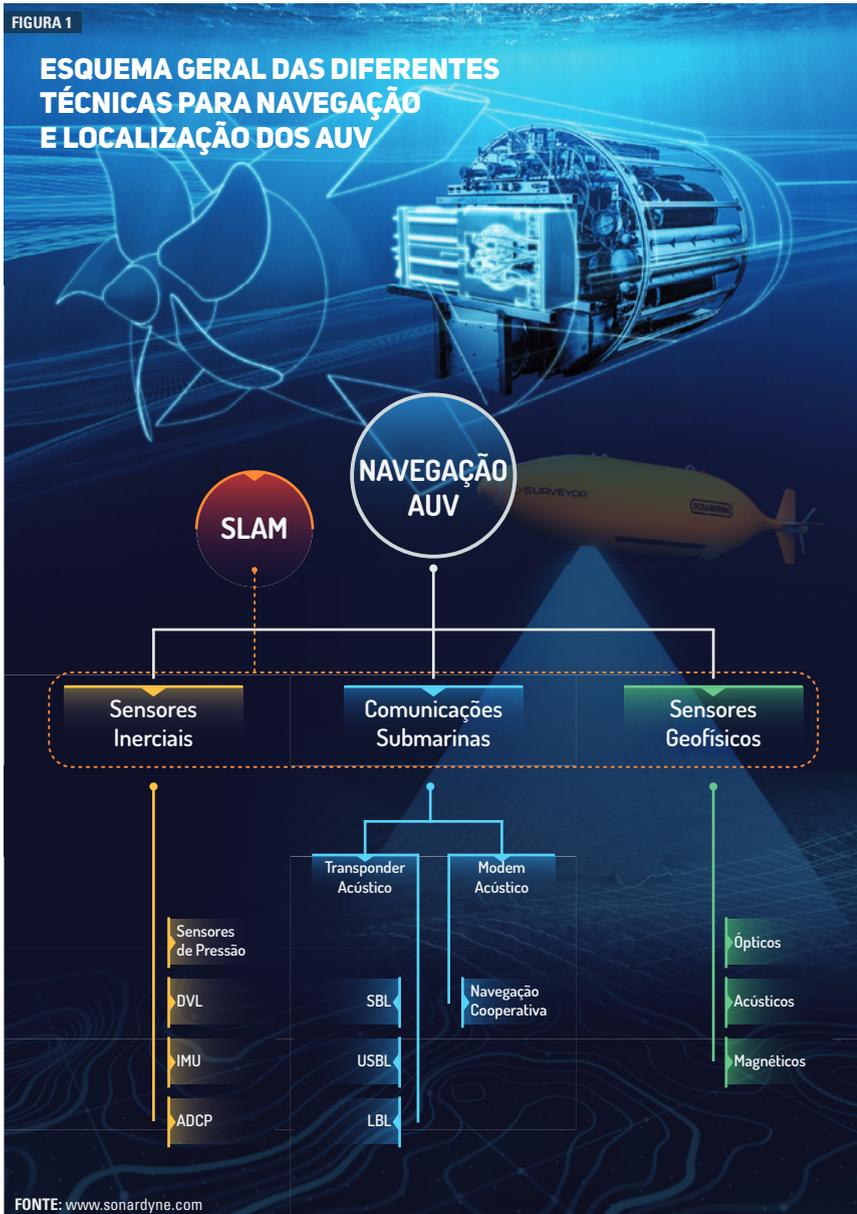
AS COMUNICAÇÕES ACÚSTICAS SUBMARINAS (CSub): UMA VISÃO GERAL

Os principais sistemas de comunicação submarina embarcados em um AUV, para navegação e localização, são feitos empregando-se *transponders* ou *modems* acústicos. Na comunicação feita por *transponders*, o AUV transmite um pulso acústico (interrogador) de especificações predefinidas que será detectado por *transponders* a bordo de outras plataformas, fixas ou móveis. Estas plataformas respondem com outro pulso acústico que será detectado pelo AUV. O tempo entre a transmissão do primeiro e a recepção do segundo pulso é, então, calculado pelo AUV, que estima sua distância à plataforma de referência. Já a comunicação por modem acústico é utilizada para transmitir e receber um pacote de dados digitais através de sinais acústicos submarinos. Chamados de portadoras, esses sinais são modulados variando-se as características das ondas sonoras, como amplitude, fase e frequência (a depender do tipo de modulação), com o intuito de enviar símbolos (conjuntos de *bits*) que serão decodificados pelo receptor-destinatário. Nesse ponto, vale destacar o Projeto Comunicações Submarinas (CSub), com a duração de 10 anos, que culminou no desenvolvimento, pelo Departamento de Acústica Submarina do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), do primeiro modem acústico nacional definido por *software* (GUARINO *et al.*, 2017).

AS CSub COM BAIXA PROBABILIDADE DE DETECÇÃO (CSub-BPD)

Como já citado, os AUV dependem das baterias para o funcionamento dos sistemas embarcados. Nesse contexto, o estado da arte encontra-se nas Comunicações Submarinas com Baixa Probabilidade de Detecção (CSub-BPD) que utilizam sinais de baixa potência, economizando as baterias, incrementando a autonomia do veículo, e, principalmente, permitindo comunicação *stealth* entre o AUV e outros meios navais. Assim, em complemento aos objetivos do Projeto CSub, pesquisadores do IEAPM e da Universidade do Algarve/Portugal apresentaram na Conferência UComms (Itália, 2022), patrocinada pelo CMRE (*Centre for Maritime Research and Experimentation*) da Otan, um artigo científico sobre CSub-BPD utilizando sensores vetoriais, a partir de

FONTE: OCEANEERING



te, a navegação pode ser dividida em três grandes áreas:

- Sensores Inerciais (*dead reckoning*): estimam a localização de um AUV a partir da localização anterior, usando a direção e velocidades estimadas na transição entre estas posições. O método tem a desvantagem de não corrigir a navegação a partir de informações externas do ambiente, fazendo que o erro de posição cresça de forma ilimitada com o tempo;

- Comunicações Submarinas: existem sistemas de navegação que adotam *transponders* para triangulação de distâncias, como os sistemas LBL, SBL e USBL, além dos *modems* acústicos que permitem uma comunicação mais sofisticada, com a transmissão de posições entre um AUV, um navio, um veículo autônomo de superfície, ou até mesmo uma navegação cooperativa com uma equipe composta somente por AUVs; e

- Sensores Geofísicos: extraem características do ambiente externo como referência para a navegação. As informações adquiridas por essa categoria de sensores incluem imagens feitas por câmeras, ecos de pulsos acústicos transmitidos por um sonar e mapa do campo magnético medido por um magnetômetro.

Já o SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) apresenta interface com todas as tecnologias mencionadas acima, uma vez que pode utilizar dados de quaisquer sensores embarcados no

experimentos realizados na costa sul portuguesa (LOUZA e JESUS, 2022). O domínio completo dessas tecnologias, juntamente ao alto nível de qualificação de pessoal na área de Acústica Submarina do IEAPM, permite que tais sistemas possam ser embarcados, em breve, em meios navais e em veículos autônomos, contribuindo com o avanço tecnológico do setor operativo.

SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS AUVs

Para uma melhor compreensão do contexto das comunicações acústicas submarinas para fins de navegação e localização dos AUV, a figura 1 mostra um esquema geral das diferentes técnicas voltadas para estas aplicações. Basicamen-

AUV para alimentar um algoritmo que visa mapear um ambiente desconhecido e, simultaneamente, estimar a localização do veículo neste ambiente. Em razão das complexidades, discutiremos em detalhes as técnicas baseadas nas CSub:

Sistemas de localização LBL, SBL, USBL

A figura 2 apresenta, da esquerda para a direita, um exemplo de sistemas SBL, USBL e LBL. No sistema LBL (*long baseline*), uma rede de transponders são georreferenciados antes do início da missão e largamente distribuídos no fundo do mar a uma distância que pode variar de 100 a 6.000 m entre cada transponder.

A localização do AUV é dada pela triangulação das distâncias calculadas pela diferença do tempo de chegada dos

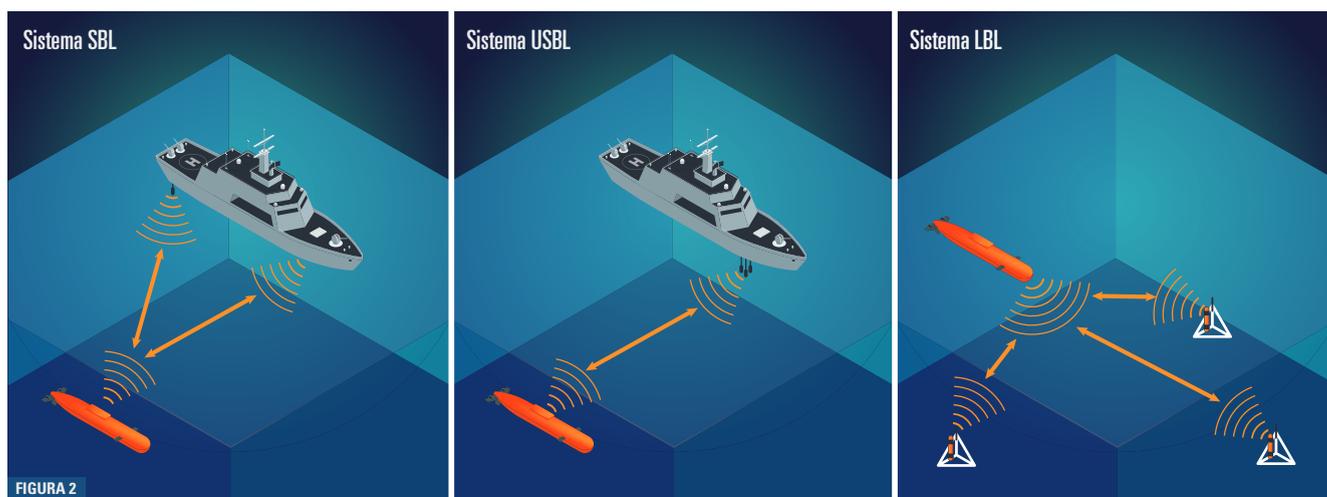


FIGURA 2

sinais acústicos entre o sistema de comunicação do AUV e cada transponder presente na infraestrutura. A maior desvantagem do sistema LBL é o custo e o tempo associado para a instalação e o georreferenciamento dos transponders, além da limitação espacial da navegação do AUV. Essa limitação é resolvida pelos sistemas SBL e USBL. No sistema SBL (*short baseline*), os *transponders* são geralmente posicionados na popa e na proa do navio, em uma distância entre 20 e 50 m, com a desvantagem da acurácia na posição que é dependente do tamanho do navio que auxilia o AUV. No sistema USBL (*ultra short baseline*), por outro lado, os *transponders* são dispostos em um arranjo, sendo a distância entre eles menor que 10 cm, e a distância relativa é determinada pelo tempo de chegada dos pulsos, enquanto a direção de chegada é calculada pela diferença de fase dos pulsos acústicos de cada transponder do arranjo que chegam no transdutor do AUV. O USBL é um sistema de fácil implementação (depende apenas da instalação do arranjo em um navio), mas tem como principal desvantagem o aumento do erro de posição com o aumento da distância do AUV para o arranjo, além da maior sensibilidade ao balanço do navio e à reflexão e refração dos pulsos acústicos.

NAVEGAÇÃO COOPERATIVA

No caso de um único veículo, uma plataforma de referência (navio ou veículo de superfície não tripulado) transmite, por *modem* acústico, a sua localização em tempo real para o AUV a partir de dados GPS, removendo a necessidade de georreferenciamento antes da missão, além de permitir a movimentação dos referenciais de posição durante a missão. Já a navegação cooperativa entre AUVs pode ser composta por times heterogêneos ou homogêneos. No primeiro caso, sensores de custo elevado e alta acurácia voltados à navegação são instalados em um AUV líder, que oferece suporte à navegação dos demais AUVs que, efetivamente, realizarão a missão. Nesse cenário, o líder pode, eventualmente, ir até à superfície para atualizar a posição GPS e, assim, corrigir os erros de posição da navegação inercial dos demais AUVs do time utilizando o *modem* acústico. Por outro lado, nos times homogêneos, os AUVs possuem os mesmos sensores e são hierarquicamente iguais. Nesse caso, a comunicação acústica é realizada entre todos do time, compartilhando distâncias e marcações relativas, o que reduz consideravelmente os erros de posição. De forma similar ao caso heterogêneo, um dos AUVs pode ir à superfície, corrigir sua posição GPS e transmitir a correção aos demais membros do time.

TRANSMISSÃO DE DADOS POR MODEM ACÚSTICO: POTENCIAIS APLICAÇÕES PARA A MB

Um sistema de comunicação acústica digital usando um *modem* embarcado tem, como principal vantagem, a transmissão de dados coletados durante a missão, em tempo (quase) real,



Veículo Autônomo de Superfície / FONTE: www.sonardyne.com

tornando as tomadas de decisão do operador mais eficientes. A questão dos AUVs e o desenvolvimento de comunicações digitais robustas é tão importante que a Otan realiza, anualmente, em parceria com a Marinha Portuguesa, o exercício REP(MUS) – *Robotic Experimentation and Prototyping with Maritime Unmanned Systems*. Em 2022, foram centenas de pesquisadores de 16 países e diversos observadores internacionais, tendo a Marinha do Brasil participado com dois Oficiais. O exercício teve a participação de diversos meios navais da Marinha Portuguesa em apoio às tarefas realizadas como minagem e varredura usando AUVs, caracterização acústica e magnética em mar aberto, o estabelecimento de redes de comunicação submarina com nós fixos e móveis e demonstração da resposta a uma emergência submarina usando o modem acústico JANUS (POTTER *et al.*, 2022), sendo esta última tarefa ilustrada na figura 3.

Outro exemplo interessante refere-se à detecção e caracterização de vazamento de óleo no mar, feitas por um AUV em um sistema de comunicação multiagente cujos dados são transmitidos a uma estação em terra, que é responsável pelos processos decisórios. Em 2019, o Brasil sofreu grave crime ambiental em virtude do derramamento de milhares de toneladas de resíduos oleosos nas nossas águas jurisdicionais (MARINHA DO BRASIL, 2023). Nesse contexto, alguns estudos apresentaram uma proposta de detecção e caracterização *in-situ* da concentração de hidrocarbonetos na coluna d'água. Um fluorômetro, sensor que mede a intensidade da fluorescência, foi integrado a um AUV que mapeou uma região potencialmente atingida por óleo (PÄRT *et al.*, 2021). Os dados medidos pelo fluorômetro foram transmitidos, por link acústico, para uma embarcação de superfície não tripulada, que retransmitiu estes dados por satélite a uma estação em terra. Após uma compilação desses dados e a integração com os de outros sensores (fotografia aérea, modelos numéricos de trajetória do derramamento) foi possível melhor avaliação da extensão e intensidade do derramamento de óleo, substanciando a tomada de decisão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As inúmeras aplicações dos AUVs requerem sistemas de comunicação acústica confiáveis e robustos para aumentar a precisão da navegação, reduzir os erros de posicionamento e permitir uma transmissão de dados confiável. Apesar do alto custo unitário desses veículos, as comunicações submarinas ainda parecem ser um ponto frágil a ser explorado. Dessa for-

Exercício de salvamento de submarino durante o REP(MUS) com emprego de um AUV e um veículo autônomo de superfície (Wave Glider) usando o modem acústico JANUS.



ma, apresentamos o modem CSub, desenvolvido pela Marinha do Brasil, e suas múltiplas aplicações que podem ser empregadas em futuros projetos que integrem AUVs aos meios navais, de forma a incrementar a precisão e confiabilidade das informações transmitidas no canal submarino.

Referências

- CARVALHO, Rodrigo C. **O emprego de veículos não tripulados nas contramedidas de minagem**: possibilidades de emprego do veículo submarino autônomo Remus 100 nas contramedidas de minagem. 2016. Monografia (Curso Superior) – Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2016.
- GUARINO, Alexandre G. L.; SILVA, Luis Felipe P. S.; XAVIER, Fabio C.; OSOWSKY, Jefferson. Primeira versão de um modem acústico submarino definido por software da Marinha do Brasil. *Revista Pesquisa Naval*, Brasília, n. 29, p. 76-85, 2017.
- LOUZA, Fabio B.; JESUS, Sergio M. Low probability of detection underwater communications using a vector sensor. In: UNDERWATER COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (UCOMMS), 6, 2022, Lerici, Italy. [Reports]. Lerici: IEEE, 2022. DOI 10.1109/Ucomms56954.2022.9905685. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9905685/references#references>. Acesso em: 10 jul. 2023.
- MARINHA DO BRASIL. **Um derramamento de óleo e os desafios para a proteção da Amazônia Azul**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/economia-azul/noticias/um-derramamento-de-oleo-e-os-desafios-para-protacao-da-amazonia-azul>. Acesso em: 10 jul. 2023.
- PÄRT, Siim *et al.* Oil spill detection using fluorometric sensors: laboratory validation and implementation to a FerryBox and a Moored SmartBuoy. *Frontiers in Marine Science*, [S. l.], v. 8, p. 1753, 2021.
- POTTER, John R.; ALVES, João; ZAPPA, Giovanni; GREEN, Dale. The Janus underwater communications standard. In: UNDERWATER COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (UCOMMS), 2014, Sestri Levante, Italy. [Reports]. Sestri Levante: IEEE, 2014. DOI 10.1109/Ucomms.2014.7017134. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265594031_The_JANUS_underwater_communications_standard. Acesso em: 10 jul. 2023.