

Veículos não tripulados para observação do oceano

João Tasso de Figueiredo Borges de Sousa

Laboratório de Sistemas e Tecnologias Subaquáticas, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto

jtasso@fe.up.pt

Resumo

Nas últimas décadas temos assistido a uma crescente utilização de veículos robóticos no estudo dos oceanos. Prevê-se mesmo que estes venham a revolucionar a observação dos oceanos num futuro próximo. Tal revolução passará pela coordenação das operações de elevados números de veículos submarinos, de superfície, aéreos e espaciais que recolherão dados em contínuo e com resoluções espaciais e temporais adaptativas, e sem precedentes.

Este artigo descreve a campanha oceanográfica *Exploring Fronts with Multiple Robots*, realizada pelo navio de investigação R/V Falkor do *Schmidt Ocean Institute* (SOI), e que teve, como principal objetivo, a demonstração de um novo sistema multi-veículo para a observação do oceano. Esta campanha, financiada pelo SOI, envolveu uma equipa internacional, liderada pelo Laboratório de Sistemas e Tecnologias Subaquáticas (LSTS) da Universidade do Porto.

Introdução

Os oceanos parecem imensos e poderosos, mas na realidade constituem uma fina e frágil camada de água, com uma profundidade média de 4 km num Planeta com um raio superior a 6000 km. De fato, toda a água do Planeta poderia ser armazenada numa esfera com um diâmetro de aproximadamente 1380 km, pouco maior do que o estado americano do Arizona [1]. Este fato é ainda mais importante, porque esta fina camada de água é um dos elementos chave do sistema de suporte de vida desta nave espacial em que viajamos, o planeta Terra. O problema é que não dispomos ainda das ferramentas e das tecnologias que nos permitam, não só avaliar o estado deste sistema, mas também compreender como é que as mudanças climáticas, a acidificação dos oceanos, a pesca não sustentável, a poluição, o desperdício, a perda de habitats, a navegação, a segurança e a mineração estão a afetar a sustentabilidade e a governação dos oceanos.

Muito embora os navios oceanográficos continuem a ser um dos principais pilares do estudo dos oceanos, o fato é que um navio só pode estar num único sítio de cada vez. Por outro lado, o interior do oceano muda mais depressa do que conseguimos medir com os meios tradicionais que incluem, para além dos navios, derivadores de superfície e flutuadores Argos [2], para citar apenas alguns. Foi exatamente por esta razão que Walter Munk, *Secretary of the Navy Research Chair in Oceanography*, Scripps, afirmou, em 18 de Abril de 2002,

Veículos submarinos, aéreos e de superfície não tripulados

O desenvolvimento de novos veículos robóticos tem sido impulsionado, por um lado, por avanços significativos em tecnologias dos materiais, em computação, sensores, navegação, armazenamento de energia e comunicações e, por outro, pela crescente procura na exploração de petróleo e gás e em aplicações militares e científicas.

Existem vários tipos de robots para operações marítimas. Estes robots podem ter formas, tamanhos, configurações e categorias muito diversas. Um veículo submarino autónomo (*Autonomous Underwater Vehicle* – AUV na terminologia anglo-saxónica) é um pequeno submarino não tripulado. Os veículos autónomos de superfície e os veículos aéreos não tripulados (*Autonomous Surface Vehicle* – ASV e *Unmanned Air Vehicle* – UAV na terminologia anglo-saxónica) representam, respetivamente, as expressões destes robots para os domínios de superfície e aéreos. Os veículos pilotados remotamente (*Remotely Operated Vehicle* – ROV) são veículos submarinos ligados por um cabo a um navio, a partir do qual são comandados por um operador.

Ao contrário do que a terminologia possa indiciar, a maior parte dos veículos não tripulados existentes no mercado não são autónomos, isto é, não possuem a capacidade de planeamento deliberativo a bordo. São automáticos no sentido em que as suas ações são determinadas a partir de medições dos sensores por procedimentos pré-determinados.

numa audição perante a comissão americana para a política dos oceanos: “*Most of the previous century could be called a century of under-sampling*” (A maior parte do século passado poderia ser chamada de século da sub-amostragem).

Entretanto, nas últimas décadas temos assistido a uma crescente utilização de veículos robóticos no estudo dos oceanos. Esta foi impulsionada, em parte, pelo artigo publicado por Tom Curtin e co-autores em 1993 sobre redes de amostragem oceanográfica autónoma [3], com ênfase muito especial em observações co-temporais e distribuídas espacialmente.

Desde então assistiu-se a desenvolvimentos impressionantes em AUV, propulsionados a hélice ou com propulsão baseada no controlo de flutuação e do centro de gravidade e, também, em ASV, movidos a vento ou a energia das ondas. Algumas destas tecnologias permitem missões com durações de meses, o que é fundamental para um estudo dos oceanos em contínuo. Os desenvolvimentos em UAV para aplicações marítimas também têm tido um crescimento considerável. Contudo, as limitações relativas a descolagem e aterragem e de tempo de voo são ainda um obstáculo a uma utilização mais alargada em operações no oceano.

Foi apenas no final da primeira década deste século que a tecnologia robótica atingiu os níveis de maturidade e de viabilidade económica que estabeleceram as condições para uma efetiva mudança de paradigma: da operação com um único veículo para a operação com equipas de veículos [4]. Esta mudança de paradigma foi impulsionada por desenvolvimentos em inteligência artificial, controlo e navegação, bem assim como por avanços em sistemas de armazenamento de energia, em sensores, em sistemas computacionais e de navegação, em sistemas de comunicação rádio e subaquáticos, e em tecnologias dos materiais e na miniaturização de sensores.

Este artigo aborda questões do estudo dos oceanos com veículos não tripulados, utilizando, como exemplo, a campanha oceanográfica *Exploring Fronts with Multiple Robots* [5], realizada pelo navio de investigação R/V Falkor do *Schmidt Ocean Institute* (SOI), que teve como principal objetivo a demonstração de um novo sistema multi-veículo para o estudo dos oceanos. Esta campanha, financiada pelo SOI, envolveu uma equipa multidisciplinar internacional, liderada por investigadores do Laboratório de Sistemas e Tecnologias Subaquáticas da Universidade do Porto [6] (LSTS, fig. 1). A equipa multidisciplinar embarcada no R/V Falkor incluía nove investigadores do LSTS e outros nove investigadores provenientes do CIIMAR – Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental da Universidade do Porto, da *Norwegian University of Science and Technology*, da Universidade Politécnica de Cartagena e das universidades norte-americanas de Rhode Island e Harvard. A apoiar a realização da campanha a partir de Portugal esteve também uma equipa que incluía investigadores da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e das Universidades de Aveiro e do Algarve. Colaboraram ainda nesta campanha investigadores do *Sintef* da Noruega e do *Monterey Bay Aquarium Research Institute* e da *NASA-Ames* dos Estados Unidos da América.



Figura 1 - Equipa embarcada no R/V Falkor. (© cedida pelo *Schmidt Ocean Institute*).

O artigo é organizado em 5 seções. A seção seguinte descreve os objetivos e desafios da campanha oceanográfica. Segue-se uma breve apresentação dos meios e tecnologias utilizadas. Apresenta-se depois uma breve descrição da campanha, que teve uma duração de 3 semanas. Concluímos com uma série de considerações sobre as lições aprendidas, em particular no que refere ao futuro do estudo dos oceanos.

O desafio: a observação da frente subtropical do Pacífico Norte

O principal objetivo da campanha oceanográfica *Exploring Fronts with Multiple Robots* foi a demonstração de uma nova abordagem à observação do oceano baseada num sistema composto por múltiplos veículos submarinos, de superfície e aéreos operados a partir do navio oceanográfico R/V Falkor. O sistema assenta numa plataforma de *software open-source* de comando, controlo, comunicações e autonomia desenvolvida pelo LSTS que permite dotar estes veículos, bem assim como o R/V Falkor, da capacidade para encontrar, seguir e amostrar fenómenos dinâmicos do oceano com resoluções espaciais e temporais adaptativas sem precedentes. Outro aspeto inovador desta campanha foi o estudo dos novos métodos de trabalho multidisciplinares, nas áreas das ciências do mar e da computação e das engenharias, levado a cabo por uma etnógrafa residente especializada no estudo de métodos de trabalho em missões espaciais e, também, oceanográficas.

O principal propósito da campanha foi orientado para três objetivos científicos principais, que representam outras tantas tarefas em oceanografia operacional: 1) Realização de atividades oceanográficas tradicionais (perfis verticais, perfis 3D sinópticos); 2) Execução de tarefas que não são realizadas de forma rotineira por navios oceanográficos; 3) Recolha de dados

LSTS software tool chain (<https://lsts.fe.up.pt/toolchain>)

Esta plataforma de *software open-source* de comando, controlo, comunicações e autonomia, é utilizada em 20 países, em mais de 100 sistemas robóticos para operações com múltiplos veículos que comunicam através de WiFi, GSM, modems acústicos (para comunicações subaquáticas) e comunicações por satélite. É composta por várias ferramentas:

Neptus – o interface homem-máquina, que corre em computadores, e que suporta todo o ciclo de vida de uma missão, incluindo por isso, componentes de planeamento, de controlo de execução e de análise de dados de missão.

IMC – o protocolo de comunicações que é utilizado por todos os nós numa rede de veículos. Todos os sistemas nesta rede utilizam mensagens IMC para comunicar entre eles.

Dune – o *software* de bordo dos veículos que implementa algoritmos de planeamento, controlo, navegação, comunicações e autonomia, bem assim como todos os interfaces com os sub-sistemas de energia, de comunicações, sensores e atuadores.

Ripples – ferramenta baseada na Web para planeamento e controlo remoto, bem assim como para visualização e disseminação de dados.

coordenadas entre navio e sistemas robóticos. Estes três objetivos científicos tiveram por objeto de estudo uma frente oceânica.

As frentes oceânicas constituem alguns dos mais estáveis e persistentes elementos da estrutura dos oceanos desempenhando um papel muito importante num conjunto de processos e aplicações que incluem, entre outros, a circulação dos oceanos, a biodiversidade, as pescas, a navegação e a defesa, em particular no que refere à luta anti-submarina.

Frentes em oceanografia

Em oceanografia uma frente é uma fronteira entre duas distintas massas de água que, geralmente, se movem em duas direções diferentes. As duas massas de água podem ter temperaturas, salinidades ou densidades diferentes, ou apresentar diferenças noutros marcadores oceanográficos. É também devido a esta diversidade de características que algumas frentes são objeto de grande atividade biológica (por exemplo, algumas frentes podem ser identificadas pela elevada concentração de navios de pesca). As frentes podem ter escalas espaciais e temporais muito diversas, desde os metros e minutos, aos milhares de km em escalas planetárias. Algumas frentes são formadas e dissipadas em pouco tempo. Outras persistem por longos períodos de tempo.

A equipa selecionou, para objeto de estudo, a frente subtropical (STF) do Pacífico Norte, situada aproximadamente a 1850 quilómetros (30N-35N e 130W-135W) a oeste de San Diego, porto de escala do R/V Falkor. Esta é uma frente climática de grande escala – meso-escala na ordem de centenas de km – em que águas vindas de norte encontram águas mais quentes e com salinidades mais elevadas vindas do sul. É pouco profunda (cerca de 300 m), com uma forte assinatura em salinidade e baixa assinatura em temperatura, o que dificulta a sua localização do espaço com recurso a mapas de temperatura da superfície (SST), mais ainda porque se situa numa zona que se encontra nublada com muita regularidade, o que dificulta a sua observação do espaço. A seleção desta área de estudo teve a ver com a sua localização em águas internacionais, longe de áreas marinhas protegidas, o que simplifica consideravelmente os processos de obtenção de permissões, e, também, com o fato de não existirem estudos recentes desta frente. Os últimos estudos desta frente foram realizados nos anos 80 [7].

Meios e tecnologias utilizados

Os meios utilizados nesta campanha incluíram, para além do navio R/V Falkor com todo o seu equipamento de medição e de recolha de amostras de água, 3 UAV de descolagem/aterragem vertical (VTOL) equipados com câmaras no domínio do visível, do infra-vermelho e multi-espectral e, ainda de um sensor para medir concentrações do gás dimetilsulfureto (DMS), 2 *quadcopters* para filmagens, 1 ASV Waveglider [8] (movido com recurso à energia das ondas) e 2 ASV Saildrone [9] (veleiros autónomos), equipados com sensores para a medição de salinidade, temperatura e correntes no oceano, e 7 AUV (seis dos quais desenvolvidos em Portugal), equipados com sensores para a medição de salinidade, temperatura, pressão, clorofila-a, turbidez, oxigénio dissolvido e acidez, entre outros (fig. 2). Estes AUV, equipados com baterias de lítio, podiam executar missões com duração superior a 50 horas. Os AUV tinham a capacidade de planeamento a bordo, que lhes conferia uma grande autonomia para operações com durações superiores a dois dias, realizadas a distâncias do navio que poderiam exceder 30 km. Utilizaram-se comunicações por satélite para interagir com os AUV e com os ASV.



Figura 2 - AUVs e UAVs utilizados na campanha. (© cedida pelo Schmidt Ocean Institute).

A bordo do R/V Falkor foi instalado um centro de controlo de missão, distribuído por várias estações, todas suportadas pela plataforma de *software* do LSTS, com particular destaque para o *Ripples*, que geria a troca de dados e comandos com todos os veículos, bem assim como com todos os serviços de fornecimento de dados utilizados na campanha. Esta ferramenta suportava também um centro de controlo de missão localizado no Porto.

A campanha

Introdução

O navio R/V Falkor partiu e regressou a San Diego a, respetivamente, 28 de Maio e 17 de Junho de 2018. A campanha foi organizada em várias fases: 1) Reconhecimento prévio da área de operação com ASV, que teve início a 1 de Maio; 2) Trânsito de 3 dias para a área de operação; 3) Testes de sistemas na área de operação; 4) Mapeamento de uma pequena seção da frente; 5) Mapeamento de uma seção da frente; 6) Exploração da frente; 7) Trânsito de 3 dias para regresso a San Diego.

A equipa trabalhou ininterruptamente, com exceção dos trânsitos de e para San Diego, em 4 turnos diários de seis horas cada, com equipas de duas pessoas. Tal foi tornado possível pelo elevado grau de automatização do centro de controlo de missão e pela autonomia dos veículos. À equipa de operação, juntavam-se mais duas pessoas para as operações com UAV. Os restantes elementos da equipa trabalharam na análise de dados, no tratamento de amostras de água e, ainda, no planeamento de operações. Uma etnógrafa residente realizou o estudo científico das novas práticas de trabalho induzidas pelas novas ferramentas e tecnologias, em particular no que referia às interações entre cientistas e engenheiros.

Reconhecimento da área de operação

Os únicos dados in-situ relativos à frente STF, que se situa aproximadamente a meio caminho entre a Califórnia e o Hawaii, remontavam a campanhas efetuadas nos anos 70 e 80. Tornava-se assim essencial efetuar um reconhecimento prévio da área, tendo em vista determinar a localização exata da frente.

Para o efeito, foram utilizados os 3 ASV. Um *Waveglider* partiu da Califórnia e os dois *Saildrones* encontravam-se em trânsito numa viagem de retorno à Califórnia. Os dados de temperatura (SST) e salinidade (SSS) recolhidos por estes ASVs eram disponibilizados em tempo real na Internet.

Depois de chegar à área de operação, tendo partido da Califórnia, o *Waveglider* foi enviado para Sul, para efetuar uma seção meridional que iria atravessar toda a zona da frente. Os *Saildrones* recolheram o mesmo tipo de dados numa seção paralela, para Norte. Foram ainda efetuadas várias seções que atravessaram várias frentes, algumas das quais mais do que uma vez. Os dados de SSS eram, como esperado, os mais importantes para a deteção da frente STF, com variações significativas, de cerca de 0,5 psu [10], entre os dois lados da frente. Os incrementos em SST eram mais modestos (1 °C a 1,5 °C). Foram estes dados T-S que permitiram identificar a STF como a frente mais forte e mais robusta na área mapeada.

Utilização de dados de deteção remota

Foram utilizados vários tipos de dados de deteção remota por satélite, antes e durante a campanha. As imagens SST foram fornecidas por radiômetros instalados a bordo dos satélites Aqua e Terra operados pela NASA. Foram utilizados produtos de cô dos oceanos, tais como concentração de clorofila-a, provenientes do sensor MODIS do satélite Aqua e do sensor OLCI do satélite Sentinel-3 (ESA), mapas de salinidade da missão SMOS (ESA) e, ainda, mapas de dados históricos de salinidade obtidos pela missão Aquarius (NASA). Finalmente foram ainda utilizados mapas de SSH (sea surface height) baseados em dados de altimetria disponibilizados no site AVISO.

O tempo nublado que se fez sentir durante os primeiros dias da campanha inviabilizou a utilização de dados SST e de cô dos oceanos. A primeira imagem SST de qualidade foi obtida a 11 de Junho. Esta imagem veio a confirmar o que já se tinha inferido a partir dos dados recolhidos in-situ durante esse período: a existência de um grande filamento da frente, que se tornou num dos principais focos da observação durante o resto da campanha.

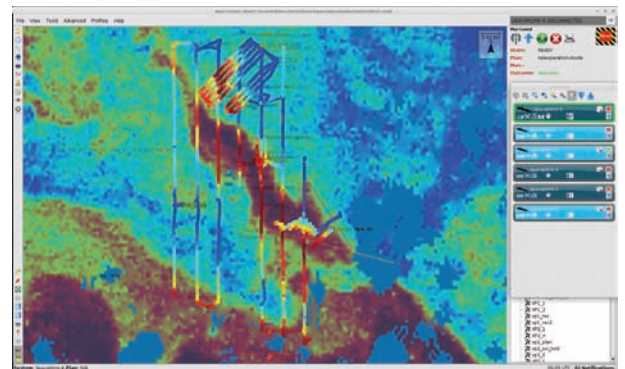


Figura 3 - Percursos percorridos por AUV, codificados com cores associadas a níveis de salinidade (salinidade crescente do azul para o vermelho) sobrepostos numa imagem SST, em que é visível o filamento a destacar-se da frente.

Mapeamento de um segmento da frente

O mapeamento em 3 dimensões de uma frente oceânica é uma das tarefas mais complexas em oceanografia operacional. Este foi executado, em simultâneo, com duas equipas, de três AUV cada, com o objetivo de demonstrar também o potencial das operações robóticas coordenadas (fig. 3). Foi adotado o formato dos trajetos utilizado pelos cortadores de relva, com as seções mais longas perpendiculares à frente. Os AUV executam perfis no plano vertical, com o formato de yo-yo, e com variação de profundidade entre 0 m e 100 m. Uma equipa de AUV era substituída pela outra quando era necessário recarregar as baterias. A duração da missão de cada equipa era limitada pela capacidade das baterias (50 h para uma das equipas).

Em paralelo, e coordenados com as missões dos AUV, foram também efetuadas dezenas de perfis verticais com a roseta do R/V Falkor para medições e

recolha de amostras de água, até 600 m, com o objetivo de estudar as distribuições bio-geo-químicas e biológicas ao longo da frente.

Exploração

Os dados recolhidos durante a fase de mapeamento foram utilizados para identificar hotspots para os estudos mais detalhados que se lhe seguiram. Estes incluíram perfis com elevada resolução espacial levados a cabo por AUV, que foram complementados com medições e recolha de amostras de água efetuadas a partir do navio. Foram efetuados voos com os UAV para recolher imagens nos domínios do visível, do infravermelho e ainda multiespectral, e para medir concentrações do gás dimetilsulfureto (DMS). Os UAV foram também utilizados como *relais* de comunicação para AUV e para transportar dados destes para o navio. O R/V Falkor, 3 AUV e 1 UAV movimentaram-se em formação com o objetivo de efetuar medições co-temporais sobre estes *hotspots*. Finalmente, foi também desenvolvido um novo algoritmo para seguimento autónomo de frentes, que foi testado com sucesso com o R/V Falkor, com o *Waveglider* e com um AUV.

Divulgação científica

A campanha teve também uma importante componente de divulgação científica, que tirou partido do sistema de comunicação por satélite estado da arte do R/V Falkor, que permitiu a realização de apresentações em direto, que chegaram a mais de 3500 estudantes dos Estados Unidos da América, de Portugal, da Noruega, de Moçambique, de Cabo Verde e de Espanha. No dia dos Oceanos foi realizada uma sessão em conjunto com dois outros navios oceanográficos, que difundida na Internet para todo o mundo. Foram efetuadas também sessões em direto com o museu Smithsonian, bem assim como com o *Massachusetts Institute of Technology*, que teve lugar durante a visita do Sr. Primeiro Ministro de Portugal e do Sr. Ministro da Ciência e Tecnologia a esta instituição.

Conclusões

Os objetivos técnico-científicos da campanha foram totalmente atingidos. Os AUV percorreram aproximadamente 1800 km, durante cerca de 500 horas, os ASV percorreram cerca de 18000 km, durante cerca de 2 meses, e os UAVs fizeram 25 voos autónomos, com uma duração total de cerca de 10 horas. A localização da frente subtropical do Pacífico Norte foi determinada, como previsto, e foi ainda estudado, com um detalhe sem precedentes, o segmento mais oriental desta frente. Neste âmbito, foi também mapeado, pela primeira vez, um filamento de mesoescala de uma frente oceânica, utilizando principalmente AUV para o efeito.

A campanha demonstrou o enorme potencial que a operação coordenada de navios e de múltiplos veículos não tripulados representa para o estudo dos oceanos. Demonstrou, também, o papel fundamental desempenhado pelo *software* de comando, controlo,

comunicações e autonomia do LSTS na coordenação e operação destes sistemas.

Os sistemas e tecnologias demonstrados com tanto sucesso nesta campanha podem ser utilizados em outras frentes oceânicas, bem assim como no estudo de outros fenómenos do oceano.

Agradecimentos

Esta campanha foi financiada, em grande parte, pelo Schmidt Ocean Institute (SOI). O seu sucesso deve-se a uma equipa multidisciplinar. Para o SOI e para esta excelente equipa [11] vão os mais sinceros agradecimentos.

Referências

- [1] <https://water.usgs.gov/edu/gallery/global-water-volume.html>
- [2] <http://www.argo.ucsd.edu/>
- [3] Curtin, T.B., Bellingham, J.G., Catipovic, J., Webb, D., 1993. Autonomous oceanographic sampling networks. *Oceanography* 6 (3), 86-94.
- [4] Lynn, R., 1986. The Subarctic and Northern Subtropical Fronts in the Eastern North Pacific Ocean in Spring, *Journal of Physical Oceanography*, Volume 16 No. 2, February 1986, pp.209-222
- [5] https://schmidtocean.org/cruise/exploring_fronts_with_multiple_aerial-surface-underwater-vehicles/
- [6] <https://lsts.fe.up.pt/>
- [7] Bellingham, J., Rajan, K., 2007. Robotics in Remote and Hostile Environments. *Science* (New York, N.Y.) 318. 1098-102. 10.1126/science.1146230.
- [8] <https://www.liquid-robotics.com/wave-glider/overview/>
- [9] <https://www.saildrone.com/>
- [10] psu: Practical salinity unit (Unidade de Salinidade Prática).
- [11] https://schmidtocean.org/cruise/exploring_fronts_with_multiple_aerial-surface-underwater-vehicles/#team



João Tasso de Figueiredo Borges de Sousa, é docente do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e diretor do Laboratório de Sistemas e Tecnologias Subaquáticas da Universidade do Porto. Tem um doutoramento e um mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, ambos concedidos pela

Universidade do Porto. Os seus interesses de investigação incidem sobre veículos submarinos, de superfície e aéreos não tripulados, sobre *software* de planeamento e controlo para redes de veículos, sobre otimização dinâmica e sistemas ciberfísicos. Recebeu vários prémios, entre os quais se destacam o prémio de inovação nacional na fileira do mar em 2006, um prémio de mérito pedagógico da Universidade do Porto em 2008 e, ainda, o IEEE/OES *rising star mid-career award* in 2018. É membro do *Advisory Committee do Swedish Maritime Robotics Centre* e do *MUSIC^2 Innovation Advisory Board* da NATO. Foi o cientista chefe da campanha *Exploring Fronts with Multiple Robots* financiada pelo *Schmidt Ocean Institute*. Publicou mais de 400 artigos, dos quais cerca de 40 artigos em revistas científicas internacionais.