

CAPÍTULO 3 – MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE

1. INTRODUÇÃO

A Medição de profundidades é uma das principais tarefas do hidrógrafo. Estas tarefas requerem um conhecimento específico do meio físico, da acústica submarina, dos diversos equipamentos utilizados na medição de profundidades, dos sensores de determinação de atitude e proa da plataforma de sondagem e dos procedimentos apropriados para cumprir os requisitos e recomendações de exatidão e cobertura definidos pela publicação S-44 (5ª Edição) da OHI.

O fio-de-prumo e a vara de prumar foram os primeiros equipamentos utilizados na medição direta da profundidade. O seu princípio de operação simples tem permitido a sua contínua utilização ao longo de vários séculos.

Os sondadores de feixe simples, derivados dos sonares militares, foram um grande desenvolvimento tendo sido utilizados em levantamentos hidrográficos desde meados do século XX.

Durante a última década, os levantamentos hidrográficos sofreram uma mudança conceptual na tecnologia e metodologia da medição das profundidades. Os sondadores de multifeixe e sistemas de sondagem laser aerotransportados proporcionam atualmente uma cobertura quase total do fundo do mar. A alta densidade de dados recolhidos, bem como a elevada taxa de aquisição dos mesmos conduziram a enormes coletâneas de dados batimétricos e informação complementar.

O estado da arte dos equipamentos de medição de profundidade foi avaliado como se segue pelo grupo de trabalho encarregue da preparação em 1998 da 4ª edição da S-44:

Sondadores de feixe simples atingiram, em águas pouco profundas, uma exatidão subdecimétrica. O mercado oferece uma variedade de equipamentos com diferentes frequências, taxas de transmissão de impulsos etc. e é possível satisfazer a maioria dos utilizadores, em particular, os requisitos dos hidrógrafos. (...)

Sondadores multifeixe apresentam um rápido desenvolvimento e oferecem grande potencial para medição exata e busca total do fundo, se utilizados com procedimentos adequados e se garantido que a resolução do sistema é adequada para a detecção de perigos para a navegação.

Sistemas de sondagem laser aerotransportados são uma tecnologia emergente que pode oferecer ganhos substanciais de produtividade em águas límpidas e pouco profundas. Estes sistemas são capazes de medir profundidades até 50 metros ou mais.

Apesar destas novas tecnologias, os sondadores de feixe simples (SFS) são ainda os equipamentos mais comuns utilizados nos levantamentos hidrográficos no mundo inteiro. Estes sondadores evoluíram também do registo analógico para o registo digital, com aumento da precisão e da exatidão e com um conjunto de características e funcionalidades que permitem corresponder a uma mais ampla variedade de solicitações dos utilizadores. A utilização de SFS com sensores de movimentos, sistemas de posicionamento por satélite (GPS) e *software* de aquisição de dados concorrem para a otimização da produtividade e redução de pessoal durante os levantamentos.

Nos nossos dias os sondadores multifeixe são uma valiosa ferramenta para a determinação da profundidade quando requerida a busca total do fundo. Um número crescente de serviços hidrográficos adotou a tecnologia multifeixe como a metodologia principal para a recolha de

dados batimétricos para produção cartográfica. A aceitação de dados multifeixe na utilização na cartografia náutica publicada é um indicador da crescente confiança na tecnologia. Apesar das elevadas capacidades dos SMF, é necessário um conhecimento profundo dos seus princípios de operação pelos planeadores, operadores e verificadores, assim como prática na aquisição e no processamento dos dados.

Os sistemas de sondagem laser aerotransportados são utilizados por um número muito reduzido de serviços hidrográficos. Estes sistemas têm a mais elevada taxa de aquisição e são particularmente adequados para águas pouco profundas. No entanto, os custos de aquisição e operação e operação dos meios envolvidos não permitem um uso mais generalizado.

Neste Capítulo, a Secção 2 apresenta alguns fundamentos de acústica necessários à compreensão das ondas acústicas na água do mar, à sua propagação e parâmetros acústicos. A Secção 3 trata dos sensores de movimento. A secção 4 apresenta as características dos transdutores e a sua classificação relativamente ao tipo de feixe, princípios de operação e instalação. A Secção 5 descreve os sistemas acústicos dos sondadores de feixe simples e sistemas de varrimento, tanto multifeixe como sonares interferométricos; relativamente às suas características, princípios de operação, instalação e uso operacional. Finalmente, a Secção 6 apresenta os sistemas não acústicos, tais como sistemas de sondagem laser aerotransportados e sistemas de indução eletromagnética, sistemas de detecção remota e os sistemas tradicionais de rocega mecânica.

A terminologia utilizada neste capítulo segue, dentro do possível, o Dicionário de Hidrografia [OHI SP-32 5ª Edição, 1994].

2. FUNDAMENTOS SOBRE ACÚSTICA E SENSORES DE MOVIMENTOS

A água do mar é o meio onde usualmente têm lugar as medições efetuadas em hidrografia. Assim, torna-se essencial o conhecimento das propriedades físicas da água e da propagação das ondas acústicas para compreender os conteúdos e objetivos deste capítulo.

2.1. Ondas acústicas e propriedades físicas da água do mar

Apesar das ondas eletromagnéticas apresentarem uma propagação excelente no ar e no vácuo, estas dificilmente se propagam nos líquidos. No entanto, as ondas acústicas, sónicas ou ultrasónicas apresentam uma boa propagação nos meios elásticos, desde que estes possam entrar em vibração quando submetidos a variações de pressão. A maioria dos sensores utilizados na determinação da profundidade utiliza ondas acústicas.

2.1.1. Campo acústico

As ondas acústicas consistem em variações subtis do campo de pressão na água, as partículas de água movem-se longitudinalmente, para a frente e para trás, na direção de propagação da onda, produzindo regiões adjacentes de compressão e expansão.

A intensidade da onda acústica I é a quantidade de energia que atravessa uma unidade de área por unidade de tempo. A intensidade acústica é dada por:

$$I = \frac{p_e^2}{\rho c}, \quad (3.1)$$

em que ρ é a densidade da água, c é a velocidade de propagação da onda acústica na água e p_e é a pressão acústica efetiva³⁰, dada pela raiz média quadrática (*root mean square*) da amplitude da pressão acústica P :

$$p_e = \frac{P}{\sqrt{2}}$$

A intensidade da onda acústica é calculada através do valor médio da pressão acústica, em vez de valores instantâneos.

A pressão acústica e a intensidade, devido à vasta gama de valores que podem assumir, são usualmente expressos em escalas logarítmicas referentes a níveis de pressão e intensidade. A escala logarítmica mais comum é a escala decibel.

O nível de intensidade acústica, IL , é dado por,

$$IL = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{REF}} \quad (3.2)$$

em que I_{REF} é a intensidade de referência.

O nível de intensidade acústica pode alternativamente ser expresso por,

$$IL = 20 \log_{10} \frac{p_e}{p_{REF}} \quad (3.3)$$

em que p_{REF} é a pressão de referência³¹.

2.1.2. Equação sonar

A equação sonar³² é utilizada para estudar e expressar a capacidade de detecção e desempenho dos sondadores em função das condições de operação [Urlick, 1975].

Para os sondadores, a equação sonar apresenta uma medida da detecção de sinal ou do eco, o *Echo Excess* (EE),

$$EE = SL - 2TL - (NL-DI) + BS - DT. \quad (3.4)$$

onde SL = *source level*/nível de transmissão, TL = *transmission loss*/perdas de transmissão, NL = *noise level*/nível de ruído, DI = *directivity index*/índice de directividade, BS = *backscatter strength*/nível de retrodifusão e DT = *detection threshold*/limiar de detecção.

Nesta secção, cada termo da equação sonar é apresentado e estudado com o objetivo de permitir melhor compreensão dos processos envolvidos na propagação dos sinais acústicos e da detecção de ecos.

A intensidade de uma onda acústica I_r à distância r da fonte acústica é obtida por,

³⁰ Pascal (Pa) é a unidade de pressão no Sistema Internacional de unidades (SI).

³¹ Na acústica submarina a pressão de referência usualmente adoptada é de 1 μ Pa.

³² *SOUND NAVIGATION AND RANGING*.

$$I_r = \frac{p_r^2}{\rho c} \text{ W/m}^2, \quad (3.5)$$

em que p_r é a pressão efetiva à distância r e ρc é a impedância acústica³³ (considerando a velocidade de propagação das ondas acústicas de 1500 m/s e a densidade da água do mar de 1026 kg/m³ a impedância acústica é $\rho c = 1.54 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$)

O Nível de Transmissão/Source Level (SL) corresponde ao nível de intensidade do sinal acústico referido a intensidade de uma onda acústica plana³⁴ exercendo a pressão de 1 μPa (raiz quadrática média) a 1 metro do centro da fonte transmissora, i.e.,

$$SL = 10 \log \frac{I_1}{I_{REF}} \quad (3.6)$$

As Perdas de Transmissão/Transmission Loss (TL) resultam das perdas de intensidade acústica devido à geometria, i.e., por espalhamento da energia ao longo de uma maior superfície, sendo proporcional a r^2 . E devido à absorção em função das propriedades físicas e químicas da água do mar e da frequência acústica, sendo proporcional ao coeficiente de absorção (ver §2.3.1).

O espalhamento deve-se à forma cônica do feixe (Figura 3.1). O aumento da superfície conduz a um decréscimo da potência por unidade de área, ou seja a uma diminuição da intensidade.

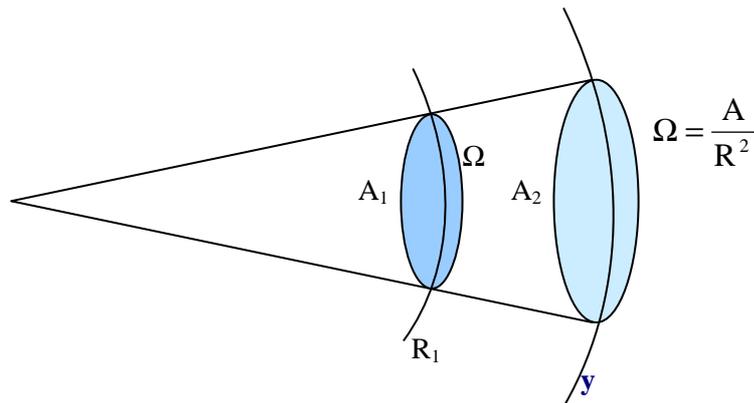


Figura 3.1 "Perdas de propagação devido à geometria do feixe"

A potência do impulso acústico, Π , é igual a Intensidade x Área,

$$\Pi = I_1 \cdot A_1 = I_2 \cdot A_2,$$

onde $A_1 = \Omega \cdot R_1^2$ e $A_2 = \Omega \cdot R_2^2$, sendo Ω o ângulo sólido³⁵.

³³ A impedância acústica é uma medida da resistência do meio à propagação de ondas acústicas, i.e., um factor de proporcionalidade entre a velocidade e a pressão acústica.

³⁴ As ondas planas ocorrem em regiões reduzidas, suficientemente afastadas da fonte, onde as superfícies de onda (pontos que vibram em fase) são aproximadamente planas e apresentam a mesma amplitude.

Assim, a relação de intensidades é dada por,

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \quad (3.7)$$

Considerando a intensidade de referência em $R_1 = 1$ m, distância para a qual o nível da transmissão (SL) é determinado, a razão logarítmica das intensidades relaciona as perdas de transmissão por espalhamento:

$$10 \cdot \log \frac{I}{I_{Ref}} = 10 \cdot \log \frac{1}{R_2^2} = -20 \cdot \log R_2 \quad (3.8)$$

Pelo que as perdas de transmissão são dadas por,

$$TL = 20 \log_{10} r + ar, \quad (3.9)$$

em que r é a distância ao transdutor e a é o coeficiente de absorção.

O Nível de Ruído/Noise Level (NL) depende do nível espectral de ruído ambiente (N_0) e da largura de banda do transdutor durante a recepção (w),

$$NL = N_0 + 10 \log_{10} w. \quad (3.10)$$

O ruído no oceano é gerado por várias fontes [Urlick, 1975], tais como: ondas, atividade sísmica, ruído termal, vida marinha e tráfego marítimo.

Além do ruído, é também importante ter em conta o efeito combinado da retrodispersão de energia acústica existente na coluna de água (ex: ondas de superfície, bolhas de ar, vida marinha, material em suspensão, etc.). Esta contribuição é conhecida como Nível de Reverberação/Reverberation Level (RL).

Os transdutores têm usualmente a capacidade de concentrarem ou dirigirem a energia acústica num feixe com forma cónica (Figura 3.2). Esta propriedade pode ser quantificada, para a equação sonar, através da razão entre a intensidade acústica nesse feixe e a intensidade acústica numa fonte omnidireccional, com potências iguais.

³⁵ O ângulo sólido, Ω , corresponde ao espaço delimitado por uma superfície cónica. O valor, expresso em esteroradianos (sr), é obtido por $\Omega = S/R^2$, onde S é a superfície esférica com centro no vértice do cone e raio R .

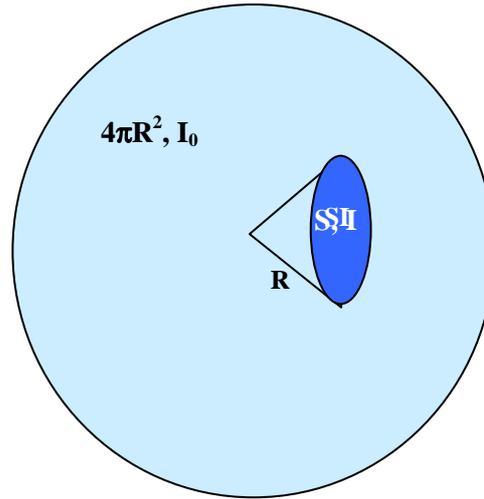


Figura 3.2 "Superfícies insonificadas por uma fonte omnidirecional e por uma fonte direcional"

Considerando a mesma potência para as fontes direcional e omnidirecional tem-se:

$$\Pi = I_0 \cdot 4\pi R^2 = I \cdot S. \quad (3.11)$$

A razão de intensidades é dada por,

$$\frac{I}{I_0} = \frac{4\pi R^2}{S} \quad (3.12)$$

sendo o Índice de Directividade/Directivity Index (DI) obtido por:

$$DI = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} = 10 \log_{10} \frac{4\pi R^2}{S}. \quad (3.13)$$

Para um transdutor agregado de comprimento L e comprimento de onda λ , (com $L \gg \lambda$) o Índice de Directividade é dado por:

$$DI = 10 \log_{10} (2L/\lambda). \quad (3.14)$$

A energia acústica refletida pelo fundo do mar é a matéria utilizada pelos sistemas sonar, sendo também utilizada de forma remota para inferir algumas propriedades do fundo.

O conhecimento do ângulo do feixe e do perfil de velocidade de propagação do som ao longo da coluna de água permite obter do nível de retrodifusão (*backscatter*) corrigido dos efeitos das perdas de propagação.

Cada partícula do fundo pode ser vista como um refletor, sendo o retorno do fundo a soma das contribuições de energia proveniente da interface água – solo e do volume de sedimentos, devido à penetração de alguma energia nos sedimentos. No entanto, a contribuição do volume de sedimentos é menos significativa para frequências elevadas.

O Nível de Retrodifusão/Backscattering Strength (BS) é usualmente descrito como a soma logarítmica da retrodifusão intrínseca por unidade de área ou *backscatter index (SB)* que é dependente das propriedades refletivas do fundo e da área efetiva de retrodifusão A (área insonificada do fundo que contribui para o sinal retrorefletido).

$$BS = SB + 10 \log_{10} A \text{ dB} \quad (3.15)$$

Os limites da área de retrodifusão são definidos pela geometria do feixe na vertical do transdutor (*nadir*), especificamente pela largura do feixe transmitido na direção longitudinal (*along track*), ϕ_T , e pela largura do feixe recebido na direção transversal (*across track*), ϕ_R .

Fora da vertical do transdutor, a área de retrodifusão é limitada pela largura do feixe, ϕ_T , e pelo comprimento do impulso transmitido, τ (Figura 3.3). O Nível de Retrodifusão pode ser dado por:

$$BS = \begin{cases} SB + 10 \log(\phi_T \phi_R R^2) & \text{Constrição por largura do feixe} \\ SB + 10 \log\left(\frac{c\tau}{2\sin\beta} \phi_T R\right) & \text{Constrição por comprimento de impulso} \end{cases} \quad (3.16)$$

em que R é a distância entre o transdutor e um ponto no leito do mar, c é a velocidade de propagação do som na água e β é o ângulo do feixe, referido à vertical.

O coeficiente de retrodifusão, SB , depende significativamente do ângulo de incidência, com a maior variação próximo do nadir. Para ângulos de incidência mais elevados segue a lei de Lambert [Urlick, 1975 e de Moustier, 1993]. É comum definir:

$$SB = BS_N, \text{ para incidência normal } (\beta = 0^\circ)$$

$$SB = BS_O \cdot \cos^2 \beta, \text{ para incidência oblíqua } (\beta > 10\text{-}25^\circ)$$

Tipicamente, o BS_N apresenta um valor na ordem de -15 dB e o BS_O na ordem de -30 dB. Estes valores podem variar ± 10 dB ou mais, dependendo do tipo de fundo e da sua rugosidade.

Considerando a Figura 3.3, a área insonificada instantânea, A , é uma função da largura do feixe transmitido, ϕ_T . O número de amostras por feixe depende do intervalo de amostragem (τ_s).

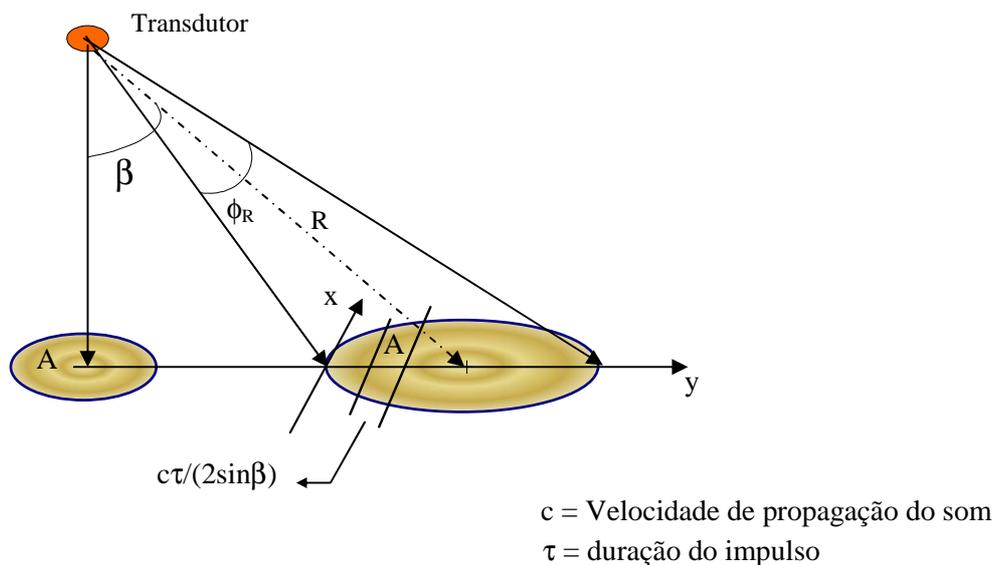


Figura 3.3 "Amostras de retrodifusão"

O Limiar de Detecção/Detection Threshold (DT) é um parâmetro dependente do sistema e estabelece o nível mínimo a partir do qual o sondador detecta os ecos.

2.1.3. Temperatura

A temperatura da água do mar à superfície varia com a posição geográfica, com a estação do ano e com a hora do dia [Pickard e Emery, 1990]. A sua distribuição é complexa e não pode ser prevista com a exatidão necessária para os levantamentos hidrográficos. E ao longo da coluna de água, o comportamento da velocidade de propagação do som é também bastante complexo. Devido a essas dificuldades de previsão, é necessária uma distribuição abrangente no tempo e no espaço dos perfis de velocidade de propagação do som na água para se poder dispor de perfis atualizados de velocidade de propagação do som na água representativos da área a sondar.

A medição da profundidade é muito sensível às variações do perfil de velocidade de propagação do som na água. A variação de 1 grau Celsius na temperatura traduz-se aproximadamente numa variação de 4,5 m/s na velocidade de propagação do som.

A variação de temperatura é o fator dominante na variação da velocidade de propagação do som na água entre a superfície e o limite inferior da termoclina³⁷, passando a ser a pressão o fator dominante para maiores profundidades.

2.1.4. Salinidade

A salinidade é uma medida da quantidade de sais e outros minerais dissolvidos na água do mar. É normalmente definida como a quantidade total de sais dissolvidos na água do mar em partes por milhar (‰).

Na prática, a salinidade não é determinada diretamente mas calculada com base no teor de cloro, condutividade elétrica, índice de refração, ou por outra propriedade cuja relação com a salinidade seja bem conhecida. Pela Lei das Proporções Constantes a quantidade de cloro numa amostra de água é utilizada para estabelecer a salinidade³⁸ dessa amostra.

A salinidade média da água do mar é da ordem de 35 ‰. A taxa de variação da velocidade de propagação do som na água é aproximadamente 1.3 m/s para uma variação de 1 ‰ na salinidade.

A salinidade é normalmente medida através de estações CTD (acrônimo para condutividade, temperatura, e profundidade) usando a observável condutividade elétrica, ver § 2.2.1.2.

2.1.5. Pressão

A pressão também afeta significativamente a variação da velocidade de propagação do som na água. A pressão é uma função da profundidade e a taxa de variação da velocidade de propagação do som é de 1.6 m/s por cada 10 atmosferas (aproximadamente por cada 100 metros de profundidade)³⁹.

A pressão tem maior influência na velocidade de propagação do som em grandes profundidades.

³⁷ A termoclina é também conhecida como a camada de descontinuidade ou camada térmica. A termoclina corresponde a um gradiente negativo da temperatura ao longo da coluna de água e que é mais acentuado que nas camadas adjacentes, inferior e superior. No oceano, as principais termoclinas são sazonais, devido ao aquecimento da superfície da coluna de água, ou permanentes.

³⁸ Um comité conjunto (IAPO, UNESCO, ICES, e SCOR) propôs a adopção universal da seguinte relação entre a clorinidade e a salinidade: $S = 1.80655 Cl$. Esta equação foi adoptada em 1963 pela IAPO e em 1964 pela ICES.

³⁹ Por aplicação do princípio da hidrostática, i.e., $p(z) = p_0 + \rho g z$.

2.1.6. Densidade

A densidade da água depende dos parâmetros anteriores, i.e., temperatura, salinidade e pressão.

Cinquenta por cento da água no oceano apresenta uma densidade compreendida entre 1027,7 e 1027,9 kg/m³. A maior influência na densidade é a compressibilidade da água com a profundidade. Uma massa de água com densidade de 1028 kg/m³ à superfície apresentará uma densidade de 1051 kg/m³ a uma profundidade de 5000 metros

2.2. Determinação da velocidade de propagação do som, salinidade e temperatura

Esta subsecção descreve a instrumentação utilizada na determinação da velocidade de propagação do som, salinidade e temperatura, assim como os seus princípios de operação e o cálculo da velocidade de propagação do som na água.

2.2.1. Instrumentação

2.2.1.1. SVP (Perfilador de velocidade do som)

É o equipamento usualmente utilizado para a determinação da velocidade de propagação do som ao longo da coluna de água. Este equipamento tem um sensor de pressão para medir a profundidade e um par transdutor/refletor separados de uma distância **d**. A velocidade de propagação do som é calculada pela equação $c = 2 \cdot d / \Delta t$, onde Δt corresponde ao intervalo de tempo do duplo trajeto entre o transdutor e o refletor (similar à medição de profundidade efetuada pelos sondadores acústicos).

2.2.1.2. CTD

É um equipamento eletrónico com sensores de condutividade, temperatura e profundidade. Este equipamento regista a salinidade por medição da condutividade elétrica da água do mar.

A velocidade de propagação do som na água do mar varia com a elasticidade e densidade do meio, grandezas que dependem da salinidade, da temperatura e da pressão. Com os dados do CTD (salinidade, temperatura e pressão) é possível calcular, através de equações empíricas, a velocidade de propagação do som na água. Uma equação simples mas com exatidão adequada foi apresentada por Coppens [Kinsler et al., 1982]:

$$C(Z, T, S) = 1449.05 + T \cdot (4.57 - T \cdot (0.0521 - 0.00023 \cdot T)) + \quad (3.17)$$

$$+ (1.333 - T \cdot (0.0126 - 0.00009 \cdot T))(S - 35) + \Delta(Z)$$

em que **T** é a temperatura em graus Celsius (°C), **S** é a salinidade em partes por mil (ppm), **Z** é a profundidade em quilómetros e $\Delta(Z) \approx 16.3 \cdot Z + 0.18 \cdot Z^2$.

Esta equação é válida para 45 graus de latitude. Para outras latitudes, **Z** deve ser substituída por $Z \cdot (1 - 0.0026 \cdot \cos(2\phi))$, sendo ϕ a latitude.

2.2.1.3. Termistores

São elementos cuja resistência elétrica depende da sua temperatura, função da quantidade de calor recebido das imediações por radiação⁴⁰. As cadeias de termistores são utilizadas para medir a temperatura a várias profundidades ao longo da coluna de água. Estas cadeias, usualmente fundeadas, consistem em vários elementos regularmente espaçados ao longo de um cabo de

⁴⁰ A taxa de calor por radiação é dada pela Lei de Stefan que descreve a razão de emissão de calor por radiação como proporcional à quarta potência da temperatura absoluta.

suporte. Um registador de dados efetua uma amostragem sequencial e armazena as temperaturas ao longo do tempo.

2.2.2. Operação dos equipamentos

Antes de ser utilizado, o SVP deve ser corretamente parametrizado com as configurações da gravação e calibrado com o offset atmosférico de forma a gerar medições fiáveis

Convém sublinhar que, durante a calibração do offset atmosférico, o SVP não se deve encontrar em local pressurizado sob risco da calibração introduzir desvios incorretos, conduzindo a erros na medição da profundidade.

Antes de efetuar o perfil, o equipamento deverá ser colocado na água, durante cerca de 15 minutos, para estabilização térmica.

Durante a realização dum perfil de velocidade de propagação do som na água é recomendável que o equipamento seja arriado a velocidade constante.

2.2.3. Registo e processamento de dados

Os perfis de velocidade de propagação do som na água devem ser editados e verificados cuidadosamente para despiste de profundidades e leituras anómalas.

Em geral, os perfiladores efetuam o registo de pares de profundidade – velocidade de propagação durante a subida e descida do equipamento. Assim, as medições devem ser comparadas e a informação adicional removida, de forma a obter um ficheiro ordenado por profundidades crescentes.

2.2.4. Cálculo da velocidade de propagação do som

Após validação do perfil de velocidade de propagação do som, este pode ser aplicado aos ficheiros dos dados de sondagem, sendo utilizado para corrigir as profundidades medidas através dos dados do perfil da velocidade do som.

Para feixes próximos da vertical, caso específico dos sondadores de feixe simples, é suficiente a utilização de um valor médio de velocidade de propagação do som ao longo da coluna de água. No entanto, para feixes oblíquos, é necessário efetuar o traçado do raio acústico tendo em consideração a curvatura do feixe devido a fenómenos de refração. Este é o procedimento utilizado nos sondadores de multifeixe (ver §5.2.1.8.1).

Para um impulso transmitido na vertical (i.e., $\theta_0 = 0^\circ$), a média harmónica para a velocidade de propagação do som c_h , para uma profundidade z_n , é dada por,

$$c_h(z_n) = \frac{z_n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} \ln\left(\frac{c_i}{c_{i-1}}\right)}, \quad (3.18)$$

em que g_i é o gradiente constante na camada i , dado por, $g_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}$.

2.3. Propagação do som na água do mar

Nesta secção é apresentada a propagação do som na água do mar, em particular a atenuação, reflexão e refração.

2.3.1. Atenuação

A atenuação é a perda de energia na propagação de uma onda acústica devido a absorção, espalhamento esférico e dispersão devido a partículas existentes na coluna de água.

A absorção resulta da dissociação e associação de algumas moléculas na coluna de água. O sulfato de magnésio ($MgSO_4$) é o composto que mais contribui para a absorção na água do mar. A taxa de absorção depende das propriedades físico-químicas da água e da frequência acústica transmitida. Observando a Figura 3.4 é possível concluir que acima de 100 kHz o coeficiente de absorção aumenta com a temperatura. Por essa razão, é esperada uma variação do alcance sonar com a temperatura do meio.

O espalhamento esférico depende a geometria. Para um ângulo sólido a energia acústica dispersa-se à medida que a distância à fonte aumenta.

Ambas as perdas por absorção e por espalhamento esférico são tidas em consideração na equação sonar (cf. § 2.1.2). No entanto, as perdas por reflexão dependem de partículas ou corpos presentes na coluna de água. A reflexão deve-se principalmente ao organismos marinhos, sendo uma das maiores contribuições o *deep scattering layer* (DSL) que consiste numa camada de plâncton que varia de profundidade ao longo do dia.

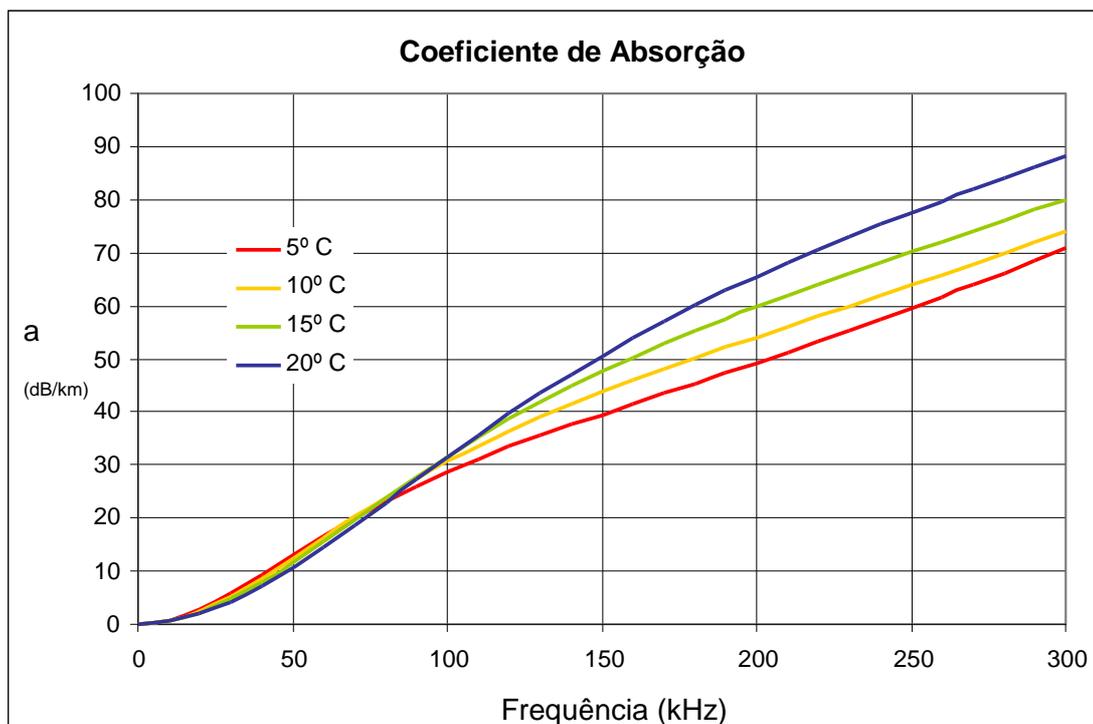


Figura 3.4 "Coeficiente de absorção"

2.3.2. Refração e reflexão

A refração é o processo pelo qual a direção de propagação da onda acústica varia como resultado da variação da velocidade de propagação do som ao longo do meio de propagação, ou quando a energia acústica passa através da interface entre dois meios, apresentando uma descontinuidade na velocidade de propagação do som entre os dois meios.

De acordo com a Lei de Snell e considerando dois meios (Figura 3.5) com diferentes velocidades de propagação do som c_1 e c_2 , se c_1 for maior que c_2 a direção de propagação da energia é alterada e o ângulo de transmissão será menor que o ângulo de incidência. Ao invés, se c_1 for menor que c_2 ,

a direção de propagação da energia é alterada e o ângulo de transmissão será maior que o ângulo de incidência. Para incidência normal não ocorre refração.

Para incidência normal e para fundos regulares, o coeficiente de reflexão⁴¹ para a pressão, \mathfrak{R} , é obtido pela razão entre a amplitude de pressão da onda refletida e a amplitude de pressão da onda incidente [Kinsler et al., 1982].

$$\mathfrak{R} = \frac{P_R}{P_I} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (3.19)$$

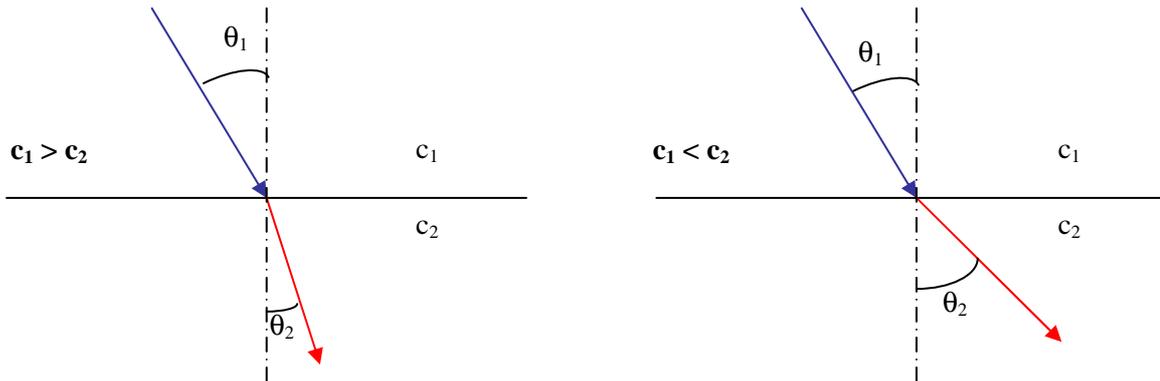


Figura 3.5 "Princípio da Refração"

Em condições normais, a razão entre a energia acústica refletida e a energia acústica transmitida depende principalmente de:

- ◆ Diferenças entre impedâncias acústicas do meio;
- ◆ Rugosidade do fundo;
- ◆ Frequência acústica.

2.4. Parâmetros acústicos

As características de um sondador acústico são determinadas pelos seus transdutores, nomeadamente, a directividade, largura do feixe, guiamento do feixe e nível dos lóbulos laterais. Nesta subsecção são apresentados os parâmetros acústicos.

2.4.1. Frequência

A frequência acústica é o parâmetro que condiciona o alcance e a penetração da onda acústica nos sedimentos. A atenuação do sinal acústico na água é proporcional à frequência. Quanto mais elevada a frequência maior a atenuação e, conseqüentemente, menor o alcance e a penetração das ondas acústicas no volume de sedimentos.

A largura do feixe depende da frequência acústica e da dimensão do transdutor. Para a mesma largura do feixe, uma frequência menor requer um transdutor com maior dimensão.

⁴¹ É possível definir coeficientes de reflexão para a potência e para a intensidade. Para a incidência normal o coeficiente para a potência e para a intensidade corresponde ao quadrado do coeficiente de reflexão para a pressão.

As frequências típicas dos sondadores acústicos são as seguintes:

- Frequências superiores a 200 kHz para profundidades inferiores a 100 metros;
- Frequências entre os 50 e 200 kHz para profundidades inferiores a 1500 metros;
- Frequências entre 12 e 50 kHz para profundidades superiores a 1500 metros.

As frequências dos perfiladores de sedimentos são, em geral, inferiores a 8 kHz.

2.4.2. Largura de banda

Considerando f_0 como a frequência de ressonância, correspondente à máxima potência de transmissão, e f_1 e f_2 as frequências correspondentes a metade da potência máxima, a largura de banda é o intervalo entre essas frequências (Figura 3.6), i.e., $B_w = f_2 - f_1$.

O fator de qualidade do transdutor, Q , é dado por,

$$Q = \frac{f_0}{B_w}. \quad (3.20)$$

Das definições acima é possível concluir que Q e B_w variam inversamente. Portanto, para otimizar a potência transmitida o transdutor deve transmitir próximo da frequência de ressonância e ter uma pequena largura de banda, i.e., um elevado fator de qualidade.

Durante a recepção é necessário ter uma boa discriminação do eco relativamente a qualquer outro sinal. Embora deva ser bem definida na faixa de frequência, a largura de banda do transdutor deve satisfazer a relação $B_w \geq 1/\tau$, sendo τ o comprimento do impulso

A solução ideal é ter um transdutor para a transmissão com Q elevado, e um transdutor de recepção com a mesma frequência de ressonância mas com baixo Q .

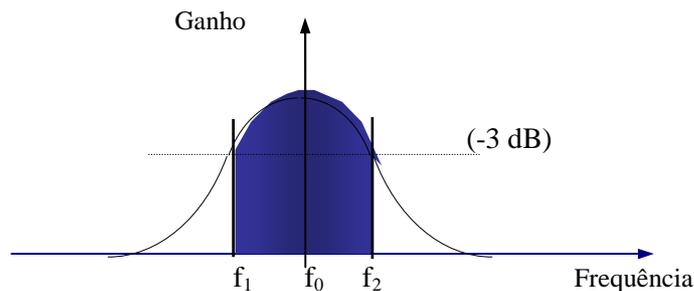


Figura 3.6 "Largura de banda do transdutor"

2.4.3. Comprimento do impulso

O comprimento do impulso determina a energia transmitida para a água. Para a mesma potência, quanto maior o comprimento do impulso, mais energia é colocada na água e, portanto, maior será o alcance atingido pelo sondador acústico.

Para tirar vantagem da frequência de ressonância do transdutor a duração do impulso deve ser, no mínimo, metade do seu período natural. No entanto, o inconveniente de impulsos mais longos é o decréscimo na resolução vertical de duas estruturas próximas (Figura 3.7).

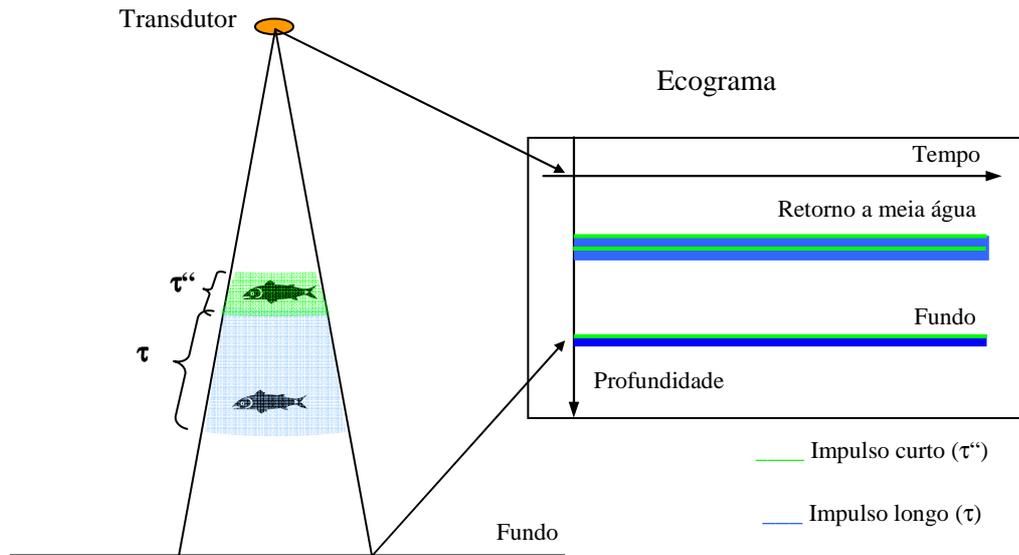


Figura 3.7 "Resolução vertical em função do comprimento do impulso"

3. SENSORES DE MOVIMENTO

Ser possível corrigir as profundidades observadas e o seu posicionamento do movimento da plataforma de sondagem, i.e., atitude (balanço/*roll*, cabeceio/*pitch*, e proa/*heading*) e arfagem/*heave*, significou uma melhoria considerável na qualidade e exatidão dos levantamentos hidrográficos. Para este objetivo são utilizados sensores inerciais e sensores de proa (usualmente uma girobússola ou agulha *fluxgate*) ou ainda sensores inerciais com integração de informação GPS para medição da atitude e da arfagem da plataforma de sondagem.

A atitude da plataforma consiste em três rotações em torno de três eixos ortogonais convencionados para a plataforma. Daqui em diante o sistema de coordenadas da plataforma é definido por um sistema de mão direita, apontando o eixo dos xx'' para a proa, o eixo dos yy'' para estibordo e o eixo dos zz'' para baixo. Neste sistema de referência o balanço corresponde à rotação em torno do eixo dos xx'' (o balanço é positivo quando o estibordo entra na água), o cabeceio corresponde à rotação em torno do eixo dos yy'' (o cabeceio é positivo quando a proa sai fora de água), e a guinada/*yaw* corresponde à rotação em torno do eixo dos zz'' (o *yaw* é positivo para rotações no sentido dos ponteiros do relógio).

Para se transformar os dados de movimento, referidos ao sistema de referência da plataforma, para o sistema de coordenadas local é necessário efetuar rotações de acordo com a atitude a que a plataforma está sujeita. Daqui em diante, por convenção, o sistema de coordenadas local é definido como um sistema de mão esquerda com o eixo dos xx'' a apontar para Este, o eixo dos xy'' a apontar para Norte e o eixo dos zz'' a apontar para baixo.

Esta secção apresenta os fundamentos sobre a determinação dos movimentos e a sua exatidão.

3.1. Princípios de funcionamento

3.1.1. Sensores inerciais

Os sensores inerciais ou Inertial Measurement Units (IMU) são os sensores usualmente utilizados em hidrografia para determinação do balanço, cabeceio e arfagem. Estes sensores aplicam as leis do movimento de Newton e consistem em três acelerómetros, instalados num sistema de eixos tri-ortogonais e três sensores de razão angular colocados no mesmo sistema de eixos, ficando sujeitos aos mesmos movimentos que a plataforma (*strap down system*).

A saída da tríade de acelerómetros fornece a uma boa estimacão do vetor de gravidade. A tríade de sensores de razão angular mede os movimentos angulares (*roll, pitch e yaw*).

Os dados provenientes dos acelerómetros passam por um filtro passa-baixo para a remoção na vertical aparente das variações de alta-frequência devido à ondulação, guinadas e alterações bruscas de velocidade. Por outro lado, os dados do sensor de razão angular passam por um filtro passa-alto para remover os movimentos de baixa frequência. O resultado dos filtros é a atitude da embarcação, acima da frequência de corte estabelecida (usualmente, são aceitáveis frequências de corte entre 0,1 a 0,05 Hz).

Quando a plataforma está sujeita a acelerações cuja duração excede o período de corte utilizado no filtro passa-baixo aplicado aos acelerómetros, tais como rotações ou variações prolongadas de velocidade, a aceleração centrípeta ou tangencial é interpretada como aceleração horizontal prolongada, não sendo filtrada pelo filtro passa-baixo. O resultado é a deflexão aparente da vertical do lugar, com os consequentes erros nas medições angulares (*roll e pitch*).

A combinação dos dois filtros (passa-baixo e passa-alto) e a relação entre as duas bandas de passagem estabelece as características do sensor.

Estes sensores inerciais são muito sensíveis ao intervalo de tempo utilizado para a integração, especialmente para o cálculo de arfagem. A frequência de corte equivalente deve ser afinada para um valor adequado em que o sensor possa detectar a ondulação de maior período, sem atenuar ou eliminar as ondas com menor período.

3.1.2. Integração dos sensores inerciais com informação GPS

A integração de informação GPS fornece um meio para determinação da proa da plataforma através da utilização de duas antenas GPS numa linha base, usualmente orientada longitudinalmente á proa da plataforma.

A velocidade e a taxa de rotação da plataforma fornecida pelo receptor GPS e pelos sensores de razão angular podem ser utilizadas para calcular a aceleração centrípeta. Tomando em linha de conta essa informação, as medições de *roll* e de *pitch* são compensadas da deflexão da vertical aparente. O ganho com este sensor é o de *roll* e *pitch* com elevada exatidão, imune às acelerações horizontais.

3.2. Medições de *roll, pitch*, e arfagem

Desde meados da década de 1990 que os sensores de movimento são utilizados de forma recorrente nos levantamentos hidrográficos. Estes sensores são hoje um requisito essencial não só para os levantamentos com sondador multifeixe, mas também para os levantamentos de feixe simples quando utilizada a aquisição automática de dados. Estes sensores são utilizados para compensar o *roll, pitch* e arfagem.

As profundidades calculadas devem ter em consideração os dados do sensor de movimentos, i.e., os valores de rotação em torno do eixo longitudinal da plataforma de sondagem (*roll* - θ_R), os

valores de rotação em torno do eixo transversal da plataforma de sondagem (*pitch* - θ_P), a proa da plataforma (α) e a deslocação vertical (arfagem). Ver Figura 3.8 e anexo A.

3.3. Proa

A determinação da proa é essencial nos levantamentos com sistemas de sondagem por varrimento. No entanto, para os levantamentos com sondadores de feixe simples as variações de proa (*yaw*) durante a rotação não são significativas se a antena de posicionamento se encontrar na vertical do transdutor. Quando a antena de posicionamento e o transdutor não se encontram na mesma vertical, é necessário utilizar a proa da plataforma, para posicionar corretamente a profundidades.

Para a medição da proa em tempo real, podem ser utilizados vários equipamentos tais como: girobússolas, agulhas *fluxgate* e DGPS.

A determinação da proa, baseada na fase da portadora, é utilizada nos sensores inerciais integrando informação DGPS. Esta solução permite uma elevada exatidão.

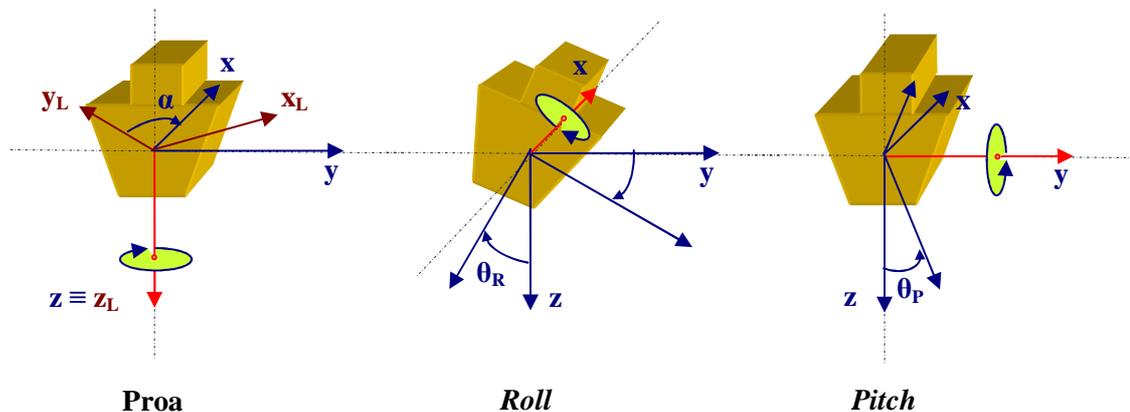


Figura 3.8 "Atitude da plataforma de sondagem"

3.4. Exatidão das medições

A exatidão do *roll*, *pitch*, arfagem e proa deve ser tão elevada quanto possível. Presentemente, os sensores de movimentos são suficientemente exatos para serem utilizados em quase todas as ordens de levantamento. No entanto, os sensores inerciais, quando utilizados isoladamente, apresentam desvios nas medições durante acelerações horizontais (centrípeta ou tangencial) da plataforma, devido ao desvio da vertical aparente.

Para os sondadores multifeixe é recomendada a utilização de sensores inerciais com integração de informação DGPS de forma a minimizar o efeito das acelerações horizontais. Em geral, a exatidão destes sensores, a um nível de confiança de 95%, são da ordem de 0.05° para o *roll* e *pitch*, 0.2° para a proa e 10 centímetros ou 10% da sua amplitude, conforme o maior valor para a arfagem.

Durante as guinadas da plataforma de sondagem, as medições da arfagem são degradadas devido á aceleração centrípeta. Tipicamente, é necessário aguardar, após terminada a guinada, um intervalo de tempo dez vezes o período de corte para se retomar a exatidão das medições da arfagem.

4. TRANSDUTORES

Os transdutores⁴² são um dos componentes dos sondadores acústicos. As características do transdutor determinam algumas das características de funcionamento dum sondador. Por esta razão é particularmente importante estudar os seus princípios de operação, e aspectos relacionados, tais como: largura do feixe, directividade, guiamento do feixe, instalação e cobertura.

Os transdutores são os dispositivos utilizados na transmissão e recepção de impulsos acústicos. O seu princípio de operação consiste na conversão de energia elétrica em energia acústica, i.e., os transdutores convertem impulsos elétricos de um gerador de sinais em vibrações longitudinais que se propagam na coluna de água como onda de pressão [Seippel, 1983]. Reciprocamente, durante a recepção, as ondas de pressão são convertidas em impulsos acústicos.

Esta secção apresenta a classificação dos transdutores relativamente ao: princípio de operação, feixe, largura do feixe e instalação. No final desta secção é apresentada uma avaliação da insonificação obtida.

4.1. Classificação Relativamente ao Princípio de Operação

Os transdutores, de acordo com o princípio de operação, são classificados em magnetostritivos, piezoelectricos e electrostritivos.

4.1.1. Magnetostritivos

Estes transdutores apresentam um enrolamento de níquel sobre um eixo de ferro. Um impulso de corrente continua através do eixo gera um campo magnético no enrolamento que produz a sua contração e, conseqüentemente a redução seu diâmetro. Quando a corrente elétrica ao longo do eixo cessa o enrolamento regressa ao tamanho inicial.

A aplicação de um impulso de corrente alterna conduz à contração e expansão do enrolamento de níquel de acordo com as características do sinal aplicado.

A amplitude da vibração induzida será máxima se a frequência for igual ou relacionada harmonicamente com a frequência natural de vibração ou frequência de ressonância⁴³ do material do transdutor.

Este transdutor é, no entanto, menos eficiente do que os transdutores que operam pelo efeito piezoelectricos.

4.1.2. Piezoeléctrico

Estes transdutores são constituídos por duas placas com uma camada de cristais de quartzo no meio. A aplicação de um potencial elétrico entre as placas produz uma variação da espessura da camada de quartzo, como função da polarização da corrente aplicada (efeito piezoeléctrico). A diferença de potencial produz a vibração do quartzo e conseqüentemente a vibração de toda a

⁴² Por definição, o transdutor é um equipamento utilizado para transmitir impulsos acústicos e para os receber. Em particular, se o equipamento for utilizado unicamente para a transmissão é chamado de projector e se for unicamente utilizado como para a recepção, operando de modo passivo, é chamado de hidrofone.

⁴³ Este fenómeno corresponde ao forçamento e prolongamento de qualquer movimento de onda, tais como as ondas acústicas. A frequência de ressonância corresponde à frequência em que o transdutor vibra de forma mais eficaz.

unidade. Reciprocamente, a compressão mecânica da camada de quartzo produz uma diferença de potencial entre as duas faces opostas da camada de quartzo.

A amplitude da vibração será máxima se a frequência do potencial elétrico corresponder à frequência natural do quartzo.

4.1.3. Electrostritivo

Estes transdutores baseiam-se no mesmo princípio dos transdutores piezoelétricos. No entanto, os materiais utilizados (usualmente cerâmicas policristalinas ou certos polímeros sintéticos) não apresentam naturalmente propriedades piezoelétricas. Assim, durante o processo de fabrico estes materiais necessitam de ser polarizados.

Presentemente, os transdutores utilizados são quase exclusivamente electrostritivos. Estes transdutores são mais leves, reversíveis e podem ser organizados em agregados (*arrays*). Estes agregados compostos de um conjunto de elementos mais pequenos, quando organizados convenientemente, permitem, de acordo com o Teorema do Produto (vd. §4.2), características similares a um transdutor de peça única.

4.2. Largura do Feixe

A pressão gerada por um transdutor, expressa em coordenadas polares, é dada pelo produto:

$$P(r, \theta) = P_{ax}(r) \cdot h(\theta), \quad (3.21)$$

em que θ é o ângulo referido à normal ao transdutor que é a direção de máxima intensidade acústica, r é a distância entre um ponto e o transdutor, $P_{ax}(r)$ é a amplitude da pressão no eixo acústico e $h(\theta)$ é o fator direcional que corresponde á intensidade relativa do sinal. O fator direcional é normalizado para $\theta = 0$, i.e., $h(0) = 1$, logo $P(r, 0) = P_{ax}(r)$.

A directividade do transdutor é usualmente representada por um diagrama de radiação $B(\theta) = h^2(\theta)$, ou numa escala logarítmica $b(\theta) = 10 \cdot \log_{10}(B(\theta)) = 20 \cdot \log_{10}(h(\theta))$.

O transdutor pode ser caracterizado pela sua largura de feixe b_w ; definido como o ângulo do feixe a um nível de -3 dB, i.e., a largura de feixe correspondente a metade da potência ao longo do eixo acústico $b_w = 2\theta_{-3dB}$, (ver Figura 3.9).

A medição da profundidade é efetuada para qualquer direção dentro do cone definido pela largura do feixe.

A largura do feixe está relacionada com as dimensões do transdutor e com a frequência dos impulsos acústicos. Por exemplo, a largura do feixe para um transdutor com a forma de pistão circular, com diâmetro D , é dada aproximadamente por:

$$b_w = 60 \lambda / D \text{ (graus)}, \quad (3.22)$$

e para um transdutor de face retangular, de comprimento L e largura W , a largura do feixe nas duas dimensões são dadas respectivamente por:

$$b_w = 50 \lambda / L \text{ e } b_w = 50 \lambda / W \text{ (graus)}, \quad (3.23)$$

Para um agregado linear de N elementos transdutores omnidireccionais separados de uma distância d , a soma dos sinais dos elementos transdutores produz um diagrama de radiação direcional (Figuras 3.10 e 3.11).

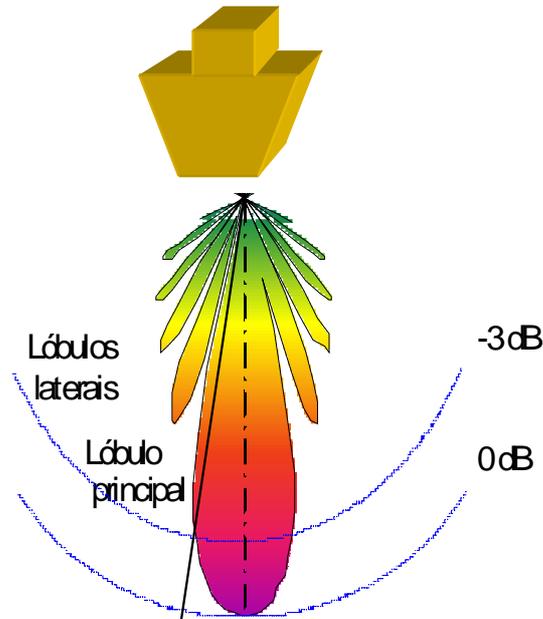


Figura 3.9 "Largura do feixe definida a um nível de -3dB"

A direção do eixo acústico é normal à face do agregado de transdutores. A largura do feixe, a um nível de -3 dB, é dada aproximadamente por:

$$b_w = 50 \lambda / ((N-1)d) \text{ (graus)}, \quad (3.24)$$

em que λ é o comprimento da onda acústica.

O fator direcional dum agregado de elementos transdutores é dado por [Kinsler et al., 1982]:

$$h_{\text{agregado}}(\theta) = \left| \frac{\sin(N\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta)}{N \cdot \sin(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta)} \right| \quad (3.25)$$

O Teorema do produto – é uma lei da acústica que define o fator direcional de um agregado de N elementos transdutores como o produto do fator direcional de um elemento pelo fator direcional do agregado, i.e.,

$$h(\theta) = h_e(\theta) \cdot h_{\text{agregado}}(\theta) \quad (3.26)$$

e a amplitude da pressão é dada por:

$$P(r, \theta, \phi) = P_{ax}(r) \cdot h_e(\theta, \phi) \cdot h_{\text{agregado}}(\theta, \phi) \quad (3.27)$$

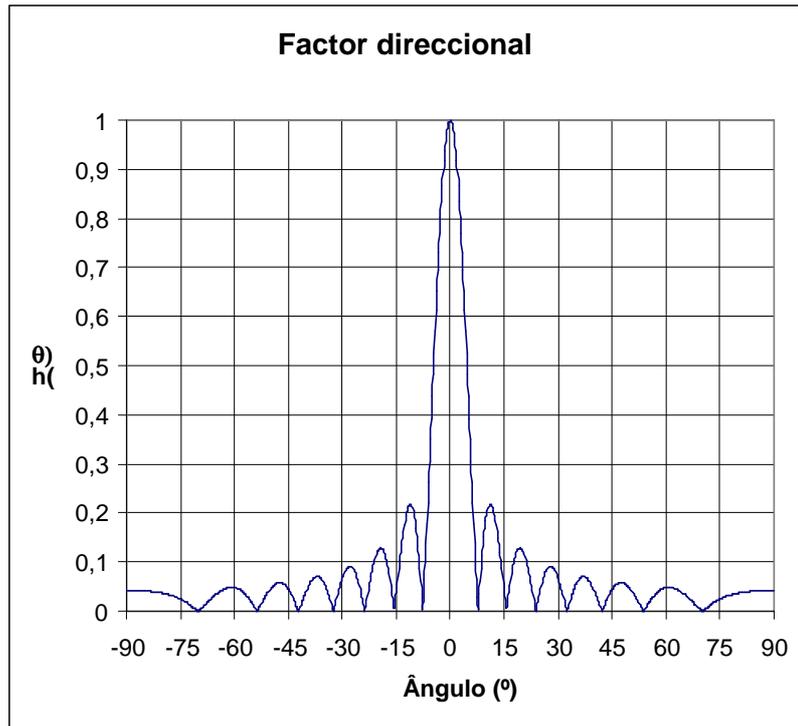


Figura 3.10 "Fator direccional"

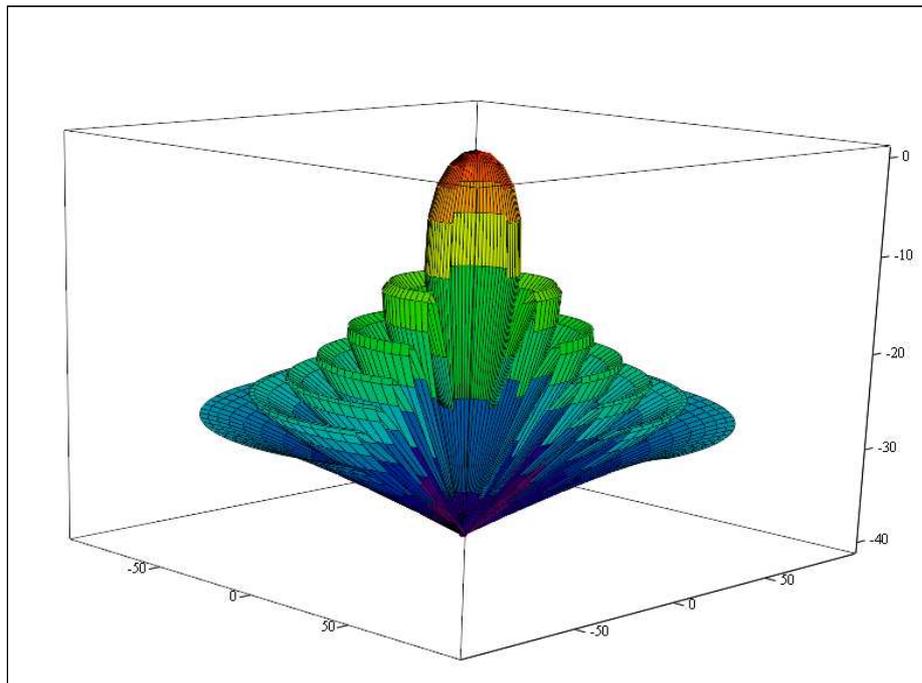


Figura 3.11 "Diagrama de radiação de um feixe formado perpendicularmente à face do transdutor"

Para um elemento linear, o fator direccional é dado por:

$$h_{\text{linear}}(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\pi \frac{L}{\lambda} \sin \theta\right)}{\pi \frac{L}{\lambda} \sin \theta} \right| \quad (3.28)$$

O fator direcional de um agregado de elementos transdutores é apenas válido para o campo longínquo, i.e., em áreas onde as ondas geradas por um elemento central e por um elemento exterior do agregado apresentam uma diferença de fase inferior a 180 graus.

$$k \sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} - kR \leq \pi \quad (3.29)$$

em que k é o número de onda, i.e., $k = 2\pi/\lambda$.

Por exemplo, para uma frequência de 100 kHz e um agregado de transdutores de comprimento $L = 0.5$ m, o campo distante corresponde a distâncias superiores a 4 metros. Este é usualmente o limite para a medição mínima da profundidade.

No campo próximo, os processos de interferência conduzem a uma representação mais complexa da pressão acústica.

O eixo acústico de um transdutor ou de um agregado de elementos transdutores é normal à face do transdutor. Para formar feixes oblíquos à face do agregado de elementos transdutores, é necessário efetuar o guiamento do feixe. Este processo é conseguido através de técnicas de guiamento de feixes.

Um agregado com N elementos transdutores omnidireccionais pode guiar um feixe através da introdução de atrasos em tempo ou fase em cada elemento. O correspondente fator direcional é dado por (Figura 3.12):

$$h_{\text{array}}(\theta) = \left| \frac{\sin \left[N\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_{\text{ax}}) \right]}{N \cdot \sin \left[\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_{\text{ax}}) \right]} \right|, \quad (3.30)$$

O resultado desta equação é um feixe guiado na direção θ_{ax} (Figura 3.13)

O guiamento do feixe pode ser conseguido através da introdução de diferenças de tempo ou fase nos elementos do agregado (equação 3.31).

O guiamento dos feixes tem dois objetivos: Estabilização do feixe e formação do feixe durante a fase de recepção.

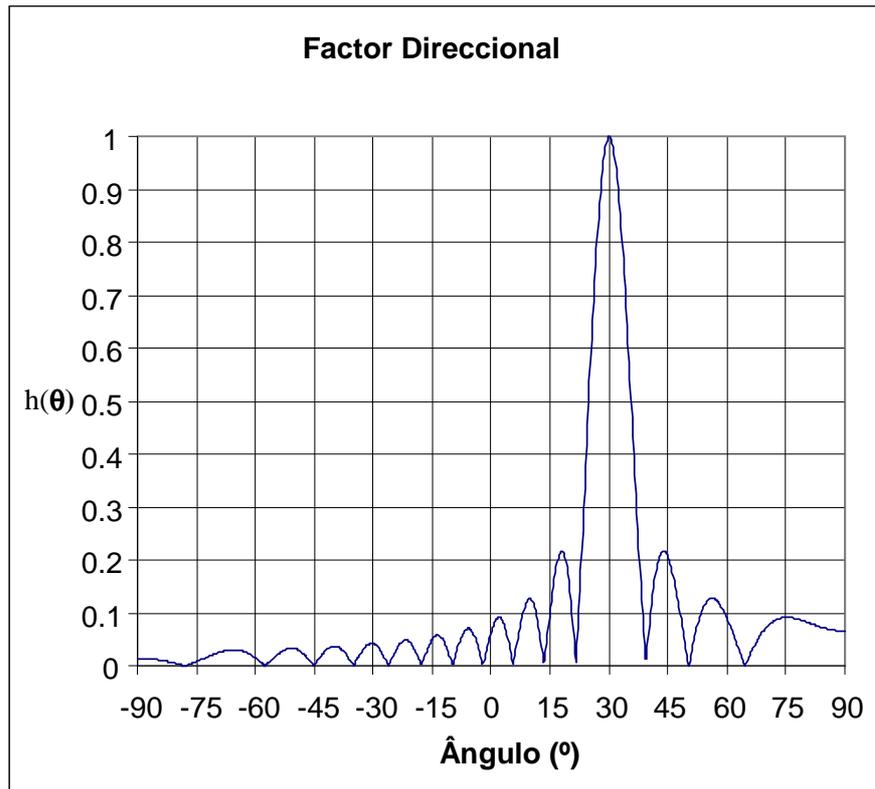


Figura 3.12 " Fator direccional para um feixe guiado 30 graus"

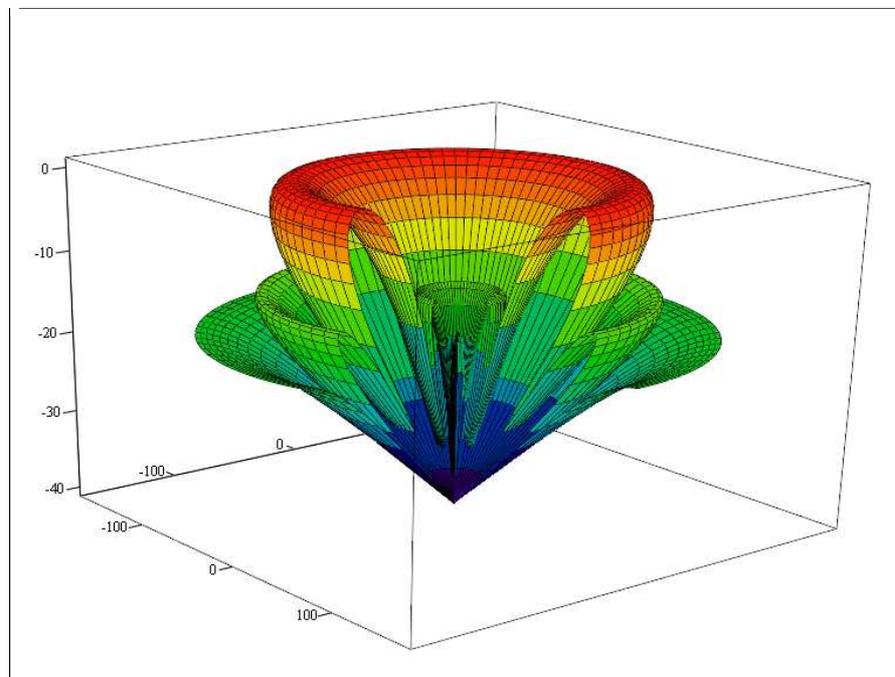


Figura 3.13 "Diagrama de radiação para um feixe guiado 30°"

Para a estabilização do feixe é necessário medir o ângulo referido á normal do agregado, sendo o atraso em tempo dos elementos do agregado dado por,

Figura 3.15 "Área insonificada linear (a) e hiperbólica (b) "

Os lóbulos secundários apresentam efeitos indesejáveis, tais como a detecção de ecos correspondentes às direções desses lóbulos. Este é o caso geral dos sondadores multifeixe para ângulos de feixe elevados onde a detecção é efetuada para o nadir ou quando existem áreas rochosas de maior refletividade (Figura 3.16). Este efeito conduz a isóbatas ondulantes que muitas vezes apresentam a forma de "ómega". A redução dos lóbulos é vital para a operação com sucesso dos sondadores multifeixe. Esta redução é obtida por aplicação de ganho variável (*shading functions*) aos sinais detectados pelos vários elementos do agregado de transdutores durante a recepção.

Considerando todos os transdutores com o mesmo ganho, os lóbulos secundários apresentarão um nível de aproximadamente -13 dB. A técnica utilizada para a redução dos lóbulos secundários consiste na sobreposição de uma janela que amplifica os sinais dos diferentes elementos com diferentes ganhos. Estas janelas são usualmente simétricas em relação ao eixo do agregado.

A janela *Dolph-Chebyshev* é utilizada com grande frequência; esta janela apresenta a vantagem de otimizar o nível dos lóbulos secundários para uma determinada largura de feixe. Esta janela produz a mesma amplitude para todos os lóbulos secundários.

A desvantagem da aplicação destas janelas é a redução da directividade.

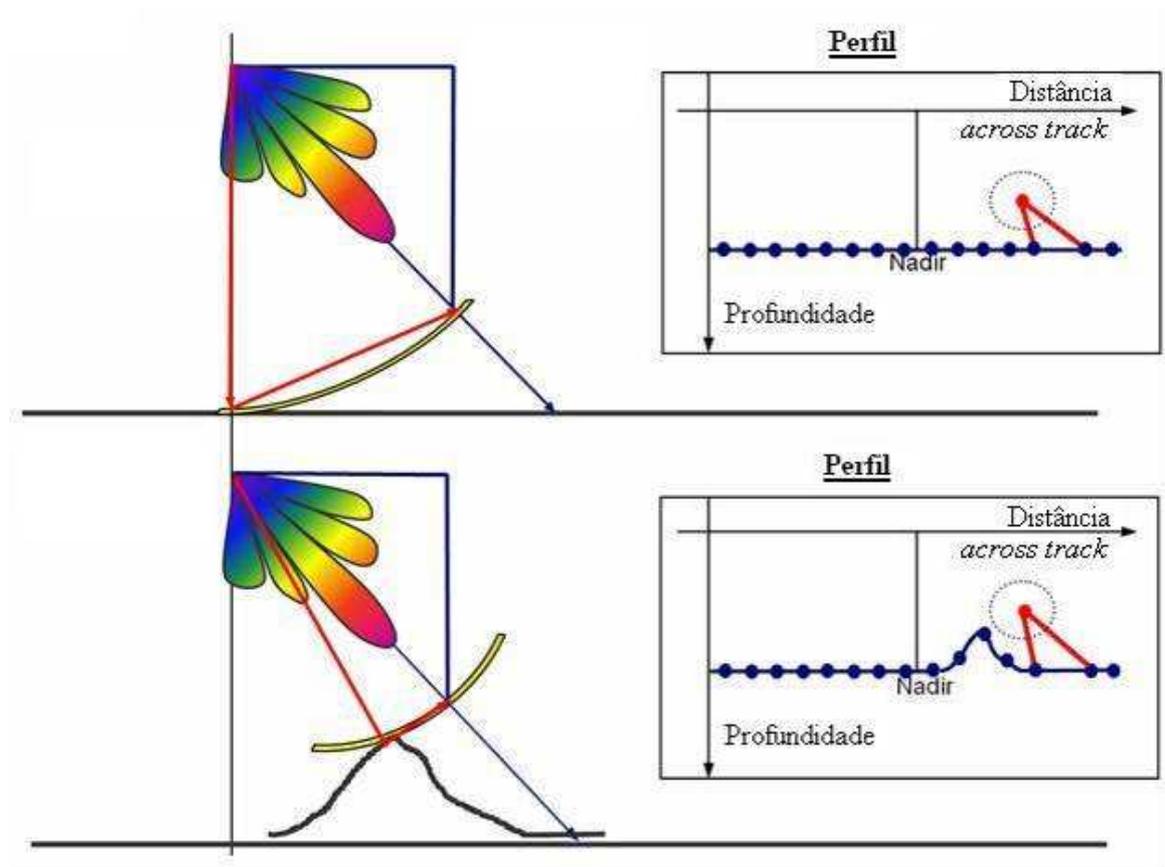


Figura 3.16 "Medição da profundidade através dos lóbulos secundários com conseqüente erro na medição e na localização da profundidade "

4.3. Classificação Relativamente ao Feixe

Os sondadores acústicos podem ser divididos em feixe simples e multifeixe. Os sondadores de feixe simples podem apresentar um transdutor único ou um agregado de elementos transdutores.

Os sondadores multifeixe apresentam agregados de elementos transdutores. Como referido anteriormente isto é devido á necessidade de formação de feixes em várias direções e, algumas vezes para estabilização dos feixes para compensar a atitude da plataforma.

4.3.1. Feixe simples

O feixe simples requer apenas um transdutor para as funções de transmissão e recepção, mas um agregado de elementos transdutores pode ser utilizado quando requerida a estabilização do feixe. O conhecimento dos ângulos de *roll* e de *pitch* é necessário para a estabilização do feixe.

A largura do feixe é uma função das dimensões do transdutor e do comprimento de onda acústica. O feixe será mais estreito quanto maior a frequência e quanto maior a dimensão do transdutor. Assim, para se obter um feixe estreito em baixas frequências é necessário um transdutor com grandes dimensões.

O transdutor selecionado para um sondador de feixe simples deve ter um feixe estreito quando é necessário elevada directividade ou um feixe largo quando a directividade não for a preocupação principal, mas sim a detecção de profundidades mínimas ou a detecção de obstáculos no fundo do mar.

Os feixes mais largos apresentam capacidade para detectar ecos num maior cone (ou ângulo sólido), o que se reveste de utilidade para a detecção de perigos para a navegação que poderão requer mais investigação futura. Estes feixes não são usualmente estabilizados. A atitude do transdutor não influencia as medições em condições médias do estado do mar.

Por outro lado, feixes estreitos, tipicamente 2° a 5°, são normalmente requeridos para mapeamento de elevada resolução (Figura 3.17). Estes feixes têm de ser estabilizados para medição correta da profundidade na vertical do transdutor.

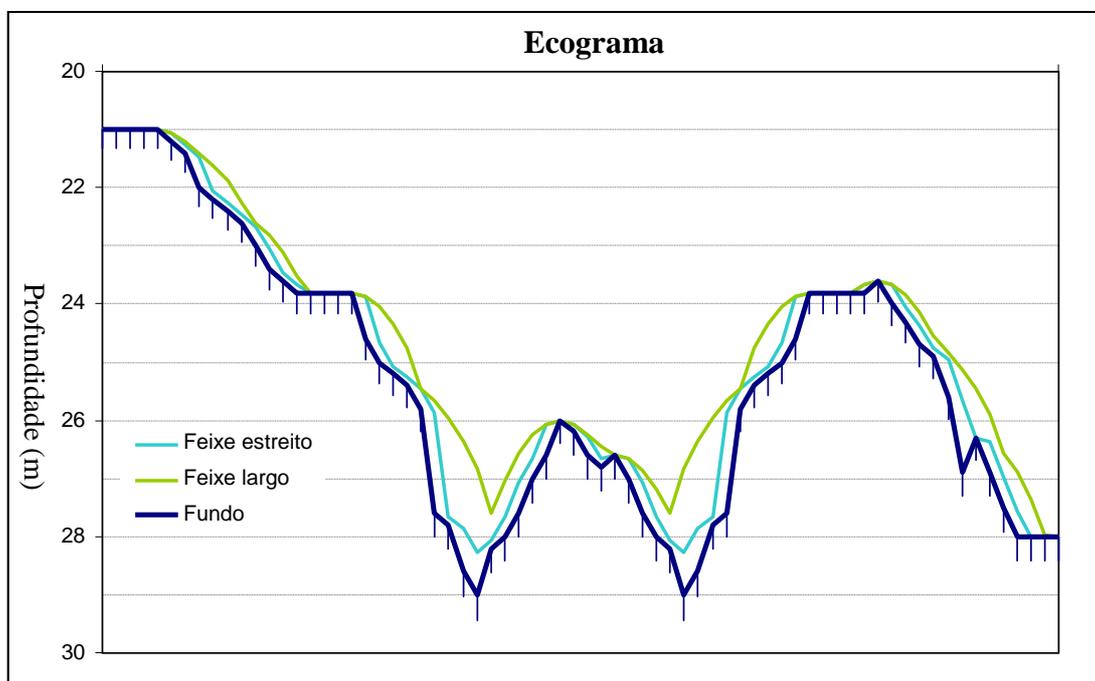


Figura 3.17 "Ilustração da medição da profundidade com um sondador de feixe estreito e de feixe largo."

4.3.2. Multifeixe

Os sondadores multifeixe têm usualmente dois transdutores separados para transmissão e para recepção, i.e., um projetor e um hidrofone. O primeiro é orientado longitudinalmente e o segundo é orientado transversalmente à proa da plataforma de sondagem. O mais usual é a transmissão de um único feixe em forma de leque, estreito na direção proa-popa e largo na direção bombordo-estibordo.

O hidrofone forma vários feixes em direções pré-definidas, estreito bombordo-estibordo e largo proa-popa, garantindo, independentemente da atitude da plataforma de sondagem, a intersecção entre o feixe transmitido e recebido.

4.4. Classificação Relativamente à Instalação

Existem vários tipos de instalação dos transdutores a bordo da plataforma de sondagem. A opção sobre o tipo de instalação depende da portabilidade do sistema, da necessidade de o manter longe das fontes de ruído do navio, incluindo o fluxo de água turbulento abaixo da quilha e a necessidade de o arriar para o aproximar do fundo.

O transdutor pode ser instalado no casco, rebocado ou portátil. Cada uma destas instalações é apresentada a seguir.

4.4.1. Montagem de casco

Esta instalação é usual para os sondadores de feixe simples e para os sondadores multifeixe em navios de maior porte, especialmente para levantamentos em grandes fundos.

A instalação no casco pode ser:

4.4.1.1. Embutido no casco (*Flush mounted*)

O transdutor é montado com a face no plano do casco. Esta opção é utilizada para os transdutores feixe simples e multifeixe. Apresenta como vantagem não necessitar de uma estrutura para a instalação. A desvantagem é a maior proximidade com o ruído do navio.

4.4.1.2. Bolha (*Blister*)

O transdutor é montado numa estrutura em forma de casco. Esta opção é utilizada para os transdutores feixe simples e multifeixe. Apresenta como vantagem a redução do efeito do fluxo de água na face do transdutor. A desvantagem é a necessidade de uma estrutura dedicada para a instalação.

4.4.1.3. Gôndola

O transdutor é instalado numa estrutura especial com a forma de gôndola (Figura 3.18). Esta opção é utilizada nos sondadores multifeixe, especialmente para operação em águas profundas. Apresenta como vantagem a redução do ruído devido ao navio e ao fluxo de água na face do transdutor que passa entre o casco e a gôndola. A desvantagem é a necessidade de uma estrutura para a instalação dos transdutores e o aumento do calado da plataforma em cerca de um metro.

4.4.2. Rebocado

A instalação do transdutor é efetuada num peixe rebocado, esta é a instalação utilizada nos transdutores do sonar lateral, apresenta uma redução do ruído e a possibilidade de arriá-lo mais próximo do fundo.

4.4.3. Portátil

Esta instalação é usualmente utilizada para instalações de feixe simples ou multifeixe em embarcações, especificamente para levantamentos em fundos baixos. Esta instalação pode ser

montada na borda ou à proa da embarcação (Figura 3.19). A estrutura de suporte deve ser bem sólida e resistente à torção.



Figura 3.18 "Instalação em gôndola "



Figura 3.19 "Instalação à proa"

4.5. Cobertura

A cobertura do fundo, i.e., a área insonificada com sondador de feixe simples, é a área delimitada pelo feixe, onde a célula insonificada é dada por (Figura 3.20):

$$a = 2 \cdot z \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (3.34)$$

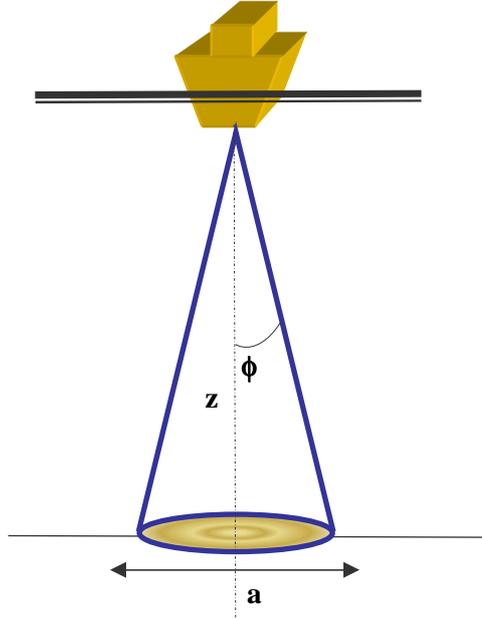


Figura 3.20 "Cobertura do sondador de feixe simples"

Nos sondadores multifeixe a área insonificada corresponde à intersecção entre o feixe transmitido e o feixe formado na recepção. A área insonificada depende do ângulo do feixe, da sua largura, da profundidade e do declive médio do fundo. A área insonificada por cada feixe pode ser aproximada por uma elipse. Considerando um fundo plano e horizontal, o comprimento da elipse na direção transversal à linha de proa é dado aproximadamente por a_y ,

$$a_y = \frac{2z}{\cos^2(\beta)} \tan\left(\frac{\phi_R}{2}\right) \quad (3.35)$$

em que z é a profundidade média, β é o ângulo do feixe e ϕ_R é a largura do feixe formado na recepção na direção transversal à proa do navio. Na presença de um declive, definido por um ângulo ζ , o comprimento da área insonificada é dada aproximadamente por,

$$a_y = \frac{2z}{\cos(\beta)\cos(\beta - \zeta)} \tan\left(\frac{\phi_R}{2}\right) \quad (3.36)$$

Para um fundo plano, a largura da área insonificada, na direção proa-popa, é dado aproximadamente por a_x ,

$$a_x = \frac{2z}{\cos(\beta)} \tan\left(\frac{\phi_T}{2}\right) \quad (3.37)$$

em que ϕ_T é a largura do feixe transmitido.

A cobertura do fundo é uma função da dimensão das áreas insonificadas, do espaçamento transversal dos feixes, da taxa de transmissão dos impulsos, da velocidade da plataforma de sondagem, da variação da proa (*yaw*), do *pitch*, e do *roll*. Para se obter a insonificação completa do fundo, as áreas insonificadas de impulsos consecutivos devem ter alguma sobreposição, de tal forma que qualquer ponto no fundo seja insonificado, no mínimo, por um impulso acústico.

Num fundo plano, o comprimento da faixa insonificada é dado por:

$$S_w = 2z \cdot \tan\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (3.38)$$

em que $\Delta\theta$ é a abertura angular efetiva do feixe transmitido no sentido transversal à proa.

5. SISTEMAS ACÚSTICOS

Esta secção apresenta os sistemas acústicos utilizados em levantamentos hidrográficos. Estes sistemas são divididos de acordo com a sua capacidade cobertura do fundo submarino, ou seja, sondadores de feixe simples e sondadores de varrimento (sondadores multifeixe ou sonares interferométricos⁴⁴).

5.1. Sondadores de feixe simples

Os sondadores acústicos são dispositivos utilizados para a medição da profundidade. A medição é efetuada por observação do intervalo de tempo entre a emissão de um impulso acústico e a recepção do seu eco, após reflexão no fundo submarino.

Tradicionalmente, a principal finalidade do sondador acústico é produzir um registo consistente e de alta resolução do perfil de profundidades do relevo submarino. O ecograma, depois de devidamente analisado e interpretado, é amostrado de forma a reproduzir o perfil do fundo.

Durante a última década, a tecnologia aplicada nos sondadores de feixe simples tem melhorado progressivamente com digitalizadores automáticos, gravadores sem partes móveis e anotação das posições sobre o registo do fundo. Recentemente, a utilização de computadores e processadores de sinal mais sofisticados têm permitido o processamento e visualização em tempo real dos registos do fundo, em vez do registo em papel.

5.1.1. Princípios de funcionamento

Um sondador acústico funciona através da conversão de energia elétrica, do gerador de impulsos, em energia acústica. Como os transdutores não transmitem em todas as direções, a energia acústica é projetada para a água sob a forma de um feixe orientado verticalmente.

O impulso acústico viaja através da coluna de água até embater no fundo. A interação com o fundo resulta em reflexão, transmissão e espalhamento (*scattering*).

Parte da energia refletida, o eco, retorna ao transdutor e é detectada por este. O nível de intensidade do eco diminui rapidamente com o tempo, por essa razão o nível do eco é ajustado automaticamente através do controlo automático de ganho (AGC) ajustado na fábrica e do Ganho

⁴⁴ Sistema utilizado na determinação da distância a um objecto imerso através da medição do intervalo de tempo entre a transmissão de um impulso acústico e a recepção do eco. O termo sonar deriva das palavras *S*ound *N*avigation and *R*anging.

Variável no Tempo (TVG) para compensar a diminuição do nível do eco em função do tempo. Após a amplificação, o sinal elétrico gerado na recepção é passado para um detector e comparado com o limiar definido para filtrar o ruído. O sinal resultante é, então, visualizado e/ou gravado.

A observável resultante é o intervalo de tempo entre o impulso transmitido e o eco recebido, t , sendo a profundidade medida dada por:

$$z_m = \frac{1}{2} \cdot t \cdot \bar{c} \quad (3.39)$$

onde \bar{c} é a velocidade média de som na coluna de água.

5.1.1.1. Parâmetros dos sondadores acústicos

Necessitam de ser corretamente definidos a fim de se obter uma alta resolução e precisão no registo do fundo. Os parâmetros mais importantes são:

- a) **Potência** - A gama de profundidades de funcionamento de um sondador acústico depende da duração do impulso, da frequência e potência transmitida. Para otimizar o uso do sondador, a potência transmitida deve ser mantida em valores mínimos, mas que garantam a detecção adequada. O aumento da potência resultará em níveis mais altos do eco, mas também em níveis mais elevados de reverberação, conduzindo a um mau registo. A potência máxima de transmissão é condicionada pelo fenómeno de cavitação⁴⁵ e pela resistência máxima à vibração do material transdutor.
- b) **Ganho** - O ganho implica amplificação de sinal. A amplificação do sinal também amplifica o ruído e, conseqüentemente, o registo dos dados pode ser confuso. É recomendável que o ganho seja ajustado de acordo com o tipo de fundo e com a potência de transmissão.
- c) **Intensidade do registo** – Este parâmetro é utilizado nos sondadores de registo analógico e serve para ajustar a intensidade de impressão.
- d) **Comprimento do impulso** – o comprimento do impulso é habitualmente selecionado automaticamente em função da profundidade. O comprimento do impulso é responsável pela resolução vertical do sondador. Para aumentar a resolução vertical deve-se diminuir o comprimento do impulso. Porém, em zonas com fraca refletividade ou com declives acentuados, poderá ser necessário aumentar o comprimento do impulso.

Em fundos baixos, onde a resolução vertical é mais importante, devem ser utilizados impulsos curtos. Isso irá reduzir a probabilidade de ecos falsos devido a reverberação forte.

- e) **Escala** - Corresponde à escala da profundidade da janela de registo. A largura do papel de registo é fixo; portanto, numa escala pequena ter-se-á uma baixa resolução vertical.
- f) **Fase** - A fase é um parâmetro dos sondadores analógicos que permite superar as limitações do registo numa largura fixa de papel. A escala de fase consiste na gravação apenas de uma janela de profundidade que pode ser alterada, manual ou automaticamente, para manter o registo com uma resolução vertical satisfatória independentemente da profundidade (Figura 3.21).

⁴⁵ Corresponde à produção de bolhas de ar na água. Este fenómeno ocorre quando a pressão acústica se aproxima da pressão hidrostática.

- g) **Calado** – Este parâmetro corresponde à imersão do transdutor. O calado deve ser determinado antes de se iniciar a sondagem e verificado regularmente, de forma a se registar a profundidade referida ao nível instantâneo da água.
- h) **Velocidade do papel** – a velocidade do papel é particularmente importante quando o registo é exclusivamente analógico e deve ser selecionada de forma a garantir uma boa resolução horizontal das profundidades medidas.
- i) **Velocidade de propagação do som na água** – Este é o valor nominal da velocidade do som correspondente à velocidade média de propagação do som na área de sondagem. Nos levantamentos com requisitos de exatidão mais exigentes, a velocidade de propagação do som pode ser regulada para a velocidade do som à face do transdutor ou para 1500 m/s, sendo a profundidade posteriormente corrigida no processamento mediante a aplicação do perfil real da velocidade de propagação do som na coluna de água.

Nos sondadores clássicos de registo analógico, este parâmetro não corresponde à velocidade de propagação do som na água, mas ao valor de calibração dos componentes mecânicos e elétricos do sondador para medir a profundidade correta da água.

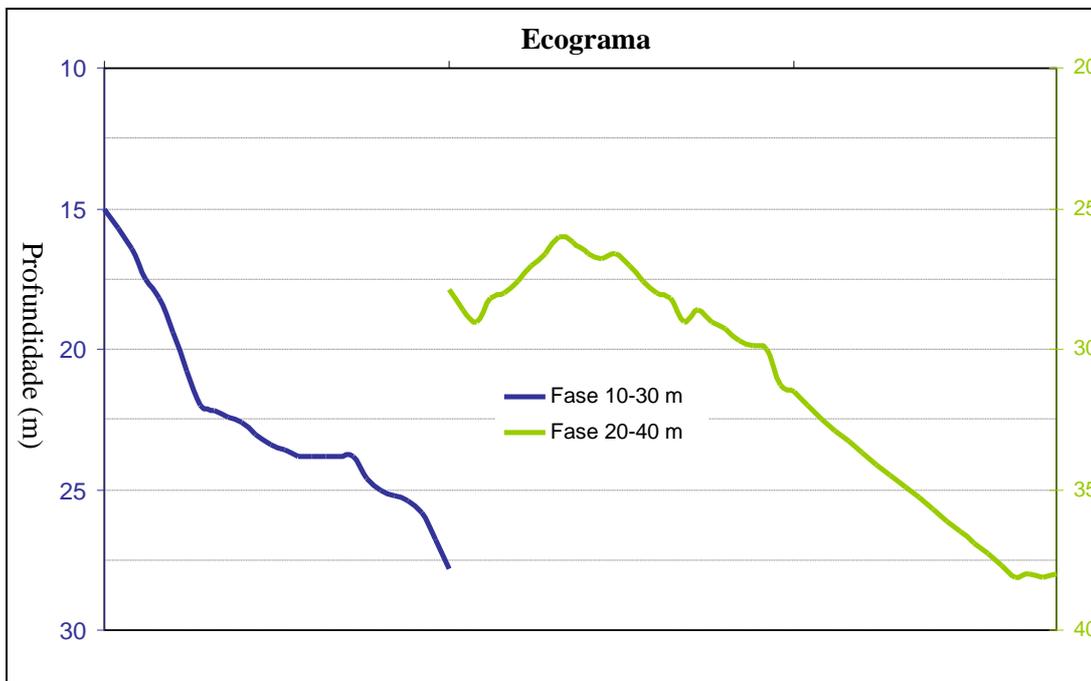


Figura 3.21 "Fases de registo"

Os princípios gerais de funcionamento dos sondadores de feixe simples foram referidos anteriormente. No entanto, é possível diferenciar os sondadores acústicos em dois tipos: digitais e analógicos.

No sondador analógico, cujo esquema é apresentado na Figura 3.22, o ciclo começa com a geração de um impulso elétrico e com a transmissão de energia acústica para a água. Após a recepção e conversão do eco em energia elétrica, o sinal de baixa tensão é pré-amplificado e transmitido a um amplificador de gravação, a fim de ser gravado o ecograma num registo gráfico das profundidades medidas com uma resolução horizontal e vertical adequada. Após concluída a fase gravação, é possível dar início a um novo ciclo.

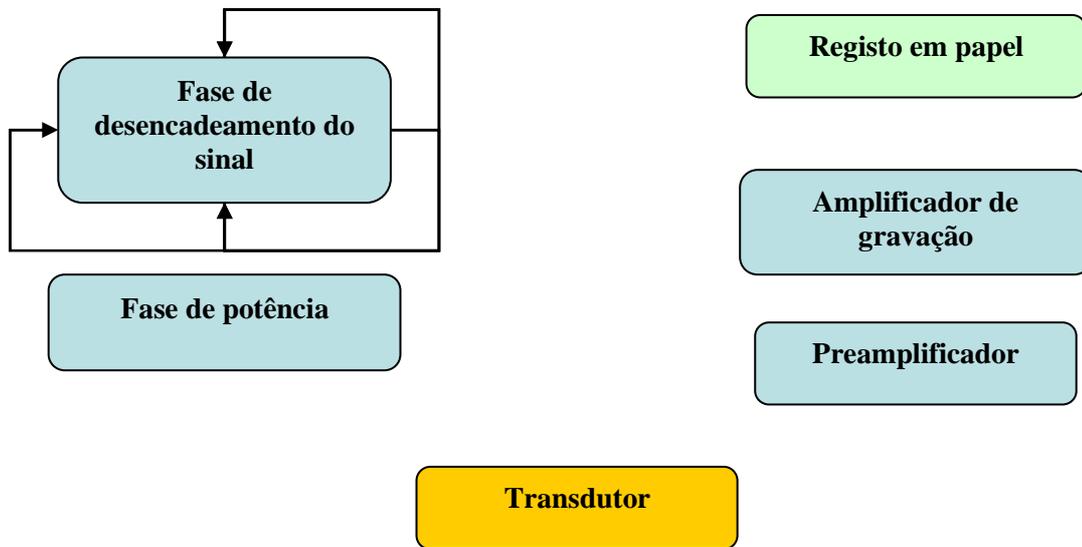


Figura 3.22 "Sondador analógico – diagrama de blocos"

Os sondadores hidrográficos para águas pouco profundas são habitualmente dotados com dois canais (de baixa e alta frequência). A gravação simultânea de duas frequências permite a separação do retorno do fundo marinho correspondente à superfície dos sedimentos não compactados e dos sedimentos compactados ou da rocha devido às diferentes impedâncias acústicas.

O sondador digital, cujo esquema é apresentado na Figura 3.23, funciona de maneira semelhante ao sondador analógico na transmissão do impulso. No entanto, durante a recepção do eco, o sinal recebido é amplificado em função do tempo (ganho variável no tempo) e passa por um detector de envolvente do sinal onde é finalmente convertido no formato digital, que é o sinal que é processado para determinar a profundidade. Isto permite que a informação seja armazenada e visualizada em diversos formatos.

5.1.1.2. Exatidão

A exatidão da medição da profundidade é uma função de vários fatores, do sondador e do meio. Geralmente, é necessário calcular o balanço de erros com base nesses fatores (ver 5.1.4).

5.1.1.3. Resolução

A resolução é a capacidade de diferenciar dois ou mais objetos próximos; é geralmente expressa como a distância mínima diferenciável entre dois. Na medição de profundidade, uma das grandes preocupações é a resolução vertical do sondador, que é dependente de:

- a) Comprimento do impulso – quanto maior o comprimento do impulso menor a resolução (ver 2.4.3). Dois objetos dentro de um feixe estreito, se estiverem separados por menos de metade de um comprimento de impulso serão registados como um eco só. E serão resolvidos e registados como dois ecos se estiverem separados por mais do que um comprimento de impulso;
- b) Sensibilidade e resolução do suporte utilizado na gravação;

c) Largura do feixe transmitido.

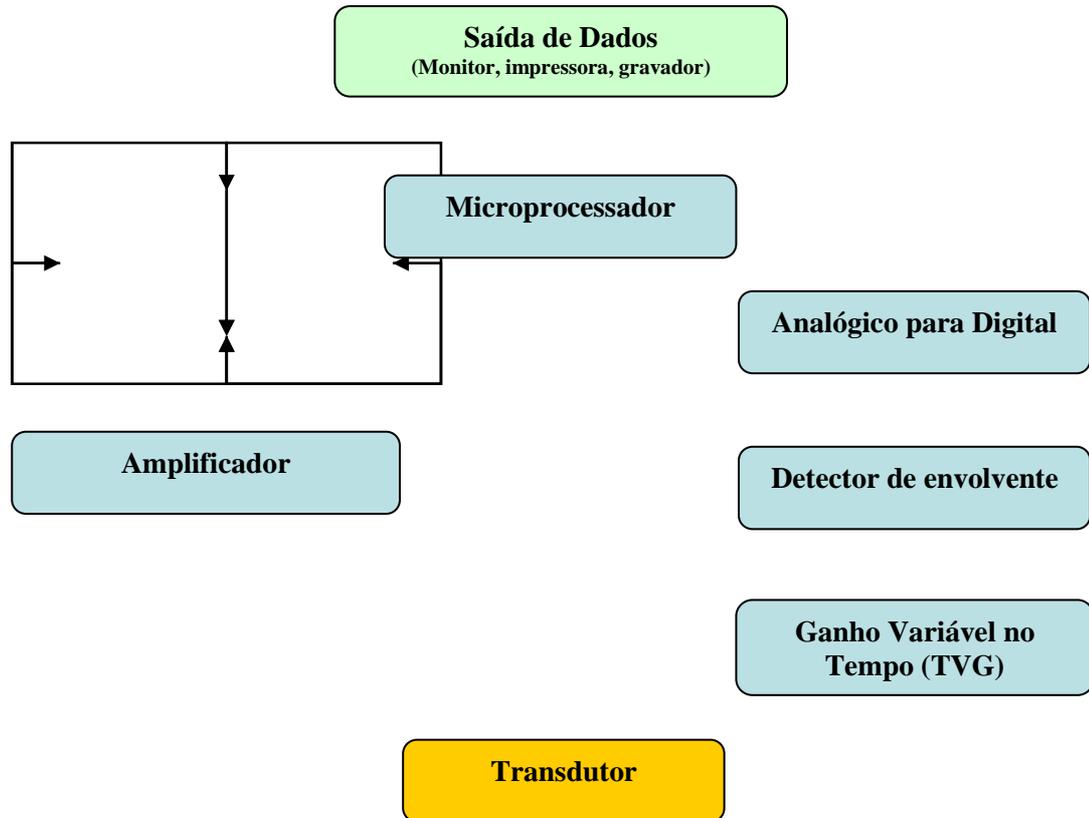


Figura 3.23 "Sondador digital – diagrama de blocos"

5.1.1.4. Frequência acústica

A frequência de um sondador é selecionada com base na utilização prevista do equipamento, ou seja, a profundidade em que deverá ser utilizado. Em alguns casos, é desejável a utilização do mesmo dispositivo em várias profundidades, para o efeito o sondador pode ter mais de um transdutor, de forma a melhorar a aquisição e a qualidade dos dados.

As frequências são frequentemente atribuídas a canais. O sondador com dois canais é utilizado, principalmente, em fundos baixos e águas costeiras. Para águas profundas, é costume usar unicamente uma baixa frequência.

5.1.2. Instalação e calibração

O transdutor pode ser montado no casco, na borda ou à proa. As precauções a ter na instalação são que o transdutor deve ser colocado o mais longe possível das fontes de ruído próprias da plataforma e mergulhado o mais possível para evitar o ruído proveniente da agitação marítima e ficar sempre submerso mesmo em condições de mar adversas. É também muito importante que o transdutor seja bem fixo na vertical.

É também desejável para o compensador de arfagem que a antena de posicionamento seja colocada na vertical transdutor.

A calibração do sondador é uma tarefa rotineira que consiste no ajustamento do equipamento para a medição correta da profundidade. A calibração pode ser realizada através de uma chapa refletora

(*bar-check*) ou com um transdutor especial. O objetivo é selecionar o valor adequado do parâmetro da velocidade de propagação do som de modo a ajustar as medições efetuadas pelos componentes mecânicos e elétricos do sondador. Também é possível corrigir as profundidades medidas através da aplicação do perfil de velocidade de propagação do som na coluna de água em pós-processamento.

Em fundos baixos, a calibração do sondador para a velocidade média de propagação do som na coluna de água pode ser efetuado das seguintes maneiras:

- a) Bar-check - consiste em arriar uma chapa refletora, a várias profundidades, por baixo do transdutor (por exemplo, a cada dois metros), registando o erro de medição da profundidade, a corrigir durante o processamento dos dados, ou forçando o sondador a registar a profundidade correta atuando no parâmetro de velocidade de propagação do som na água (Figura 3.24). Neste caso, o valor adotado para a calibração deve corresponder à média das observações. Este método deve ser utilizado até profundidades de 20-30 m.
- b) Transdutor de calibração – destina-se à calibração dos sondadores acústicos, tendo por base o conhecimento do comprimento exato do percurso efetuado pelos impulsos acústicos no equipamento. O processo de calibração consiste em forçar o registo correto do percurso dos impulsos acústicos, em ambos os sentidos, no interior do equipamento por ajuste do parâmetro da velocidade de propagação do som na água. O transdutor de calibração deve ser arriado a várias profundidades, em cada profundidade é efetuado o ajustamento para o registo correto do duplo trajeto dos impulsos acústicos no interior do equipamento. Devido ao tipo de medição realizada, cada medição é apenas válida para a profundidade correspondente. O valor adotado para a calibração deve corresponder à média de todas as observações. Este método deve ser utilizado até profundidades de 20-30 m.
- c) Um método combinado pode também ser utilizado com um transdutor de calibração e um perfilador da velocidade de propagação do som. Este método é geralmente usado para profundidades superiores às consideradas nos métodos anteriores. Com um perfil de velocidade de propagação do som e com o ajustamento do sondador para a medição correta do duplo trajeto no transdutor de calibração, pode ser seguido um procedimento semelhante ao descrito em b). Nos sondadores mais modernos o parâmetro da velocidade de propagação do som corresponde efetivamente ao valor real da velocidade de propagação do som.

A correção da profundidade é calculada durante o processamento de dados, com o pressuposto de que os dados foram adquiridos utilizando a velocidade verdadeira de propagação do som medida à profundidade do transdutor. A correção à profundidade é baseada na diferença entre a velocidade de propagação do som usada durante a aquisição dos dados e a velocidade média harmónica calculada para cada profundidade a partir do perfil de velocidade de propagação do som observado.

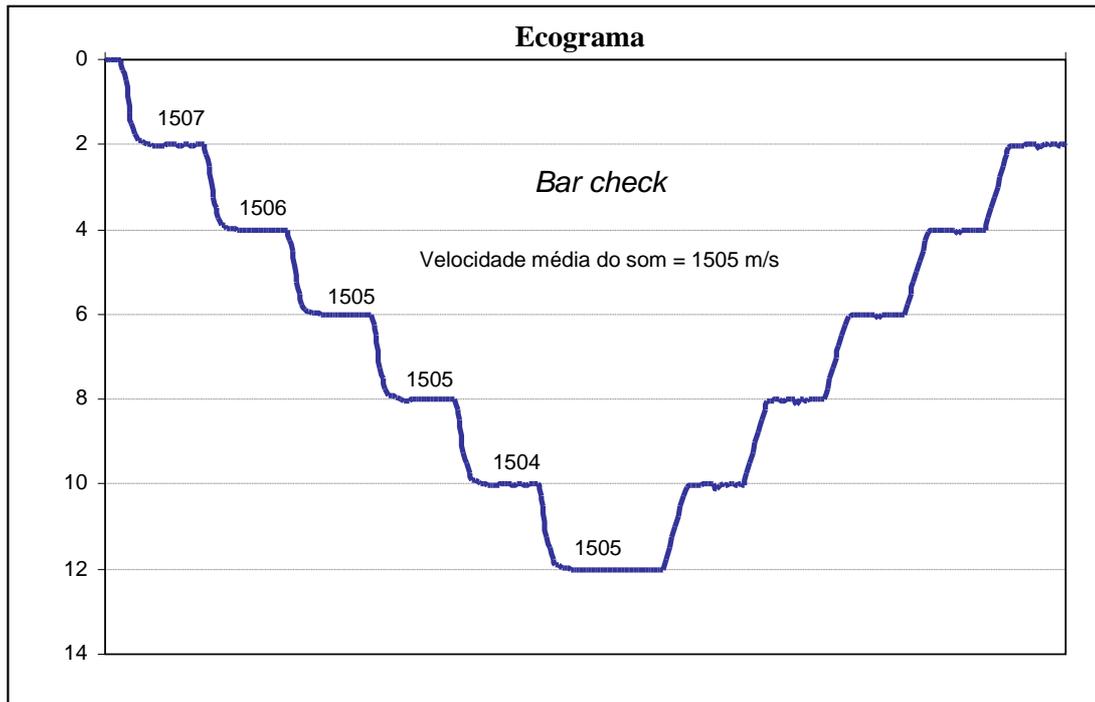


Figura 3.24 "Ilustração do método de calibração por *bar-check* "

Para profundidades superiores a 200 metros, não é necessária corrigir as profundidades da velocidade de propagação do som na água. Um padrão usualmente utilizado é o valor médio de velocidade de propagação do som de 1500 m/s ou utilização de valores estatísticos como por exemplo os apresentados nas Tabelas de Mathews (NP 139).

5.1.3. Operação e registo de dados

A operação dos sondadores acústicos deve ser remetida para o manual de utilização. No entanto, é importante salientar os seguintes aspectos:

- ◆ Antes do início da sondagem, é necessário calibrar o sondador para a velocidade de propagação do som na água atual;
- ◆ Deve ser selecionada uma escala geral adequada para as profundidades esperadas;
- ◆ A frequência deve ser escolhida de acordo com as profundidades de operação;
- ◆ Quando for utilizado um sondador de registo analógico, é essencial parametrizar o ganho e a intensidade do registo para que permitam um ecograma legível.

5.1.4. Fontes de erro e técnicas de controlo de qualidade

Os erros na determinação da profundidade podem ser divididos em três categorias: erros grosseiros, erros sistemáticos e erros aleatórios.

Erros grosseiros correspondem aos erros cometidos pelas máquinas, devido a defeitos dos componentes mecânicos ou eletrónicos.

Erros sistemáticos são principalmente o resultado de deficiências da compensação dos erros fixos ou de desvios nas medições (erros que variam em função das condições de operação), como por exemplo na medição dos movimentos da embarcação, desalinhamento do transdutor e do sensor de movimentos e incerteza nos ângulos de montagem. Estes erros podem ser facilmente corrigidos

se a forma e grandeza destes erros sistemáticos for conhecida. Esta categoria de erros pode ser determinada e removida durante a calibração do sistema.

Depois da remoção dos erros grosseiros e sistemáticos nas profundidades medidas, permanecerão ainda os erros aleatórios. Estes erros podem ser analisados utilizando técnicas estatísticas.

Os hidrógrafos devem estar conscientes das fontes que contribuem para o erro da profundidade e quais os impactos de cada fonte de erro. Esta secção identifica várias fontes de erros e apresenta algumas técnicas utilizadas para controlo de qualidade.

5.1.4.1. Devido ao declive do fundo

Tendo em consideração os diferentes declives do fundo oceânico (Figura 3.25) o erro na medição da profundidade, dz , depende da largura do feixe e da inclinação do fundo. Se nenhuma correção for aplicada, o erro em profundidade, será dada por:

$$dz = \begin{cases} z_m (\sec(\zeta) - 1) & \zeta < \frac{\phi}{2} \\ z_m \left(\sec\left(\frac{\phi}{2}\right) - 1 \right) & \zeta > \frac{\phi}{2} \end{cases} \quad (3.40)$$

em que ϕ é a abertura do feixe e ζ é o declive do fundo.

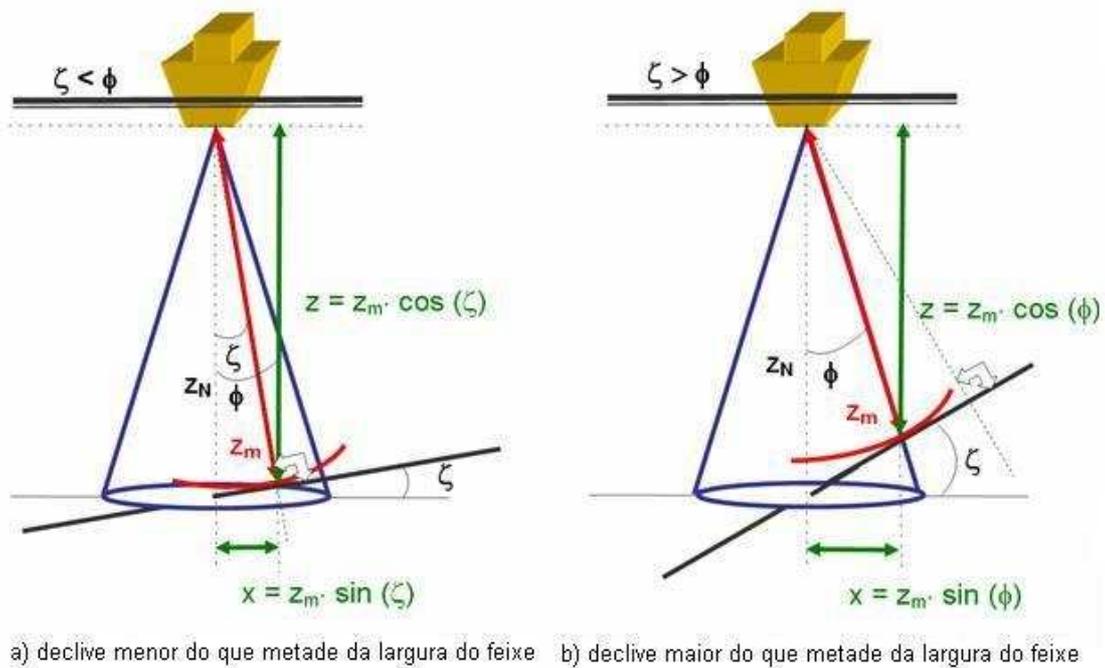


Figura 3.25 "Efeito da abertura do feixe e do declive na medição e no posicionamento das profundidades"

5.1.4.2. Devido à velocidade de propagação do som

A variação da velocidade de propagação do som é difícil de controlar e produz, nos sondadores de feixe simples, erros na medição da profundidade (dz_m) proporcionais à variação média da velocidade de propagação do som (dc) e à profundidade,

$$dz_c = \frac{1}{2} \cdot t \cdot dc \quad (3.41)$$

ou

$$dz_c = z \cdot \frac{dc}{c} \quad (3.42)$$

A magnitude do erro devido à variação da velocidade de propagação do som na água varia com:

- a) Incerteza na determinação da velocidade de propagação do som;
- b) Variação temporal da velocidade de propagação do som;
- c) Variação espacial da velocidade de propagação do som.

De notar que a variância da profundidade medida, $\sigma_{z_c}^2$, devido à incerteza na determinação da velocidade de propagação do som e à sua variação temporal e/ou espacial, é dada por:

$$\sigma_{z_c}^2 = \left(\frac{z}{c}\right)^2 (\sigma_{c_m}^2 + \sigma_c^2) \quad (3.43)$$

em que $\sigma_{c_m}^2$ é a variância da medição da velocidade de propagação do som e σ_c^2 é a variância da velocidade de propagação do som devido à sua variação espacial e temporal.

A variação temporal e espacial da velocidade de propagação do som na água é uma importante contribuição externa nos erros de medição da profundidade. É importante que, durante o planeamento dos levantamentos ou no início da sondagem, sejam efetuados vários perfis de velocidade de propagação do som na água distribuídos pela área a levantar e ao longo do dia (com particular atenção aos ciclos da maré) por forma a assistir o hidrógrafo na decisão da frequência e na localização dos perfis de velocidade de propagação do som a executar durante o levantamento.

5.1.4.3. Devido à medição do tempo

Um sondador acústico mede efetivamente o tempo, convertendo essa medição em profundidade. O erro na medição do tempo, dt , está diretamente relacionado com o erro em profundidade, dz_t . Na geração mais recente de sondadores acústicos o erro na medição do tempo é geralmente pequeno e constante. Este erro é calculado durante a calibração.

$$dz_t = \frac{1}{2} c \cdot dt \quad (3.44)$$

O maior erro na medição do tempo é função da identificação do instante do eco que corresponde à medição da profundidade, ou seja, aos algoritmos utilizados para a detecção do eco.

De notar que a variância da profundidade devido ao erro na medição do tempo, $\sigma_{z_t}^2$, é dada por,

$$\sigma_{z_t}^2 = \left(\frac{1}{2} c\right)^2 \sigma_{t_m}^2, \quad (3.45)$$

em que σ_{tm}^2 é a variância da medição do tempo.

5.1.4.4. Devido ao *roll*, *pitch*, e *heave*

O *roll* e o *pitch* contribuem para o erro na medição da profundidade quando a sua magnitude é superior a meia largura do feixe, $\phi/2$. A Figura 3.26 ilustra o erro na profundidade e no posicionamento devido ao *roll*, θ_R . Esta figura pode ser adaptada para o *pitch* através da permuta de θ_R por θ_P .

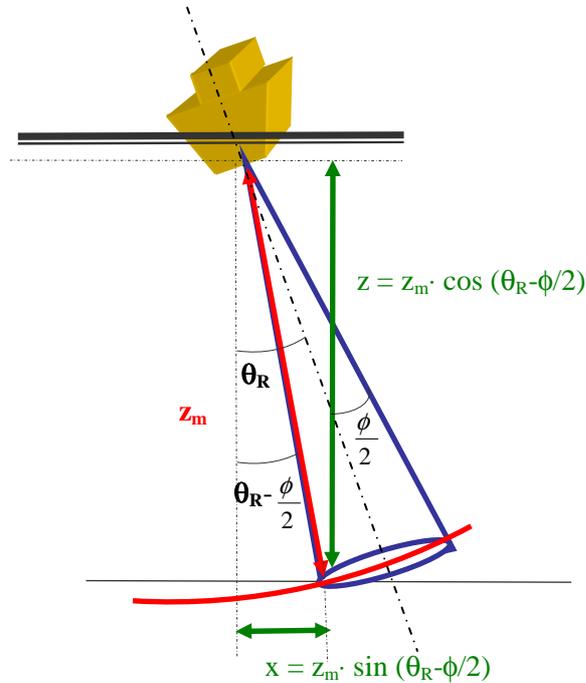


Figura 3.26 "Efeito da largura do feixe e do *roll* na medição da profundidade e no posicionamento "

Os sondadores com largura de feixe elevada são geralmente imunes aos efeitos do *roll* e *pitch* da plataforma de sondagem.

Nos sondadores de feixe estreito, o *roll* e o *pitch* podem ser compensados através da estabilização do feixe, ou seja, mantendo o feixe na vertical, independentemente da atitude da embarcação ou da profundidade, ou corrigindo a profundidade medida da seguinte forma:

$$dz_{\text{roll}} = \begin{cases} z_m \left(1 - \sec\left(\theta_R - \frac{\phi}{2}\right) \right) & \theta_R > \frac{\phi}{2} \\ 0 & \theta_R < \frac{\phi}{2} \end{cases} \quad (3.46)$$

A arfagem/*heave* (\mathbf{h}), efeito causado pela ação do mar sobre a plataforma de sondagem, é medido com sensores inerciais ou com compensadores de arfagem. O compensador de arfagem deve ser colocado na vertical dos transdutores para medir a arfagem efetiva do transdutor.

Quando se utilizarem sensores inerciais, a instalação deve ser efetuada próximo do centro de gravidade da plataforma. Com os braços a partir do centro de gravidade para o transdutor e com as medições instantâneas de *roll* e de *pitch*, o *heave* medido, \mathbf{h}_m , pode ser transferido para a posição do transdutor, \mathbf{h}_i , através da aplicação do *heave* induzido, \mathbf{h}_i , (Figura 3.27).

$$h_t = h_m + h_i \quad (3.47)$$

Para calcular o *heave* induzido, considera-se a plataforma como um corpo rígido que pode rodar livremente em torno dos três eixos (x , y , z) no referencial da plataforma (identificado com o subscrito \mathbf{V}) como mencionado em 3. A rotação (em *roll* e *pitch*) do centro de gravidade, próximo do qual é medido o *heave*, traduz-se na variação da profundidade do transdutor no referencial local (identificado com o subscrito \mathbf{L}). Esta variação vertical do transdutor no referencial local é chamada *heave* induzido.

O *heave* induzido, adaptado de Hare [1995], para os referenciais definidos em 3 e no Anexo A, é dada por:

$$h_i = z_t^L - z_t^V = -x_t^V \sin(\theta_p) + y_t^V \cos(\theta_p) \sin(\theta_R) + z_t^V (\cos(\theta_p) \cos(\theta_R) - 1) \quad (3.48)$$

Onde θ_p é ângulo de *pitch*, θ_R é o ângulo de *roll*, e x_t , y_t e z_t são as coordenadas do transdutor.

O erro total na medição da profundidade devido ao *heave* é dado por,

$$dh = dh_m + dh_i \quad (3.49)$$

Onde dh_m é o erro na medição do *heave* e dh_i é a o erro na determinação do *heave* induzido.

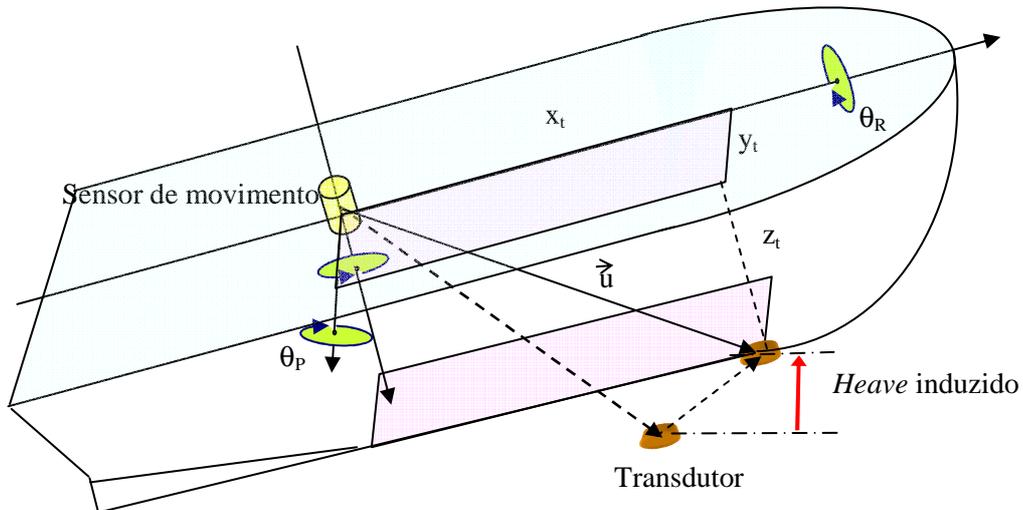


Figura 3.27 "Heave induzido"

A variância do *heave* induzido depende da incerteza nos desvios (*offsets*) do transdutor e do sensor de movimentos e da incerteza das medições dos ângulos de *roll* e de *pitch* [Hare, 1995].

A variância total do *heave* corresponde à variância em profundidade, σ_h^2 , dada por,

$$\sigma_h^2 = \sigma_{hm}^2 + \sigma_{hi}^2 \quad (3.50)$$

em que σ_{hm}^2 é a variância da medição do *heave*, σ_{hi}^2 é a variância do *heave* induzido. Este último erro é usualmente insignificante quando comparado com a incerteza na medição do *heave*.

Quando não for utilizado um compensador de arfagem, é possível suavizar os dados no ecograma analógico manualmente. Esta tarefa exige uma experiência considerável na interpretação do registo da profundidade, a fim de preservar as características do relevo submarino. O procedimento geral, em condições de *roll* não significativo, o despolamento do registo do fundo deve ser efetuado a meio das cristas e das cavas (Figura 3.28).

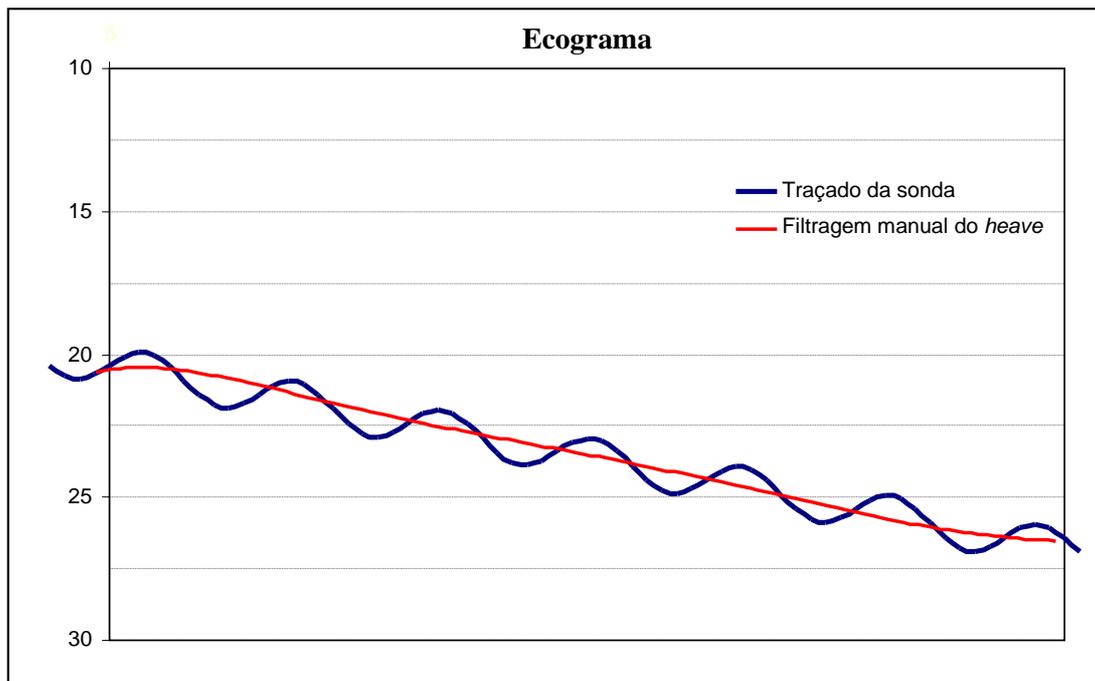


Figura 3.28 "Suavização do efeito do *heave*"

5.1.4.5. Devido ao calado, assentamento e variação dinâmica do caimento

A medição rigorosa da imersão do transdutor é fundamental para a exatidão da profundidade medida. Mesmo assim, devido à variação do calado, pode ser necessário atualizar a imersão do transdutor durante o levantamento. As razões para a variação do calado são principalmente devido ao consumo de água e de combustível. A variação do calado, para o mesmo deslocamento, aumenta com a diminuição da área de flutuação na superfície do mar. O erro no calado propaga-se diretamente como erro de medição da profundidade, $dz_{draught}$.

O assentamento/settlement é o aumento do calado de uma embarcação, relativamente ao seu calado em repouso. Este efeito, particularmente visível em águas pouco profundas, deve-se à redução da pressão da água junto às obras vivas do navio. O erro na medição da profundidade devido ao assentamento é $dz_{settlement}$.

A variação dinâmica do caimento/squat é outro dos efeitos que ocorre em condições dinâmicas, a variação dos calados a vante e a ré como resposta à elevação e depressão do nível de água sobre o casco resultante dos sistemas de ondas à proa e à popa. Nos navios hidrográficos onde o *squat* seja significativo, é geralmente calculada uma tabela de *squat* em função da velocidade do navio. O erro na medição da profundidade devido ao *squat* é dz_{squat} .

A posição relativa do transdutor relativamente ao sensor de movimentos ou compensador de arfagem necessita de ser tomada em consideração para corrigir a profundidade medida devido ao *heave* induzido, ver 5.1.4.4.

O erro total devido à posição do transdutor relativamente à superfície da água, dz_i é:

$$dz_i = \sqrt{dz_{\text{draught}}^2 + dz_{\text{settlement}}^2 + dz_{\text{squat}}^2} \quad (3.51)$$

A variância total da profundidade devido à imersão do transdutor é dada por,

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\text{draught}}^2 + \sigma_{\text{settlement}}^2 + \sigma_{\text{squat}}^2 \quad (3.52)$$

em que $\sigma_{\text{draught}}^2$ é a variância do calado, $\sigma_{\text{settlement}}^2$ é a variância do assentamento e σ_{squat}^2 é a variância do *squat*.

5.1.4.6. Registo e resolução

O registo e a resolução das profundidades medidas dependem do modo de funcionamento do sondador. No caso do registo analógico, o operador deve, durante a aquisição de dados, seleccionar os parâmetros adequados para obter, tanto quanto possível, um ecograma legível e com a resolução adequada. Por outro lado, o registo digital já não tem um tal grau de dependência do operador, mas é recomendável monitorização na aquisição de dados.

No registo em papel, é necessário seleccionar o ganho e intensidade para legibilidade do registo, assim como uma escala vertical, com suficiente discriminação. Por essa razão é também comum o uso de escalas de fase (ver 5.1.1.1).

O ecograma em papel deve ser preparado para a leitura; esta tarefa consiste em identificar os pontos do fundo marinho que serão seleccionados para leitura da profundidade. Isso é geralmente realizado com o auxílio de uma mesa digitalizadora.

O erro associado à leitura do ecograma depende da experiência e do cuidado do hidrógrafo. Considerando um papel de registo com uma largura de 20 centímetros e escala geral 0-200 metros, um erro de leitura de 0,5 mm irá produzir um erro na profundidade de 0,5 metros. Por isso, esta escala não é adequada para o registo de profundidades em fundos baixos. O erro de leitura é dz_{read} , com variância, σ_r^2 .

5.1.4.7. Interpretação do ecograma

É uma responsabilidade do hidrógrafo. A interpretação requer experiência para identificação de formas particulares, ecos múltiplos e ecos falsos.

- a) **Ecos falsos** – são causados por material estranho em suspensão, tais como algas marinhas ou peixes na coluna de água (Figura 3.29), por camadas de água com bruscas variações de temperatura, salinidade ou ambas.

Ecos falsos são ocasionalmente registados pelos sondadores e podem ser interpretados erroneamente como profundidades corretas. Em caso de dúvida sobre a validade dessas profundidades, deve ser efetuada uma investigação dessas sondas ou, eventualmente, repetida parte da sondagem.

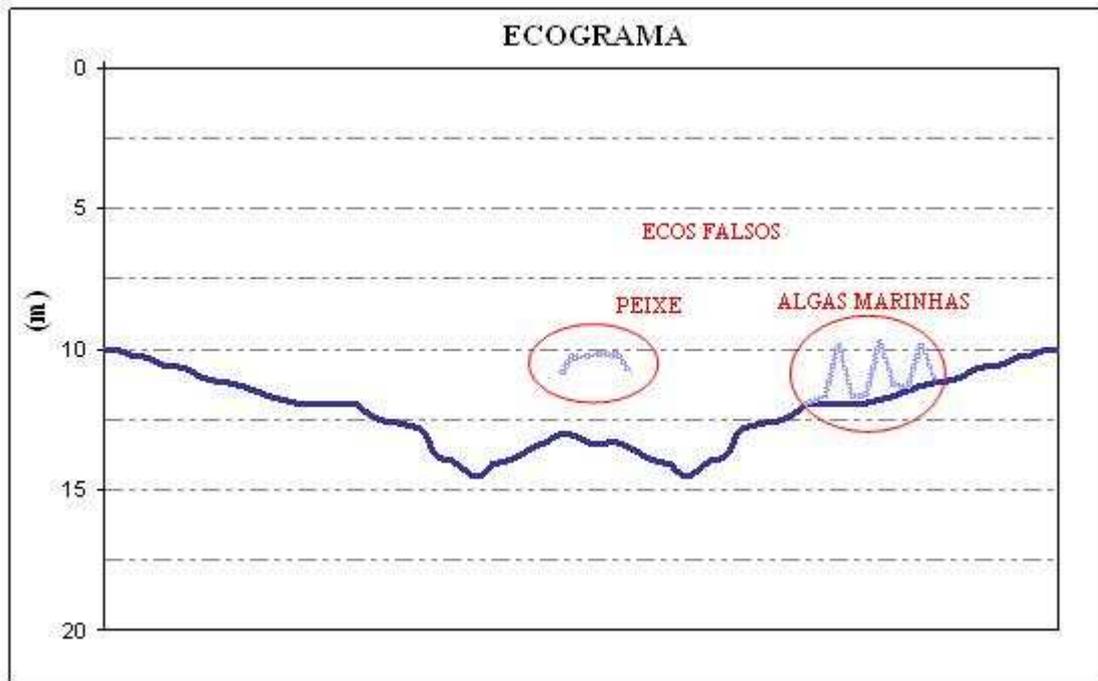


Figura 3.29 "Ecos falsos"

- b) **Ecos múltiplos** – são ecos recebidos após o primeiro retorno do fundo, devido a reflexões múltiplas entre o fundo e a superfície. Estas reflexões são usualmente registadas como múltiplos da profundidade real. (Figura 3.30).

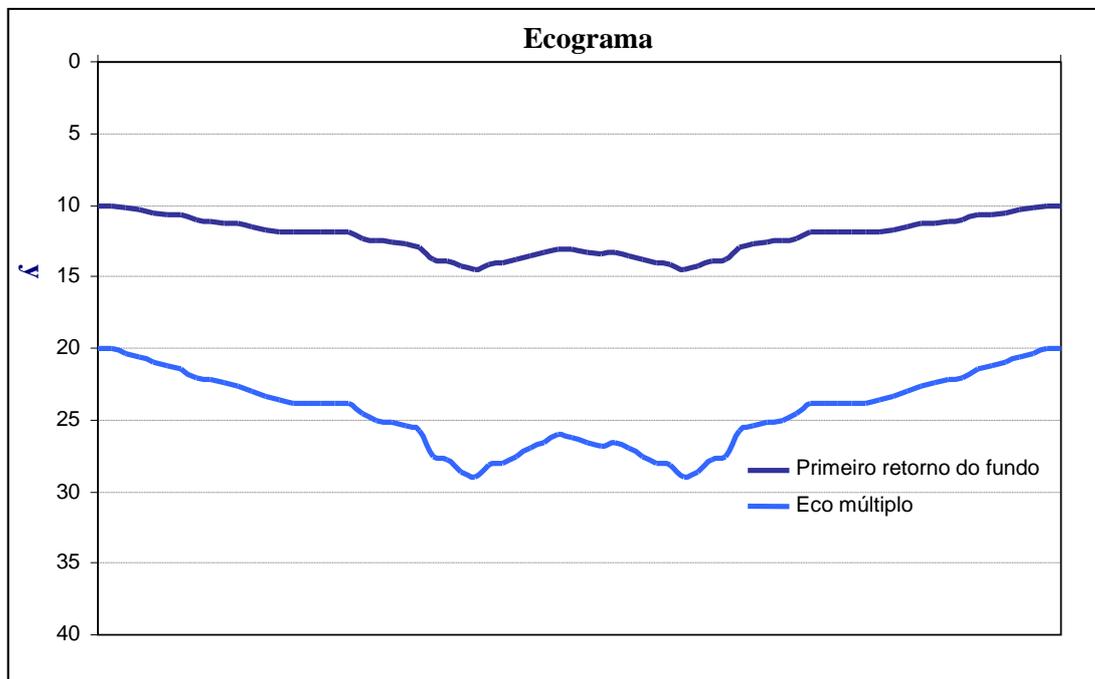


Figura 3.30 "Registo de ecos múltiplos"

- c) **Arfagem/heave** – a oscilação vertical da plataforma de sondagem devido ao efeito do mar, deve ser compensada durante a aquisição de dados por um sensor de movimentos ou compensador de arfagem ou filtrado manualmente durante o pós-processamento. A experiência do hidrógrafo é a ferramenta utilizada para este efeito, embora seja por vezes difícil, em particular em fundos irregulares, distinguir o *heave* da irregularidade do fundo.

- d) **Ecoss laterais** – são ecos falsos detectados pelos lóbulos secundários, que levam a erros na medição da profundidade e no posicionamento (ver 4.2).
- e) **Sedimentos não consolidados** – são usualmente detectados pelas frequências acústicas elevadas. Em fundos baixos é recomendável a utilização de sondadores acústicos com duas frequências para separação dos sedimentos não consolidados e do fundo rochoso (Figura 3.31).

5.1.4.8. Redução da profundidade

As medições de profundidade, após corrigidas da atitude da plataforma, são reduzidas para o *Datum* vertical através da aplicação da maré. O erro na profundidade devido ao erro de medição da maré é referido como dz_{tide} .

Além do erro na medição da maré, existe por vezes um erro, mais significativo que é o erro da concordância da maré, que resulta da diferença da maré entre a área da sondagem e a maré medida no marégrafo. O erro em profundidade devido à concordância da maré é $dz_{\text{co-tidal}}$. Esta diferença pode ser bastante significativa a várias milhas de distância do marégrafo (ver Capítulo 4). Por vezes poderá ser necessário utilizar um modelo de concordâncias da maré ou médias ponderadas a partir de dois ou mais marégrafos.

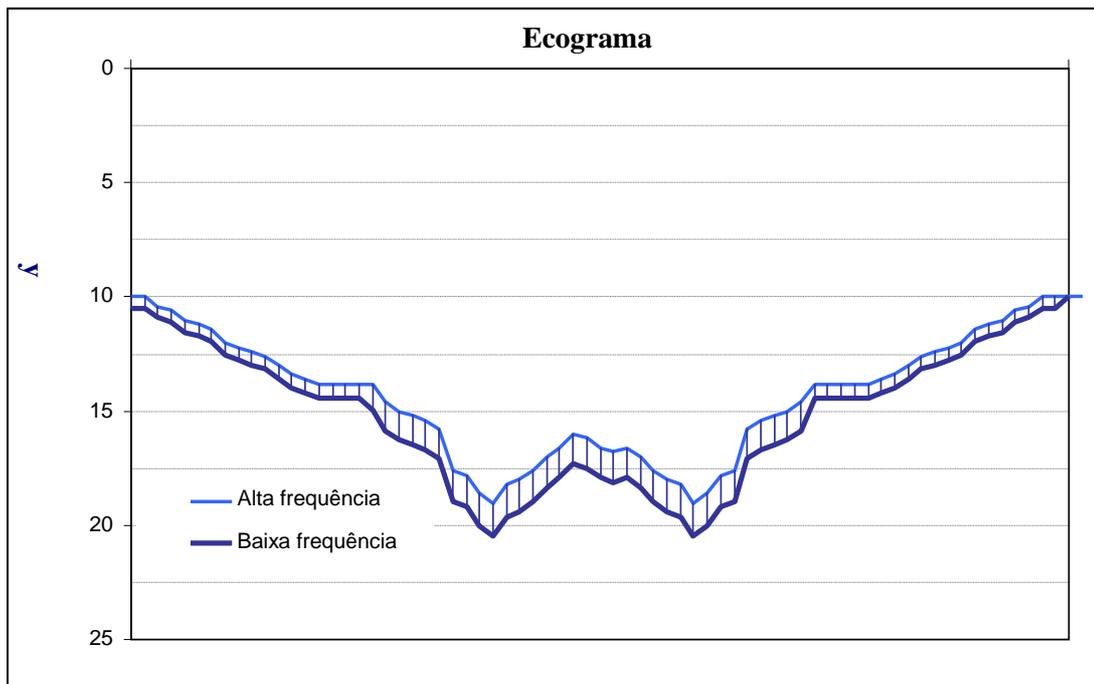


Figura 3.31 "Ecograma com o registo de duas frequências"

A variância da maré, σ_{tide}^2 , devido ao erro de medição e da concordância da maré é dada por:

$$\sigma_{\text{tide}}^2 = \left(\sigma_{\text{tide}_m}^2 + \sigma_{\text{co-tidal}}^2 \right) \quad (3.53)$$

em que $\sigma_{\text{tide}_m}^2$ é a variância da medição da maré e $\sigma_{\text{co-tidal}}^2$ é a variância da concordância da maré.

A determinação da maré por GPS-RTK (*Real Time Kinematic*) permite a determinação da maré com elevada exatidão na própria plataforma de sondagem. No entanto, o cálculo da maré necessita de um modelo de diferenças entre o elipsóide de referência (WGS84) e o *Datum* vertical utilizado.

O controlo de qualidade é efetuado através da estatística das diferenças entre as sondas das fiadas de verificação e as sondas vizinhas das fiadas principais. A estatística desta comparação deve estar de acordo com os requisitos de precisão da S-44 (Figura 3.32).

De acordo com os erros apresentados nas secções anteriores, é possível estimar a variância da profundidade reduzida como,

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z_c}^2 + \sigma_{z_t}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \sigma_{\text{tide}}^2. \quad (3.54)$$

O erro estimado ou incerteza da profundidade reduzida, a um nível de confiança de 68 % (ou 1σ) é obtido pela raiz quadrada da equação 3.54. Assumindo que as componentes dos erros seguem uma distribuição aproximadamente normal, o erro estimado da profundidade reduzida, a um nível de confiança de 95 % (ou 2σ), obtém-se substituindo cada variância σ^2 por $(2\sigma)^2$.

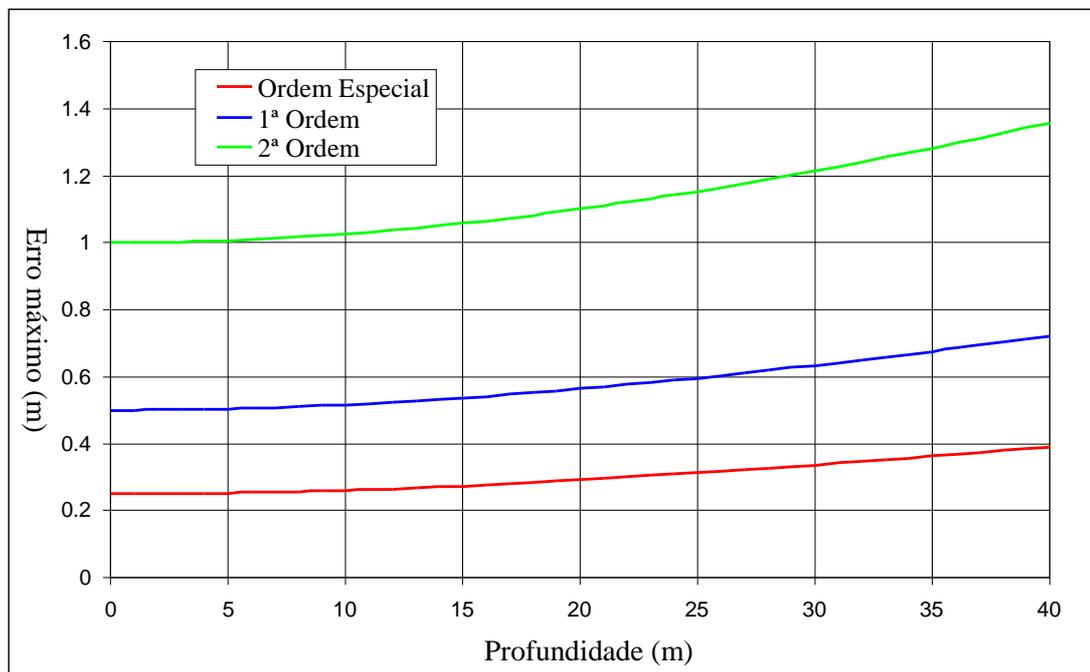


Figura 3.32 "Requisitos mínimos da profundidade reduzida para Ordem Especial, Ordem 1 e Ordem 2 (S-44)"

Para cada sistema de sondagem é recomendado o desenvolvimento de um balanço de erros para avaliar a sua conformidade com os requisitos da S-44. Na Figura 3.33 é apresentada a estimação dos erros para um determinado sondador acústico e para condições de operação específicas.

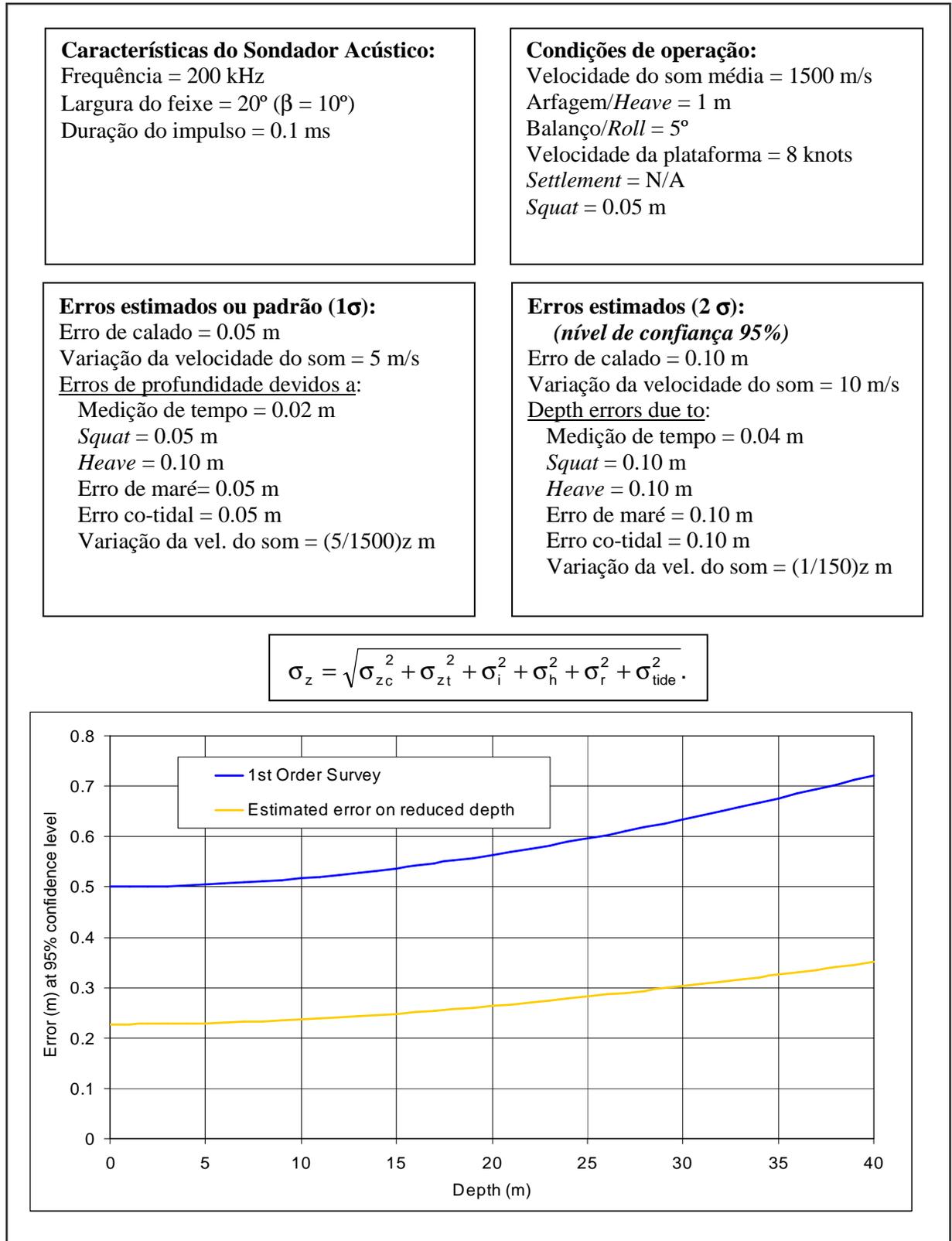


Figura 3.33 "Estimação do erro na profundidade reduzida"

5.2. Sistemas de Cobertura por Faixa (Swath systems)

Os sistemas de cobertura por faixa (*swath systems*) efetuam medições de profundidade ao longo de uma faixa do fundo do mar. Estes sistemas efetuam medições em perfis perpendiculares à proa

da plataforma de sondagem. À medida que a plataforma se desloca, as medições de perfis consecutivos efetuam o varrimento de uma faixa do fundo (conhecida como *swath*).

Esta secção apresenta os sistemas sondadores multifeixe e os sonares interferométricos.

5.2.1. Sondadores multifeixe

Os sondadores multifeixe são uma ferramenta valiosa para a medição da profundidade quando é necessária a busca total do fundo. Estes sistemas apresentam a potencialidade de insonificação completa do fundo submarino, com o consequente aumento de resolução e de capacidade de detecção.

5.2.1.1. Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do sondador multifeixe baseia-se na transmissão de um impulso acústico em forma de leque na direção do fundo. Após a reflexão da energia acústica pelo fundo, vários feixes são formados eletronicamente em direções predefinidas, através de técnicas de processamento de sinal. O duplo intervalo de tempo entre a transmissão e a recepção é calculado com recurso a algoritmos de detecção de fundo. Com a aplicação do traçado do raio acústico (ver 5.2.1.8.1) é possível determinar a profundidade e a distância transversal entre o transdutor e o centro da área insonificada.

O feixe transmitido é largo na direção transversal à proa e estreito na direção longitudinal (proa - popa). Inversamente, os feixes formados durante a recepção são estreitos na direção transversal à proa e largos na direção longitudinal. A intersecção destes dois feixes no plano do fundo corresponde à área insonificada para a qual é medida a profundidade.

Como as medições da profundidade são efetuadas a partir de uma plataforma flutuante com seis graus possíveis de liberdade (três translações e três rotações), são necessárias medições precisas da latitude, longitude, *heave*, *roll*, *pitch* e proa para o cálculo exato da profundidade e do posicionamento.

A. Detecção do fundo é o processo utilizado pelos sondadores multifeixe para determinar o instante de chegada e a amplitude do sinal acústico. A fiabilidade deste processo afeta a qualidade das medições. Erros grosseiros na medição da profundidade podem depender, entre outros fatores, do desempenho deficiente dos algoritmos de detecção de fundo. Os algoritmos de detecção de fundo podem ser classificados em duas categorias: detecção em amplitude e detecção em fase.

- a) **Detecção em amplitude.** O transdutor emite um impulso na direção do fundo e inicia um período de escuta do eco proveniente da reflexão no fundo. Nesta fase, o sinal de retorno é amostrado em tempo para cada ângulo de feixe. O tempo de viagem do sinal para um ponto do fundo é definido pela amplitude detectada no sinal refletido no fundo (Figura 3.34).

Os métodos comuns de detecção em amplitude são os seguintes:

- i. Frente de onda do sinal refletido. Este método é usualmente utilizado para ângulos de incidência próximos de zero. A detecção do fundo corresponde ao primeiro retorno dentro do feixe.

Com o aumento do ângulo de incidência, o sinal refletido perde a sua forma acentuada original e o método do primeiro retorno deixa de ter bons resultados. Dois outros métodos podem ser utilizados, estes têm em consideração a variação da intensidade das amostras ao longo da célula insonificada.

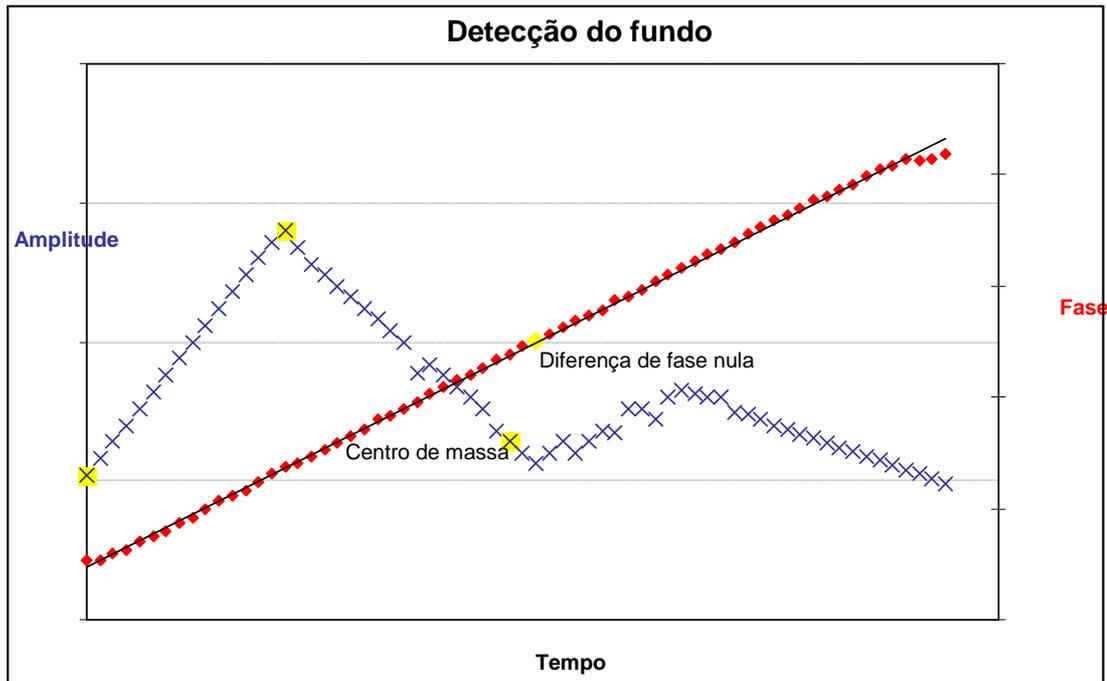


Figura 3.34 "Métodos de detecção do fundo (detecção do sinal)"

- ii. Máxima amplitude do sinal refletido. A detecção do eco é definida pelo instante correspondente à máxima amplitude do sinal refletido.
 - iii. Centro de massa do sinal refletido. Este método consiste na determinação do instante correspondente ao centro de massa do sinal em amplitude.
- b) **Detecção em fase**. A detecção em amplitude é a técnica utilizada na detecção do eco para os feixes centrais (próximos do nadir), onde a amplitude da retroreflectividade apresenta valores mais elevados e um número de amostras é reduzido. Para os feixes exteriores, a retroreflectividade decresce e o número de amostras aumenta consideravelmente. Consequentemente, o retorno em amplitude é tão diluído no tempo que a detecção em amplitude não apresenta bons resultados. Para um fundo com declive acentuado, e no sentido do aumento da profundidade, a diminuição da retroreflectividade é também acentuada. Portanto, a detecção em fase é o método usualmente utilizado para ângulos de incidência elevados.

Nesta técnica, para cada feixe o transdutor é dividido em dois sub agregados, frequentemente com sobreposição, encontrando-se os centros destes sub agregados separados por um número de comprimentos de onda. Cada sub agregado forma um feixe em direções predeterminadas, para a chegada simultânea de ecos de diferentes direções, este método apresenta a vantagem de resolver apenas os ecos na direção de formação do feixe. A sequência de valores da diferença de fase é então utilizada para estimar o instante de chegada do eco na direção do feixe formado na recepção, através da determinação da diferença de fase nula da série observada [de Moustier, 1993]. A figura 3.35 ilustra um exemplo do método de detecção em fase. O equivalente aos centros dos dois sub agregados são representados por **A** e **B** separados de uma distância ℓ , onde θ é o ângulo do sinal recebido relativamente ao eixo acústico Um polinómio de segunda ordem pode ser ajustado a um subconjunto da série de diferenças de fase do sinal recebido nos dois sub agregados para refinar a determinação do instante correspondente à diferença de fase nula.

Quando o eco chega na direção do eixo acústico, i.e. $\theta = 0$, o sinal nos dois sub agregados encontra-se em fase, sendo este o instante de chegada do eco para o feixe em causa.

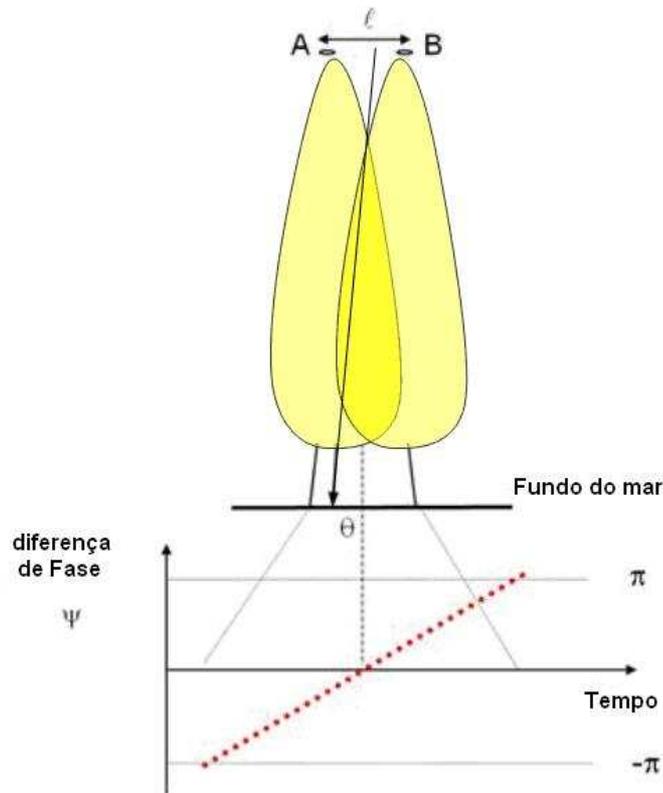


Figura 3.35 "Método de detecção em fase (diferença de fase nula)"

Ao longo da faixa sondada, é normalmente necessária uma combinação de detecção em amplitude e fase para a determinação consistente do tempo de trajeto do impulso. Próximo do nadir, deve ser utilizada a detecção em amplitude por a série temporal de amostras para estes feixes ser relativamente reduzida para uma detecção robusta em fase. A detecção em amplitude é também utilizada em fundos irregulares com declives acentuados afastados do nadir. A detecção em fase para feixes próximos do nadir pode ocorrer devido a erros grosseiros (blunders), como por exemplo o retorno do sinal na coluna de água ou devido á detecção do eco pelos lóbulos secundários. Para feixes afastados do nadir a detecção é usualmente efetuada em fase. A amplitude poderá, no entanto, ser utilizada em casos de elevada refletividade do fundo, como a associada a diferenças de refletividade na área insonificada causadas quer por reflexão normal (ou especular), quer por variância elevada no ajustamento da curva à série temporal de amostras de diferença de fase. Estas condições podem ocorrer na presença de destroços ou de fundos muito irregulares.

- c) **Fast Fourier Transform (FFT)** De acordo com 4.1, os sinais recebidos em cada elemento são copiados para cada feixe durante a formação dos feixes. A soma da amplitude dos N elementos transdutores é ela própria uma transformada de *Fourier* do vetor, com N elementos, correspondente ao diagrama de radiação de um agregado linear. Se N for uma potência de 2 o cálculo é menos exigente e a transformada de *Fourier* é

chamada de *Fast Fourier Transform*⁴⁶. Este método tem a vantagem de aumentar a velocidade do processo de formação de feixes.

Detalhes sobre este método são apresentados por de Moustier [1993].

5.2.1.2. Exatidão

Para os sondadores multifeixe a medição do ângulo e da distância é mais complexa que para os sondadores de feixe simples. Consequentemente, existe um número de fatores que contribuem para o erro destas medições, incluindo o ângulo do feixe, ângulo de incidência no fundo, largura do feixe transmitido e do feixe formado na recepção, exatidão na determinação da atitude e da arfagem, algoritmos de detecção do eco e variação do perfil de velocidade de propagação do som na água.

Usualmente é necessário calcular um balanço de erros devido a estes fatores (ver 5.2.1.8.).

5.2.1.3. Resolução

Os sistemas sondadores multifeixe, com a sua capacidade de insonificação total do fundo, contribuem para a melhor representação do relevo submarino e, quando comparados com os sondadores de feixe simples, para maior resolução cartográfica. No entanto, a resolução da medição da profundidade depende dos seguintes fatores: frequência acústica, largura do feixe transmitido e do feixe formado na recepção e do algoritmo utilizado na detecção do fundo.

A resolução da medição da profundidade é função do comprimento do impulso e da dimensão da área insonificada. A área insonificada dos sondadores multifeixe para incidência normal é relativamente pequena pelo que a resolução do sondador multifeixe é superior à do sondador de feixe simples.

5.2.1.4. Frequência

É selecionada em função da sua utilização, nomeadamente o alcance máximo e resolução pretendida.

As frequências dos sondadores multifeixe são tipicamente:

- a) Profundidades inferiores a 100 metros: frequências superiores a 200 kHz;
- b) Profundidades inferiores a 1500 metros: frequências entre 50 e 200 kHz;
- c) Profundidades superiores a 1500 metros: frequências entre 12 e 50 kHz.

5.2.1.5. Sensores do sistema multifeixe e sua integração

Além do sondador multifeixe, os sistemas multifeixe incluem:

- a) Sensor de movimento – para determinação da atitude (*roll*, *pitch* e *proa*) e arfagem. Atualmente estes sensores compreendem uma unidade de medição inercial (IMU) e um par de receptores GPS e respectivas antenas. Como resultado da tecnologia utilizada, este sensor permite também a determinação da posição com elevada exatidão;
- b) Perfilador de velocidade de propagação do som – para a medição da velocidade de propagação do som ao longo da coluna de água;

⁴⁶ Também é possível utilizar FFT quando N não é uma potência de 2, através da adição de elementos com amplitude zero, ver de Moustier [1993].

- c) Sensor de velocidade de propagação do som – para medição da velocidade de propagação do som na face do transdutor. Este componente deve ser considerado obrigatório para os agregados de transdutores de face plana, onde é necessário o guiamento dos feixes;
- d) Sistema de posicionamento –nos novos sistemas, como referido acima, o posicionamento está integrado com os sensores de movimento. O GPS em modo pseudo-diferencial ou em modo RTK é sistema geralmente usado;
- e) Sensor de proa – encontra-se também integrado com o sensor de movimentos, a melhor solução é dada pela proa obtida por dois receptores GPS.

5.2.1.6. Instalação e calibração (*patch test*)

A instalação dos transdutores multifeixe pode ser por fixação ao casco ou por fixação à proa ou à borda. A fixação ao caso é utilizada em navios ou em instalações permanentes, as outras instalações são utilizadas em embarcações ou em instalações temporárias.

A calibração (*patch test*) é um procedimento essencial que consiste na determinação dos desvios em *roll*, *pitch* e proa para o transdutor e sensor de movimentos e da latência do sistema de posicionamento. Informação detalhada sobre este assunto pode ser encontrada em Godin [1996].

A calibração deve ser efetuada após instalação do sistema e após grandes períodos de inoperacionalidade ou após alterações significativas da instalação.

Antes da calibração é necessário verificar os parâmetros de instalação e efetuar um perfil de propagação da velocidade do som na água de forma a atualizar cálculo da refração.

a) Latência do posicionamento

A latência ou atraso do posicionamento é a diferença em tempo entre posicionamento e a determinação da profundidade. Para a determinação da latência são efetuadas duas fiadas sobrepostas, no mesmo sentido e velocidades diferentes, num fundo inclinado. Quanto maior o declive do fundo maior será a resolução deste parâmetro. O declive deve ser regular e apresentar uma extensão suficiente para garantir uma amostragem adequada. A figura 3.36 ilustra a calibração deste parâmetro.

O valor da latência é obtido por medição do deslocamento longitudinal das sondas ao longo do declive devido às diferentes velocidades do navio. Para evitar a influência dos desvios em *pitch*, as fiadas devem ser efetuadas no mesmo sentido.

O valor da latência, δt , pode ser obtido através da equação:

$$\delta t = \frac{\Delta x}{v_2 - v_1} \quad (3.55)$$

onde Δx é a separação horizontal entre os perfis das duas fiadas, realizadas às velocidades v_1 e v_2 para a fiada 1 e 2, respectivamente.

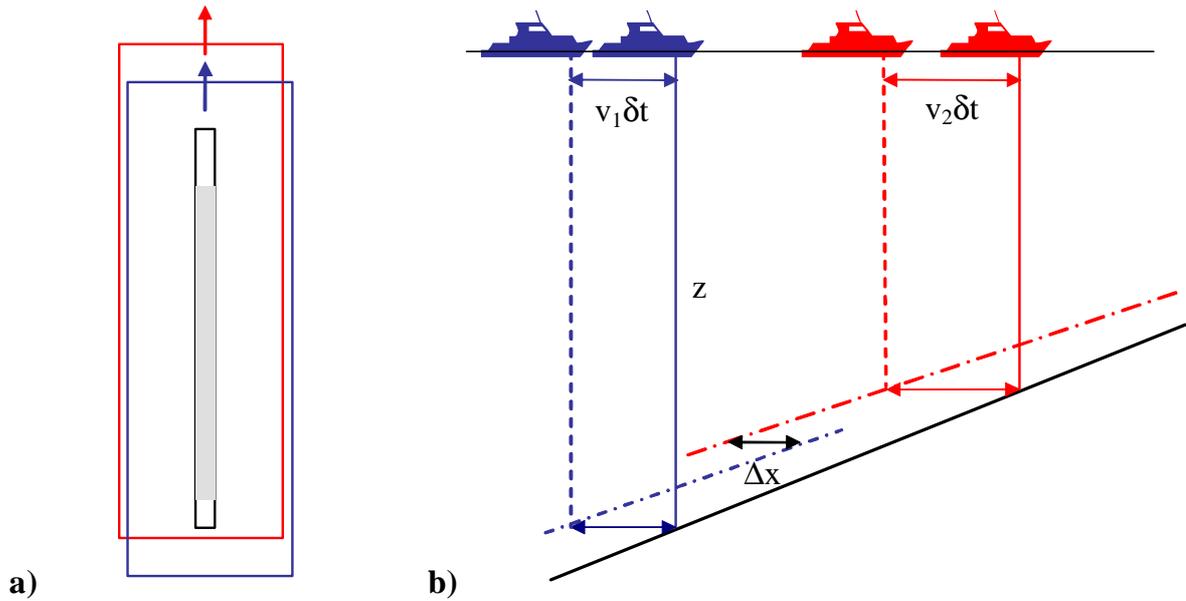


Figura 3.36 "Calibração da latência. a) vista de cima; b) secção longitudinal onde é visível a separação entre os dois perfis relativamente ao fundo real. "

b) Desvio em *pitch*

O desvio em *pitch* é a composição do desvio angular do sensor de movimentos e do alinhamento do transdutor com a vertical do lugar no plano longitudinal da plataforma de sondagem. Para determinar o desvio em *pitch* são efetuadas duas fiadas sobrepostas, em sentidos opostos e à mesma velocidade, num fundo inclinado. Tal como referido na determinação da latência, quanto maior o declive maior será a resolução deste parâmetro. O declive deve ser regular e apresentar uma extensão suficiente para garantir uma amostragem adequada. A figura 3.37 ilustra a calibração deste parâmetro.

Após a determinação da latência, o desvio em *pitch* é obtido por medição do deslocamento longitudinal. Para evitar qualquer interferência devido à latência, este parâmetro deve já estar corrigido antes de se realizar esta calibração.

O desvio em *pitch*, $\delta\theta_p$, pode ser obtido pela equação:

$$\delta\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{2 \cdot z}\right) \quad (3.56)$$

Onde Δx é a separação horizontal entre os dois perfis de sondagem na vizinhança do nadir, e v_1 e v_2 são as velocidades das fiadas 1 e 2 respectivamente.

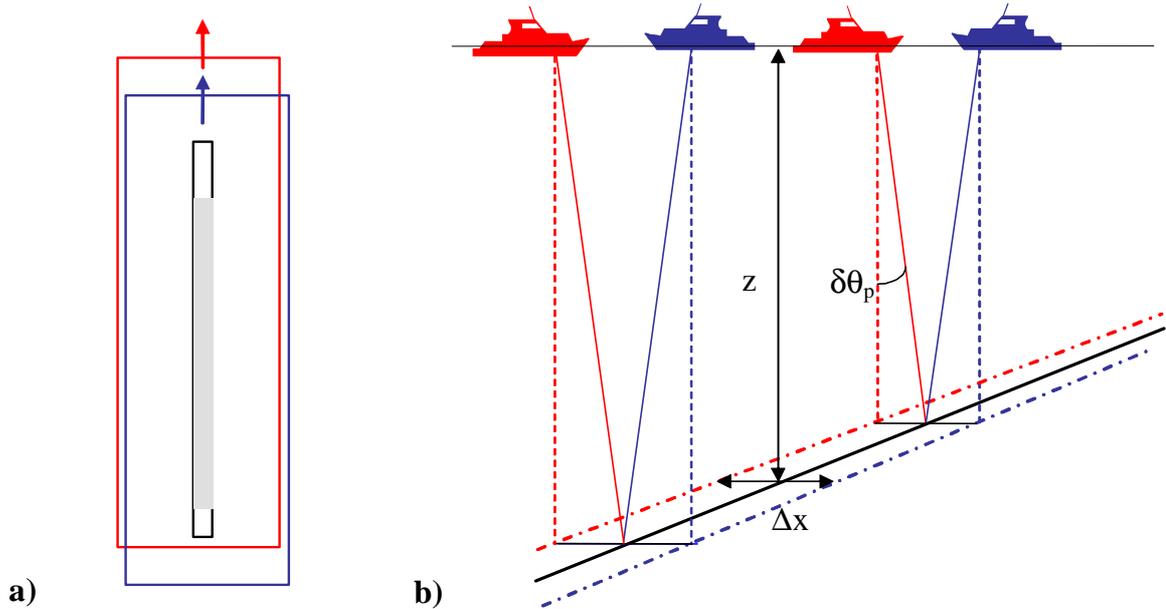


Figura 3.37 "Calibração do desvio em *pitch* a) vista de topo das duas fiadas; b) secção longitudinal, onde é visível a separação entre os dois perfis relativamente ao fundo real."

c) Desvio em proa

O desvio em proa é a composição dos desvios angulares do sensor de determinação da proa e do alinhamento do transdutor, segundo a perpendicular ao eixo longitudinal da plataforma de sondagem. O procedimento para determinar o desvio em proa consiste em realizar dois pares de fiadas adjacentes e recíprocas, à mesma velocidade, numa área com uma estrutura batimétrica bem definida, por exemplo um baixio. As fiadas adjacentes devem apresentar sobreposição dos feixes exteriores na área da estrutura batimétrica (a sobreposição não deve ser superior a 20% da faixa sondada). A figura 3.38 ilustra a calibração do desvio em proa.

Após a correta determinação da latência do sistema de posicionamento e do desvio em *pitch*, o desvio em proa pode ser obtido através da medição do deslocamento longitudinal da estrutura batimétrica entre as fiadas adjacentes. Para evitar qualquer influência da latência e do desvio em *pitch*, o sistema deverá ter sido previamente compensado para estes dois desvios.

O desvio em proa, $\delta\alpha$, pode ser obtido pela equação:

$$\delta\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{\Delta L}\right) \quad (3.57)$$

Onde Δx é a separação horizontal da estrutura batimétrica obtida através das duas fiadas recíprocas adjacentes à estrutura, sendo ΔL a distância entre as duas fiadas.

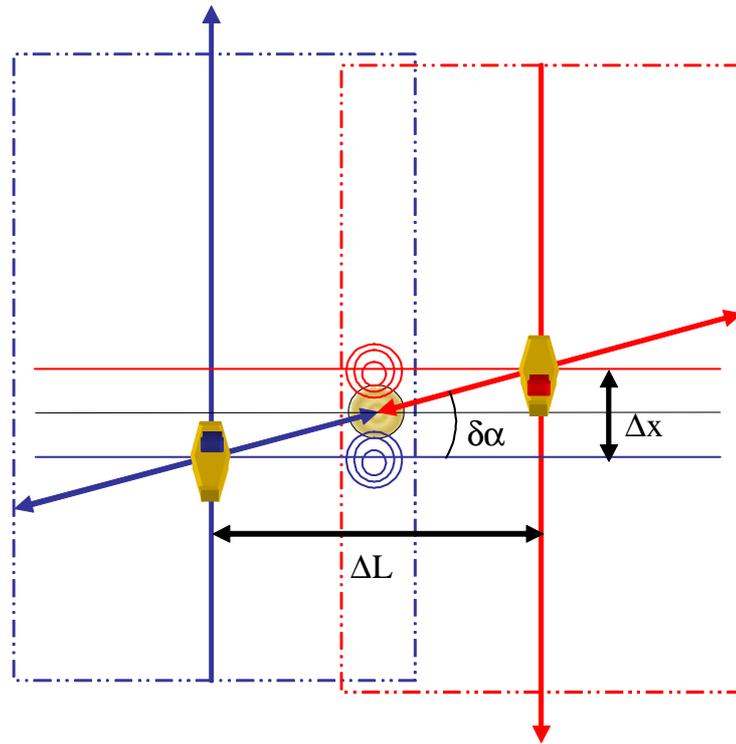


Figura 3.38 "Calibração do desvio em proa"

d) Desvio em *roll*

O desvio em *roll* é a composição do desvio angular do sensor de movimentos e do alinhamento do transdutor com a vertical do lugar no plano transversal da plataforma de sondagem. Para determinar o desvio em *roll* são efetuadas duas fiadas sobrepostas, em sentidos opostos e à mesma velocidade, num fundo plano e regular. A figura 3.39 ilustra a calibração deste parâmetro.

Após correta determinação da latência do sistema de posicionamento, do desvio em *pitch* e do desvio em proa, o desvio em *roll* pode ser obtido através da medição do deslocamento vertical dos feixes exteriores das duas fiadas sobrepostas. Para evitar qualquer influência da latência, do desvio em *pitch* e do desvio em *roll* o sistema deve ser previamente compensado para estes erros sistemáticos.

O desvio em *roll*, $\delta\theta_R$, pode ser obtido através da equação:

$$\delta\theta_R = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta z}{2 \cdot \Delta y}\right) \quad (3.58)$$

Onde Δz é a separação vertical entre os feixes exteriores das duas fiadas recíprocas e Δy é a distância entre o nadir e o ponto onde a separação vertical das duas fiadas é medida.

A calibração é usualmente efetuada através de ferramentas interativas. O ajustamento ou cálculo do desvio deve ser efetuado por amostragem de várias secções de forma a determinar um valor médio para cada parâmetro. Os desvios podem ter uma incerteza da ordem da resolução do sensor de movimentos.

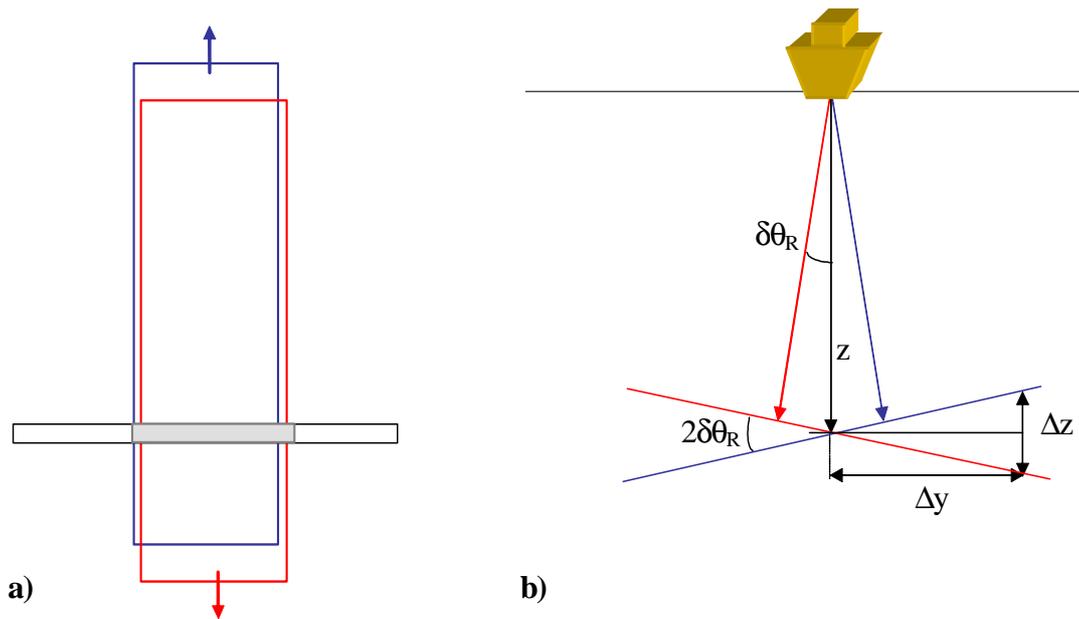


Figura 3.39 “Calibração do desvio em *roll*. a) vista de topo das duas fiadas; b) secção transversal, onde é visível a separação entre os dois perfis relativamente ao fundo real.”

5.2.1.7. Operação e registo de dados

A configuração dos equipamentos na plataforma de sondagem e os parâmetros de calibração devem ser verificados no início de cada levantamento. Os parâmetros do sistema utilizados durante a aquisição podem variar consoante a área do levantamento (v.g. profundidade máxima, profundidade esperada, máxima razão de transmissão de impulsos, etc.).

No início de um levantamento deve ser efetuado um perfil de velocidade de propagação do som na água e transferido para o sondador multifeixe para ser utilizado, geralmente, em tempo real. A velocidade de propagação do som à face do transdutor deve ser comparada com o valor dado pelo sensor de velocidade colocado à imersão do transdutor. Durante o levantamento devem ser efetuados vários perfis de velocidade de propagação do som, de acordo com a avaliação prévia de variação temporal e espacial dos perfis de velocidade de propagação do som.

Durante o levantamento, os sistemas apresentam capacidade de operação autónoma. No entanto, o hidrógrafo deve monitorizar a aquisição dos dados e verificar a sua integridade. Em particular, deve ser garantida a completa insonificação do fundo e a sobreposição entre fiadas adjacentes. É importante comparar a sobreposição dos feixes exteriores de faixas adjacentes e verificar eventuais tendências de encurvamento sistemático dos perfis (conjunto de feixes correspondentes a um impulso).

No final de cada sessão de sondagem é altamente recomendável a duplicação da informação adquirida (*backup*).

5.2.1.8. Fontes de erro e técnicas de controlo de qualidade

As fontes de erro para os sondadores de feixe simples foram apresentadas em 5.1.4. Daqui em diante são analisadas as fontes de erro para os sondadores multifeixe. Alguns dos erros são comuns aos dois sistemas, i.e. não variam com o ângulo do feixe. Por esta razão alguns dos erros são referidos na secção 5.1.4. Detalhes na incerteza da medição dos sondadores multifeixe podem ser encontrados em Hare [1995] e Lurton [2002].

5.2.1.8.1 Devido à velocidade de propagação do som. Erros ou variação na velocidade de propagação do som na água resultam em soluções incorretas para a refração e, conseqüentemente, em erros na medição da profundidade e posicionamento.

O traçado do raio acústico⁴⁷ baseia-se na lei de Snell que estabelece a relação entre a direção do raio e a velocidade de propagação das ondas acústicas:

$$\frac{\text{sen } \theta_0}{c_0} = \dots = \frac{\text{sen } \theta_i}{c_i} = \kappa \quad (3.59)$$

onde c_i é a velocidade de propagação do som, θ_i é o ângulo de incidência referido à vertical para uma profundidade z_i e κ parâmetro do raio ou constante de Snell.

Considerando um perfil de velocidade de propagação do som discreto (Figura 3.40), é aceitável assumir o gradiente de velocidade de propagação do som é constante para cada camada, i.e. entre duas medições sucessivas da velocidade de propagação do som. Desta forma, a velocidade de propagação do som pode ser representada por:

$$c^i(z) = c_{i-1} + g_i(z - z_{i-1}), \quad \text{for } z_{i-1} \leq z \leq z_i \quad (3.60)$$

onde g_i é o gradiente da camada i , dado por:

$$g_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \quad (3.61)$$

Em cada camada o impulso acústico descreve um trajeto curvilíneo com raio de curvatura constante, ρ_i , dado por:

$$\rho_i = -\frac{1}{\kappa g_i} \quad (3.62)$$

⁴⁷ O raio acústico corresponde a uma linha desenhada a partir da fonte, sendo perpendicular à frente de onda em qualquer ponto da trajetória.

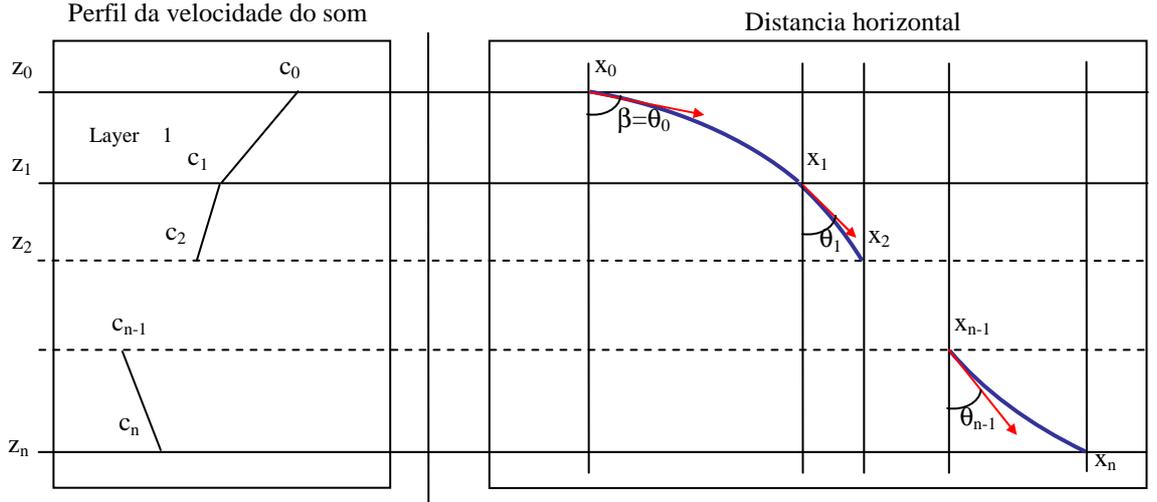


Figura 3.40 "Traçado do raio acústico"

Considerando o ângulo do feixe θ_0 (ou β) numa profundidade com velocidade de propagação do som c_0 , a distância horizontal percorrida pelo impulso acústico até ao nível i é dada por:

$$\Delta x_i = \rho_i (\cos \theta_i - \cos \theta_{i-1}) = \frac{\cos \theta_{i-1} - \cos \theta_i}{\kappa g_i} \quad (3.63)$$

e, substituindo $\cos(\theta_i)$ por $\sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}$ obtém-se:

$$\Delta x_i = \frac{\sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2} - \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}}{\kappa g_i} \quad (3.64)$$

O tempo de percurso do impulso acústico na camada i é dada por:

$$\Delta t_i = \frac{1}{g_i} \int_{c_{i-1}}^{c_i} \frac{dc}{c \cdot \cos(\theta)} \quad (3.65)$$

que pode também ser escrito na forma:

$$\Delta t_i = \frac{1}{g_i} \ln \left(\frac{c_i}{c_{i-1}} \frac{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2}}{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}} \right) \quad (3.66)$$

Para obter a distância horizontal total percorrida pelo sinal acústico e o intervalo de tempo correspondente, é necessário somar as distâncias Δx_i e os tempos Δt_i desde o transdutor até ao fundo,

$$x = \sum_{i=1}^n \frac{[1 - (\kappa c_{i-1})^2]^{1/2} - [1 - (\kappa c_i)^2]^{1/2}}{\kappa g_i} \quad (3.67)$$

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} \ln \left(\frac{c_i}{c_{i-1}} \frac{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2}}{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}} \right) \quad (3.68)$$

A determinação da profundidade e o seu posicionamento resultam da integração de cada uma das componentes da velocidade do impulso ao longo do tempo. O trajeto é fixo pelo ângulo inicial do feixe, utilizando o perfil atualizado da velocidade de propagação do som na água entre a profundidade do transdutor e o percurso do impulso até ao fundo ($\Delta t/2$).

Tomando um perfil de velocidade de propagação do som na água, com gradiente constante, \mathbf{g} , a profundidade é obtida através de:

$$z = \int_0^{\Delta t/2} (c_0 + \mathbf{g} \cdot \mathbf{z}) \cdot \cos(\theta) dt \quad (3.69)$$

O erro em profundidade, $d\mathbf{z}_c$, devido à variação do gradiente, $d\mathbf{g}$, e à velocidade de propagação do som à face do transdutor, dc_0 , por diferenciação da equação 3.69 pode ser aproximada por:

$$dz_c = \frac{z^2}{2c_0} (1 - \tan^2(\beta)) dg + \frac{z}{c_0} dc_0 \quad (3.70)$$

onde β e c_0 são o ângulo de lançamento do feixe e a velocidade obtida do perfil para a profundidade do transdutor. Na equação 3.70 o primeiro termo corresponde aos erros relativos à distância e à refração devido à variação do gradiente do perfil de velocidade de propagação do som na água, enquanto que o segundo termo corresponde ao erro em profundidade devido ao desvio do perfil à profundidade do transdutor. Assumindo que não existe correlação entre estes dois erros, a variância da profundidade devido aos erros na velocidade de propagação do som são dados por:

$$\sigma_{z_c_profile}^2 = \left(\frac{z^2}{2c_0} \right)^2 (1 - \tan^2(\beta))^2 \sigma_g^2 + \left(\frac{z}{c_0} \right)^2 \sigma_{c_0}^2 \quad (3.71)$$

onde σ_g^2 corresponde à variância do gradiente do perfil de velocidade de propagação do som na água e $\sigma_{c_0}^2$ corresponde à variância do valor inicial da velocidade de propagação do som na água utilizada no cálculo da profundidade.

Os erros na velocidade de propagação do som na água são, na prática, difíceis de quantificar e os problemas devido às variações temporais e espaciais da velocidade de propagação do som podem, por vezes, ser tão significativas que a solução pode passar a limitar a cobertura angular efetiva do sondador multifeixe.

Existe outra componente de erro na profundidade devido à variação da velocidade de propagação do som à face do transdutor. Esta componente introduz um erro no ângulo do feixe que, por seu lado, também se traduz em erro na profundidade medida e no seu posicionamento.

Para a estabilização do feixe é necessário introduzir atrasos em tempo nos elementos transdutores do agregado (4.2). Para calcular os atrasos é necessário conhecer a velocidade de propagação do som à face dos transdutores. Isto é usualmente conseguido através de um sensor de velocidade de propagação do som colocado junto do transdutor. Qualquer erro na velocidade de propagação do som à face do transdutor propagar-se-á como erro no ângulo do feixe (Figura 3.41).

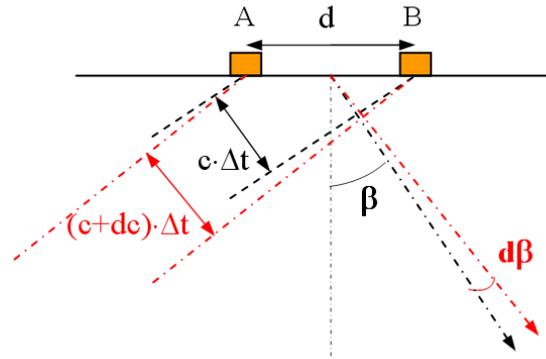


Figura 3.41 "Erro no guiamento do feixe devido à variação da velocidade de propagação do som na água "

O atraso em tempo para guiar o feixe um ângulo β é obtido por:

$$\Delta t = \frac{d}{c_0} \sin(\beta) \quad (3.72)$$

logo:

$$\beta = \text{asin}\left(\frac{c_0 \cdot \Delta t}{d}\right) \quad (3.73)$$

por diferenciação e procedendo a simplificação apropriada, obtém-se:

$$d\beta = \frac{\tan(\beta)}{c_0} dc_0 \quad (3.74)$$

O erro no guiamento do feixe propaga-se num erro em profundidade, dado por:

$$dz_\beta = -\frac{z}{c_0} \cdot \tan^2(\beta) dc_0 \quad (3.75)$$

A variância da profundidade devido ao guiamento do feixe é dada por:

$$\sigma_{z\beta}^2 = \left(\frac{z}{c_0}\right)^2 \tan^4(\beta) \sigma_{c_0}^2 \quad (3.76)$$

onde $\sigma_{c_0}^2$ corresponde à variância da velocidade de propagação do som utilizada no guiamento do feixe, usualmente obtida por um sensor colocado junto ao transdutor.

A variância estimada para a profundidade devido aos erros da velocidade é dada por:

$$\sigma_{zc}^2 = \sigma_{zc_profile}^2 + \sigma_{z\beta}^2 \quad (3.77)$$

Os erros mencionados acima podem ser detectados por inspeção visual dos dados através da curvatura anormal dos perfis (conjunto dos vários feixes).

5.2.1.8.2 Devido à atitude. A medição da profundidade depende dos erros em *pitch* e *roll*, com a seguinte contribuição:

$$dz_{\theta_R} = R \cdot \cos(\theta_P) \cdot \sin(\beta - \theta_R) d\theta_R \quad (3.78)$$

e,

$$dz_{\theta_P} = R \cdot \sin(\theta_P) \cdot \cos(\beta - \theta_R) d\theta_P \quad (3.79)$$

As respectivas variâncias da profundidade são dadas por:

$$\sigma_{z\theta_R}^2 = (Z \cdot \cos(\theta_P) \cdot \tan(\beta - \theta_R))^2 \sigma_{\theta_R}^2 \quad (3.80)$$

e,

$$\sigma_{z\theta_P}^2 = (Z \cdot \sin(\theta_P))^2 \sigma_{\theta_P}^2 \quad (3.81)$$

A variância total da profundidade devido à atitude e à arfagem da plataforma é dada por:

$$\sigma_{z\text{motion}}^2 = \sigma_{z\theta_R}^2 + \sigma_{z\theta_P}^2 + \sigma_h^2 \quad (3.82)$$

onde σ_h^2 é a variância da arfagem.

5.2.1.8.3 Devido ao calado, assentamento, *squat* e posição relativa do transdutor. A exatidão da medição da imersão do transdutor e o conhecimento do comportamento do navio em condições dinâmicas, assentamento e *squat* são fundamentais para a exatidão das medições de profundidade. Estes erros contribuem para o erro da profundidade independentemente do ângulo do feixe.

A variância da profundidade devido à imersão do transdutor, ver 5.1.4.4, é dada por:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\text{draught}}^2 + \sigma_{\text{settlement}}^2 + \sigma_{\text{squat}}^2 \quad (3.83)$$

onde $\sigma_{\text{draught}}^2$ é a variância do calado, $\sigma_{\text{settlement}}^2$ é a variância do assentamento e σ_{squat}^2 é a variância do *squat*.

5.2.1.8.4 Redução da profundidade. Este assunto já foi analisado em 5.1.4.8.

O controlo de qualidade deve ser efetuado através de cálculos estatísticos baseados na comparação entre profundidades das fiadas de verificação e superfície batimétrica gerada com as fiadas principais. A estatística gerada nesta comparação deve satisfazer os requisitos de exatidão apresentados na S-44.

De acordo com os erros apresentados acima, a variância estimada para a profundidade reduzida é dada por:

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z_c}^2 + \sigma_{h\text{motion}}^2 + \sigma_i^2 + \sigma_{\text{tide}}^2 + \sigma_{z\text{detection}}^2 \quad (3.84)$$

onde $\sigma_{z\text{ detection}}^2$ corresponde à variância da profundidade devido ao algoritmo de detecção do fundo implementado no sondador multifeixe [Lurton, 2002].

O erro estimado na profundidade reduzida, a um nível de confiança de 68 por cento (ou 1σ), é obtido pela raiz quadrada da equação 3.84. Assumindo que as componentes do erro seguem uma distribuição aproximadamente normal, o erro estimado da profundidade reduzida, a um nível de confiança de 95 por cento (ou 2σ), é obtida pela substituição cada variância σ^2 por $(2\sigma)^2$.

5.2.2. Sonares interferométricos

5.2.2.1. Os sonares interferométricos

Os sonares interferométricos utilizam a fase do sinal sonar para medir o ângulo da frente de onda refletida pelo fundo ou por um alvo. Este princípio difere do utilizado nos sistemas multifeixe que forma na recepção um conjunto de feixes e efetua a detecção do fundo para cada feixe, quer por amplitude ou fase, para determinação da profundidade ao longo da faixa sondada [Hughes Clarke, 2000].

Estes sonares têm dois ou mais agregados horizontais. Cada agregado produz um feixe com grande abertura transversal e com pequena abertura longitudinal. Um destes agregados de elementos transdutores é utilizado para a transmissão, insonificando uma área do fundo e difundindo a energia incidente em várias direções. Parte dessa energia será refletida na direção dos agregados que medem o ângulo relativamente aos transdutores.. A distância é também calculada a partir do tempo de ida e volta observado.

Existem vários métodos para a medição do ângulo. O mais simples consiste na soma dos sinais recebidos em dois agregados, resultando em franjas de amplitude do sinal ou “*fringe*” que correspondem à variação da intensidade do sinal. Se os dois agregados estiverem separados por meio comprimento de onda, existirá apenas uma *fringe*, correspondendo a direção de fase nula à perpendicular do eixo do transdutor, podendo a direção ser determinada sem ambiguidade. Se os transdutores estiverem separados por vários comprimentos de onda, o ângulo de detecção da frente de onda pode ser derivado para as direções onde a ocorrência do sinal é máxima ou mínima (Figura 3.42). No entanto, este método, quando utilizado individualmente, produz um número reduzido de medições.

5.2.2.2. Sonares de prospecção (*Forward looking sonars*)

Os sonares de abertura horizontal são utilizados na detecção de obstruções através do varrimento mecânico ou eletrônico no plano horizontal. Estes sistemas são especialmente adequados na detecção de obstruções em áreas não levantadas ou sondadas inadequadamente.

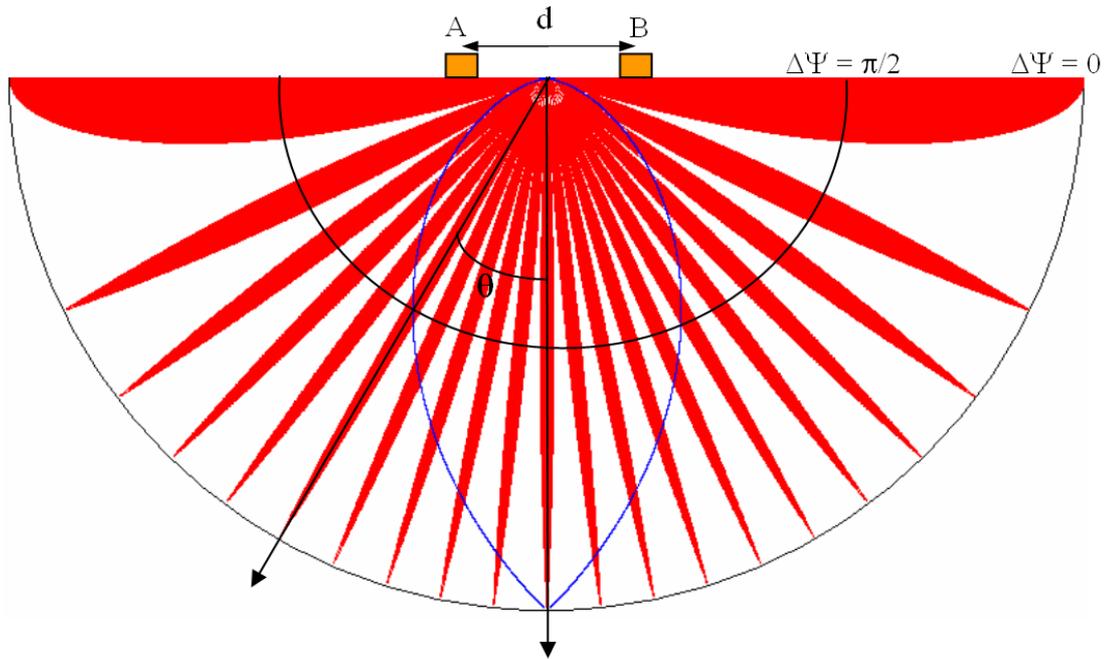


Figura 3.42 "Diagrama de radiação resultante da interferência, construtiva ou destrutiva, dos sinais recebidos em dois agregados, separados por uma distância (d) 10 vezes superior ao comprimento da onda acústica (vermelho) e a meio comprimento de onda (azul)"

6. SISTEMAS NÃO ACÚSTICOS

Além dos sistemas acústicos apresentados na secção anterior, existem alguns sistemas eletromagnéticos que podem ser utilizados na medição da profundidade, tais como os sistemas laser e de indução eletromagnética, bem como a determinação de profundidade derivada de altimetria satélite. Estes sistemas e os tradicionais métodos mecânicos para determinação da profundidade ou para rocega são descritos seguidamente.

6.1. Sistemas Laser Aerotransportados

Os sistemas laser⁴⁸ constituem uma alternativa e um complemento aos sistemas acústicos em fundos baixos [Guenther et al., 1996].

Um sistema laser é constituído por um módulo de varrimento laser, um receptor GPS e um sensor inercial de movimento (IMU).

6.1.1. Princípios de funcionamento

O sistema hidrográfico laser aerotransportado, LIDAR (*L*ight *D*etection *A*nd *R*anging), é utilizado para medição da profundidade. Este sistema emite um impulso laser em duas frequências (azul-verde e infravermelho), com um padrão em arco através do percurso de voo da plataforma. O sistema regista ambos os sinais correspondentes ao impulso de luz refletido pela superfície do mar e pelo fundo (Figura 3.43). O intervalo de tempo entre os dois retornos é convertido em profundidade.

⁴⁸ Laser é o acrónimo para *L*ight *A*mplification by *S*timulated *E*mission of *R*adiation. Basicamente o laser consiste num diodo que produz luz numa determinada frequência.

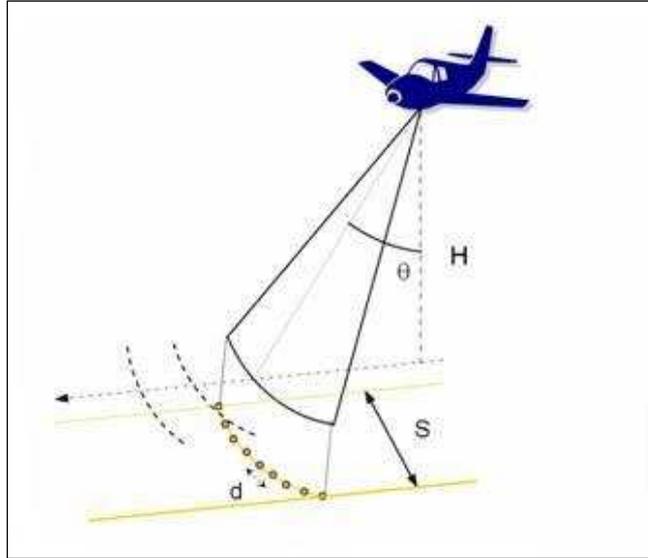


Figura 3.43 "Geometria das medições LIDAR "

A propagação da luz na água do mar, tal como a propagação da energia acústica, depende da temperatura, pressão e salinidade. A água do mar é, até certo ponto, transparente à luz. Em condições ideais, sem material em suspensão, a atenuação é uma função da absorção e da dispersão.

A transparência da água do mar às frequências das bandas do infravermelho e do visível do espectro eletromagnético é uma função da quantidade de material em suspensão. Portanto, a transparência da água⁴⁹ é uma condicionante à utilização dos sistemas de sondagem laser. A máxima profundidade de operação do Lidar é cerca de 2 a 3 vezes a profundidade do disco *Secchi*⁵⁰.

Um impulso de luz em duas frequências diferentes é transmitido na direção do mar. Parte da energia do feixe infravermelho é refletida pela superfície do mar e regressa no sentido do avião, o feixe laser azul-verde transmitido para a água é parcialmente refletido pelo fundo e é também detectado pelo sistema., A distância ao fundo do mar pode ser medida conhecendo a velocidade da luz na água e medindo o intervalo de tempo com elevada precisão. O cálculo da profundidade requer, adicionalmente, o conhecimento da geometria das medições de acordo com a lei de Snell (Figura 3.44).

$$\frac{\text{sen } \theta_a}{c_a} = \frac{\text{sen } \theta_w}{c_w} \quad (3.85)$$

onde θ_a e θ_w são os ângulos de incidência no ar e na água e c_a e c_w são as velocidades de propagação da luz no ar e na água.

⁴⁹ A transparência da água, i.e., a transmissão de luz visível através da água, pode ser quantificada pela profundidade de um disco Secchi.

⁵⁰ O disco Secchi é um instrumento simples utilizado para medir a transparência da água. Este disco de cor branca, tem aproximadamente 30 cm de diâmetro, é colocado horizontalmente na extremidade de um fio graduado em metros. O disco é arriado na água até se perder de vista, sendo essa profundidade registrada.

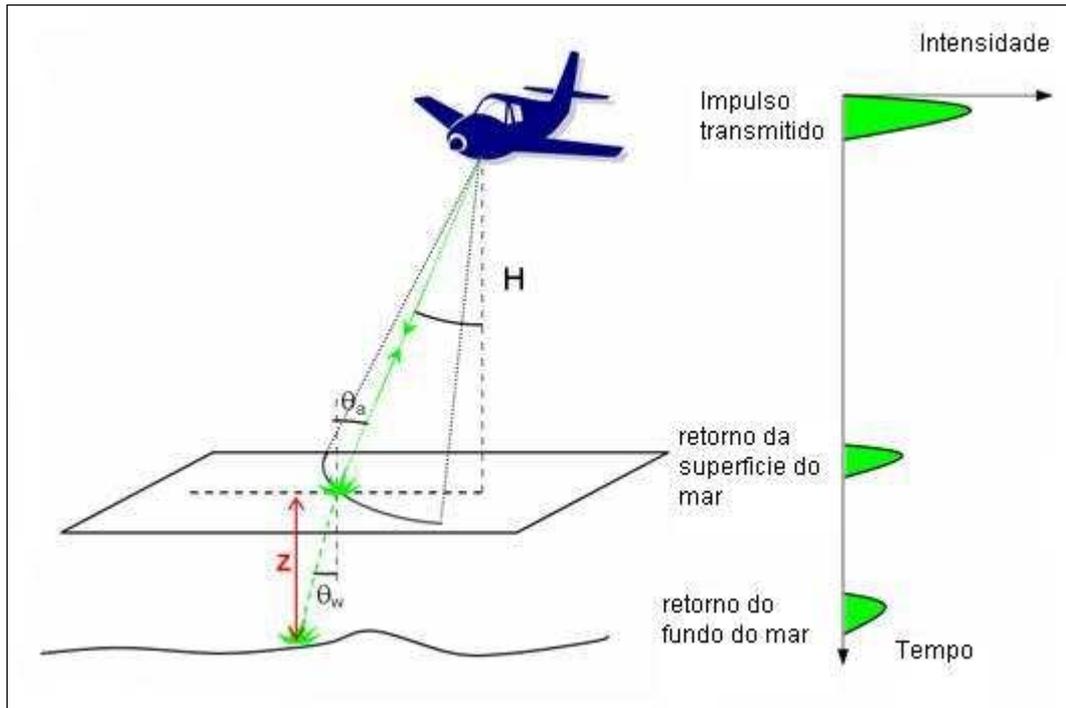


Figura 3.44 "Princípio do funcionamento Lidar"

6.1.2. Capacidades e limitações

Os sistemas laser são eficientes em águas pouco profundas devido à sua elevada produtividade [Axelsson e Alfredsson, 1999]. Esta produtividade resulta da elevada velocidade de sondagem e da largura da faixa coberta que é independente da profundidade. Por outro lado, os sondadores multifeixe são operados com velocidades reduzidas de sondagem e a faixa sondada é proporcional à profundidade da água (usualmente 3 vezes a profundidade média).

Os sistemas laser fornecem uma boa cobertura, próxima da cobertura total do fundo, em condições extrema de salinidade e temperatura, onde os sistemas acústicos apresentam um pobre desempenho.

Inquestionavelmente, a segurança é uma grande vantagem da operação com os sistemas laser, particularmente onde existem perigos submersos que possam por em risco a navegação na superfície.

Apesar das capacidades mencionadas acima, os sistemas laser são muito sensíveis ao material em suspensão e à turbidez da coluna de água. A profundidade máxima de operação, em condições ótimas, i.e. em águas muito limpas, é da ordem dos 50-70 metros.

6.2. Sistemas Eletromagnéticos Aerotransportados

Os sistemas de indução magnética aerotransportados têm sido utilizados desde há 40 anos na detecção de depósitos de minerais metálicos altamente condutivos. Os desenvolvimentos desta tecnologia têm permitido a utilização dos princípios de indução magnética no mapeamento de estruturas do fundo existentes em águas pouco profundas. Informação detalhada sobre estes sistemas pode ser encontrada em Zollinger et al. [1987] e Smith e Keating [1996].

6.2.1. Princípios de operação

Os princípios de operação destes sistemas baseiam-se nas técnicas de levantamentos geofísicos de medição da condutividade elétrica ou da espessura de uma camada de condutividade.

Um dipolo magnético de transmissão, colocado num helicóptero ou num avião de asa fixa produz um campo magnético, o campo primário, e o receptor rebocado é utilizado para detectar o campo magnético secundário induzido na terra.

Assumindo camadas horizontais, o processamento da informação no domínio do tempo ou da frequência pode ser utilizado para determinar a condutividade, σ_w , e a espessura da camada de água, i.e. a profundidade da água e condutividade, σ_s , do fundo do mar (Figura 3.45).

6.2.2. Capacidades e limitações

Estes sistemas não acústicos, devido às baixas frequências utilizadas, têm capacidade de operar sobre o gelo espesso. No entanto, este sistema está limitado à operação em profundidades inferiores a 100 metros e têm, até ao presente, sido utilizados unicamente em trabalhos de reconhecimento.

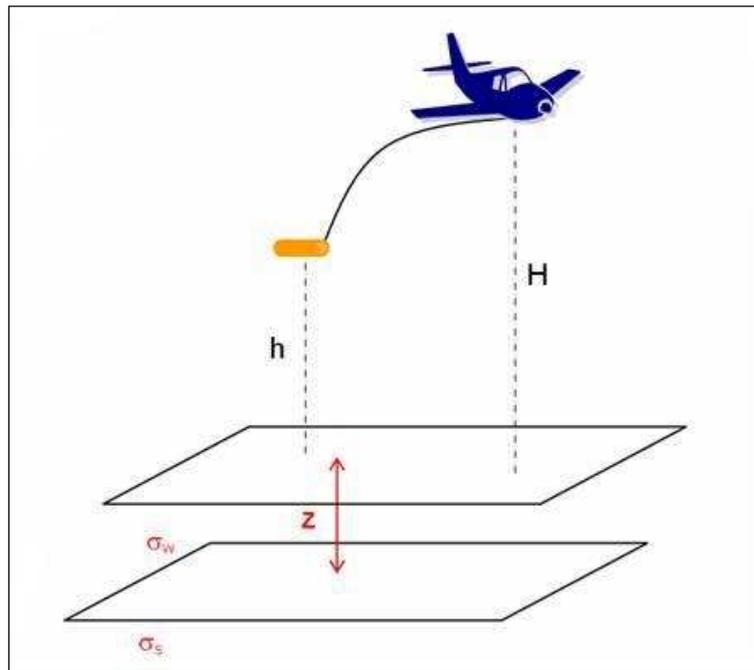


Figura 3.45 "Princípio de funcionamento do sistema eletromagnético"

6.3. Detecção remota

Esta secção apresenta a estimativa da profundidade derivada da fotografia aérea e de altimetria satélite como método adicional para a cobertura de áreas extensas.

6.3.1. Foto-batimetria

É prática corrente a utilização da fotografia aérea para delimitação da linha de costa e, algumas vezes, muito útil para atividades de reconhecimento, planeamento de levantamentos hidrográficos, localização de baixos e descrição qualitativa do fundo submarino, em vez de método para a determinação da profundidade.

6.3.1.1. Princípios de operação

Os processadores digitais de imagem têm capacidade para correlacionarem a intensidade luminosa com a profundidade. No entanto, a variação na intensidade luminosa depende também da existência de material em suspensão e das propriedades refletivas do fundo. Portanto, deve ser feita uma calibração local para ter em conta estas variações.

6.3.1.2. Capacidades e limitações

A aplicação da foto-batimetria, dentro das presentes limitações desta tecnologia, permanece principalmente como uma ferramenta de reconhecimento e de planeamento em áreas onde a informação batimétrica é inexistente ou insuficiente.

6.3.2. Outros

As imagens satélites na banda do visível podem ser utilizadas de forma idêntica à foto-batimetria aérea. No entanto, os satélites podem estar equipados com altímetros para o mapeamento da superfície dos oceanos e, com processamento adequado dos dados, é possível estimar as profundidades em todo o globo.

A superfície do oceano apresenta uma forma irregular que segue em geral a topografia do fundo do mar. As estruturas no fundo submarino, tais como os montes submarinos, contribuem para a deflexão da vertical, que causa um desnível na superfície e conseqüentemente a água do mar é puxada acumulando-se na forma de uma bolsa na superfície do mar. A superfície do oceano pode ser mapeada através de um altímetro satélite e a anomalia, i.e. a diferença entre a superfície observada e a superfície teórica, tal como a gerada pelo elipsóide WGS84, pode ser determinada e a profundidade da água estimada (Figura 3.46).

A integração da altimetria satélite com medições batimétricas pode produzir um conjunto de dados mais fiáveis, contribuindo para o conhecimento do fundo submarino em áreas onde os levantamentos hidrográficos são escassos [Smith e Sandwell, 1997].

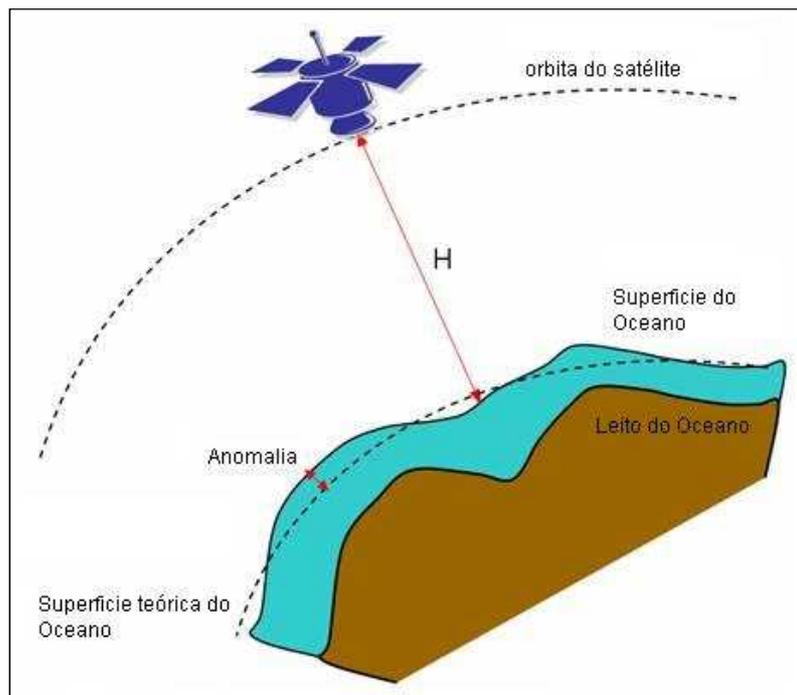


Figura 3.46 "Batimetria derivada de altimetria satélite"

6.4. Sistemas mecânicos

Os sistemas mecânicos foram os primeiros a ser utilizados na medição de profundidades. No entanto, estes sistemas continuam válidos e a ser utilizados nos nossos dias.

Os sistemas estudados até agora efetuam medições indiretas e são sensíveis às características da água. Em condições típicas, erros grosseiros na medição de profundidade têm probabilidade de ocorrer devido a reflexões na coluna de água, não relacionadas com o fundo e podem ser causados

por: algas, cardumes de peixe, *deep scattering layer*, variações térmicas e sedimentos em suspensão. Adicionalmente, podem ocorrer erros próximos de cais, onde a detecção do eco é efetuada pelos lóbulos secundários, provenientes do próprio cais.

Os métodos mecânicos (fio-de-prumo ou vara de prumar) não são sensíveis às condições ambientais e podem ser utilizados como métodos alternativos.

A rocega por barra ou por cabo são técnicas que permitem detectar profundidades mínimas sobre destroços e obstruções garantindo profundidades mínimas, por exemplo ao longo de canais de navegação.

6.4.1. Fio-de-prumo e vara de prumar

O fio-de-prumo é um instrumento utilizado pelo hidrógrafo para resolver ambiguidade de interpretação de sondas anómalas.

Em águas transparentes, o fio-de-prumo ou a vara de prumar podem ser utilizados para determinar as profundidades mínimas sobre os pontos avistados da superfície. Em outras situações, a detecção e a medição podem ser mais difíceis e os métodos de rocega podem constituir-se como alternativa.

6.4.1.1. Descrição

O fio-de-prumo é uma linha graduada, com marcas que facilitam a leitura da profundidade e com uma massa de chumbo na extremidade. O fio-de-prumo é utilizado para determinar a profundidade da água, geralmente, em profundidades inferiores a 50 metros.

Para corrigir o efeito de alongamento do fio é usualmente introduzido uma correção na medição. Este erro foi limitado pela introdução de um fio metálico sem deformação em condições normais de utilização no interior do cabo.

A vara de prumar é uma régua graduada utilizada na medição direta da profundidade. Geralmente é utilizada em profundidades inferiores a 4 metros.

Como anteriormente referido, atualmente estes instrumentos são utilizados na verificação de sondas anómalas detectadas por sistemas acústicos em fundos baixos.

6.4.1.2. Fontes de erro

As fontes de erro na medição da profundidade com o fio-de-prumo são principalmente devidas a:

- a) Curvatura do cabo induzida pela corrente, traduz-se em erro na determinação da profundidade. A sua correção pode ser problemática e, por essa razão, é recomendável realizar medições de profundidade em condições de corrente pouco significativa. Deve ser também minimizado o efeito resultante da velocidade residual da embarcação.
- b) Arfagem contribui diretamente para o erro na medição da profundidade. A arfagem dificulta também a leitura da profundidade; para ultrapassar esta dificuldade são efetuadas médias entre as medições na crista e na cava das ondas.

6.4.1.3. Operação, registo e processamento de dados

A medição direta da profundidade deve ser efetuada com a embarcação a pairar e, se possível, evitando períodos de grandes correntes. É usual, entre medições sucessivas de profundidade, manter ao fio-de-prumo na água para detectar eventuais estruturas proeminentes.

6.4.2. Rocega por barra (*bar sweep*)

A cobertura batimétrica por feixe simples restringe-se à medição de profundidade ao longo das fiadas, deixando a faixa entre fiadas sem cobertura ou informação detalhada, apesar do sonar lateral poder ser utilizado para a busca e localização de estruturas proeminentes no fundo entre as fiadas feixe simples. Para picos rochosos ou destroços, o sondador de feixe simples pode não detectar a profundidade mínima pelo eco ser demasiado fraco para ser detectado pelo sondador. Esta é a situação particular de mastros ou de peças metálicas salientes em destroços submarinos.

Para efeitos de segurança da navegação, o uso de uma rocega mecânica precisa, por barra ou por cabo, é um meio adequado para garantir uma profundidade mínima ao longo de uma área ou canal de acordo com a publicação S-44, e pode ser considerada adequada para os levantamentos de Ordem Especial e de Ordem 1.

6.4.2.1. Descrição

O varrimento é efetuado com uma barra com cerca de 5-6 metros de comprimento. As extremidades da barra devem apresentar peso adicional para evitar a tendência de elevação da barra, quando em movimento. A barra é suspensa por baixo da embarcação por cabos graduados

Este instrumento é muito simples de produzir. Testes de tentativa erro podem ser utilizados para atingir a melhor solução.

Este equipamento é muitas vezes mais eficaz e mais fácil de utilizar que a rocega por cabo.

6.4.2.2. Metodologia de operação

A barra para a rocega deve ser suspensa na horizontal por baixo da embarcação ou navio. O sistema de rocega deve estar equipado com sensores de vibração (*rockers*) ou outros sensores para registar o contacto com o fundo.

A profundidade da barra deve ser referida ao *Datum* vertical, a altura da maré deve ser registada durante a operação de rocega, sendo a profundidade devidamente reduzida.

Deve ser efetuada uma cobertura completa da área de interesse para a navegação á profundidade de segurança. Caso seja detectado uma obstrução; deve ser efetuada uma busca total do fundo na sua vizinhança para confirmar que a profundidade mínima é detectada.

6.4.3. Rocega por cabo

Como alternativa à rocega por barra, a rocega por cabo pode ser utilizada para determinar a profundidade mínima de uma obstrução quando, pela natureza geral o terreno visível, seja de suspeitar da existência de um pico rochoso ou obstrução.

Informação detalhada sobre a rocega por cabo pode ser encontrada em NOAA [1976].

6.4.3.1. Descrição

A rocega é constituída por duas pequenas portas de arrasto (idênticas às utilizadas na pesca do arrasto). Estas portas encontram-se ligadas por uma amarra com 40 a 60 metros. A rocega é efetuada por reboque deste conjunto, através de dois cabos ligados às portas de arrasto, usualmente cerca de 60 metros a ré da embarcação NOAA [1976].

REFERÊNCIAS

- Artilheiro, F. (1996) *“Analysis and Procedures of Multibeam Data Cleaning for Bathymetric Charting”* Master’s Report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton New Brunswick, Canada. US Hydrographic Conference 1999. Wiley and Sons, Toronto.
- Axelsson, R. and M. Alfredsson (1999) *“Capacity and Capability for Hydrographic Missions”* International Hydrographic Review, LXV(2), p. 25.
- Clay, C. e H. Medwin (1977) *“Acoustical Oceanography”* Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration, J.M.F. Moura and I.M.G. Lourtie Eds., pp. 329-354.
- de Moustier, C. (1988) *“State of the Art in Swath Bathymetry Survey Systems”* Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference “96, Halifax, NS, Canada, pp. 25-31.
- de Moustier, C. (1993). *“Signal Processing for Swath Bathymetry and Concurrent Seafloor Acoustic Imaging”* SPIE: Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice. 15, pp. 54-71.
- Godin, A. (1996). *“The Calibration of Shallow Water Multibeam Echo-Sounding Systems”* International Hydrographic Review (LXXII), Monaco, pp 37-69.
- Guenther, G., R. Thomas, and P. LaRocque (1996). *“Design Considerations for Achieving High Accuracy with the SHOALS Bathymetric Lidar System”* In: P. Cook and C. Carlton (eds) Continental Shelf Limits - The Scientific and Legal Interface. Oxford University Press, New York.
- Hare, R. (1995). *“Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding”* International Hydrographic Organization, Monaco.
- Hughes Clarke, J. (2000). *“Present-day Methods of Depth Measurement”* International Hydrographic Organization, Monaco.
- IHO (1994). *“Hydrographic Dictionary. Special publication No. 32, 5th edition”* Wiley and Sons, Toronto.
- IHO (2008). *“IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special publication No. 44, 5th edition”* Canadian Hydrographic Conference 2002.
- Kinsler, L., A. Frey, A. Coppens, and J. Sanders (1982). *“Fundamentals of Acoustics”* National Oceanic and Atmospheric Administration. US Department of Commerce.
- Lurton, X. (2002). *“Acoustical Measurement Accuracy Modelling for Bathymetric Sonars”* Report from Simrad Subsea AS, Horten, Norway, FEMME 93, 16 p. Pergamon Press, Oxford.
- NOAA (1976). *“Hydrographic Manual. 4th edition”* Prentice-Hall.
- Pöfner, F. (1993). *“Model for Calculation of Uncertainty in Multibeam Depth Soundings”* Geophysics, Vol. 61, No. 1, pp. 74-81.
- Pickard, G. and W. Emery (1990). *“Descriptive Physical Oceanography – An Introduction, 5th edition”* Science 277. pp. 1956-1962.
- Seippel, R. (1983). *“Transducers, Sensors and Detectors”* University of New Brunswick.
- Smith, R. and P. Keating (1996). *“The usefulness of multicomponent, time-domain airborne electromagnetic measurements”* McGraw-Hill, Toronto.
- Smith, W. and D. Sandwell (1997). *“Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Sounding”* Geophysics, Vol. 52 no. 8, pp. 1172-
- OMG (1996). *“Multibeam Sonar Surveying Training Course. Ocean Mapping Group”*
- Urlick, R. (1975). *“Principles of Underwater Acoustics.”*
- Zollinger, R., H. *“Airborne Electromagnetic Bathymetry”*

Morrison, P.
Lazenby, and A.
Becker (1987).

1137.



BIBLIOGRAFIA

- Andersen, O. and P. Knudsen (1998). "Global Gravity Field from ERS1 and GEOSAT Geodetic Mission Altimetry" *Journal Geophysics Research* 103(C4), pp. 8129-8137.
- Arabelos, D. (1997). "On the Possibility to Estimate the Bottom Topography from Marine Gravity and Satellite Altimetry Data Using Collocation" In: R. Forsberg, M. Feissel, R. Dietrich (eds) *Geodesy on the Move Gravity, Geoid, Geodynamics, and Antarctica IAG Symposia 119*, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, pp. 105-112.
- Burtch, R. (2002). "Lidar Principles and Applications" IMAGIN Conference 2002, Traverse City. Marine Geophysics Research 18, pp. 23-134. IEEE, pp. 964-967.
- Calmant, S. and N. Baudry (1996). "Modelling Bathymetry by Inverting Satellite Altimetry Data: A Review" *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 14, pp. 289–298.
- Collet, C., J. Provost, P. Rostaing, P. Pérez, and P. Bouthemy (2000). "SPOT Satellite Data Analysis for Bathymetric Mapping" *Journal Geophysics Research* 88, pp. 1563-1571.
- Denbigh, P. (1989). "Swath bathymetry: Principles of operation and an analysis of errors" *In Proceedings, ERIM Fourth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Orlando*, pp. 17-19.
- Dixon, T., M. Naraghi, M. McNutt, and S. Smith (1983). "Bathymetric Prediction from SEASAT Altimeter Data" *Marine Geodesy*, 22, pp. 157-167.
- Durey, L., G. Terrie, R. Arnone, and A. Martinez (1997). "Bottom Reflectance Maps from Hyperspectral Sensors: An Application to AAHIS Data" *NOAA Professional Paper Series, National Ocean Service. Proceedings of EARSel Symposium 2000. Dresden, Germany.*
- Geng, X. and A. Zielinski (1999). "Precise Multibeam Acoustic Bathymetry" *Proceedings 5th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, ERIM International, October 5-7, San Diego, CA, Vol. I, 47-55.*
- Guenther, G. (1985). "Airborne Laser Hydrography: System Design and Performance Factors" *SPIE: Ocean Optics XII, Vol. 2258, pp. 422-430.*
- Guenther, G., A. Cunningham, P. LaRocque, and D. Reid (2000). "Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Lidar Bathymetry" *SPIE: Laser Remote Sensing of Natural Waters from Theory to Practice, Vol. 2964, pp. 54-71.*
- Guenther, G., M. Brooks, and P. LaRocque (1998). "New Capabilities of the SHOALS Airborne Lidar Bathymeter" *Extract of Report, Simrad Subsea AS, Horten, Norway, 4 p.*
- Guenther, G., P. LaRocque, and W. Lillycrop (1994). "Multiple Surface Channels in SHOALS Airborne Lidar" *Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference "96. Halifax, NS, Canada, pp. 9-15.*
- Guenther, G., R. Thomas, and P. LaRocque (1996). "Design Considerations for Achieving High Accuracy with the SHOALS Bathymetric Lidar System" *International Hydrographic Review, Monaco, LXVI(2), pp. 119-139.*
- Hammerstad E. (1995). "Simrad EM 950/1000 - Error Model for Australian Navy" *Lecture IV-1 in Coastal Multibeam Hydrographic Surveys. United*
- Hare, R. and A. Godin (1996). "Estimating Depth and Positioning Errors for the Creed/ EM 1000 Swath Sounding System" *United*
- Herlihy, D., B. Hillard, and T. Rulon (1989). "National Oceanic and Atmospheric Administration Sea Beam System - Patch Test" *United*
- Hughes Clarke, J. (1995). "Reference Frame and Integration." *United*

- Hughes Clarke, J. (1995a). *"Interactive Bathymetry Data Cleaning"* States / Canada Hydrographic Commission Multibeam Working Group, St. Andrews, New Brunswick, Canada. Lecture X-4 from Coastal Multibeam Hydrographic Surveys. United States / Canada Hydrographic Commission Multibeam Working Group, St. Andrews, New Brunswick, Canada. 3rd edition, BSP, Oxford.
- Ingham, A. (1992). *"Hydrography for the Surveyor and Engineer"* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54. pp. 123-129.
- Irish, J. and W. Lillycrop (1999). *"Scanning Laser Mapping of the Coastal Zone: The SHOALS System"* PIANC Bulletin. 2000 (103), pp. 43-53.
- Irish, J., J. McClung, and W. Lillycrop (2000). *"Airborne Lidar Bathymetry: the SHOALS System"* Tectonophysics 210, pp. 235-253.
- Jung, W. and P. Vogt (1992). *"Predicting Bathymetry from Geosat ERM and Ship Borne Profiles in the South Atlantic Ocean"* SPIE: Laser Remote Sensing of Natural Waters from Theory to Practice, Vol. 2964, pp. 26-37. Marine Geodesy, Vol. 15, pp. 177-185.
- Lillycrop W., L. Parson, and J. Irish (1996). *"Development and Operation of the SHOALS Airborne Lidar Hydrographic Survey System"* Sea Technology, Vol. 38, No. 6, pp. 17-25.
- Lillycrop, W. and J. Banic, (1993). *"Advancements in the US Army Corps of Engineers Hydrographic Survey Capabilities: The SHOALS System"* Proceedings of the 6th Biennial National Ocean Service International Hydrographic Conference, Norfolk, VA, pp. 144-151.
- Lillycrop, W., J. Irish, and L. Parson (1997). *"SHOALS System: Three Years of Operation with Airborne Lidar Bathymetry - Experiences, Capability and Technology Advancements"* Journal of Coastal Research, Vol. 13, No. 4.
- Lillycrop, W., L. Parson, L. Estep, P. LaRocque, G. Guenther, M. Reed, and C. Truitt (1994). *"Field Test Results of the U.S. Army Corps of Engineers Airborne Lidar Hydrographic Survey System"* Proceedings of Hydrographic Symposium XVth International Hydro Conference. Monaco.
- Parson, L., W. Lillycrop, C. Klein, R. Ives, and S. Orlando (1996). *"Use of LIDAR Technology for Collecting Shallow Bathymetry of Florida Bay"* Proceedings, 5th Biennial National Ocean Service International Hydrographic Conference, Baltimore.
- Pope, R., B. Reed, G. West, and W. Lillycrop. (1997). *"Use of an Airborne Laser Depth Sounding System in a Complex Shallow-water Environment"* Proceedings 24th Joint Meeting of UNIR Sea Bottom Surveys Panel, Tokyo, Japan.
- Quinn, R., (1992), *"Coastal Base Mapping with the LARSEN Scanning Lidar System and Other Sensors"* Sea Technology, June 1998, pp. 19-25.
- Riley, J. (1995). *"Evaluating SHOALS Bathymetry Using NOAA Hydrographic Survey Data"* Hydro 99.
- Sinclair, M. (1998). *"Australians Get on Board with New Laser Airborne Depth Sounder"* Proceedings Canadian Hydrographic Conference 2000.
- Sinclair, M. (1999). *"Laser Hydrography - Commercial Survey Operations"* SPIE: Ocean Optics X, Vol. 1302, pp. 597-611.
- Smith, R. and M. Smith (2000). *"Airborne Lidar and Airborne Hyperspectral Imagery: A Fusion of Two Proven Sensors for Improved Hydrographic Surveying"*
- Thomas, R. and G. Guenther (1990). *"Water Surface Detection Strategy for an Airborne Laser Bathymeter"*

- USACE (2002). *“Hydrographic Surveying Manual”* U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington.
- Vergos, G. and M. Sideris (1998). *“On Improving the Determination of the Gravity Field by Estimating the Bottom Ocean Topography with Satellite Altimetry and Shipborne Gravity Data”* Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- Whitman, E. (1996). *“Laser Airborne Bathymetry - Lifting the Littoral”* Sea Technology, August 1996, pp. 95-98.
- Wozencraft, J. (2001). *“The Coastal Zone Revealed Through Shoals Lidar Data”* Proceedings US Hydrographic Conference 2001.
- Wright, C. and J. Brock (2002). *“EAARL: A LIDAR for Mapping Shallow Coral Reefs and Other Coastal Environments”* Seventh International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments Proceedings 2002.
- Yakima, W., Wilt M., H. Morrison, K. Lee, and N. Goldstein (1989). *“Electromagnetic Sounding in the Columbia Basin”* Geophysics, Vol. 54, No. 8, pp. 952-961.

ANEXO - REFERENCIAL E SISTEMAS DE COORDENADAS

Referencial e Sistemas de Coordenadas

A determinação de profundidade é efetuada numa plataforma em condições dinâmicas. Normalmente, é utilizado um sistema de referência (sistema de coordenadas da embarcação) com três eixos ortogonais para localizar a bordo os sensores hidrográficos e medir a atitude e arfagem da plataforma de sondagem.

A atitude da embarcação consiste em deslocamentos angulares nesses três eixos. O balanço (*roll*) transversalmente e no eixo dos xx ; o cabeceio (*pitch*) longitudinalmente e no eixo dos yy , e a proa (*yaw*) horizontalmente e no eixo dos zz .

Ao considerar um sistema de referência ortogonal de mão direita com o eixo dos zz a apontar para baixo, o balanço será positivo quando o lado de estibordo estiver mais baixo, o cabeceio será positivo quando a proa estiver para cima, e a proa será positiva no sentido de rotação dos ponteiros do relógio.

Considerando a figura A.1, a rotação θ_1 no plano yz , ou seja a rotação no eixo dos xx , pode ser expressa pela matriz de rotação:

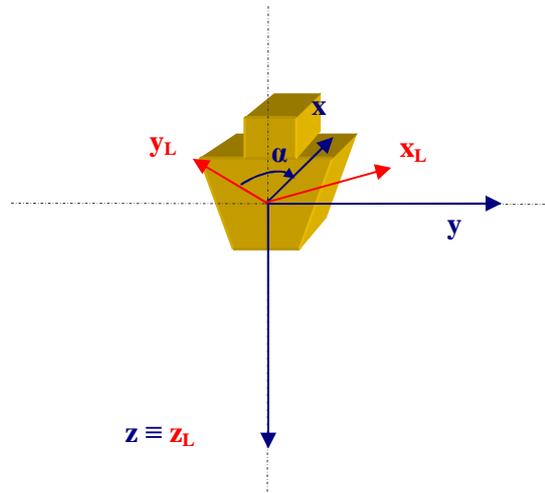


Figura A.1. “Sistema de coordenadas da embarcação”

$$R_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

E as rotações nos eixos dos yy e zz são, respectivamente:

$$R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (\text{A.2})$$

$$R_3(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.3})$$

A transformação que resulta de três rotações sequenciais é expresso pelo produto das matrizes de rotação. As rotações sucessivas são aplicadas para a esquerda deste produto.

Considerando as rotações sucessivas $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ nos eixos dos xx, yy e zz, a matriz de transformação é dada por:

$$\begin{aligned} & R_3(\theta_3) \cdot R_2(\theta_2) \cdot R_1(\theta_1) = \\ & = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3)\cos(\theta_2) & \sin(\theta_3)\cos(\theta_1) + \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)\sin(\theta_1) & \sin(\theta_3)\sin(\theta_1) - \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)\cos(\theta_1) \\ -\sin(\theta_3)\cos(\theta_2) & \cos(\theta_3)\cos(\theta_1) - \sin(\theta_3)\sin(\theta_2)\sin(\theta_1) & \cos(\theta_3)\sin(\theta_1) + \sin(\theta_3)\sin(\theta_2)\cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2)\sin(\theta_1) & \cos(\theta_2)\cos(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (\text{A.4}) \end{aligned}$$

As profundidades medidas, inicialmente referidas ao referencial da embarcação, necessitam de ser posicionadas num sistema de coordenadas local. Esse sistema local poderá ser um sistema tri-ortogonal de mão esquerda com o eixo dos xx a apontar para Leste, o eixo dos yy na direção do Norte geográfico, e o eixo dos zz a apontar para baixo.

Um feixe com um trajeto R e ângulo β (Figura A.2), numa embarcação de sondagem com *roll*, *pitch* e proa (respectivamente: $\theta_R, \theta_P, \alpha$), será transferido do sistema de coordenadas tri-ortogonal de mão direita da embarcação $(x, y, z)_V$ para o sistema de coordenadas tri-ortogonal de mão esquerda local $(x, y, z)_L$ através da rotação no eixo xx do ângulo de *roll* recíproco $(-\theta_R)$, da rotação no eixo dos yy do ângulo de *pitch* recíproco $(-\theta_P)$ e da rotação no eixo dos zz do ângulo de proa recíproco $(-\alpha)$.

E, uma vez que os dois eixos dos zz são positivos para baixo e o sistema de coordenadas local é de mão esquerda e o sistema de coordenadas da embarcação é de mão direita, é necessário também trocar as coordenadas x e y na transformação do sistema de coordenadas da embarcação para local. Isto é efetuado aplicando a matriz de rotação R_{xy} .

