

Levantamentos hidrográficos com incerteza decimétrica?

Paulo Nunes¹; João Vicente¹; Adolfo Lobo²; Marina Miranda¹; Cristina Monteiro¹; João Cruz¹

¹ Instituto Hidrográfico – Rua das Trinas, 49, 1249-093 Lisboa

² EMEPC – Rua Costa Pinto, 165, 2770-047 Oeiras

(antunes.nunes@hidrografico.pt; delgado.vicente@hidrografico.pt; arlobo@emepc-portugal.org;
marina.rita.miranda@hidrografico.pt; cristina.monteiro@hidrografico.pt
ventura.cruz@hidrografico.pt)

Os levantamentos hidrográficos (LH) destinam-se a fins diversos, sendo de destacar, entre outros, a aquisição de dados batimétricos para a produção de cartas náuticas, para apoio a obras marítimas ou para estudos científicos, e a deteção e caracterização de objetos no fundo do mar.

Os LH são projetos planeados e conduzidos de acordo com determinados critérios e normas técnicas da Organização Hidrográfica Internacional (OHI). O cumprimento das especificações é, em regra, avaliado a dois níveis: (1) medição de sondas reduzidas com uma incerteza inferior à máxima incerteza (horizontal e vertical) admissível para uma determinada ordem de levantamento; (2) critérios de cobertura e/ou de deteção de objetos.

Atualmente, para além das incertezas associadas à metodologia utilizada para a medição de sondas, existem três componentes de incerteza vertical significativas que podem ser minimizadas: (1) a incerteza associada à propagação espacial e temporal da onda de maré, (2) a variação espacial e temporal da velocidade propagação do som ao longo da coluna de água, e (3) as variações verticais instantâneas da linha de água da embarcação de sondagem devido a alterações de proa ou a acelerações bruscas.

A presente comunicação tem como objetivo partilhar algumas metodologias passíveis de serem utilizadas nos LH de modo a minimizar as incertezas na aquisição de profundidades, objetivo essencial nos LH realizados para controlo de obras marítimas.

1 Introdução

O principal objetivo dos levantamentos hidrográficos (LH) é obter dados para a produção ou atualização das cartas náuticas (CN) com ênfase nas estruturas que afetam a segurança da navegação (OHI, 2005). Para este efeito, OHI (2008) estabelece na Publicação Especial S-44 os requisitos mínimos que os Serviços Hidrográficos devem observar na execução de LH. Os requisitos variam com a área a sondar (profundidade e tipo de navegação esperada para a área) sendo, desta forma, os LH classificados em 4 Ordens: Especial, 1a, 1b e 2. Os requisitos mínimos para cada ordem são definidos em função das máximas incertezas admissíveis¹, horizontal e vertical, e das dimensões mínimas das estruturas a detetar. Com base nos trabalhos de Hare *et al.* (1995) e de Artilheiro *et al.* (2005), Artilheiro e Vicente (2009) esclarecem as metodologias a adotar na modelação das fontes de incerteza das medições.

Da realização de um LH resulta um conhecimento do fundo marinho que pode e deve ser caracterizado e que, face aos métodos atuais permitem descreve-lo com elevado detalhe. Deste modo a informação batimétrica tem cada vez mais um maior número de aplicações. Assim, Vicente *et al.* (2012) apresentaram um conjunto de propostas com vista à definição de requisitos adicionais de cobertura e densidade de informação, as quais estão em fase de implementação no Instituto Hidrográfico (IH).

Os levantamentos hidrográficos podem ter requisitos diferentes de acordo com o fim especial a que se destinam, sendo sempre necessário definir tecnicamente a máxima incerteza que se pretende atingir. Por vezes, nomeadamente, no levantamento de áreas para controlo de obras marítimas (ex.: controlo de volumes dragados), são definidos requisitos mais exigentes do que os definidos na S-44. A máxima incerteza vertical admissível é definida em função da profundidade, sendo para os LH de ordem especial, levantamentos mais exigentes, superior a 25 cm. Será possível realizar levantamentos hidrográficos com incertezas verticais inferiores?

Para um determinado sistema de sondagem as incertezas associadas aos equipamentos utilizados são, em regra, definidas em especificações técnicas dos fabricantes, devendo ser aferidos pelos serviços hidrográficos. Alguns destes equipamentos devem ser objeto de provas de calibração regulares. Por outro lado, parte da incerteza vertical de um sistema depende da instalação dos sensores, nomeadamente, a incerteza na medição das distâncias entre os diversos sensores que constituem um sistema sondador e a incerteza na medição dos desvios de orientação existentes entre os referenciais associados a cada sensor. As incertezas de instalação podem ser minimizadas através de utilização de metodologias adequadas e aferidas em provas específicas.

As incertezas mais complexas de monitorizar/minimizar estão relacionadas com o meio ambiente. Quando uma embarcação é sujeita a uma agitação marítima que afeta a incerteza das medições condicionando as especificações do LH só existe uma solução: interromper a sondagem e esperar dias mais favoráveis ou, se possível, substituir a embarcação por outra mais robusta. As alterações espaciais e temporais da velocidade de propagação do som (VPS) podem, também, condicionar o cumprimento das especificações de um levantamento (Clarke *et al.*, 2000). No entanto, atualmente, o hidrógrafo dispõe de equipamentos e metodologias que permitem a aquisição em contínuo da informação de coluna de água (Beaudoin *et al.*, 2009; Beaudoin, 2010).

Num levantamento tradicional, para além dos fatores referidos, o hidrógrafo necessita ainda de saber:

¹ As incertezas máximas admissíveis para a medição de profundidades e para o respetivo posicionamento são referidas a um nível de confiança de 95%. A incerteza vertical é considerada como a incerteza na medição de uma profundidade reduzida ao *datum* vertical (usualmente designada por sonda reduzida).

- Arfagem, arfagem induzida e calado dinâmico², função da velocidade da embarcação de sondagem, manobras de alteração de proa e/ou velocidade, alteração do calado, alterações do centro de gravidade, alteração da densidade da água do mar, impacte da intensidade/direção da corrente na velocidade da embarcação, etc.
- Maré na posição da embarcação, normalmente estimada a partir de marégrafos instalados ao longo das margens dos rios ou da costa

Atualmente, a metodologia referida pode ser substituída pela utilização de sistemas de posicionamento *Global Navigation Satellite System (GNSS) Real Time Kinematic (RTK)*³, com a integração de informação de atitude da embarcação com a informação de posicionamento, permitindo a realização de levantamentos referidos ao elipsoide. Neste caso, o hidrógrafo necessita de conhecer:

- Separação entre a antena e o transdutor
- A altura da antena relativamente ao elipsoide
- Modelo de separação entre o elipsoide e o *datum* vertical

Note-se que nesta última metodologia, as alterações dinâmicas e a maré deixam de ser estimadas passando a ser corrigidas/aplicadas pelo sistema de posicionamento RTK (Dodd *et al.*, 2010; Wells, 2013A).

A presente comunicação tem como objetivo:

- Realçar a importância do conhecimento adequado da VPS ao longo da coluna de água e apresentar uma metodologia que permite minimizar as incertezas das medições
- Apresentar as vantagens de utilização de sistemas de posicionamento vertical utilizando o sistema de posicionamento RTK em detrimento da redução de maré tradicional

Neste artigo apresentam-se os resultados do estudo de comparação entre as duas metodologias de redução da sondagem ao *datum* vertical e demonstra-se a importância do conhecimento do perfil da VPS durante a sondagem para a diminuição da incerteza vertical e horizontal. Para tal foi selecionada uma área no porto de Lisboa, próxima de Paço de Arcos, área de difícil modelação da propagação da onda de maré e com elevadas variações espaciais e temporais da VPS ao longo da coluna de água, nomeadamente, no período de verão.

2 Metodologia

2.1 Meios

Face aos meios disponíveis no IH foi selecionada a embarcação de sondagem “Gaivota” (figura 1) por ter um comportamento dinâmico significativo na determinação do balanço de incertezas na presença de variações bruscas de proa e/ou de velocidade, além de caimentos assinaláveis.

² De acordo com Artilheiro (2003), um erro na medição do calado propaga-se diretamente como um erro de medição da profundidade. A variação do deslocamento da embarcação devido ao consumo de água e de combustível, sendo usualmente linear, entre reabastecimentos, traduz-se no erro do calado. O assentamento (*settlement*) é o aumento do calado de uma embarcação a navegar, relativamente ao seu calado em repouso. Este efeito é mais visível em águas pouco profundas e deve-se à redução da pressão da água junto às obras vivas do navio. O efeito contrário é possível também de observar, ou seja, a diminuição do calado com o deslocamento fruto da tendência da força de impulsão tender a elevar o navio, fenómeno conhecido por *lift*. A variação dinâmica do caimento (*squat*) é outro dos efeitos que ocorre em condições dinâmicas, em regra, com o aumento de velocidade existe uma tendência natural das embarcações para elevarem a proa da embarcação, alterando o plano horizontal da mesma. A água do mar e dos rios não possui a mesma densidade, pelo que pode existir ainda um erro devido à variação da densidade da água. O efeito é o mesmo da variação de deslocamento.

³ Tecnologia explanada por Hofmann-Wellnhof *et al.* (2008).



Figura 1 – Embarcação de sondagem a navegar no interior da doca de Paço de Arcos.

2.2 Equipamentos

Para o estudo foi utilizado o sistema sondador multifeixe (SMF) KONGSBERG EM 3002 (Kongsberg, 2006). A incerteza esperada do sistema é função da profundidade, do ângulo de incidência e das condições de operação, podendo ser utilizado em LH de ordem especial (Artilheiro e Vicente, 2009). O sistema utilizado apresenta a seguinte constituição (figura 2):

- SMF: constituído por unidades eletrónicas de transmissão, receção e processamento de sinal, transdutores (transmissão e de receção) e uma unidade de operação;
- Módulo SEATEX SEAPATH 200 RTK (Kongsberg, 2004): para integração dos dados de posicionamento com os dados de atitude da embarcação de sondagem. Engloba:
 - Duas antenas *Global Navigation Satellite System* (GNSS), sendo a antena de posicionamento de dupla frequência. A utilização de duas antenas permite a obtenção da proa
 - Recetor de correções diferenciais *Real Time Kinematic* (RTK)
 - Sensor inercial *Motion Reference Unit* (MRU) (Kongsberg, 2001)
- Sondas para medição da VPS na água:
 - PROBE mini SVP (Valeport, 2012) colocado à face dos transdutores e utilizado para guiamento e formação dos feixes
 - SOUND VELOCITY PROFILER (SVP) para medição ao longo da coluna de água, informação utilizada para o traçado do raio sonoro e, conseqüentemente, para o posicionamento das sondas no referencial da embarcação
- Estação de referência GNSS (Trimble, 2009) com emissão de correções RTK (Pacific Crest, 2001)

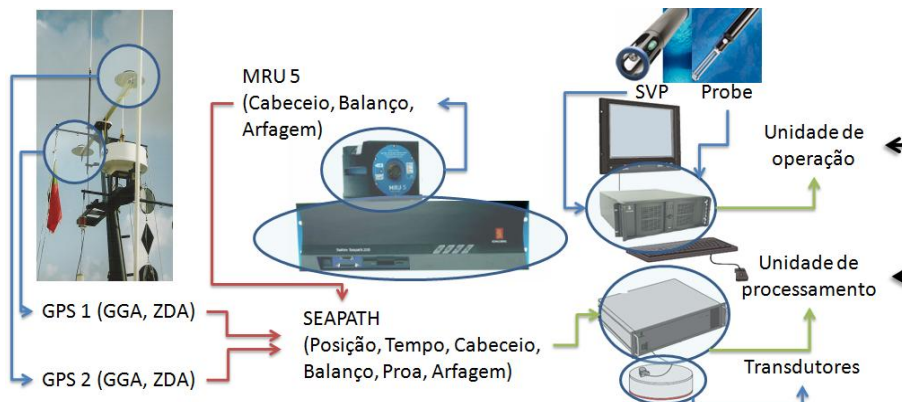


Figura 2 - Constituição de um sistema SMF (Vicente, 2011)

A aquisição de dados com SMF requer uma instalação cuidada⁴ da qual se destaca a:

- Determinação dos braços (X, Y, Z) de todos os sensores e da linha de água da embarcação (Z) relativamente ao referencial da embarcação de sondagem
- Determinação dos desvios angulares (cabeceio, balanço e proa) do transdutor e do sensor inercial relativamente ao referencial da embarcação
- Determinação do desvio angular entre o vetor das duas antenas GNSS e a proa da embarcação

A aquisição de dados requer ainda provas de aferição⁵ que têm como objetivo a validação dos desvios angulares anteriormente determinados.

2.2.1 Perfis de velocidade de propagação do som

A variação espacial e temporal do perfil de propagação do som é das maiores dificuldades que o hidrógrafo tem de enfrentar. O conhecimento do perfil de velocidade de propagação do som é preponderante nos SMF, sendo fundamental para que o sistema possa fazer o posicionamento das sondas. Para cada feixe formado na receção do eco, é necessário posicioná-lo no referencial da embarcação. Para tal é utilizado o tempo de trajeto e o ângulo de incidência do feixe formado. No entanto, para obter o posicionamento da sonda é ainda necessário o conhecimento da VPS ao longo da coluna de água, permitindo o traçado do raio sonoro e a solução de refração da VPS ao longo da coluna de água.

Tradicionalmente, com um SVP a obtenção de um perfil de VPS em profundidades inferiores a 40 m demora cerca de 20 minutos a obter e obriga à interrupção da sondagem. A periodicidade da obtenção de perfis SVP está dependente do conhecimento da área em questão e das flutuações existentes nas medições do PROBE (equipamento com observações em contínuo).

Atualmente podem ser utilizados perfiladores que não obrigam à interrupção de sondagem (Beaudoin *et al.*, 2009), usualmente, designados *moving vessel profilers* (MVP). A presente comunicação evidenciará as vantagens da utilização destes equipamentos. Foi utilizado um MVP VALEPORT UNDERWAY SV⁶ (figura 3) de queda livre por efeito da gravidade, parametrizado para amostrar variações da velocidade do som superiores a 0,1 m/s.



Figura 3 - MVP VALEPORT UNDERWAY SV⁷

2.2.2 Sistemas de referência e redução ao *Datum* Vertical

Os dados adquiridos e processados foram referidos ao *datum* ETRS89. Na visualização e análise de dados o sistema de projeção utilizado foi o PT-TM06-ETRS89⁸. As sondas foram reduzidas ao plano do Zero Hidrográfico (ZH). Em Cascais e Lisboa, o ZH é um plano localizado abaixo do Nível Médio adotado (NMA) 2,08 m.

⁴ A metodologia utilizada na instalação de um sistema SMF é explanada por Vicente (2011) no Apêndice B, por Clarke (2013A) e por Wells (2013B).

⁵ A metodologia utilizada na execução das provas de aferição é, igualmente, explicada por Vicente (2011) no Apêndice B e por Clarke (2013B).

⁶ Informação técnica disponível em: <http://www.oceanscience.com/Products/Underway-Systems/Underway-SV.aspx>. O equipamento utilizado pertence à Estrutura de Missão para a Extensão da Plataforma Continental.

⁷ <http://www.valeport.co.uk/Products/SoundVelocity/SoundVelocityDetails/List/0/ProductID/34.aspx?SortField=ProductName%2cProductName>

⁸ Os parâmetros estão disponíveis em: http://www.igeo.pt/produtos/Geodesia/Inf_tecnica/sistemas_referencia/sistemas_referencia.htm

A redução das sondas observadas ao ZH foi efetuada de duas formas diferentes:

- Utilizando marégrafos de pressão (IN-SITU, 2013) para obtenção da onda de maré em Cascais e Paço de Arcos e utilizando a informação disponível:
 - Do marégrafo de referência para o porto de Lisboa instalado no Terreiro do Trigo e mantido pela divisão da oceanografia do IH
 - Do marégrafo de Cascais, mantido pela Direção Geral do Território (DGT)
- Utilizando a informação obtida pelo sistema de posicionamento RTK referido na secção 2.2. para obtenção da altitude elipsoidal e o GeodPT08⁹ (modelo do geoide para Portugal continental) para redução da sondagem ao *datum* vertical

2.3 Processamento dos dados

O processamento dos dados foi realizado na aplicação CARIS HIPS 8.1 (CARIS, 2013). Foram criados dois modelos batimétricos (MB) utilizando o algoritmo *Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator* (CUBE) (Calder e Wells, 2007) com uma resolução de um metro. O algoritmo CUBE é utilizado no Instituto Hidrográfico (Vicente *et al.*, 2012) para processamento dos dados batimétricos adquiridos pelos SMF com vantagens demonstradas (Vicente, 2011).

O primeiro modelo batimétrico foi gerado com a redução da altitude elipsoidal ao *datum* vertical (zero hidrográfico) utilizando a informação RTK e a ferramenta GPS *Tide*¹⁰ (CARIS, 2013). O segundo modelo batimétrico foi criado com a redução da sondagem de maré pelo método tradicional através das observações dos marégrafos instalados.

3 Execução, assunções e limitações

3.1 Área de estudo

Para o estudo selecionou-se uma área no porto de Lisboa, adjacente à doca da Direção de Faróis, em Paço de Arcos. A aquisição de dados decorreu nos dias 19 e 20 de agosto de 2013. Na presente comunicação a análise de resultados limitou-se à área adjacente à doca de Paço de Arcos identificada na figura 4.

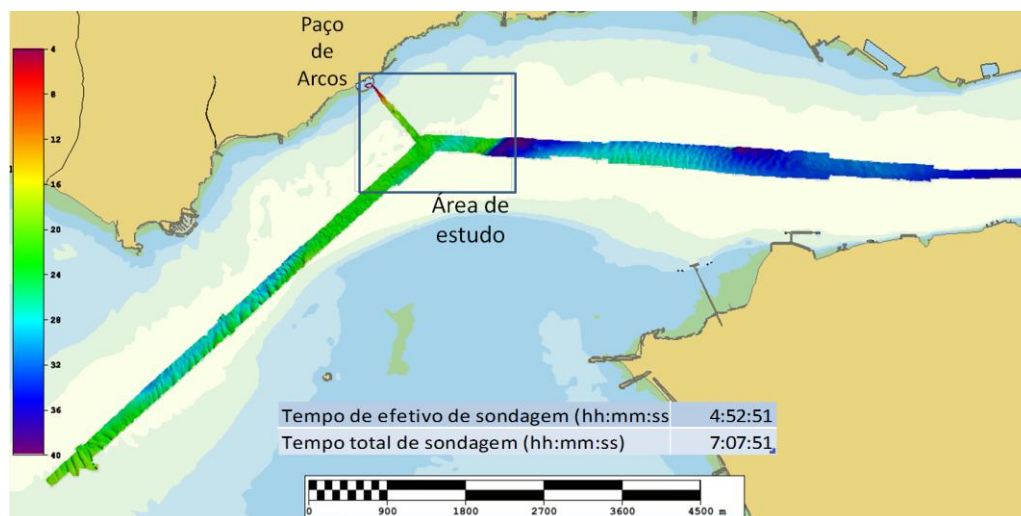


Figura 4 – Área de estudo

⁹ <http://www.igeo.pt/produtos/geodesia/GeodPT08.htm>

¹⁰ A ferramenta GPS *Tide* permite utilizar o modelo do geoide GeoPT08 e aplicar a diferença entre o NMA e o ZH para o porto de Lisboa (2,08 metros).

3.2 Parâmetros de incerteza

A tabela I indica os parâmetros de incerteza associada aos sensores utilizados num sistema SMF obtidos das especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes mencionados na secção 2.2.

Tabela I – Parâmetros de incerteza instrumentais (1 sigma)

SMF EM 3002		Outros sensores – valores de incerteza padrão	
Frequência (kHz)	300	Incerteza do perfilador da VPS (m/s)	0,50
Abertura do feixe transmitido (°)	1,5	Incerteza do velocímetro colocado à face dos transdutores (m/s)	0,25
Abertura do feixe formado na receção (°)	1,5	Incerteza na medição do balanço (°)	0,02
Cobertura angular máxima (°)	130	Incerteza na medição do cabeceio (°)	0,02
Espaçamento angular entre feixes (°)	0,9	Incerteza na medição da arfagem (m)	0,05
Duração do impulso (ms)	0,15	Incerteza no posicionamento horizontal da embarcação (m)	0,01+1,6 ppm
Taxa de amostragem do eco (kHz)	14	Incerteza no posicionamento vertical da embarcação (m)	0,02+3,2 ppm
Amostragem dos dados de fase do eco (m)	0,05	Incerteza na medição da maré (m)	0,01

A tabela II indica os parâmetros de incerteza de instalação dos sensores e as condições médias de operação da embarcação de sondagem.

Tabela II – Parâmetros de incerteza (1 sigma) de instalação e condições médias de operação

Distâncias (referidas ao MRU)		Incerteza na medição	Condições médias de operação	
Transdutor X (m)	-0.88	0.01	Velocidade sondagem (m/s)	3
Transdutor Y (m)	-0.02	0.01	Profundidade (m)	25
Transdutor Z (m)	1.32	0.01	Variação da VPS na água à face dos transdutores (m/s)	1
Antena X (m)	0.78	0.01	Variação da VPS ao longo da coluna de água (m/s)	2
Antena Y (m)	-0.03	0.01	VPS média	1515
Antena Z (m)	-1.78	0.01	Balanço médio (°)	3
Valores de aferição (desvios de orientação)			Cabeceio médio (°)	3
Rolloff ¹¹ (°)		0.03	Alterações de proa médias (°)	10
Pitchoff ¹² (°)		0.25	Arfagem média (m)	0.1
Proaoff ¹³ (°)		0.15		

3.3 Maré

A comparação entre as observações da onda de maré nos três marégrafos mencionados na secção 2.2.2 gerou a necessidade de recorrer a correções em tempo e amplitude com a ferramenta *Tide Zone* (CARIS, 2013). O algoritmo *Tide Zone* cria as concordâncias assumindo uma propagação linear da maré aplicando uma média ponderada baseada na distância da embarcação de sondagem à posição dos marégrafos. A assunção de uma propagação linear trás uma

¹¹ O desvio em balanço resulta dos eixos do sensor de movimentos e do transdutor no plano transversal da embarcação não se encontrarem alinhados.

¹² O desvio na medição do cabeceio resulta dos eixos do sensor de movimentos e do transdutor no plano longitudinal da embarcação não se encontrarem alinhados.

¹³ O desvio entre a medição da proa e o alinhamento do transdutor resulta da soma do desvio do azimute do transdutor, em relação à perpendicular à linha de proa da embarcação, e do erro de alinhamento das duas antenas GNSS com a proa da embarcação.

dificuldade ao processo. A propagação da maré real, principalmente em zonas estuarinas, não é linear, depende de vários fatores, muito difíceis de modelar: batimetria e topografia das fronteiras da área, interação entre zonas de cursos fluviais e águas oceânicas, caudal e turbulência dos cursos fluviais, etc... Estes condicionantes na descrição da maré só podem ser reduzidos com o aumento do número de marégrafos e um bom planeamento da sua instalação.

Foram criadas duas áreas, área Tejo e área Barra, para o processamento da redução de maré no algoritmo *Tide Zone*. A propagação de maré no interior do porto, na área Tejo, foi estimada por interpolação entre os dados do marégrafo instalado na doca da Direção de Faróis (DF) e das observações de maré do marégrafo de referência para o porto de Lisboa instalado no Terreiro do Trigo (TT). A propagação da maré na área Barra foi estimada por interpolação entre um marégrafo de campanha instalado junto do marégrafo de Cascais e o marégrafo instalado na doca da DF.

Para minimizar os erros de concordância da interpolação linear foram assumidos os seguintes pressupostos que levaram à criação de estações maregráficas virtuais:

- A maré observada em Cascais é idêntica à maré a meio da barra do porto de Lisboa (estação V_CASCAIS)
- A maré na doca de Paço de Arcos é similar à maré da zona envolvente (estação V_ARCOS)
- A maré na área da ponte 25 de abril pode ser determinada através da determinação de concordâncias com base nas observações em Paço de Arcos e no Terreiro do Trigo (estação V_PONTE)

A figura 5 ilustra as marés observadas no dia 19 de agosto. As diferenças mencionadas são semelhantes para o dia 20 de agosto. Com base nestes pressupostos, foram reposicionados os marégrafos e gerado um marégrafo virtual localizado na área da ponte (figura 6).

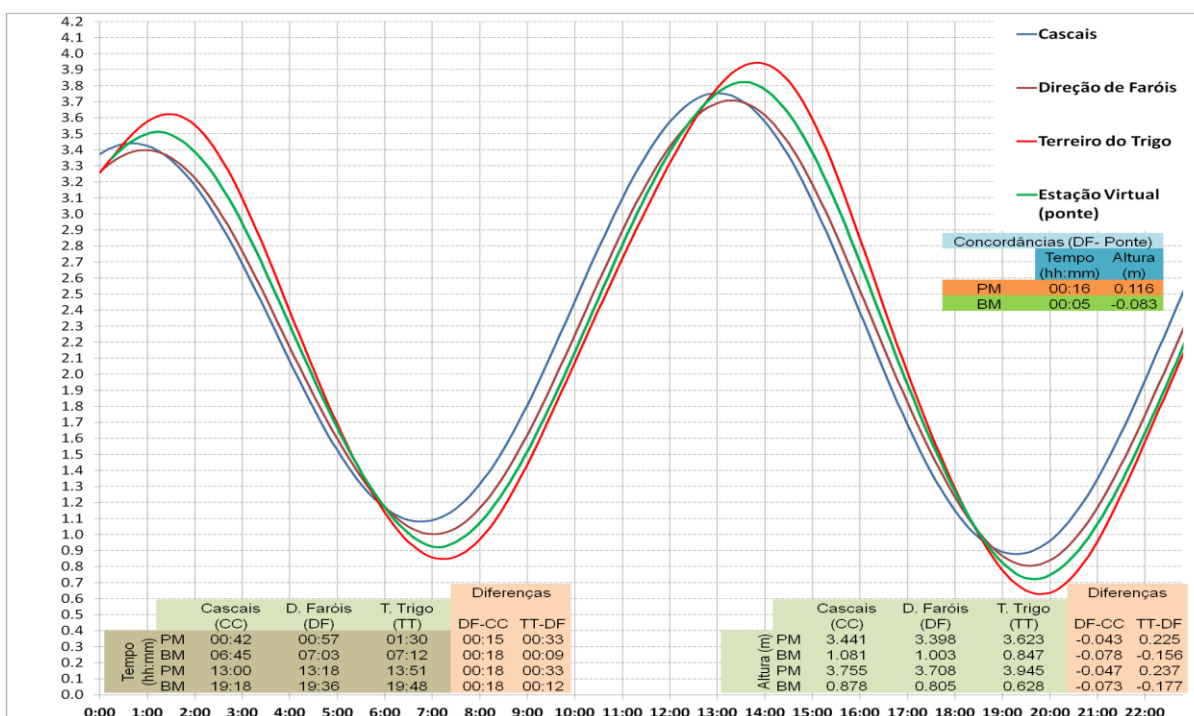


Figura 5 – Marés observadas em Cascais, paço de Arcos e Terreiro do Trigo (dia 19 de agosto) e maré estimada para a ponte 25 de abril

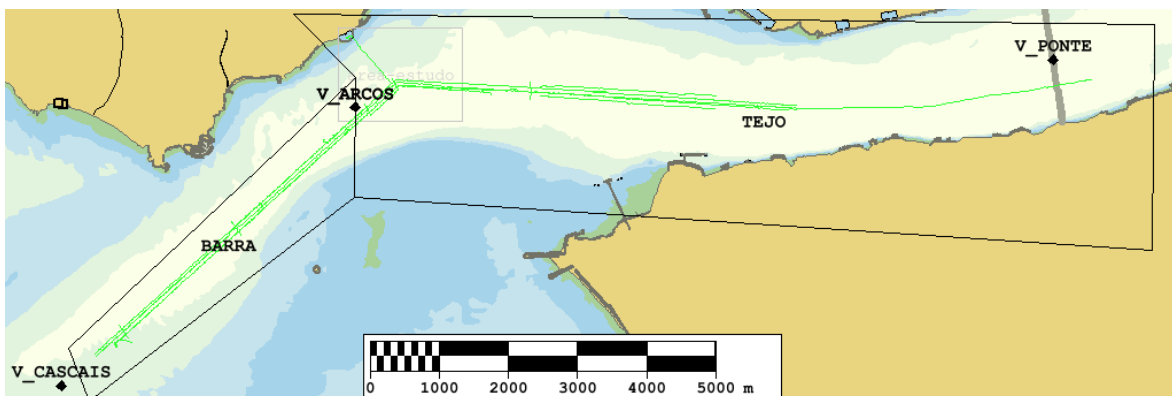


Figura 6 – Estações maregráficas virtuais e áreas de influência

3.4 Aferição do sistema de posicionamento RTK

A estação de referência RTK foi instalada no edifício da Direção de Faróis em Paço de Arcos, tendo a antena sido coordenada através de observações GNSS obtidas durante um período de 24 horas. As coordenadas da estação foram obtidas na aplicação Trimble Business Center V 2.5 (Trimble, 2013) com um ajustamento de rede, utilizando as estações RENEP CASC e IGP e a estação IH-BH localizada nas instalações do IH no Seixal. Partindo da marca de nivelamento (MN) IH-BH57/2009, localizada próximo do molhe da doca de Paço de Arcos, foi efetuado um nivelamento geométrico, complementado com um nivelamento trigonométrico, que permitiu obter a cota ortométrica da estação de referência RTK. Comparando esta cota com a obtida por observações GNSS, utilizando o ajuste de rede referido e o modelo do geóide GeodPT08, obtiveram-se diferenças inferiores a 2 cm.

Foram ainda realizadas 2004 observações com a estação móvel de bordo sobre a marca de nivelamento (MN) IH-BH57/2009, localizada próximo do molhe da doca. Comparando os resultados obtidos, utilizando o modelo do geóide GeodPT08 para a determinação da cota ortométrica, com as coordenadas conhecidas da MN obtiveram-se os resultados expressos na tabela III.

Tabela II – Diferenças obtidas entre as observações GNSS RTK e as coordenadas conhecidas da MN IH-BH57/2009

	Componente Vertical	Componente Horizontal
Diferença média (m)	0.013	0.030
Desvio padrão – σ (m)	0.009	0.004
RMS	0.010	0.030

A verificação efetuada permite a utilização do sistema de posicionamento RTK utilizando os valores de incerteza referidos nas especificações técnicas dos equipamentos.

4 Resultados

4.1 Vantagens da utilização do MVP

No dia 19 de agosto foram realizados 19 perfis de VPS e no dia 20 de agosto foram realizados 22 perfis. A periodicidade dos perfis foi inferior a 10 minutos. Tradicionalmente, a execução dos perfis é realizada sempre que se registam flutuações da VPS à face do transdutor (obtida em tempo real) superiores a 3 m/s relativamente ao perfil da VPS. Segundo este critério, no mínimo, teriam sido necessários realizar 10 perfis de VPS. Considerando que cada um deles demora cerca de 20 minutos a realizar, a sondagem teria demorado mais 3h e 20 min. Cada perfil executado com o MVP demora cerca de 1 minuto (nos 20 m de profundidade) sem interrupção do levantamento. Na

figura 5 apresentam-se os perfis que foram realizados durante a sondagem na área adjacente à marina de Oeiras, no período compreendido entre as 16:58 e as 17:54 horas do dia 19 de agosto. Nesse período foram realizados cinco perfis sem interromper a sondagem. Os dois últimos perfis do período, realizados às 17:40 e 17:47, apresentam diferenças claras, sendo um exemplo das dificuldades na identificação dos pontos de grande variação da VPS. Ambos os perfis foram realizados em período de vazante, apresentam 7 minutos de intervalo, distanciam-se menos de 500 metros, a profundidade média em ambos os locais é de 24 metros.

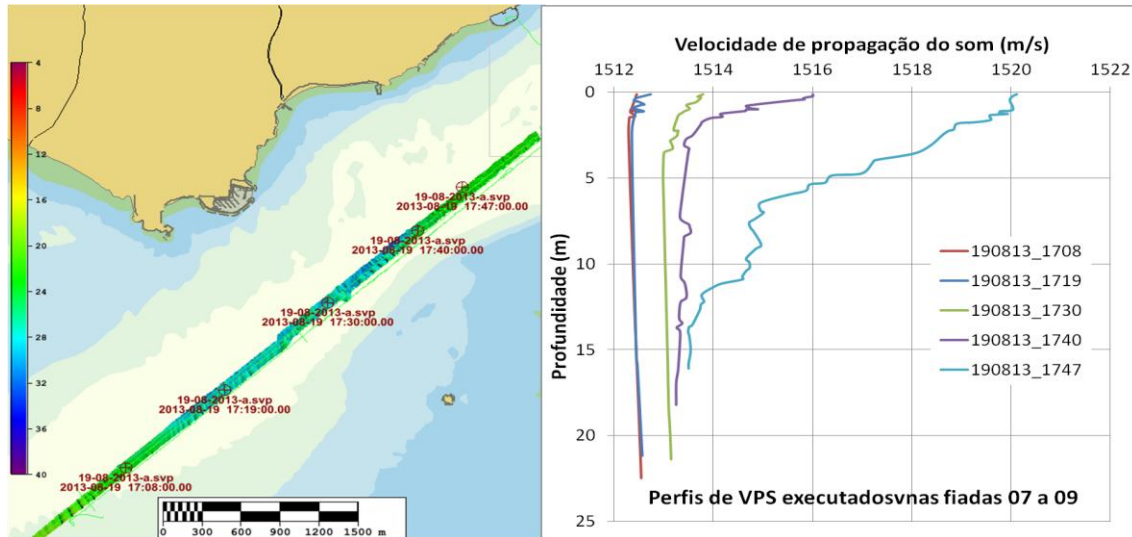


Figura 5 – Perfis de VPS executados nas fiadas 07 a 09 do dia 19 de agosto de 2013

A utilização do MVP possibilitou a continuação do LH por ter permitido a execução do perfil das 17:47, permitindo minimizar as incertezas estimadas na variação temporal e espacial da VPS ao longo da coluna de água. A figura 6 ilustra os erros no posicionamento e na medição das sondas caso não tivesse sido efetuado o perfil das 17:47. Nesta demonstração, utilizou-se o formulário de modelação do trajeto do impulso acústico, assumindo o fenómeno de refração da onda acústica esférica numa coluna de água estratificada em camadas com gradientes constantes da velocidade do som (Kinsler, 2000) e, igualmente, exposto em OHI (2005). Realça-se um erro de 15 cm na medição da profundidade para um ângulo de incidência de 60°.

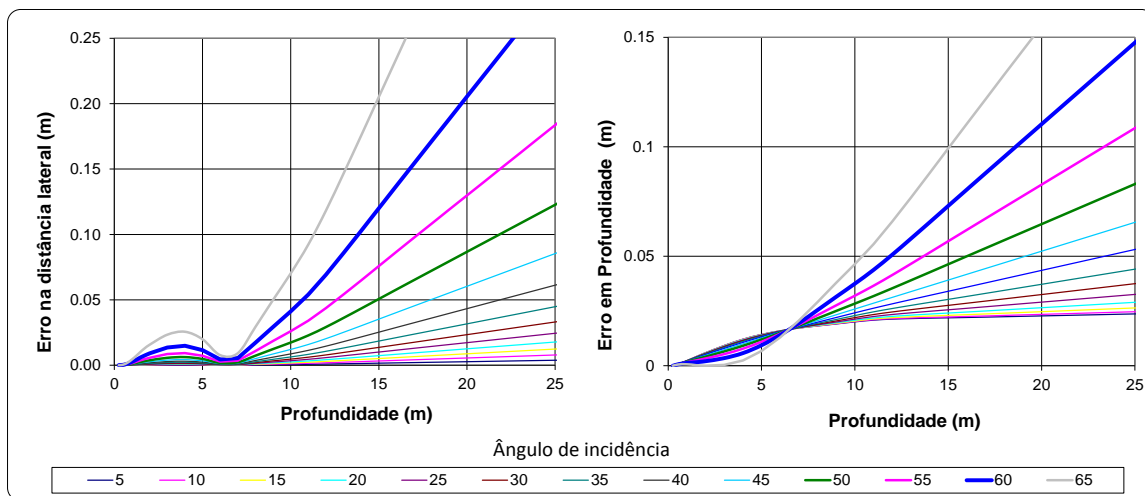


Figura 6 - Erro no posicionamento das sondas comparando os perfis das 1740 e das 1747

4.2 Vantagens da utilização do sistema de posicionamento RTK

A figura 7 ilustra os MB CUBE de 1 m de resolução gerados a partir das duas metodologias em análise (redução ao *datum* vertical através de informação GNSS RTK versus utilização de interpolações lineares entre datagramas de maré).

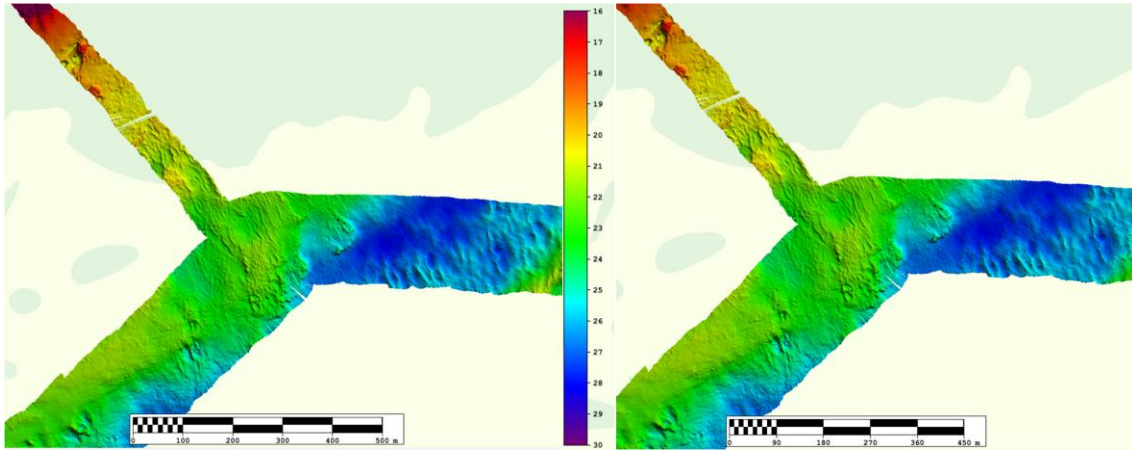


Figura 7 – Modelos batimétricos CUBE de 1 m de resolução com diferentes reduções de sondagem (esquerda: informação RTK; direita: maré tradicional)

A figura 8 ilustra as superfícies de desvio padrão. Da observação das imagens notam-se apenas ligeiras diferenças médias pontuais (inferiores a 20 cm nos MB e inferiores a 10 cm entre as superfícies de desvio padrão).

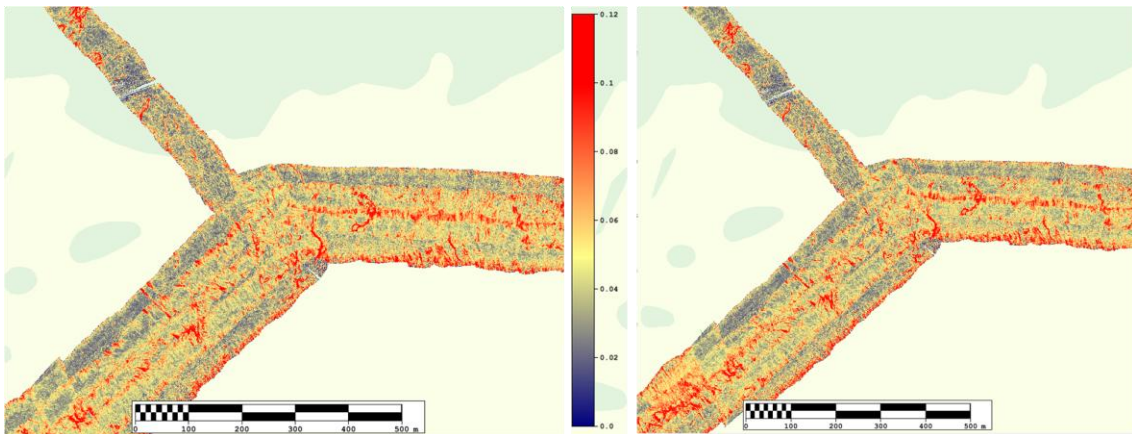


Figura 8 – Modelos de desvio padrão CUBE de 1 m de resolução com diferentes reduções de sondagem (esquerda: informação RTK; direita: maré tradicional)

A figura 9 ilustra o modelo de diferenças entre os MB gerados pelas duas metodologias. Notam-se diferenças superiores a 10 cm em algumas áreas, no entanto, a análise da figura não permite conclusões pela utilização de informação de diversas fiadas na estimação de profundidade nodal, executadas em condições ambientais diferentes.



Figura 9 – Modelo de diferenças de 1 m de resolução elaborado a partir dos MB ilustrados na figura 7.

Assim, de modo a obter conclusões relevantes recorreu-se à análise de diferenças de MB gerados a partir de fiadas de sondagem isoladas. A análise do modelo de diferenças da fiada 37, ilustrado na figuras 10 e 11, realizada no dia 20 de agosto, numa situação de maré a vazar demonstra que:

- As diferenças diminuem com a diminuição de velocidade e com a aproximação à doca de Paço de Arcos
- Dentro da doca e junto à MN, com a velocidade de sondagem quase nula (motor propulsor parado) as diferenças são, em média, inferiores a 3 cm, valor aceitável tendo em consideração a incerteza do modelo do geóide e as incertezas verticais na determinação da linha de água da embarcação, na separação entre a antena GNSS e o transdutor, e na determinação da posição da estação de referência
- Na zona exterior à doca as diferenças refletem as alterações de calado dinâmico (linha de água da embarcação) e da incerteza na determinação das concordâncias de maré. Note-se que a diminuição das diferenças inicia-se com a diminuição da velocidade da embarcação

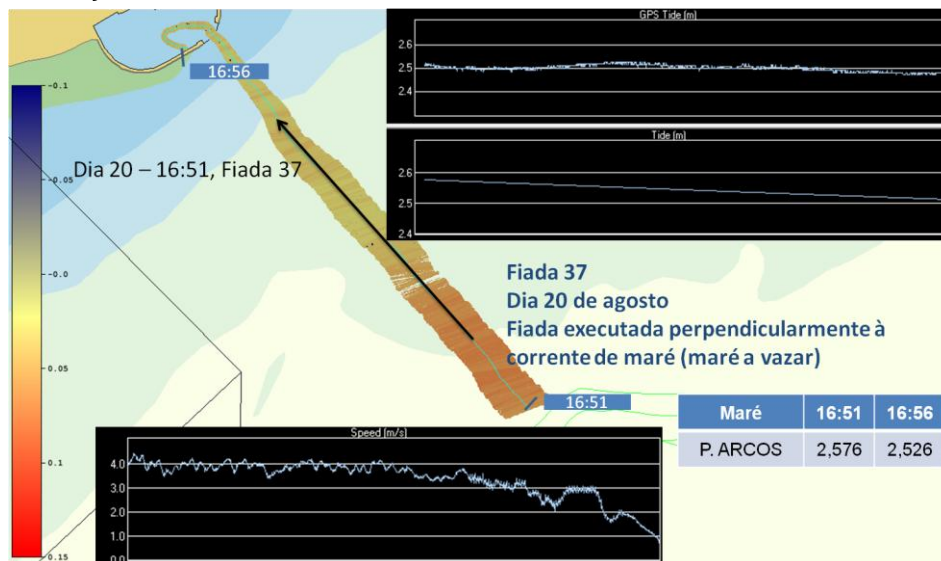


Figura 10 – Modelo de diferenças de 1 m de resolução elaborado a partir de MB gerados a partir da fiada 37.

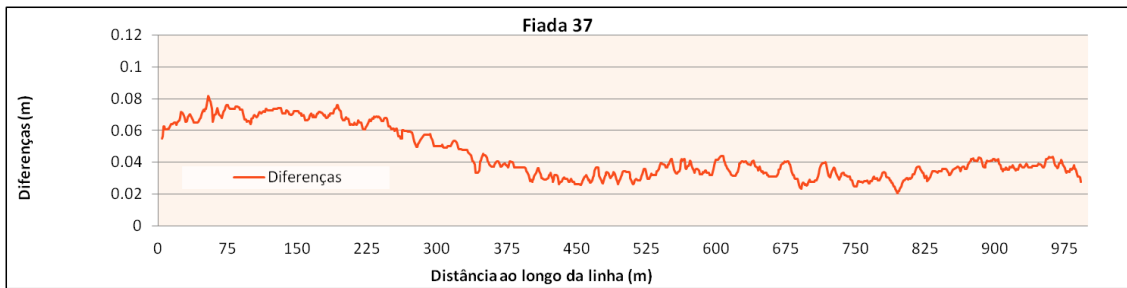


Figura 11 – Diferenças obtidas na fiada 37 entre os dois MB referidas à posição da embarcação.

A análise do modelo de diferenças da fiada 4, ilustrado na figuras 12 e 13, realizada no dia 19 de agosto numa situação de maré a vazar, demonstra que as diferenças aumentam com o aumento da velocidade da embarcação de sondagem e com o afastamento da embarcação à posição de influência do marégrafo de Paço de Arcos

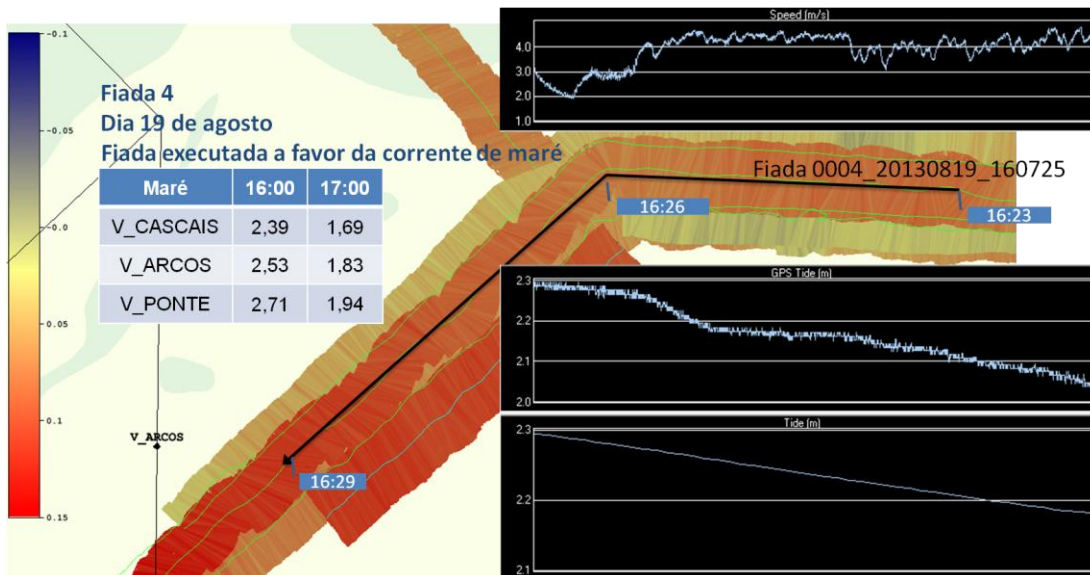


Figura 12 – Modelo de diferenças de 1 m de resolução elaborado a partir de MB gerados a partir da fiada 4.

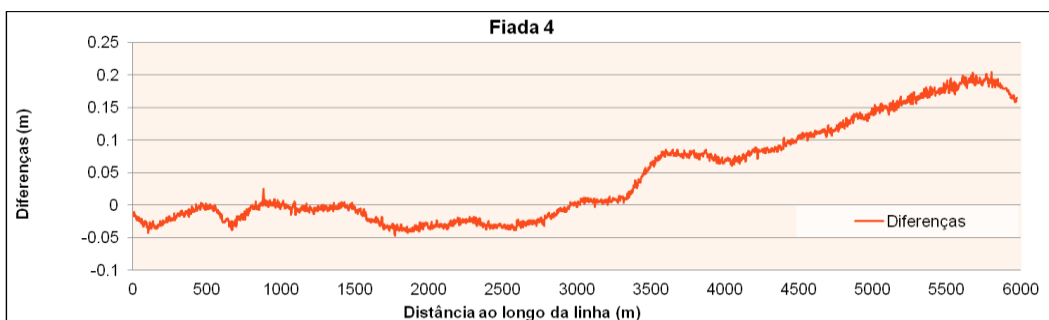


Figura 13 – Diferenças obtidas na fiada 4 entre os dois MB referidas à posição da embarcação.

A análise do modelo de diferenças da fiada 10, ilustrado na figuras 14 e 15, realizada no dia 20 de agosto, numa situação de maré a encher demonstra que:

- As diferenças são mínimas com a velocidade quase nula da embarcação (motores propulsores parados)
- As diferenças aumentam com o aumento da velocidade da embarcação de sondagem

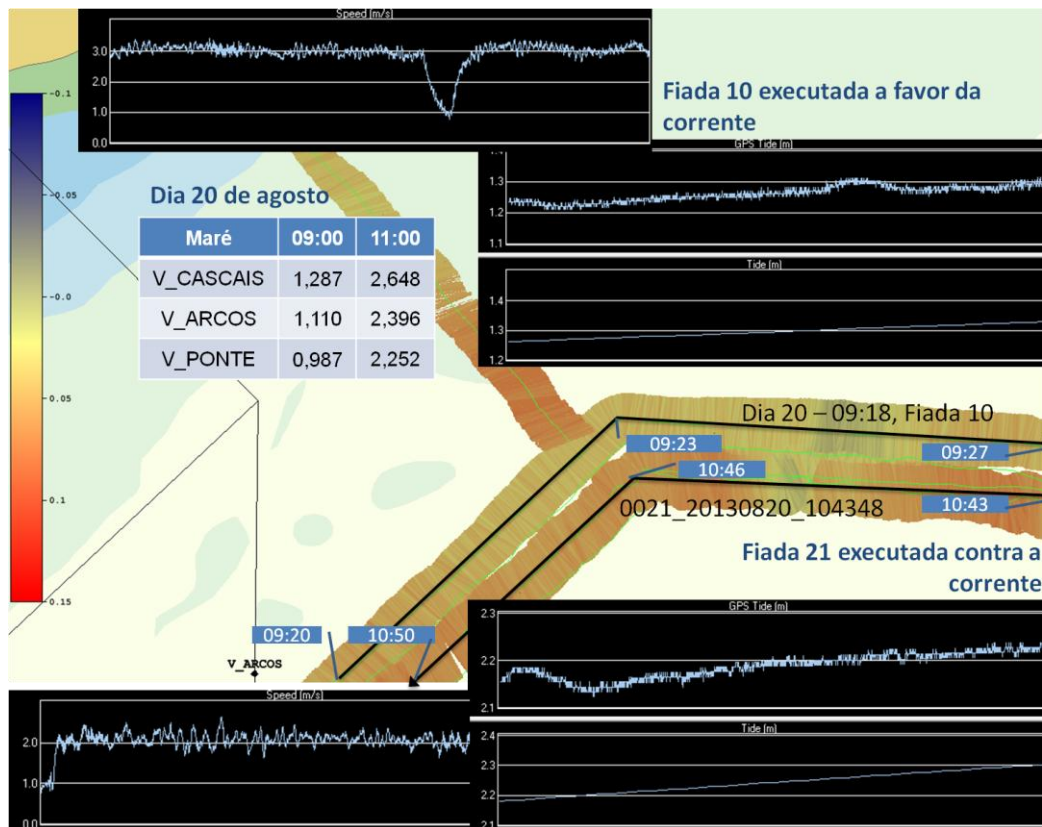


Figura 14 – Modelo de diferenças de 1 m de resolução elaborado a partir de MB gerados a partir das fiadas 10 e 21.

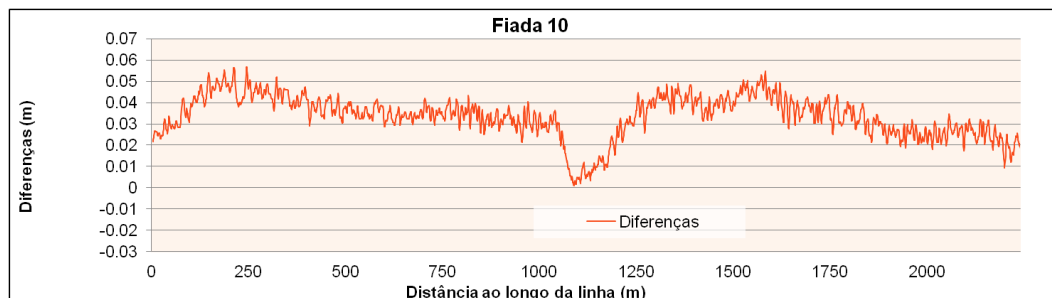


Figura 15 – Diferenças obtidas na fiada 10 entre os dois MB referidas à posição da embarcação.

A análise do modelo de diferenças da fiadas 21, ilustrado na figuras 14 e 16, realizada no dia 20 de agosto, numa situação de maré a encher demonstra que:

- As diferenças são mínimas com a velocidade quase nula da embarcação (motores propulsores parados)
- As diferenças aumentam com o aumento da velocidade da embarcação de sondagem e são de grandeza diferente quando comparadas com a corrente a favor. Esta dedução indica que as diferenças, neste tipo de embarcação, não são dependentes da velocidade

mas sim, da potência introduzida no motor da embarcação de modo a alcançar uma determinada velocidade. Comparativamente com a manhã dia 19 de agosto ainda é de assinalar o consumo de combustível assinalável, situação que incrementou a incerteza na medição da imersão do transdutor quando da redução da sondagem pelo método tradicional

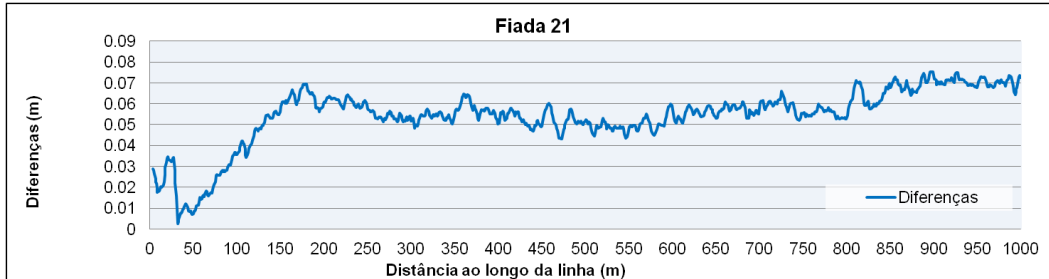


Figura 16 – Diferenças obtidas na fiada 21 entre os dois MB referidas à posição da embarcação.

A análise do modelo de diferenças da fiada 33, ilustrado na figuras 17 e 18, realizada no dia 20 de agosto, numa situação de maré a vazar demonstra que as diferenças são significativas, mormente por:

- A relação diferenças *versus* velocidade não se pode deduzir mas deve ser baseada na relação potência introduzida no motor de propulsão da embarcação
- Antes da execução desta fiada a embarcação de sondagem reabasteceu de combustível, situação que alterou o calado da embarcação

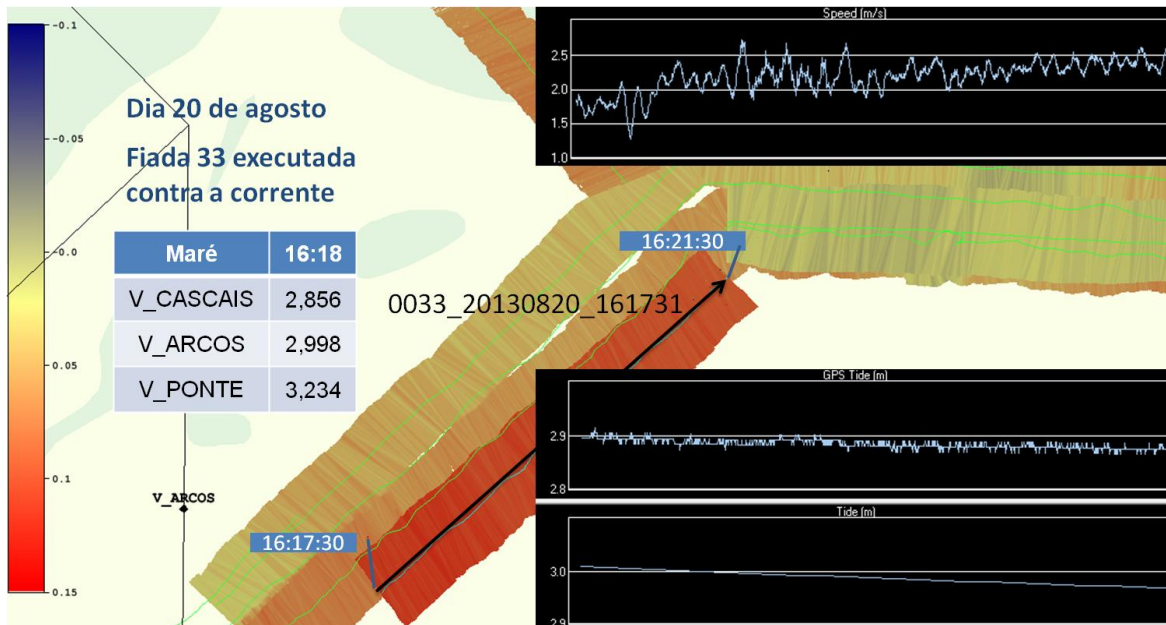


Figura 17 – Modelo de diferenças de 1 m de resolução elaborado a partir de MB gerados a partir da fiada 33.

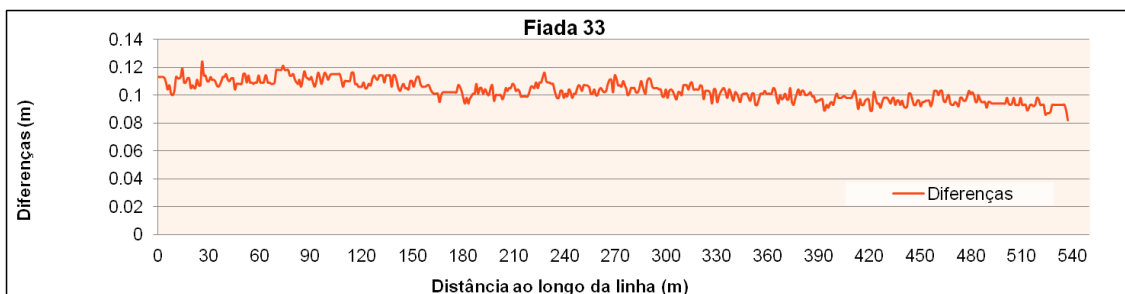


Figura 18 – Diferenças obtidas na fiada 33 entre os dois MB referidas à posição da embarcação.

4.3 Balanços de incerteza

A figura 19 demonstra claramente as vantagens da utilização de MVP e da redução da sondagem ao *datum* vertical utilizando observações GNSS RTK. Na modelação das incertezas assumiu-se a metodologia desenvolvida por Artilheiro e Vicente (2009) e, considerando os seguintes valores de incerteza adicionais (1 sigma) relativamente aos expostos na secção 3.2:

- Redução da maré tradicional: incerteza de 5 cm na determinação das concordâncias de maré, incerteza na determinação do calado dinâmico da embarcação de 4 cm e erros na determinação da profundidade oriundos dos perfis expostos nas figuras 5 e 6
- Redução da sondagem ao *datum* vertical com observações GNSS RTK: incerteza resultante das variações espaciais e temporais do perfil de VPS de 1 m/s, incerteza no modelo do geóide/referência vertical de 3 cm

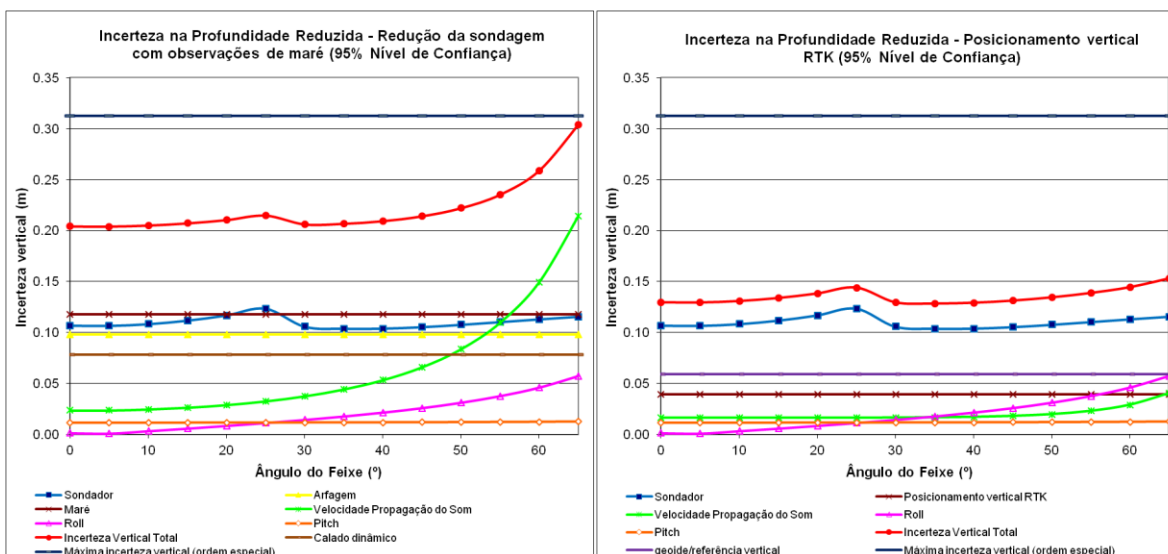


Figura 19 – Balanços de incerteza para uma profundidade média de 25 m utilizando, à esquerda a incerteza associada à medição pontual de perfis de VPS e a redução de maré tradicional e, à direita, a utilização de MVP e a redução da sondagem ao *datum* vertical por observações GNSS RTK

5 Considerações finais

A comunicação destinava-se a justificar as vantagens da redução da sondagem ao *datum* vertical por métodos GNSS, neste caso RTK, e verificar as vantagens de utilização de perfiladores de velocidade do som em contínuo (MVP).

A utilização do GNSS em modo RTK permite uma diminuição considerável da incerteza vertical total. A determinação da altitude elipsoidal pelo método RTK permite filtrar os erros associados à

estabilização dos sensores inerciais instalados na embarcação e medir as oscilações verticais provocadas pelo caimento e variação de calado da embarcação.

Os resultados obtidos na superfície de diferenças justificam-se ainda pela dificuldade de estimar a propagação da maré.

Note-se que as diferenças obtidas podem ser minimizadas com a utilização de modelos de propagação de maré validados e estudos adequados de comportamento dinâmico da embarcação. No entanto, um dos objetivos deste trabalho foi evidenciar as vantagens do posicionamento GNSS RTK nos levantamentos hidrográficos por não necessitar da informação referida. Outra das vantagens do posicionamento RTK consiste em não necessitar de tempo de estabilização do sensor inercial após alterações de proa e/ou de velocidade bruscas ou significativas da embarcação, rentabilizando a sondagem e otimizando a aquisição de dados em áreas de difícil manobra.

Quando da utilização de SVP tradicionais a variação do perfil de VPS pode apresentar um efeito dominante na incerteza vertical total para os feixes exteriores. O MVP permitiu atingir um aumento franco na rentabilidade do levantamento com redução na incerteza total vertical. Foram realizados três vezes mais perfis do que seriam pelo método de recolha pontual. Este aumento do número de perfis é fundamental em áreas de estuário com uma grande variabilidade temporal e espacial dos perfis de velocidade, melhorando o desempenho do sistema sondador multifeixe, com melhoria clara no processo de aquisição de dados de qualidade e redução do tempo de processamento de dados e no processo de estimação da profundidade. A utilização de MVP em áreas estuarinas pode permitir ainda estudos oceanográficos adicionais de caracterização ambiental.

O estudo demonstrou que para se realizarem levantamentos hidrográficos com incertezas (vertical e horizontal) reduzidas é necessário conduzir um correto planeamento, com uma criteriosa instalação e parametrização dos equipamentos (estação de referência, marégrafos, sistemas de aquisição de dados, etc...). A aquisição de dados batimétricos deve ser realizada com pessoal proficiente na exploração dos sistemas e na condução de processos de controlo de qualidade e validação da informação adquirida. Só dessa forma se consegue utilizar a tecnologia disponível para atingir os requisitos técnicos dos levantamentos.

Do trabalho realizado pode-se enumerar algumas linhas de estudo futuro:

- Realização de levantamentos para controlo de obras marítimas com referência ao elipsoide através de métodos GNSS RTK, eliminando do balanço de incertezas verticais a incerteza associada à ondulação do geoide, nomeadamente, em locais onde a separação entre o elipsoide e o datum vertical não seja conhecida com a precisão necessária
- Análise da metodologia de posicionamento GNSS *Precise Positioning Kinematic* (PPK) para redução da incerteza em levantamentos costeiros e oceânicos e estudo da assimilação de dados PPK nas aplicações de processamento de dados batimétricos
- Modelação de maré em zonas oceânicas e costeiras, ou áreas remotas onde não existe referencial altimétrico utilizando técnicas GNSS (RTK e PPK)
- Análise da adequabilidade da resolução do modelo do geoide em uso, nomeadamente, em zonas de fronteira mar – terra e onde existam variações de relevo significativas

Considerando os equipamentos e metodologias utilizados na presente comunicação e respondendo à pergunta que serve de tema à comunicação, para profundidades de 25 m, não é possível realizar levantamentos com incerteza vertical total decimétrica em virtude da grandeza associada ao próprio sistema sondador. No entanto, como demonstrado, os sistemas de posicionamento RTK e os MVP podem diminuir significativamente a incerteza vertical total de um sistema sondador.

6 Referências bibliográficas

Artilheiro, F. (2003): "Apontamentos de Levantamentos Hidrográficos", Escola de Hidrografia e Oceanografia, Instituto Hidrográfico. (Trabalhos não publicados).

Artilheiro, F., Vicente, J. (2009): "Requisitos para os Levantamentos Hidrográficos e Capacidades dos Sistemas Utilizados", Cartografia e Geodesia 2009, pp. 462-473

Artilheiro, F.; Pimentel, F. e Vicente, J.; Estimação dos erros dos sondadores multifeixe, Anais do Instituto Hidrográfico nº 17, 2005

Beaudoin, J. (2010): "Estimation of Sounding Uncertainty from Measurements of Water Mass Variability", Technical Report nº 272, University of New Brunswick, Department of Geodesy and

Beaudoin, J., Calder, B., Hiebert, J. e Imahori, G. (2009): "Estimation of Sounding Uncertainty from Measurements of Water Mass Variability", International Hydrographic Review, November 2009.

Calder, B., Wells, D. (2007): "CUBE User's Manual", Versão 1.13, University of New Hampshire.

CARIS (2013): "CARIS HIPS and SIPS 8.1 - User Guide", CARIS.

Clarke, J. H. (2013A): "Multi-Sensor Integration and the Ship Reference", 62th Multibeam Sonar Training Course (Lisboa), University of New Brunswick (Canadá) - Ocean Mapping Group e Center for Coastal & Ocean Mapping University of New Hampshire (EUA). (Trabalho não publicado).

Clarke, J. H. (2013B): "Operational Field Trials: An approach to assessing the performance of an integrated swath sonar system", 62th Multibeam Sonar Training Course (Lisboa), University of New Brunswick (Canadá) - Ocean Mapping Group e Center for Coastal & Ocean Mapping University of New Hampshire (EUA). (Trabalho não publicado).

Clarke, J. H., Lamplugh, M. e Kammerer, E. (2000): "Integration of near-continuous sound speed profile information", Canadian Hydrographic Conference, Montreal, Canada.

Dodd, D., Mills, J., Battilana, D. e Gourley, M. (2010): "Hydrographic Surveying Using the Ellipsoid as the Vertical Reference Surface", FIG Congress 2010, Sydney, Australia.

Hare, R., Godin, A., Mayer, L. (1995): "Accuracy Estimation of Canadian Swath (Multi-beam) and Sweep (Multi-transducer) Sounding Systems", Canadian Hydrographic Service, Ottawa.

Hofmann-Wellnhof, B., Herbert, L. e Wasle, E. (2008): "GNSS - Global Navigation Satellite Systems", 5ª edição, SpringerWien, NewYork.

In-Situ (2013): "Level TROLL 300, 500, 700, 700H Instruments Operators Manual – Revision 008", In-Situ Inc.

Kinsler, L., Frey, A., Coppens, A. e Sanders, J. (2000): "Fundamentals of Acoustics", 4ª edição, John Wiley & Sons, New York.

Kongsberg (2001): "Seatex MRU User's Manual – Revision 5", Kongsberg Seatex.

Kongsberg (2004): "Seatex Seapath 200 RTK User's Manual – Revision 4", Kongsberg Seatex.

Kongsberg (2006): "EM 3002 Multibeam echo sounder -The new generation high performance shallow water multibeam Revision E", Kongsberg Maritime.

OHI (2005): "M-13 IHO Manual on Hydrography", 1ª Edição, Organização Hidrográfica Internacional.

OHI, (2008): "S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys", 5ª Ed., Organização Hidrográfica Internacional.

Pacific Crest (2001): "PDL User's Guide – Revision 3.1", Pacific Crest Corporation.

Trimble (2009): "Trimble R7 GNSS Receiver – Version 4.00, Revision A", Trimble.

Trimble (2013): “TRIMBLE BUSINESS CENTER, versão 3.0 (64bits)”, Trimble.

Valeport (2012): “miniSVP, miniCTD, miniTIDE Operating Manual – Version E”, Valeport Limited.

Vicente, J. (2011): “Modelação de dados batimétricos com estimação de incerteza”, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências.

Vicente, J., R. Silva, P. Sanches e M. Arenga (2012): “Revisão das Especificações Técnicas para a execução de Levantamentos Hidrográficos”, 2^{as} Jornadas de Hidrografia, Instituto Hidrográfico, Lisboa..

Wells, D. (2013A): “Horizontal, Vertical & Orientation Positioning Requirements”, 62th Multibeam Sonar Training Course (Lisboa), University of New Brunswick (Canadá) - Ocean Mapping Group e Center for Coastal & Ocean Mapping University of New Hampshire (EUA). (Trabalho não publicado).

Wells, D. (2013B): “Requirements for decimeter bathymetry”, 62th Multibeam Sonar Training Course (Lisboa), University of New Brunswick (Canadá) - Ocean Mapping Group e Center for Coastal & Ocean Mapping University of New Hampshire (EUA). (Trabalho não publicado).