



Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/10: 1885-1903  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## O USO DE EMBARCAÇÕES NÃO TRIPULADAS EM LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS

*The Use of Non-Tripulated Vessels in Bathymetric Surveys*

**Ítalo Oliveira Ferreira<sup>1</sup>, Arthur Ayres Neto<sup>2</sup> & Cristina Sameiro Monteiro<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal de Viçosa - UFV  
Departamento de Engenharia Civil**

Av. Peter Henry Rolfs, s/n° - Campus Universitário - Cep: 36570-900 - Viçosa/MG - Brasil  
italo.ferreira@ufv.br

**<sup>2</sup>Universidade Federal de Fluminense - UFF  
Departamento de Geologia**

Av. General Milton Tavares de Souza, s/n° - Campus da Praia Vermelha - Cep: 24210-346 - Niterói/RJ - Brasil  
aayres@id.uff.br

**<sup>3</sup> Instituto Hidrográfico - IH**

**Divisão de Hidrografia da Marinha de Portugal**  
Rua das trinas, 49 - Cep: 1249-093 - Lisboa - Portugal  
cristina.monteiro@hidrografico.pt

*Recebido em 5 de Julho, 2016/ Aceito em 14 de Outubro, 2016  
Received on July 5, 2016/ Accepted on October 14, 2016*

### RESUMO

O conhecimento da morfologia submersa é importante em diversas áreas, tais como: o estabelecimento e manutenção de hidrovias (navegação marítima ou fluvial), obras civis (pontes, portos, píeres), a locação de cabos e dutos, a prospecção de recursos minerais e o monitoramento de assoreamento de reservatórios (abastecimento ou geração de energia). Estas informações são obtidas através dos levantamentos hidrográficos que, nos dias atuais, são geralmente conduzidos a bordo de navios ou embarcações tripuladas. Todavia, o uso destas plataformas fica limitado à ambientes que não ofereçam riscos a tripulação ou a navegação superficial. Visando suprir estas demandas, nos últimos tempos surgiram plataformas de superfície não tripuladas que são controladas remotamente ou operam em modo autônomo. Este artigo objetiva apresentar um breve panorama da utilização das plataformas não tripuladas na execução de pesquisas em ambientes submersos, descrevendo as tecnologias, principais incertezas envolvidas e as vantagens e desvantagens da sua utilização. Ao final é realizada uma breve avaliação de campo de um dos modelos comercializados no Brasil.

**Palavras chaves:** Drones Marinhos, Embarcações Não Tripuladas, ASC, Batimetria, Levantamento Hidrográfico.

### ABSTRACT

Knowledge of submerged morphology is important in several areas, such as: the establishment and maintenance of waterways (maritime or inland navigation), civil works (bridges, ports, piers), leasing of cables and pipelines, exploration of mineral resources and the monitoring of silting reservoirs (supply or generation of energy). This information is obtained through hydrographic surveys which, currently, are usually conducted using ships or manned vessels. However,

the use of these platforms is limited to environments that offer no risk to crew or surface navigation. In order to meet these demands, recently emerged unmanned surface platforms that are remotely controlled or operate in autonomous mode. This article presents a brief overview of the use of unmanned platforms in the execution of research in underwater environments, describing the technologies, uncertainties involved and the advantages and disadvantages of their use. At the end, there is a brief field evaluation of one of the models sold in Brazil.

**Keywords:** Marine Drones, Unmanned Vessels, ASC, Bathymetry, Hydrographic Survey.

## 1. INTRODUÇÃO

Informações sobre a configuração morfológica das superfícies e subsuperfícies submersas é extremamente importante em diversas áreas, tais como: o estabelecimento e manutenção de hidrovias (navegação marítima ou fluvial), obras civis (pontes, portos, píeres), a locação de cabos e dutos, a prospecção de recursos minerais e o monitoramento de assoreamento de reservatórios (abastecimento ou geração de energia). Estas informações são obtidas através de levantamentos hidrográficos.

Entende-se por levantamento hidrográfico o conjunto de atividades executadas com a finalidade de obtenção de dados batimétricos, da natureza física e configuração do fundo submerso, das alturas e variações do nível das águas, dentre outros. Embora o principal interesse destes levantamentos sejam a navegação aquaviária, diversas outras finalidades são atendidas pelos dados coletados (IHO, 2005; FERREIRA *et al.*, 2012).

O termo *levantamento batimétrico*, é encontrado correntemente na literatura, constituiu-se na principal tarefa de um levantamento hidrográfico, tendo por objetivo realizar medições de profundidades associadas a uma posição na superfície. Estas profundidades são utilizadas na construção dos Modelos Digitais de Elevação das superfícies submersas que servem de insumo a diversas análises (IHO, 2005; FERREIRA *et al.*, 2013).

O levantamento batimétrico pode parecer, em um primeiro momento, semelhante ao levantamento topográfico, porém, essa equivalência se limita à construção e manipulação dos modelos digitais de elevação. Os procedimentos seguidos no planejamento, coleta e análise dos dados são totalmente diferentes dos usados na topografia terrestre.

É comum no planejamento do levantamento batimétrico dividir a superfície a ser mapeada em uma malha de linhas equidistantes, denominadas

linhas regulares de sondagem. Estas são percorridas pela plataforma de levantamento, permitindo a coleta de dados de profundidade e posição (FERREIRA *et al.*, 2015). O espaçamento entre linhas, bem como a orientação, são altamente dependentes da tecnologia adotada na medição de profundidade (IHO, 2008; DHN, 2014).

O sensoriamento remoto acústico é o principal meio de investigação de fundos submersos, visto que os métodos tradicionais de sensoriamento remoto, óticos e radar, são pouco eficientes devido à alta atenuação das ondas eletromagnéticas pela água (AYRES NETO, 2000; FERREIRA *et al.*, 2015). Sendo assim, nos levantamentos batimétricos as profundidades são obtidas preferencialmente através de sistemas acústicos, como ecobatímetros monofeixe (*SBES - Single Beam Echo Sounders*) e multifeixe (*MBES - Multibeam Echo Sounders*), além de sonares interferométricos (IHO, 2005; CRUZ *et al.*, 2014), montados a bordo de embarcações, chamadas de plataformas de sondagem. Estes sistemas são utilizados em conjunto com sistemas diferenciais de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) em tempo real, visando o georreferenciamento das profundidades, e, em alguns casos, sensores de medição inercial para controle da atitude da plataforma de sondagem (IHO, 2005; JONG *et al.*, 2010).

Num cenário atual, os produtos gerados com os sistemas de batimetria multifeixe e sonares interferométricos apresentam um elevado ganho em resolução e acurácia, tanto em termos planimétricos quanto altimétricos (profundidade), e um grande adensamento de dados, descrevendo quase que por completo o fundo submerso (CRUZ *et al.*, 2014; MALEIKA, 2015). Todavia, deve-se atentar que estes sistemas ainda possuem um custo de aquisição elevado, em alguns casos, de até 10 vezes o valor de um sistema monofeixe, o processamento de dados é mais complexo e exigem a dependência de profissionais devidamente capacitados para operação.

Apesar das ondas eletromagnéticas apresentarem dificuldades de propagação em meios aquáticos, os sistemas laser aerotransportados, também chamados de *LiDAR (Light Detection And Ranging)*, são bastante utilizados no mapeamento batimétrico (GUENTHER *et al.*, 1996; PASTOL, 2011; ELLMER *et al.*, 2014). O uso de imagens orbitais para estimar a batimetria em águas rasas também vêm sendo objeto de pesquisa (GAO, 2009; CHENG *et al.*, 2015; MOURA *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2016a). É indiscutível que estas tecnologias, pelo menos durante a coleta de dados, proporcionam maior segurança que os levantamentos batimétricos a bordo de embarcações tripuladas, principalmente em áreas que oferecem riscos à navegação na superfície. Outras formas de determinação da batimetria são discutidas, por exemplo, em IHO (2005) e USACE (2013).

Apesar da alta produtividade proporcionada pelos sistemas *LiDAR* a sua utilização fica restrita, *a priori*, aos altos custos envolvidos nos sobrevoos, a problemas relacionados com a detecção de objetos e à alta sensibilidade a materiais em suspensão e à turbidez da água, que restringem seu uso a águas rasas. A profundidade máxima de operação, em condições ótimas, isto é, em águas límpidas, é da ordem de 50 metros (IHO, 2005; ELLMER *et al.*, 2014).

Por outro lado, a determinação da profundidade derivada de imagens orbitais ainda é uma área que carece de estudos mais detalhados. Pesquisas realizadas, por exemplo, por Gao (2009), Cheng *et al.* (2015), Moura *et al.* (2016) e Ferreira *et al.*, 2016a) mostraram que esta tecnologia possui um custo relativamente baixo e reduzido tempo de execução. Porém, sua utilização limita-se a águas pouco profundas (~10 metros) e as informações ainda são obtidas com acurácias incompatíveis com os requisitos atuais, restringindo seu uso para fins de planejamento, reconhecimento e modelagem ambiental. Assim, em levantamentos batimétricos, o uso de imagens orbitais permanece, principalmente como uma ferramenta de reconhecimento e de planejamento em áreas onde informações batimétricas são inexistentes ou insuficientes. Por outro lado, imagens oriundas de sensores orbitais e aerotransportados mostram-se como uma ferramenta muito útil para a delimitação de linhas de costa.

Smith & Sandwell (1997) desenvolveram uma metodologia para mapeamento batimétrico que pode ser utilizada em escala global. Basicamente, os autores propõem a integração de dados de medições batimétricas convencionais com dados de gravidade derivadas de satélites altimétricos, tais como aqueles providos pelo satélite Jason-2 do projeto PISTACH (*Système de Traitement pour les Applications Côtières et l'Hydrologie*), para prover informações batimétricas em regiões onde a cobertura por levantamentos tradicionais é escassa ou inexistente. Estas informações, apesar da baixa acurácia e resolução espacial, podem ser utilizadas, por exemplo, em modelagens ambientais. Os mesmos autores afirmam que, embora os satélites altimétricos não possam «ver» o fundo do oceano, eles são capazes de observar anomalias gravitacionais que podem ser correlacionados com a topografia do fundo submerso.

Assim, o uso de embarcações convencionais, equipadas com sensores para mapeamento submerso e operadas por pessoal a bordo, ainda é o principal meio utilizado quando se deseja obter dados acurados à custos relativamente baixos. Todavia, seu emprego é limitado devido a diversos fatores, como: profundidade dos corpos d'água, custos relativamente altos envolvidos na operação e manutenção das embarcações e tripulação, ambientes inóspitos e inacessíveis e quaisquer áreas que ofereçam riscos a navegação superficial (FERREIRA *et al.*, 2009; GIORDANO *et al.*, 2015).

Visando suprir estas demandas o *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* apresentou, em 1993, o primeiro protótipo de plataforma superficial não tripulada utilizada em levantamentos batimétricos. O protótipo foi chamado de ARTEMIS, pesava cerca de 30 kg e possuía 1,37 m de comprimento por 0,38 m de largura (VANECK *et al.*, 1996). Desde então, inúmeras plataformas não tripuladas foram desenvolvidas para usos civis e militares.

De acordo com Zhao *et al.* (2011), relatos sobre veículos marinhos de superfície remontam à 1983 com o desenvolvimento de um veículo semi-submersível não tripulado. Desde então, os avanços tecnológicos na área de navegação inercial, microeletrônica, micromecânica e dispositivos de comunicação

sem fio possibilitaram o amadurecimento destas plataformas. No início de ano de 2000, os crescentes desenvolvimentos em robótica e automação, permitiram que diversas outras melhorias fossem implementadas, inclusive a execução de tarefas de forma autônoma (MANLEY, 2008).

Rapidamente o potencial das plataformas superficiais não tripuladas foi percebido por vários órgãos públicos e privados, bem como por entidades de pesquisa, sendo, então, várias finalidades atribuídas a estas plataformas, incluindo a execução de levantamentos batimétricos em áreas onde outros veículos marinhos não podem mostrar suas vantagens, como, por exemplo, nas pesquisas em águas muito rasas ou de difícil acesso com embarcações convencionais (MANLEY, 2008; FERREIRA *et al.*, 2009; ZHAO *et al.*, 2011; GIORDANO *et al.*, 2015).

Estas plataformas vêm sendo chamadas na literatura de USV (*Unmanned Surface Vessel* ou *Unmanned Surface Vehicle*), ASC (*Autonomous Surface Craft*), ASV (*Autonomous Surface Vessel* ou *Autonomous Surface Vehicle*) ou, simplesmente por analogia as aplicações em aviação, de “*drones*” ou “*drones marinhos de superfície*” (MANLEY, 2008; FERREIRA *et al.*, 2009; ZHAO *et al.*, 2011; GIORDANO *et al.*, 2015).

Apesar do termo autônomo (*autonomous*) ser frequentemente citado, ele não é utilizado com o significado restrito do termo. Refere-se apenas a veículos não tripulados, visto que estas plataformas, na maioria das vezes, são controladas remotamente por operadores em terra ou em embarcações, pelo menos naqueles momentos que antecedem ou sucedem a execução das tarefas que se propõe. Talvez, um termo mais coerente seja semi-autônomo.

Esta tecnologia apresenta-se bastante nova em contraste com outros veículos marinhos não tripulados, tais como o AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), concebido em meados de 1960, e o ROV (*Remotely Operated Vehicle*), desenvolvido na década de 1950, porém considerado totalmente operacional apenas no final da década de 1970 (WERNLI, 2000; ZHAO *et al.*, 2011). Todavia, muitos desafios enfrentados pelos pesquisadores em plataformas não tripuladas de superfície são análogos àqueles

encontrados durante os desenvolvimentos da tecnologia ROV e AUV, apesar do ambiente de navegação ser consideravelmente diferente (FURFARO, 2012).

Atualmente, os “*drones marinhos de superfície*” tornaram-se uma ferramenta fundamental em diversas aplicações científicas e industriais, onde a substituição do operador a bordo por uma operação remota ou totalmente autônoma é uma questão importante. Ao focar-se nos fins militares, estas plataformas podem ser utilizadas em patrulhas próximas a costa, na segurança nacional, em guerras, no monitoramento de minas submarinas e em missões de apoio a veículos subaquáticos não tripulados (AUV e ROV). Dentro de termos civis, estes veículos são rotineiramente utilizados em pesquisas oceanográficas e campanhas ambientais, monitoramento de portos e atracadouros, controle de poluição, missões de resgate e em levantamentos batimétricos (MANLEY, 2008; FERREIRA *et al.*, 2009; ZHAO *et al.*, 2011; GIORDANO *et al.*, 2015).

Para o mapeamento batimétrico, estas plataformas podem ser equipadas com diversos sensores que permitem coletar dados naquelas áreas onde os levantamentos tradicionais não são justificados ou não podem ser realizados, sejam por questões técnicas, de segurança ou financeiras.

Diante do exposto, este artigo objetiva apresentar um breve panorama da utilização das plataformas não tripuladas na execução de levantamentos batimétricos, descrevendo as tecnologias, principais incertezas envolvidas e as vantagens e desvantagens da sua utilização. Ao final é apresentada uma breve avaliação de campo do modelo RC-S2 desenvolvido pela empresa *Coden CO*.

## 2. PLATAFORMAS BATIMÉTRICAS

Atualmente, plataformas de levantamento batimétrico incluem navios de pequeno e grande porte e embarcações tripuladas, submarinos tripulados, ROVs, AUVs, aeronaves e satélites, além dos “*drones marinhos de superfície*”. A metodologia escolhida para a coleta de dados depende de cada aplicação em particular, bem como da resolução e acurácia requeridas. O uso do *LiDAR* batimétrico ainda esbarra nos altos custos, enquanto que imagens de satélite carecem

de mais pesquisas e desenvolvimentos, como discutido.

O uso de plataformas de superfície tripuladas é limitado devido a diversos fatores, tais como: a profundidade dos corpos d'água, não podendo ser utilizada em ambientes muito rasos, devido a segurança na navegação; os altos custos envolvidos na operação e manutenção das embarcações e tripulação, o que inviabiliza seu uso em determinados projetos; regiões que ofereçam quaisquer riscos a navegação, como por exemplo, rios com fortes correntezas ou zonas marinhas de arrebentação; ambientes inóspitos e inacessíveis, típicos de reservatórios de rejeito de mineradoras, dentre outros (DUNBABIN *et al.*, 2009; FERREIRA *et al.*, 2009; GIORDANO *et al.*, 2015).

Plataformas submarinas tripuladas são capazes de realizar mapeamentos batimétricos, perfilagem sísmica e imageamento acústico com elevada resolução, todavia, os riscos oferecidos à tripulação e os altos custos de operação inviabilizam sua utilização em larga escala. Além do mais, a operação com estas plataformas somente é possível em regiões mais profundas dos oceanos. Assim, levantamentos batimétricos somente são executados por estas plataformas quando existem outras tarefas envolvidas, normalmente militares.

ROVs são robôs submarinos não tripulados operados remotamente a partir de navios ou embarcações de superfície. Estes veículos são conectados a plataforma de superfície através de uma série de cabos (cordão umbilical) que permitem ao operador transmitir sinais de comando e controle, bem como enviar e receber dados. O primeiro veículo operado remotamente foi desenvolvido em 1950, pelo francês *Dimitri Rebikot*, e sua primeira aplicação foi em arqueologia subaquática (RUIZ, 2010).

Estes veículos, bem como plataformas rebocadas, mostraram-se ferramentas extremamente valiosas para investigação de fundos submersos, principalmente, através de sistemas de vídeo. Também podem ser equipados com sensores para mapeamento batimétrico, sísmica de alta resolução e sonografia. Todavia, a prática pôde demonstrar que os dados coletados são altamente sensíveis ao ruído gerado pelos propulsores do veículo. ROVs geralmente são equipados com braços articulados, câmeras que

transmitem imagens em tempo real, luzes, além dos equipamentos utilizados nos levantamentos batimétricos (COHEN, 1970; AYRES NETO, 2000; SOUZA, 2006).

Entretanto, ROVs e sensores rebocados exigem o uso de embarcações de apoio e pessoal para o seu funcionamento, tornando o processo menos eficiente, principalmente, em campanhas de áreas extensas. Além do mais, estes dispositivos são presos por cabos que podem limitar a performance dinâmica do veículo, havendo o risco de ficarem presos a objetos presentes na coluna d'água e de arrebentarem, ocorrendo, nestes casos, a perda do ROV e sensores a bordo.

Os AUVs, em sua forma mais fundamental, são dispositivos robóticos não tripulados que navegam por sistemas de propulsores próprios, controlados e pilotados por um sistema de computador a bordo. O desenvolvimento destes sistemas data de 1960, porém, foi apenas a partir de 1980 que os avanços tecnológicos, sistemas de computador com baixo consumo de energia e memória compatível com os complexos algoritmos envolvidos na navegação, permitiram desenvolver AUVs eficientes e em tamanhos menores. A comercialização destes sistemas teve um aumento significativo nos últimos anos (WERNLI, 2000; RUIZ, 2010).

Frequentemente, os AUVs são confundidos com os UUVs (*Unmanned Underwater Vehicle*), que apesar de serem bastante semelhantes aos AUVs, possuem como diferença principal a necessidade de manter certo nível de comunicação durante a execução das tarefas (RUIZ, 2010). Os AUVs são considerados autônomos por que não necessitam da intervenção do operador durante a missão de pesquisa. Ao término da execução das tarefas programadas, o dispositivo retorna para uma posição pré-programada, quando os dados são descarregados e processados. Estes sistemas, ao contrário dos ROVs, não possuem apegos físicos, podem viajar de forma mais rápida e eficiente. Estima-se que os atuais sistemas AUVs operam com uma velocidade 8 vezes mais rápida que os ROVs.

Um dos grandes problemas enfrentados pelas plataformas autônomas é a energia disponível para operação, visto que estes dispositivos são, em sua maioria, alimentados por um conjunto de baterias, que por mais eficientes

que sejam, impõe restrições em relação ao tempo de operação, potência de propulsão e carga útil a bordo (WERNLI, 2000; MANLEY, 2008). Por outro lado, na operação com plataforma de superfície, há a viabilidade de utilização de energias renováveis, por exemplo, através de painéis solares.

Outro fator limitante é o armazenamento de dados, como não há cabos conectados à plataforma autônoma, os dados precisam ser armazenados diretamente na plataforma de levantamentos, o que requer, em alguns casos, um volume excessivo de memória, ou transmitidos em tempo real através de redes sem fio, que para veículos subaquáticos, tal como os AUVs, torna-se algo impraticável.

Apesar dos ROVs, AUVs e UUVs apresentarem aplicações no mapeamento batimétrico e afins, sua principal função sempre foi a inspeção de estruturas submarinas, principalmente dutos de gás e óleo, em águas muito profundas ou que ofereçam perigo aos mergulhadores e navegantes. Além do mais, o uso destas plataformas no mapeamento batimétrico ainda é limitado devido aos altos custos envolvidos na operação, sendo assim, seu uso somente é justificado em mapeamentos de áreas profundas.

Por fim, têm-se os os “*drones marinhos de superfície*”. Neste texto, evitando quaisquer conflitos de termos, para referir-se a esta tecnologia, doravante dar-se-á preferência ao uso do termo ASC (*Autonomous Surface Craft*, em português, Embarcações de Superfície Autônomas), visto que o termo “*drone*” pode também ser utilizado para referir-se a outros veículos marinhos não tripulados, como AUVs e ROVs e é, atualmente, um termo utilizado extensamente para denotar veículos aéreos não tripulados.

É válido destacar que o termo “*drone*” (em português, zangão) é apenas um nome genérico, originado nos EUA, que vem sendo utilizado em todo o mundo para descrever qualquer objeto voador não tripulado, seja ele de qualquer propósito, origem ou característica. Ou seja, é um termo genérico, sem amparo técnico ou definição na legislação.

Um ASC incorpora todas as vantagens das demais plataformas submersas não tripuladas, mais a característica adicional de operar na

superfície, desta forma, ao contrário dos veículos subaquáticos, um ASC é capaz de manter comunicação através de uma rede sem fio (comunicação via ondas de rádio) com estações base posicionadas em terra ou em plataformas tripuladas. Esta comunicação permite que os dados coletados sejam enviados em tempo real à estação base e também propicia ao operador, caso necessário, qualquer intervenção durante a operação. Alguns sistemas atuais são programados para retornar ao ponto origem (especificado pelo operador) quando houver qualquer perda de comunicação com a estação base.

Outra vantagem dos ASCs é a possibilidade de utilizar sistemas de posicionamento GNSS para navegação e georreferenciamento dos dados coletados. Existe ainda a viabilidade do uso de sistemas diferenciais de posicionamento GNSS em tempo real, como, por exemplo, o RTK (*Real Time Kinematic*), RTG (*Real Time Gipsy*) e DGPS a partir do código ou código suavizado pela portadora, ou, como é muito comum entre as empresas de hidrografia, o uso de receptores com correção Banda L, que dispensam uma estação tradicional de referência, tal como exigido pela tecnologia RTK. Estas correções são, em sua maioria, fornecidas por empresas privadas, como Trimble (OmniSTAR) e TerraStar, que cobram pelo serviço (LANGLEY, 1998; LEICK, 2004; FERREIRA *et al.*, 2015).

Assim, levantamentos batimétricos realizados através de plataformas autônomas podem, dependendo de certas particularidades, possuir muitas vantagens. De acordo com o grau de autonomia da plataforma, a intervenção humana durante a coleta de dados é mínima ou nenhuma. Para batimetria isso é bastante útil, visto que a plataforma autônoma pode executar a partir de poucos comandos uma série de linhas de sondagem, repetidamente se necessário, o que seria uma tarefa demorada e dispendiosa para embarcações tripuladas (FERREIRA *et al.*, 2009). Soma-se a isso a redução de pessoal e equipamentos de apoio, reduzindo os custos operacionais.

Devido à alta acurácia posicional provida pelos receptores GNSS, o desempenho dos ASCs é superior àqueles fornecidos por veículos subaquáticos. Além do mais, ASCs são mais simples de operar e muito mais versáteis em

diferentes ambientes. Novas características adicionadas aos ASCs, tais como baterias com maior duração, detecção inteligente de obstáculos, sistemas inercias para controle de atitude, placas de energia solar e maior carga útil, deram ainda mais vantagens a estas plataformas (HINE & MCGILLIVARY, 2007; MANLEY, 2008; GIORDANO *et al.*, 2015).

Embora levantamentos através de plataformas autônomas sejam um conceito bastante atraente, dar autonomia a máquinas é uma tarefa desafiadora. Uma plataforma totalmente autônoma deve ser capaz de efetuar o levantamento batimétrico, seguir as linhas de sondagem planejadas, detectar e desviar de possíveis obstáculos, encontrar e corrigir falhas operacionais, dentre outros (BOAS *et al.*, 2013).

Muitos desafios foram enfrentados pelos desenvolvedores dos sistemas ASC. Alguns problemas são, inclusive, similares aqueles encontrados pelos pesquisadores durante o desenvolvimento dos AUVs e ROVs. Apesar do ambiente de operação das plataformas superficiais possuir inúmeras vantagens, apresenta também desvantagens. A área de interação entre o ar e a água é bastante dinâmica. A operação com ASCs tem mais vantagens em águas rasas, que no caso marinho ocorre principalmente em regiões costeiras. O problema aqui reside no fato da existência de inúmeros obstáculos não estáticos, como, por exemplo, embarcações civis e motos aquáticas. Outro grande problema inerente às embarcações de pequeno formato são as dificuldades enfrentadas durante a orientação devido as ondas e ao vento (FURFARO, 2012).

De todas as fontes de incertezas envolvidas em um levantamento batimétrico, a incerteza devido aos movimentos da plataforma de sondagem é, talvez, a componente mais crítica numa sondagem utilizando um ASC (HARE, 1995; FERREIRA *et al.*, 2016b)

Conforme descrito em Ferreira *et al.* (2015, 2016b), nos levantamentos batimétricos realizados com um ecobatímetro monofeixe, por exemplo, incertezas na medição da profundidade são introduzidas devido aos movimentos de *roll* (balanço), *pitch* (caturro) e *heave* (arfagem) (IHO, 2005; USACE, 2013). Sendo assim, as profundidades observadas devem ser compensadas dos valores de rotação em torno do eixo longitudinal da plataforma de sondagem

(*roll* -  $\Phi$ ), dos valores de rotação em torno do eixo transversal da plataforma de sondagem (*pitch* -  $\theta$ ) e do movimento vertical da plataforma de sondagem (*heave*). Conforme exposto na Figura 1, movimentos de *roll* e *pitch* implicarão em uma inclinação da antena GNSS, causando também incertezas no posicionamento planimétrico.

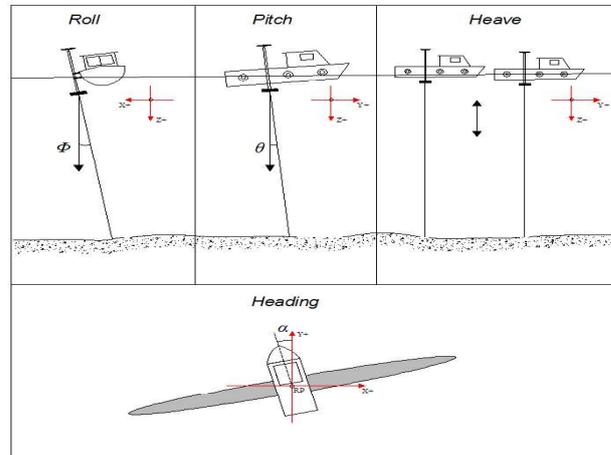


Fig. 1 – Incerteza na medição da profundidade e posição devido aos movimentos de *Roll*, *Pitch* e *Heave* da plataforma de sondagem. Fonte: Ferreira *et al.*, (2016b).

De acordo com IHO (2005), nos levantamentos monofeixe, o *roll* e o *pitch* afetam a medição da profundidade somente quando a sua magnitude é superior a metade da largura do feixe acústico emitido pelo transdutor. Operando em águas calmas (como no caso de reservatórios) a compensação destes efeitos pode ser negligenciada (USACE, 2013; FERREIRA *et al.*, 2015). Entretanto, quando se utilizam transdutores com feixe estreito o conhecimento dos ângulos de *roll* e de *pitch* são necessários para a estabilização do feixe, permitindo a correta medição da profundidade na vertical do transdutor.

Estas rotações podem ser medidas empregando Unidades de Medida Inercial (*IMU - Inertial Measurement Unit*). Os sensores inerciais aplicam as leis de movimento de Newton e são compostos por giroscópios e acelerômetros. Os acelerômetros são usados para medir as acelerações do centro de massa da embarcação, fornecendo assim as forças que agem sobre o mesmo. Os giroscópios são empregados para determinar as rotações em torno deste centro de massa e, por conseguinte, permitem analisar a situação de equilíbrio da embarcação (KÜCHLER *et al.*, 2011; FERREIRA *et al.*,

2015). Quando se utilizarem IMUs, a instalação deve ser efetuada próximo ao centro de massa da plataforma de sondagem.

O *heave* é causado pela ação de ondas sobre a plataforma de sondagem e pode ser medido através de sensores inerciais, assim como o *roll* e *pitch*, ou simplesmente por compensadores de onda. Este efeito dificilmente causará incertezas na medição de profundidade em ambientes lânticos, porém seu uso é sempre recomendável. Quando for utilizado um compensador de ondas, este deve ser fixado na vertical do transdutor, para medir o *heave* de forma efetiva (HARE, 1995; IHO, 2005). Analisando a Figura 1, percebe-se que o efeito *heave* propaga-se para a profundidade de forma direta.

Quando as medições são realizadas através de sensores de varrimento, tais como: ecobatímetros multifeixe, sonares interferométricos e sonares de varredura lateral (SSS - *Side Scan Sonar*), correções de orientação (*heading*) da plataforma de levantamento também são requeridas. Assim sendo, as sondagens observadas também devem ser compensadas dos valores de rotação em torno do eixo vertical da plataforma de sondagem (*heading* -  $\alpha$ ).

Os movimentos de *heading*, também conhecido como *yaw*, tem um pequeno efeito para feixes centrais, porém, provoca grandes lacunas ou agrupamento para feixes externos, principalmente em grandes profundidades. Enquanto os agrupamentos locais melhoram a densidade, as lacunas causam uma perda de densidade (CLARK, 2014). Uma vez que o *heading* é definido no plano horizontal, qualquer incerteza na sua medição somente pode resultar em incertezas na posição horizontal (Figura 2). No entanto, a não compensação do *heading* pode, mesmo que com baixa magnitude, influenciar a medição de profundidade em águas muito profundas. Em particular, para barcos pequenos, é muito difícil manter a plataforma de sondagem com um *heading* constante, principalmente em condições de mar agitado.

Nas operações com ASCs, estes efeitos são ainda mais preocupantes, devido, principalmente, ao tamanho e peso reduzidos destas plataformas, implicando em baixa estabilidade. Assim, as medições da atitude devem ser realizadas com alta acurácia. Porém, em função das restrições de carga útil e custos, os ASCs são, em sua

maioria, equipados com sensores inerciais de baixa resolução (FERREIRA *et al.*, 2009; GIORDANO *et al.*, 2015).

Normalmente, são utilizados sensores inerciais baseados na tecnologia MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) que, por sua vez, utilizam algoritmos de processamento para prover as informações de atitude dos ASCs. Basicamente, estas IMUs utilizam três diferentes algoritmos de processamento: VGA (*Vertical Gyro Algorithm*), AHRS (*Attitude and Heading Reference System*) e AINS (*Aided Inertial Navigation System*) (CLARK, 2014; GIORDANO *et al.*, 2015).

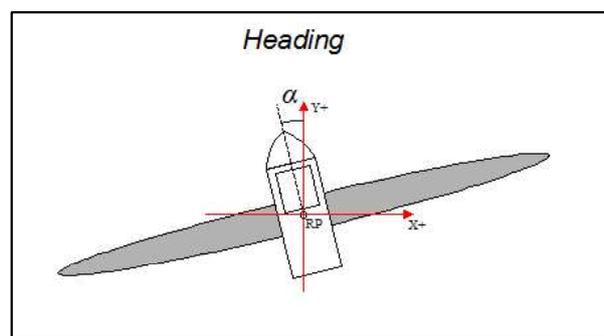


Fig. 2 – Incerteza devido aos movimentos de *heading* da plataforma de sondagem. Fonte: Ferreira *et al.*, (2016b).

Os efeitos de *roll* podem ser minimizados através da utilização de plataformas com cascos do tipo catamarã ou trimarã (MANLEY, 2008; DUNBABIN *et al.*, 2009; FERREIRA *et al.*, 2009; ZHAO *et al.*, 2011; GIORDANO *et al.*, 2015). Estes formatos, além de prover maior estabilidade que sistemas monocasco, são capazes de suportar maiores cargas.

Conforme citado, outro grande problema inerente às embarcações de pequeno formato são as dificuldades enfrentadas durante a orientação (*heading*) devido, principalmente, às ondas e ao vento (FURFARO, 2012). Este efeito pode, atualmente, ser medido com elevada acurácia, empregando sistemas diferenciais de posicionamento GNSS em tempo real. Todavia, os efeitos de *pitch* e *heave* ainda são um problema para os ASCs, principalmente em ambientes marinhos.

Em embarcações convencionais, além do *heave*, as variações dinâmicas de calado também afetam a componentes vertical. Como sabido, a face inferior do conjunto de transdutores é

a referência para a medição de profundidade, como ele é instalado submerso na água, para a obtenção das profundidades referenciadas, *a priori*, ao nível d'água, é necessário somar o valor das sondagens à altura de imersão do transdutor (*draft*). O *draft* deve ser medido com alto rigor, pois qualquer incerteza na sua medição propagar-se-á de forma direta para a profundidade (IHO, 2005; USACE, 2013). Devido às mudanças de carga a bordo, movimentos de *settlement* e *squat*, variação da densidade da água, dentre outros, o *draft* pode variar de forma instantânea durante a sondagem batimétrica. Diante disso, o termo calado dinâmico pode ser definido como a profundidade instantânea do transdutor em relação a linha média d'água. A profundidade de imersão do transdutor também é afetada pela banda e trim da embarcação (GODIN, 1998; MARTIN & BROADBENT, 2004; IHO, 2005; USACE, 2013).

Nos ASCs do tipo monocasco, o conjunto de transdutores é geralmente montado no casco, enquanto que para os ASCs do tipo catamarã, prefere-se instalar o transdutor no centro da embarcação, ou seja, entre os dois cascos. Em ambos os casos o *draft* pode ser mensurado com elevada acurácia. Nos ASCs, mudanças de carga a bordo são improváveis de ocorrer e os demais efeitos são minimizados ou eliminados.

De acordo com o discutido até o momento, uma plataforma de levantamento é composta por diversos sensores para medição da profundidade, posição, atitude e velocidade do som, seja ao longo da coluna d'água ou à face do conjunto de transdutores. Estes sensores são montados a bordo da plataforma de sondagem e, por limitações físicas, são dispostos, em quase sua totalidade, em diferentes localizações e angularmente desalinhados. A disposição dos equipamentos a bordo depende, dentre outros fatores, da configuração do sistema de levantamento e do porte da embarcação.

Para que as informações coletadas pelos diversos sensores possam ser sincronizadas, é necessário o conhecimento da posição destes sistemas em relação a um ponto de referência do sistema de coordenadas da embarcação. Incertezas no posicionamento destes sensores irão introduzir incertezas horizontais e verticais na medição da profundidade reduzida (CLARKE, 2003). É também comum equipar as plataformas

com equipamentos para imageamento acústico, como, por exemplo, SSS, e equipamentos de perfilagem sísmica, tais como, perfiladores de sub-fundo (*SBP - Sub-Bottom Profiler*), *boomers*, *sparkers* e sondas do tipo *Chirp* (AYRES NETO, 2000).

Em pequenas embarcações, quando possível, todos os sensores são instalados de forma alinhada na vertical do transdutor, sem afastamentos horizontais (*offsets*). Esse alinhamento possibilita a simplificação do modelo matemático de correção das incertezas de posicionamento da antena GNSS em relação ao transdutor, permite a medição do efeito *heave* de forma efetiva e evita a introdução de efeitos sistemáticos derivados da medição de afastamentos (FERREIRA *et al.*, 2015). Deve-se atentar que qualquer afastamento ou desalinhamento entre a antena GNSS e o transdutor irá também gerar incertezas no posicionamento da sondagem.

Quando um IMU é utilizado para medição do *roll*, *pitch* e *heave*, a instalação deste ocorre, preferencialmente, no centro de massa da plataforma de sondagem. Nestes casos, poderão ser gerados afastamentos (*offsets*) entre o sistema inercial e os demais sistemas a bordo. Devido a essa configuração, por exemplo, o efeito *heave* observado pelo sistema inercial não condiz com o *heave* efetivamente sofrido pelo transdutor, devendo-se este efeito ser transferido para a posição do transdutor através do *heave* induzido e, diante disso, qualquer incerteza na medição dos afastamentos irá se propagar para a determinação do efeito *heave* (HARE, 1995; IHO, 2005).

Em todos os casos, quando não for possível a instalação de todos os equipamentos alinhados na vertical do transdutor, devem-se medir os afastamentos com a menor incerteza possível, preferencialmente por topografia clássica, empregando ajustamento de observações e com a plataforma de sondagem em doca seca. Todavia, principalmente para grandes embarcações, pode não ser possível o emprego desta metodologia.

Neste sentido, a operação com ASCs possui diversas vantagens. Como trata-se de pequenas embarcações, os instrumentos podem ser montados sem afastamentos ou desalinhamentos ou, estes determinados com alto rigor, o que elimina possíveis fontes de incertezas nos dados.

## 2.1. Breve revisão dos ASCs

Relatos sobre ASCs (*Autonomous Surface Craft*) remontam a 1983, quando o *International Submarine Engineering*, órgão sediado no Canadá, desenvolveu um veículo semi-submersível não tripulado, chamado DOLPHIN (*Deep Ocean Logging Platform with Hydrographic Instrumentation and Navigation*) (CURCIO *et al.*, 2005; ZHAO *et al.*, 2011). Desde então, os avanços tecnológicos na área de navegação inercial, microeletrônica, micromecânica e dispositivos de comunicação sem fio possibilitaram o amadurecimento dos ASCs.

No início dos anos 1990, estudos em ASCs concentraram-se no desenvolvimento e controle da arquitetura, sistemas de navegação e técnicas de coleta de dados. Com a integração de informações GNSS, dispositivos de comunicação sem fio e sensores inercias, estas plataformas começaram a ser testadas de forma efetiva com vistas a operação autônoma e a coleta de dados automatizada.

Em 1993, o MIT apresentou o primeiro ASC para levantamentos batimétricos, chamado ARTEMIS (VANECK *et al.*, 1996). Esta plataforma foi concebida como uma réplica de uma traineira de pesca, que foi inicialmente capaz de testar os sistemas de navegação e controle requeridos por ASCs. O primeiro teste foi executado no Rio Charles, em Boston, onde o ARTEMIS foi utilizado para coletar dados de batimetria com um ecobatímetro monofeixe. Uma das principais limitações deste ASC foi a baixa estabilidade, devido, principalmente, ao tamanho reduzido. Visando fornecer maiores capacidades, uma plataforma do tipo caiaque foi posteriormente examinada e convertida em um ASC (MANLEY, 2008).

Continuando as pesquisas, o MIT apresentou em meados de 1996 o ASC ACES (*Autonomous Coastal Exploration System*). Este ASC, em comparação com ARTEMIS, apresentava-se mais estável e versátil (MANLEY, 2008; ZHAO *et al.*, 2011). O ACES foi desenvolvido com um casco do tipo catamarã, que fornecia maior estabilidade, velocidade e carga útil. Foi utilizado um motor à gasolina com uma potência de 3,3 hp, que pôde fornecer mais de 10 horas de funcionamento e uma velocidade máxima

de aproximadamente 5m/s (ou 10 nós), quase 3 vezes mais que seu antecessor (ZHAO *et al.*, 2011).

Por volta de 1998, modificações no projeto do ACES foram conduzidas. A estrutura do casco do tipo catamarã foi substituída por fibra de vidro, o que reduziu o peso, mas também a velocidade de operação da plataforma. O motor à gasolina foi substituído por um par de motores elétricos. Os testes finais nesta nova plataforma encerram-se em 2000 e o ACES modificado foi renomeado para AutoCAT (Figura 3) (MANLEY, 2008).



Fig. 3 – ASC AutoCAT. Fonte: Manley (2008).

Os desenvolvimentos realizados pelo MIT inspiraram outras pesquisas em ASC, principalmente nos Estados Unidos. Porém, somente nos últimos anos observou-se um crescimento na procura por esta tecnologia. Atualmente encontra-se diversos ASCs científicos e comerciais. A Tabela 1 apresenta um resumo do ASCs científicos desenvolvidos nos últimos anos.

Em meados de 1999, a Universidade de Rostock apresentou o primeiro ASC Europeu, chamado de MESSIN. Este ASC foi financiado pelo governo Alemão e consistia de uma embarcação do tipo catamarã com casco de fibra de vidro (CACCIA, 2006). Atualmente o ASC MESSIN conta com uma série de equipamentos a bordo, como ecobatímetros monofeixe ou multifeixe, SBP, ADCPs (*Acoustic Doppler current profiler*), sistema de posicionamento GNSS, sensores inercias e sistemas de vídeo. (BUCH & KUROWSKI, 2013).

Tabela 1: Lista dos *Autonomous Surface Craft (ASC)* internacionais

ANO	ASC	PAÍS	ORGANIZAÇÃO	USO PRINCIPAL
1993	ARTEMIS	EUA	Instituto de Tecnologia de Massachusettes (MIT)	Levantamento/testes
1996	ACES	EUA	Instituto de Tecnologia de Massachusettes (MIT)	Levantamento/testes
1999	MESSIN	Alemanha	Universidade de <i>Rostock</i>	Levantamento/testes
1999	DELFIN	Portugal	ISR/IST	Operação coordenada
2000	AutoCAT	EUA	Instituto de Tecnologia de Massachusettes (MIT)	Levantamento
2003	SESAMO	Itália	CNR-ISSIA	Levantamento
2004	SCOUT	EUA	Instituto de Tecnologia de Massachusettes (MIT)	Operação coordenada
2005	Charlie	Itália	CNR-ISSIA	Levantamento
2005	ROSS	Índia	Instituto Nacional de Oceanografia	Levantamento
2005	Springer	Grã-Bretanha	Universidade de <i>Plymouth</i>	Levantamento
2005	BOB	EUA	Virginia Tech	Levantamento
2005	Zarco	Portugal	Universidade de Porto	Operação coordenada
2006	-	EUA	Academia Naval dos Estados Unidos	Testes
2006	IRIS	EUA	WHSC	Levantamento
2007	Tri0601	China	Instituto de Automação de Shenyang	Testes
2007	Swordfish	Portugal	Instituto Politécnico de Porto	Operação coordenada
2007	Circe	EUA	Colégio de Eng. Franklin W. Olin	Uso educacional
2007	ROAZ II	Portugal	Instituto Politécnico de Porto	Levantamento
2007	OASIS-3	EUA	<i>Emergent Space Technologies</i>	Levantamento
2008	Sea-RAI	EUA	Universidade Texas A&M	Levantamento
2008	-	China	Universidade Marítima de Shanghai	Levantamento
2008	WASP	EUA	Universidade Florida <i>Atlantic</i>	Levantamento
2009	Nereus	EUA	Universidade Florida <i>Atlantic</i>	Levantamento
2009	Wivenhoe	Austrália	CSIRO ICT Center	Levantamento
2012	CatOne	Itália	<i>aerRobotix</i>	Levantamento
2015	MicroVe-GA	Itália	Universidade de Nápoles	Levantamento

Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2011).

Em paralelo, o Instituto Técnico de Lisboa projetou e desenvolveu o ASC Delfim. Este ASC consistia de um catamarã com cerca de 3,5 m dotado de motores elétricos. Delfim foi um dos frutos do projeto ASIMOV (*Advanced System Integration for Managing the coordinated operation of robotic Ocean Vehicles*), financiado pela União Europeia no período de 1997 a 2000. Apesar de não ser um dos objetivos principais, o ASC português foi utilizado para coleta

autônoma de dados batimétricos (CACCIA, 2006; ZHAO *et al.*, 2011).

Em 2003, a Itália também apresentou um ASC desenvolvido para apoio a pesquisas oceanográficas realizadas na Antártida, chamado SESAMO. Seguindo as tendências, o ASC italiano também era do tipo catamarã, o que permitia maior estabilidade e capacidade de carga útil. Possuía cerca de 320 kg e dimensões de 3,30 m de comprimento por 1,80 m de largura. SESAMO foi

utilizado com sucesso durante a XIX expedição Italiana para a Antártida, que ocorreu em meados de 2004. Um ano mais tarde, o ASC SESAMO foi melhorado e renomeado para Charlie 2005. Todavia, o foco do ASC Italiano continuou sendo coleta de dados batimétricos em áreas de difícil acesso (ZHAO *et al.*, 2011).

Com a finalidade de avançar os esforços de investigação na área da autonomia cooperativa, os engenheiros do departamento de Engenharia Oceânica do MIT desenvolveram o ASC SCOUT (*Surface Craft for Oceanographic and Undersea Testing*). Os objetivos principais do projeto incluíam: simplicidade, robustez, versatilidade e melhorias operacionais, assim, em 2004 foram construídos quatro ASCs do tipo caiaque e diversos testes de campo foram conduzidos (CURCIO *et al.*, 2005). A Figura 4 ilustra o ASC SCOUT.



Fig. 4 – ASC SCOUT. Fonte: Curcio *et al.* (2005).

Em 2007, foi a vez da Índia entrar na era dos ASCs com o desenvolvimento do ASC ROSS. No mesmo ano a Grã-Bretanha também apresentou seu ASC construído para fins de pesquisas oceanográficas, chamado Springer. Entre 2005 e 2009 uma série de ASCs foram apresentados, conforme Tabela 1, porém, o problema da maioria ainda era o armazenamento de energia. Neste sentido, destaca-se o ASC OASIS-3, um dos primeiros ASCs desenvolvidos com a capacidade de utilizar energias renováveis, através de painéis solares. Esse feito representou um grande avanço da tecnologia ASC, propiciando o desenvolvimento de outros ASCs com o mesmo propósito como o WASP e o Wivenhoe.

Recentemente, a Universidade de Nápoles apresentou o ASC MicroVeGA (*Micro Vessel Geo Application*). Este ASC é equipado a bordo com um microcomputador, sistema de posicionamento GPS diferencial, ecobatímetro monofeixe, IMU para controle de atitude, detector de obstáculos com controle de temperatura e sistema de vídeo (emerso e submerso). Todo o sistema, bem como o levantamento batimétrico, é monitorado em tempo real através do aplicativo TrackStar desenvolvido pelo mesmo grupo de pesquisas (GIORDANO *et al.*, 2015).

Para fins militares, diversas são as pesquisas e usos. Dentre os ASCs mais desenvolvidos, destacam-se o SSC San Diego, o sistema QinetiQ Ltd SWIMS e o ASC Israeli Protector (CACCIA, 2009). Nos últimos anos surgiram também as ASCs comerciais, principalmente, nos EUA, Alemanha e Japão. A empresa americana *Seafloor Systems, Inc.* comercializa, basicamente, dois modelos de ASC desenvolvidos para levantamento batimétricos, o Echoboat e o Hydron. A empresa prefere usar o acrônimo ASV (*Autonomous Surface Vehicle*), originando o Echoboat-ASV e o Hydron-ASV. A autonomia é provida pelo sistema de controle AutoNav, também produzido pela *Seafloor Systems*.

O Hydron (Figura 5) é um catamarã de pequeno porte. A plataforma pode ser equipada com sistema GNSS de qualquer fabricante, porém, somente pode transportar o ecobatímetro monofeixe modelo HydroLite da própria *Seafloor Systems*.



Fig. 5 – ASC Hydron da *Seafloor Systems, Inc.* equipado com sistema de controle AutoNav, ecobatímetro monofeixe *HydroLite* e sistema de posicionamento RTK.

O EchoBoat (Figura 6) é um ASC do tipo monocasco de maior porte, mais flexível em termos de carga útil e, desta forma, pode ser equipado com uma série de sistemas de sondagem batimétrica, incluindo sistemas multifeixe de menor porte, SSS e ADCP.



Fig. 6 – ASC Echoboat da *Seafloor Systems, Inc.* equipado com sistema de controle AutoNav, ecobatímetro multifeixe, IMU e duas antenas GNSS para posicionamento e *heading*.

Segundo informações do fabricante, mais de 100 Hydrones e 15 Echoboats já foram comercializados ao redor do mundo. A empresa também confecciona estas plataformas sem o sistema de controle AutoNav. Nestes casos, as plataformas perdem a autonomia e necessitam ser controladas remotamente durante a navegação. Para fazer uma distinção, a empresa nomeou estas plataformas com o acrônimo RCV (*Remotely Controlled Vehicle*). Independentemente do nível de intervenção humana, estas plataformas são controladas ou monitoradas por um operador em terra ou em um barco de apoio.

A empresa Americana *Oceanscience*, recentemente incorporada a gigante *Teledyne*, também atua no ramo dos ASCs, com as linhas Z-Boat e Q-Boat, ambas plataformas monocasco que podem operar de forma autônoma ou serem controladas remotamente. A linha Z-Boat compreende plataformas equipadas com sistemas de batimetria monofeixe (Z-Boat 1800), sondas para monitoramento de habitat subaquático (Z-Boat 1800MX), sistemas de batimetria

multifeixe (Z-Boat 1800-RP) e sistemas de imageamento acústico (Z-Boat 1800SS). A Figura 7 ilustra o Z-Boat 1800-RP, configurado com um sistema de batimetria multifeixe.



Fig. 7 – ASC Z-Boat 1800-RP da *Teledyne Oceanscience* equipado com sistema de controle autônomo, ecobatímetro multifeixe, IMU e duas antenas GNSS para posicionamento e *heading*.

A linha Q-Boat (Q-Boat 1800P, Q-Boat 1800D e Q-Boat *Discharge Measurements*) foi desenvolvida para implantação, especificamente, de ADCPs fornecidos pela maioria dos fabricantes mundiais. A Figura 8 ilustra uma destas plataformas.



Fig. 8 – Linha Q-Boat da *Teledyne Oceanscience* equipado com ADCP.

A empresa Alemã *Evo Logics* oferece o ASC SONOBOT. O sistema é do tipo catamarã, e oferece medições de profundidade através da tecnologia *S2C broadband*, desenvolvida pela própria fabricante, que pode fornecer medições em perfis (monofeixe) ou em faixas (multifeixe). As informações de profundidade são georreferenciadas através de sistemas de posicionamento GNSS RTK ou DGPS. A plataforma também pode ser equipada com SSS

para fornecer imageamento acústico. A Figura 9 mostra o sistema SONOBOT.



Fig. 9 – ASC SONOBOT da empresa Alemã *Evo Logics*.

Um ASC mais simples é produzido e comercializado pela empresa Japonesa *Coden Co*. A empresa produz dois sistemas do tipo monocasco, o RC-S2 e o RC-S3. Basicamente, a diferença consiste no alcance do sistema, que pode ser operado remotamente até uma distância de 500 m para o RC-S2 e de 800 m para o RC-S3. O modelo RC-S3 também possui maior velocidade e autonomia que seu antecessor.

Estes ASCs são equipados com um receptor DGPS e um ecobatímetro monofeixe com frequência de operação de 200 kHz, que pode oferecer medições de até 80 m de profundidade. A comunicação com a estação base é realizada através de uma rede *wireless* operando na faixa dos 2.4 GHz. Devido à baixa estabilidade, o sistema é utilizado, prioritariamente, em ambientes lênticos. Todavia, para navegação em meio marinho, a empresa oferece a opção de interligar dois barcos, visando formar um casco do tipo catamarã. Este conjunto é ainda equipado com um compensador de ondas para controle do efeito *heave*, o que, no entanto, isso eleva muito o custo do ASC, inviabilizando a sua utilização.

Conjuntamente com o ASC, é fornecido um *software* para planejamento do levantamento, configuração e controle do barco e transferência

dos dados em tempo real. Posteriormente, as informações batimétricas podem ser convertidas para o formato primário do *software Hypack*, através de um aplicativo fornecido pelo próprio fabricante. O *Software Hydromagic*, da empresa Holandesa *Eye4software* também é capaz de processar as informações batimétricas produzidas pelos ASCs da *Coden*.

Apesar dos modelos RC-S2 e RC-S3 serem operados remotamente, eles oferecem a opção de percorrer linhas de sondagem de forma autônoma, tendo autonomia de até 2 horas por conjunto de baterias. Neste sentido, o operador precisa indicar ao ASC quando a linha de sondagem começa e quando termina, bem como fornecer comandos para o sistema iniciar e finalizar a gravação dos dados. A Figura 10 ilustra o modelo RC-S3.



Fig. 10 – ASC RC-S3 da empresa Japonesa *Coden Co*.

No Brasil ainda não há divulgação de desenvolvimentos de ASCs para fins comerciais porém, algumas universidades vêm desenvolvendo pesquisas na área, com destaque para o ASC desenvolvido por pesquisadores da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Este ASC consiste de um trimarã projetado para realizar observações de peixes, da qualidade da água, bem como outros tipos de observações em águas fluviais. Seu grande diferencial é a autonomia, com menor exigência de reabastecimentos devido ao uso de um sistema combinado de propulsão, que inclui velas, motor elétrico e energia solar (Figura 11).



Fig. 11 – ASC desenvolvido por pesquisadores da USP. Fonte: <http://www.usp.br/agen/?p=97524>.

### 3. TESTES DE CAMPO

Com o objetivo de avaliar a capacidade das ASCs para realização de levantamentos batimétricos, diversos testes foram realizados com o modelo RC-S2 da *Coden*, cedido pela empresa CPE Tecnologia.

Foram conduzidos testes em diferentes ambientes, como: rios de baixa correnteza, áreas extremamente rasas, lagoas e represas, barragens de rejeitos de mineração, etc.

De uma forma geral, o sistema RC-S2 é muito fácil de operar e pôde fornecer dados confiáveis nas diversas áreas de estudo. Destaca-se a possibilidade de operação em águas extremamente rasas (~1 m), onde uma embarcação convencional não poderia navegar, o baixo custo relacionado a campanha batimétrica, a redução da equipe de campo a apenas um homem e o fato da plataforma não ser tripulada, o que permite seu uso em áreas que oferecem quaisquer riscos a navegação. Evidenciou-se que em uma das áreas estudadas, especificadamente, da mineradora Samarco, o uso de embarcações com tripulação não é mais recomendado, uma vez que as barragens possuem rejeitos nocivos à saúde humana.

Outra vantagem desta ASC, em específico, é o uso de motores elétricos que não agridem o meio ambiente, ao contrário de motores movidos à gasolina e óleo diesel, que além de emitirem muito barulho, lançam grandes quantidades de gases tóxicos na atmosfera e podem poluir a água com vazamentos do tanque. Tal fato permite o uso desta plataforma mesmo em ambientes onde a navegação aquaviária é proibida por questões ambientais.

A Figura 12 ilustra umas das áreas de estudo utilizadas para avaliar o ASC RC-S2, localizada na cidade de Itabira-MG. A área consiste de uma

barragem de descarte de rejeito utilizada pela Mina de Conceição (Complexo Itabira) da companhia Vale do Rio Doce.

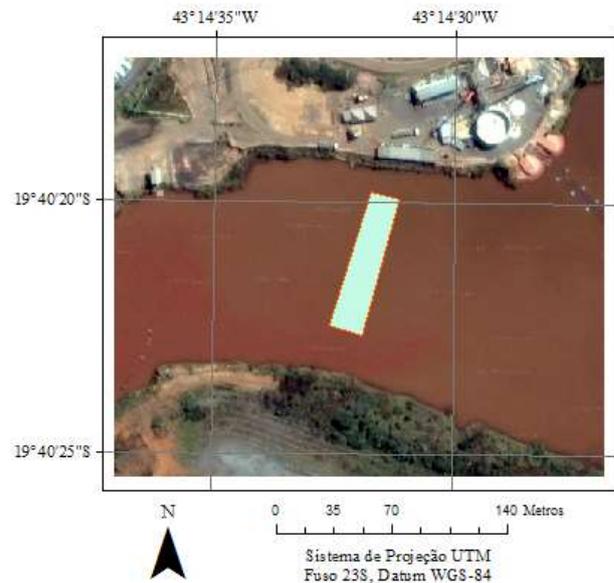


Fig. 12 - Área de Estudo, localizada em Itabira-MG.

Este teste visou, inicialmente, apresentar as potencialidades do ASC à unidade da Vale do Rio Doce. As informações apresentadas adiante são limitadas por serem de cunho confidencial.

Destaca-se que o planejamento e o processamento dos dados batimétricos são idênticos àqueles levantamentos conduzidos a bordo de embarcações convencionais. A diferença permanece apenas durante a campanha de campo, visto que a plataforma precisa ser operada por terra. Todavia, o trabalho de campo é extremamente reduzido se alguns cuidados forem tomados durante o planejamento das linhas de sondagem. Dependendo do nível de autonomia do ASC, o trabalho de campo pode, ainda, resumir-se a apenas posicionar a embarcação na água e ligar o sistema.

Inicialmente foram planejadas sete linhas de sondagem no sentido longitudinal e com espaçamento de cinco metros. Estas linhas foram, então, sondadas de forma autônoma pelo ASC RC-S2. Alguns problemas durante a navegação foram logo percebidos e atribuídos a falhas do sistema GPS. A falta de correção DGPS dificultou a navegação autônoma, como pode ser visto na Figura 13, onde as linhas na cor azul indicam a trajetória efetivamente executada pelo RC-S2 durante a navegação autônoma sem correção diferencial. Essa imprecisão na navegação das linhas, que foram planejadas como segmentos de retas, introduziu incertezas no posicionamento das profundidades.

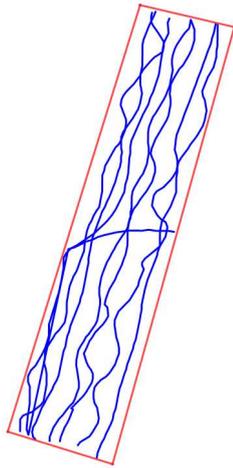


Fig. 13 – Trajetória percorrida pelo ASC RC-S2 nos testes realizados sem correção diferencial.

De acordo com o fabricante, este problema pode ser corrigido fornecendo correção DGPS para o sistema de posicionamento do ASC, indisponível nos testes iniciais.

Outros problemas enfrentados durante os testes incluem: frequente perda do sinal *wireless*, o que, para este sistema, faz com que o ASC retorne ao ponto onde foi iniciado; falta de um sistema de detecção de obstáculos, o que causa problemas durante a navegação autônoma e durante o retorno nos casos de falhas de comunicação com a estação base; baixa autonomia do conjunto de baterias, possibilitando apenas 2 h de navegação; baixa potência do conjunto de motores que limita a velocidade a cerca de 1 m/s; indisponibilidade de um sistema de vídeo, o que inviabiliza/dificulta a

operação manual via controle remoto, dentre outros.

As profundidades coletadas mostraram-se de relativa qualidade, com ecogramas limpos e sem perdas do sinal acústico, conforme ilustrado pela Figura 14. Todavia, é fácil perceber a presença de retornos múltiplos e pequenos *spikes*, que podem prejudicar a detecção de fundo durante o processamento.

A Figura 15 mostra o perfil de fundo referente ao ecograma da Figura 14, digitalizado de forma automática pelo *software Hypack*. Percebe-se que, mesmo sendo realizada de forma automática, a detecção de fundo ocorreu de forma coerente.

O mesmo padrão foi observado por todas as linhas sondadas nesta área de estudo. Evidencia-se que as características da área influenciaram a boa qualidade das profundidades, visto que se tratava de um ambiente lântico, com pouca ou nenhuma presença de sedimentos em suspensão e com fundo submerso provido de material com boa reflexão acústica.

Percebe-se que diversas melhorias são requeridas para este ASC em específico. Porém, sua utilização possui diversas vantagens, apresentadas ao longo deste artigo e, em especial para ambiente lânticos, típicos de barragens de mineração, onde os ASCs podem substituir de forma bastante eficiente e com grandes ganhos as embarcações de levantamentos batimétricos convencionais.

Testes em meios náuticos não foram conduzidos com esta plataforma devido à falta de um compensador de ondas ou um IMU.

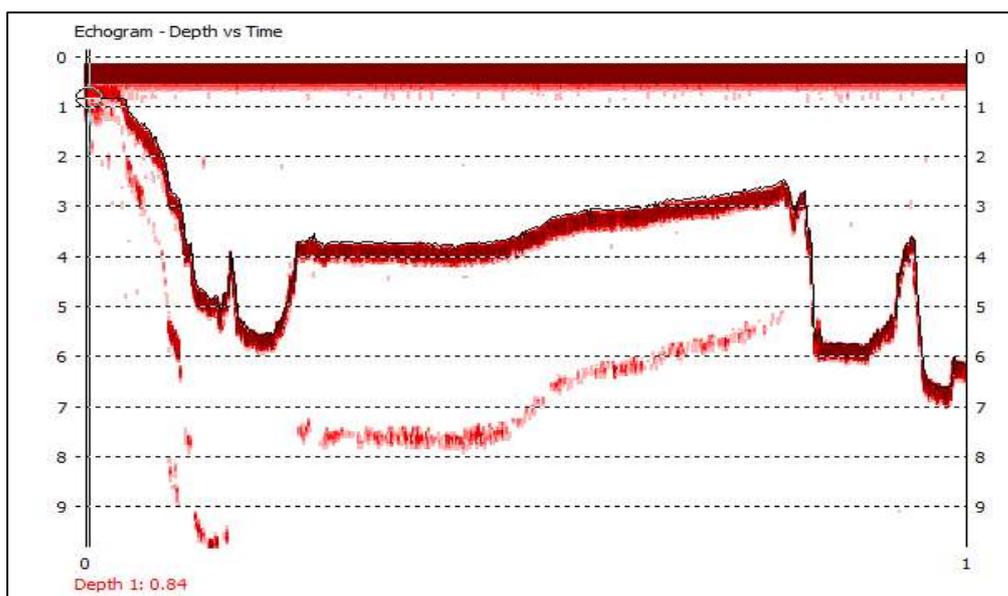


Fig. 14 – Ecograma de uma linha sondada pelo ASC RC-S2, gerado e visualizado com o *software Hypack*.

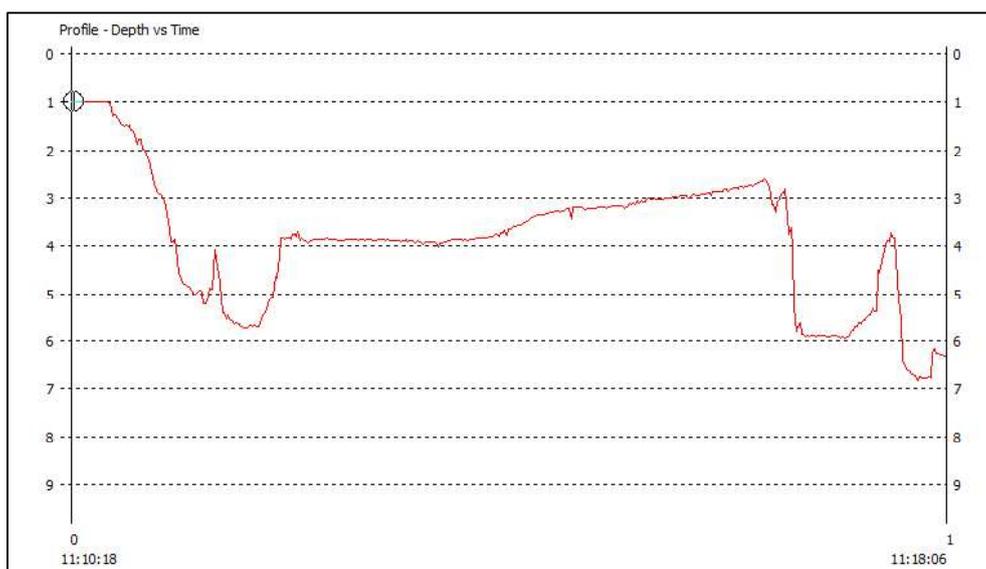


Fig. 15 – Perfil de fundo digitalizado de forma automática no *software Hypack*.

#### 4. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um breve panorama da utilização das plataformas não tripuladas na execução de levantamentos batimétricos, mostrando que, apesar da tecnologia ASC não ter atingido a maturidade de outras tecnologias utilizadas no meio náutico, como os AUVs, eles apresentaram um rápido desenvolvimento nos últimos anos e são, no cenário atual, utilizados para vários fins, sejam de ordem civil ou militares, comercial ou científica.

Ao contrário das plataformas autônomas submersas e aéreas, os ASCs são bons agentes comunicadores, que podem também ser utilizados tanto para comunicação com estações de superfície quanto estações subaquáticas.

É notável as inúmeras aplicações e potencialidades dos ASCs, principalmente na realização de levantamentos batimétricos. Entre os diversos benefícios, destacam-se: a possibilidade de operação em águas extremamente rasas (~1 m), onde uma embarcação convencional não poderia navegar; o baixo custo relacionado à campanha batimétrica; a redução da equipe de campo e o fato da plataforma não ser tripulada, o que permite seu uso mesmo em áreas que oferecem riscos aos navegantes. Todavia, também é notável a necessidade de melhorias nestes sistemas.

No futuro, pode-se vislumbrar a utilização de ASCs como estações de gerenciamento de pesca e aquicultura, plataformas autônomas

para pesquisas e descobertas de novos recursos minerais, estações meteorológicas, dentre diversas outras aplicações. A integração com dados de *laser scanner* terrestre também é uma possibilidade, tal como vêm sendo realizado em embarcações hidrográficas tripuladas.

Porém, pelo menos no Brasil, a utilização destas plataformas, principalmente, em mapeamentos batimétricos, ainda é restrita por falta de regulamentação e normas técnicas, o que vêm limitando seu uso apenas para fins científicos e mapeamento de pequenos reservatórios não navegáveis, principalmente, barragens de rejeito de mineração.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYRES NETO, A. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 18, n. 3, p. 241-256, 2000.

BOAS, E. R. V.; HONÓRIO, L. M.; MARCATO, A. L. M.; OLIVEIRA, E. J.; BARBOSA, D. A.; BOAS, A. S. C. A. V.; CRUZ, N. A.; MATOS, A.; FERREIRA, B. M.; ABREU, N.; MOREIRA, A. P.; ROCCO, A.; MICERINO, F. J.; COSTA, E. B.; MACHADO, L. C. N. Desenvolvimento de um veículo subaquático autônomo para supervisão inteligente de reservatórios. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 1, n. 1, 2013. pp. 010131-1 – 010131-6.

BUCH, T. & KUROWSKI, M. MESSIN – An

- autonomously operating unmanned surface vehicle. **In: 6<sup>th</sup> Workshop “Seabed Acoustics”**. Rostock, 2013.
- CACCIA, M. Autonomous surface craft: prototypes and basic research issues. **In: 14<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control and Automation**, p. 1-6, 2006.
- CHENG, L.; MA, L.; CAI, W.; TONG, L.; LI, M.; DU, P. Integration of Hyperspectral Imagery and Sparse Sonar Data for Shallow Water Bathymetry Mapping. **Geoscience and Remote Sensing**. IEEE Transactions on, v. 53, n. 6, p. 3235-3249, 2015.
- CLARKE, J. E. H. A reassessment of vessel coordinate systems: what is it that we are really aligning?. **In: US Hydrographic Conference**. 2003. 12p.
- CLARKE, J. E. H. **Imaging and Mapping II: Submarine Acoustic Imaging Methods**. Notes of classes. Ocean Mapping Group. University of New Brunswick. 2014. Sp.
- COHEN, P. M. **Bathymetric navigation and charting**. Annapolis, MD: United States Naval, 1970. 138p.
- CRUZ, J.; VICENTE, J.; MIRANDA, M.; MARQUES, C.; MONTEIRO, C.; ALVES, A. Benefícios da utilização de sondadores interferométricos. **3<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica**. Instituto Hidrográfico Português, Lisboa, Portugal, 2014. 19p.
- CURCIO, J.; LEONARD, J.; PATRIKALAKIS, A. SCOUT-a low cost autonomous surface platform for research in cooperative autonomy. **In: Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE**. IEEE, p. 725-729, 2005.
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. **NORMAM 25: Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos**. Marinha do Brasil, Brasil, 52p., 2014.
- DUNBABIN, M.; GRINHAM, A.; UDY, J. An autonomous surface vehicle for water quality monitoring. **In: Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)**, p. 2-4, 2009.
- ELLMER, W.; ANDERSEN, R. C.; FLATMAN, A.; MONONEN, J.; OLSSON, U.; ÖIÅS, H. Feasibility of Laser Bathymetry for Hydrographic Surveys on the Baltic Sea. **The International Hydrographic Review**, n. 12, p. 33-50, 2014.
- FERREIRA, H.; ALMEIDA, C.; MARTINS, A.; ALMEIDA, J.; DIAS, N.; DIAS, A.; SILVA, E. Autonomous bathymetry for risk assessment with ROAZ robotic surface vehicle. **In: Oceans 2009-Europe**, IEEE, p. 1-6, 2009.
- FERREIRA, I. O.; ZANETTI, J.; GRIPP, J. S.; MEDEIROS, N. G. Viabilidade do uso de imagens do sistema Rapideye na determinação da batimetria de águas rasas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 7, p. 1331-1340, 2016a
- FERREIRA, I. O.; RODRIGUES, D. D.; NETO, A. A.; MONTEIRO, C. S. Modelo de incerteza para sondadores de feixe simples. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 5, p. 863-881, 2016b.
- FERREIRA, I. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, A. P. Levantamento batimétrico automatizado aplicado à gestão de recursos hídricos. Estudo de caso: Represamento do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa–Mg. **Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, v. 4, p. 1-8, 2012.
- FERREIRA, Í. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R.; **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos**. 1<sup>a</sup> ed. Saarbrücken: Novas Edições Acadêmicas, v. 1, 100p., 2015.
- FERREIRA, Í. O.; SANTOS, G. R.; RODRIGUES, D. D. Estudo sobre a utilização adequada da krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 5, p. 831-842, 2013.
- FURFARO, T. C. **A modular guidance, navigation and control system for unmanned surface vehicles**. Dissertação (Mestrado). Florida Atlantic University, 2012. 100p.
- GAO, J. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. **Physical Geography**, v. 33, n. 1, p. 103-116, 2009.
- GIORDANO, F.; MATTEI, G.; PARENTE, C.; PELUSO, F.; SANTAMARIA, R. Integrating Sensors into a Marine Drone for Bathymetric 3D Surveys in Shallow Waters. **Sensors**, v. 16,

n. 1, p. 41, 2015.

GODIN, A. **The Calibration of Shallow Water Multibeam EchoSounding Systems**. M. Eng. report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report n. 190, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 182p., 1998.

GUENTHER, G. C.; THOMAS, R. W. L. ; LAROCQUE, P. E. Design considerations for achieving high accuracy with the Shoals bathymetric Lidar system. **In: CIS Selected Papers: Laser Remote Sensing of Natural Waters-From Theory to Practice**. International Society for Optics and Photonics, p. 54-71, 1996.

HARE, R. Depth and position error budgets for multibeam echosounding. **The International Hydrographic Review**, v. 72, n. 2, p. 37-69, 1995.

HINE, R. & MCGILLIVARY, P.A. Wave powered autonomous surface vessels as components of ocean observing systems. **Proceedings of PACON 2007**, Honolulu, HI, 2007. 9p.

IHO – International Hydrographic Organization. **C-13: IHO Manual on Hydrography**. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 2005, 540p.

IHO – International Hydrographic Organization. **S-44: IHO Standards for Hydrographic Surveys**. Special Publication n. 44–5th. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 36p., 2008.

JONG, C.D.; LACHAPPELLE, G.; SKONE, S.; ELEMA, I.A. **Hydrography**. 2<sup>a</sup> ed. Delft University Press: VSSD, 2010, 354p.

KÜCHLER, S.; EBERHARTER, J. K.; LANGER, K.; SCHNEIDER, K.; SAWODNY, O. Heave Motion Estimation of a Vessel Using Acceleration Measurements. **In: IFAC World Congress**, v. 18, n. Part 1, p. 14742-14747, 2011.

LANGLEY, R.B. RTK GPS. **GPS World**, Oregon, v. 9, n. 9, p. 70-76, 1998.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 3<sup>a</sup> ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004, 435p.

MALEIKA, W. The influence of the grid resolution on the accuracy of the digital terrain model used in seabed modeling. **Marine Geophysical Research**, v. 36, n. 1, p. 35-44, 2015.

MANLEY, J. E. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. **In: OCEANS 2008, IEEE**, p. 1-4, 2008.

MARTIN, R. J. & BROADBENT, G. J. Chart datum for hydrography. **Hydrographic Journal**, p. 9-14, 2004.

MOURA, A.; GUERREIRO, R.; MONTEIRO, C. As potencialidades da derivação de batimetria a partir de imagens de satélite multiespetrais na produção de cartografia náutica. **4<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica**. Instituto Hidrográfico Português, Lisboa, Portugal, 2016. Sp.

PASTOL, Y. Use of Airborne LIDAR Bathymetry for Coastal Hydrographic Surveying: The French Experience. **Journal of Coastal Research**. n. 62, p. 6-18, 2011.

RUIZ, D. V. **Estado del arte en robótica submarina**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Diseño Y Fabricacion, Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, Espanha, 63p., 2010.

SMITH W.H. F. & SANDWELL D.T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth sounding. **Science**, v. 277, n. 5334, p. 1956-1962, 1997.

SOUZA, L. A. P. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas**. Tese (Doutorado). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 311p. 2006.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **Hydrographic surveying**. Engineer Manual n. 1110-2-1003. Department of the Army. Washington, D. C. 2013.

VANECK, T. W.; RODRIGUEZ-ORTIZ, C. D.; SCHMIDT, M. C.; MANLEY, J. E. Automated bathymetry using an autonomous surface craft. **Navigation**, v. 43, n. 4, p. 407-419, 1996.

WERNLI, R. L. AUV's - The Maturity of the Technology. **In: OCEANS'99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century**, v. 1, p. 189-195, 2000.

ZHAO, J.; YAN, W.; JIN, X. Brief review of autonomous surface crafts. **ICIC Express Letters**, v. 5, n. 12, p. 4381-4386, 2011.