

# ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire

Departamento de Ciências do Mar

Pedro André Alves do Vale Marques

*Acústica submarina:  
Desenvolvimento de modelo de previsão de propagação acústica  
global.*

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na  
especialidade de Marinha



Alfeite  
2018





# ESCOLA NAVAL

talantõe bi-faire



Pedro André Alves do Vale Marques

*Acústica submarina:*

*Desenvolvimento de modelo de previsão de propagação acústica global.*

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na  
especialidade de Marinha

**Orientação de:** CMG Carlos Lopes da Costa

O aluno mestrando,

O orientador,

---

ASPOF Vale Marques

---

CMG Lopes da Costa

**Alfeite**

**2018**



*“Muito se tem escripto sobre a organização naval, e com isso tem ganho a corporação da Armada, não só confirmando as tradições de que gosa, fazendo sobresahir o seu estudo e a boa vontade de servir o paiz, mas também por ter apresentado claramente a situação em que se encontra e do que carece, para corresponder ao fim a que a destina o paiz, perante o qual é responsável.”*

*Inimigo provável, Capitão-de-fragata Álvaro Augusto Nunes Ribeiro*



## **Dedicatória**

Dedico este trabalho a todos os futuros aspirantes e cadetes da Escola Naval. Que sejam a esperança de tempos bonanceiros e capazes de empenho abnegado e trabalho altruísta pela Marinha.



## Agradecimentos

Ao longo do meu percurso na Escola Naval, ouvi muitas vezes o seguinte: “*Ninguém consegue acabar a Escola Naval sozinho.*” Terminando o curso, vejo que nada poderia estar mais perto da verdade. Com efeito, muitas foram as pessoas dentro e fora da Marinha, sem as quais não conseguiria ter terminado este trabalho, nem terminado a Escola Naval, motivo pelo qual fico desolado quando me vejo obrigado a referir apenas algumas, neste caso as mais presentes.

Em primeiro lugar devo muito à sabedoria e conhecimento transmitidos pelo Capitão-de-mar-e-guerra Carlos Lopes da Costa e pela porta sempre aberta do seu gabinete e por vezes o meu local de trabalho. Da mesma forma, reconheço todo o apoio dado pelo Professor Mário Gatta, na revisão de conceitos teóricos, assim como o acompanhamento dado pelo 2TEN Gaspar Merca na construção do *software* em linguagem MATLAB. Por todo o auxílio operacional, sem o qual a validação do trabalho teria sido impossível, agradeço sinceramente à Esquadilha de Subsuperfície, materializada na pessoa do Capitão-tenente Ribeiro da Paz e de toda a guarnição do NRP Arpão, que abdicaram do próprio tempo durante várias missões para testar o *software* desenvolvido. Um agradecimento especial para o 1TEN Simões Soares e aos formadores do gabinete de operações antissubmarinas, que me espicaçaram a curiosidade para o tema e me motivaram a avançar com a pesquisa e possível aplicação operacional. Finalmente, não poderia desperdiçar a oportunidade de voltar a dizer aos meus pais, irmãos, amigos e camaradas de curso o quanto ajudou todo o apoio incondicional e sólido que me prestaram durante o meu percurso na Escola Naval.



## Resumo

A partir da base de dados WOD (*World Oceanographic Database*) de 2013 da NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) e das funções da *toolbox* GSW (*Gibbs-SeaWater*) encontrou-se forma, através da ferramenta de linguagem MATLAB, de calcular perfis de temperatura conservativa e salinidade absoluta ao longo da coluna de água. Dos perfis resultantes são calculados os perfis de densidade e velocidade do som. O *software* desenvolvido utiliza o perfil de velocidades do som para resolver a propagação do som em qualquer posição da base de dados WOD2013 através do método de *raytracing*.

A investigação feita na área de acústica submarina permitiu utilizar o *software* de *raytracing* e calcular as perdas de transmissão ao longo da propagação de cada raio. Sendo pedidos ao utilizador os restantes termos da equação sonar ativo ou passivo, dependendo do contexto em que é aplicada, o *software* resolve o problema da propagação e apresenta valores de alcance de deteção e de contra deteção, anexos a um gráfico de excesso de sinal em função da distância percorrida pelos raios de som.

Os valores obtidos, assim como o gráfico de excesso de sinal, pretendem ser informação válida e relevante para o planeamento e execução de operações submarinas e antissubmarinas, da perspetiva de navio de superfície como utilizador habitual de sonar ativo e da perspetiva de utilizador habitual de sonar passivo como é o caso do submarino no contexto das operações navais.

Palavras-chave: WOD2013, GSW, MATLAB, temperatura conservativa, salinidade absoluta, velocidade do som, *raytracing*, acústica submarina, equação sonar, deteção, contra deteção.



## Abstract

*From the WOD (World Oceanographic Database) 2013 by NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) as well as the GSW (Gibbs-SeaWater) toolbox's functions, a process that calculates seawater's conservative temperature and absolute salinity by depth, was developed using MATLAB's programming language. The resulting profiles are used for calculating the density and sound speed profiles. Subsequently, the developed software solves sound propagation in any position chosen from WOD2013 by the raytracing method.*

*The investigation carried out in the field of submarine acoustics allowed the manipulation of the raytracing software in calculating the transmission loss along each ray propagation. Afterwards, the user must determine, depending on the context, which sonar equation will be used. Whether passive or active, the remaining factors of the sonar equation ought to be introduced by the user to obtain predicted sonar range and counter detection range, as well as a signal excess graph, as function of the distance travelled by each sound ray.*

*The resulting values and the signal excess graph shall be relevant and useful information for planning and carrying out submarine or anti-submarine operations, while aboard a surface ship operating active sonar or as submarine's passive sonar operator.*

*Keywords: WOD2013, GSW, MATLAB, conservative temperature, absolute salinity, sound speed, raytracing, submarine acoustics, sonar equation, detection, counter detection.*



**Índice**

Epigrafe .....	i
Dedicatória.....	iii
Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract .....	ix
Lista de abreviaturas e acrónimos.....	xiv
Índice de Figuras.....	xvi
Introdução.....	1
Enquadramento geral .....	1
Âmbito, objetivos e metodologia da dissertação .....	2
Pertinência do tema .....	3
Estrutura da dissertação .....	4
Capítulo 1. Enquadramento teórico.....	7
1.1. Nível de intensidade espectral (ISL) e nível de banda (IL).....	7
1.2. Equações sonar .....	7
1.2.1. Equação sonar passivo .....	9
1.2.2. Equação sonar ativo.....	10
1.3. Nível de intensidade (SL) .....	10
1.4. Índice de diretividade (DI) .....	12
1.4.1. DI de <i>array</i> cilíndrico .....	15
1.5. Reverberação (RL) e ruído (NL) .....	16
1.5.1 Nível de reverberação (RL).....	17
1.5.2. Nível de ruído ambiente (ANL).....	22
1.5.3. Nível de ruído próprio (SN) .....	25
1.6. Perdas de transmissão (TL).....	28
1.6.1. Dispersão.....	28
1.6.2. Absorção.....	29
1.7. Refletividade do alvo (TS).....	33
1.7.1. Refletividade de esfera.....	34

---

1.7.2. Refletividade de minas, torpedos e submarinos .....	35
1.8. Limiar de detecção (DT) .....	39
1.9. Teoria de propagação por traçamento de raios .....	42
Capítulo 2. Desenvolvimento do modelo de previsão sonar .....	47
2.1. <i>Softwares</i> de previsão sonar estudados .....	48
2.1.1 <i>Lybin</i> 6.0 .....	48
2.1.2. Análise crítica do <i>Lybin</i> 6.0 .....	55
2.1.3. <i>Raypath</i> 3.0 .....	58
2.1.4. Análise crítica do <i>Raypath</i> 3.0 .....	62
2.2. FAPSO .....	64
2.2.1. Base de dados .....	65
2.2.2. Inclusão de XBT ou XSV .....	66
2.2.3. Função <i>raytrave</i> .....	68
2.2.4. Funções TEOS-10 .....	69
2.2.5. Cálculo de distâncias percorridas .....	70
2.2.6. Interações com a superfície e o fundo .....	70
2.2.7. Introdução dos termos da equação sonar .....	71
2.2.8. Métodos de cálculo de TL .....	72
2.2.9. Nível de reverberação .....	74
2.2.10. Cálculo do excesso de sinal .....	78
Capítulo 3. Discussão de resultados .....	81
3.1. Valores de teste .....	81
3.2. Comparação entre funcionalidades do FAPSO .....	84
3.2.1. Comparação de bases de dados .....	84
3.2.2. Comparação entre métodos de cálculo de TL .....	90
3.3. Comparação com outros <i>softwares</i> .....	97
3.3.1. <i>Lybin</i> 3.0 .....	98
3.3.2. <i>Raypath</i> .....	102
Conclusões .....	105
Lista de referências .....	109

Apêndice A – Resumo alargado para a 5ª Edição das Jornadas de Engenharia Hidrográfica, realizado de 19 a 21 de junho de 2018.....	111
Apêndice B – Guia para utilização e interpretação de resultados do FAPSO .....	123
Apêndice C – USB <i>drive</i> com o FAPSO e dissertação.....	133

**Lista de abreviaturas e acrónimos**

.csv	<i>comma separated values</i>
1TEN	1º Tenente
2TEN	2º Tenente
ANL	<i>Ambient-Noise Level/Nível de Ruído Ambiente</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
ASW	<i>Anti-Submarine Warfare</i>
BS	<i>Backscattering</i>
CDR	<i>CounterDetection Range/Contra deteção</i>
DI	<i>Directivity Index/Índice de Diretividade</i>
DT	<i>Detection Threshold/Limiar de Deteção</i>
EOS	<i>Equation Of Seawater</i>
FAPSO	Ferramenta de Apoio à Previsão Sonar Operacional
FOM	<i>Figure of Merit</i>
GSW	<i>Gibbs-SeaWater</i>
GUI	<i>Guided User Interface</i>
IAPSO	<i>International Association for the Physical Sciences of the Oceans</i>
IL	<i>Intensity Band Level/Nível de Intensidade de Banda</i>
IOC	<i>Intergovernmental Oceanographic Commission</i>
ISL	<i>Intensity Spectrum Level/Nível de Intensidade Espetral</i>
IUGG	<i>International Union of Geodesy and Geophysics</i>
MK8	<i>Mark 8</i>
NL	<i>Noise Level/Nível de Ruído</i>
NOAA	<i>National Oceanographic and Atmospheric Association</i>

NRP	Navio da República Portuguesa
PSR	<i>Predicted Sonar Range</i>
RL	<i>Reverberation Level</i> /Nível de Reverberação
ROC	<i>Receiver-Operating-Characteristic</i>
SA	Salinidade Absoluta
SCOR	<i>Scientific Committee on Oceanic Research</i>
SE	<i>Signal excess</i> /Excesso de Sinal
SL	<i>Source Level</i> /Nível Sonoro da Fonte
SN	<i>System Noise</i> /Nível de Ruído Próprio
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> /Relação Sinal-Ruído
SOAS	Serviço de Operações Antissubmarinas
SP	Salinidade Prática
TAS	<i>Towed Array Sonar</i>
TEOS	<i>Thermodynamic Equation Of Seawater</i>
TL	<i>Transmission Loss</i> /Perdas de Transmissão
TMA	<i>Target Motion Analysis</i>
TS	<i>Target Strength</i> /Refletividade do Alvo
WOA	<i>World Ocean Atlas</i>
WOD	<i>World Ocean Database</i>
XBT	<i>eXpendable Bathy Thermograph</i>
XSV	<i>eXpendable Sound Velocimeter</i>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> – Parâmetros da equação sonar que caracterizam o meio de propagação, o alvo e a fonte. É também indicado o método de cálculo destes parâmetros, assim como o local de referência para o cálculo.....	9
<b>Figura 2</b> – Padrão omnidirecional que caracteriza a recepção do hidrofone, colocado na origem dos eixos. $r$ corresponde ao raio da esfera ou distância do hidrofone.....	13
<b>Figura 3</b> – Capacidade de diretividade do <i>array</i> de hidrofones permite reduzir a potência do ruído.....	14
<b>Figura 4</b> – Função de padrão do feixe, onde o comprimento de onda é metade da distância entre dois hidrofones. A função varia entre 0 e 1, sendo dependente de $\theta$ . Quando $b\theta = 0$ , <i>array</i> não consegue detetar qualquer sinal. Quando $b\theta = 1$ , a probabilidade de deteção é de 100%. $b\theta BW$ equivale à imagem do ângulo de abertura do feixe, em que a probabilidade de deteção é igual ou superior a 50%. .....	15
<b>Figura 5</b> – <i>Array</i> cilíndrico composto por <i>staves</i> (colunas), <i>rings</i> (anéis).....	16
<b>Figura 6</b> – A distância a que o alvo se encontra da fonte sonora pode fazer depender a utilização do RL ou NL. Se considerado o ambiente em que o NL seja <i>Noise Level 2</i> , o alcance da deteção passa a ser $R_n$ , se considerado <i>Noise Level</i> , a deteção passa a estar limitada pela reverberação, sendo o alcance $R_r$ . .....	19
<b>Figura 7</b> – Volume elementar, $V$ e ângulo sólido elementar, $d\Omega$ , para a reverberação de volume. ....	20
<b>Figura 8</b> – Representação da área $\Psi r^2$ . A unidade do ângulo sólido é esterradiano ( $sr$ )..	21
<b>Figura 9</b> – Espectro de diversos tipos de ruídos existentes em águas profundadas e pouco profundas. Pode distinguir-se o caráter intermitente ou permanente de alguns ruídos. Reimpressão de gráfico das curvas de Wenz (1962) pela National Academy Press, Washington D.C.....	24
<b>Figura 10</b> – Fontes de ruído e a sua distribuição pelo espectro de frequências. ....	26
<b>Figura 11</b> – Regiões de dominância, por frequência e velocidade, das diferentes fontes de ruído próprio. ....	27
<b>Figura 12</b> – Possíveis trajetos percorridos pelo ruído próprio.....	28

<b>Figura 13</b> – Caracterização de diversos tipos de dispersão. Para cada dispersão é indicada a forma como varia a intensidade acústica e como deve ser calculada a intensidade resultante. ....	29
<b>Figura 14</b> – Esquema simplista da viscosidade dinâmica ( <i>shear viscosity</i> ). Este tipo de viscosidade justifica o atrito que dois filetes de fluido com velocidades diferentes geram entre si.....	30
<b>Figura 15</b> – Coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) para água destilada e água do mar.....	31
<b>Figura 16</b> – Esquema de reflexão de uma onda plana em dado alvo. TS é calculado com os valores $I_i$ e $I_r$ a um metro do centro acústico do alvo (C).....	34
<b>Figura 17</b> – Valores de TS estimados para algumas formas geométricas simples.....	36
<b>Figura 18</b> – Modelo utilizado para simplificação de cálculos de TS.....	37
<b>Figura 19</b> – Distribuição do TS em função da marcação. O TS no través é bastante superior ao TS da proa e popa.....	39
<b>Figura 20</b> – Matriz de decisão face à situação de presença ou ausência de sinal num meio ruidoso.....	40
<b>Figura 21</b> – Curvas ROC de Peterson and Birdsall para teoria de detecção de sinais, em gráfico de coordenadas de probabilidade.....	41
<b>Figura 22</b> – Arco de circunferência que une o ponto inicial ao ponto P. O raio mantém-se constante, devido ao gradiente de velocidade do som linear.....	44
<b>Figura 23</b> - Janela de edição de escala e valores para funções <i>raytrace</i> .....	49
<b>Figura 24</b> - Curvas de reverberação de superfície (a azul), de fundo (a castanho), de volume (a vermelho), total (a preto) e nível de ruído (a verde). O eixo vertical corresponde a níveis de reverberação em dB e o eixo horizontal a distância em km.....	50
<b>Figura 25</b> – O <i>Lybin</i> suporta variações em distância da velocidade de vento, dos perfis de velocidade do som e perfis e tipos de fundo.....	51
<b>Figura 26</b> – Editor de perfil da velocidade de vento (em m/s) em função da distância (em m).....	52
<b>Figura 27</b> – Editor do perfil de velocidade do som (em m/s) a partir da profundidade (em m), da temperatura (em °C) e da salinidade (em ppm). O programa necessita que o utilizador	

introduza pelo menos três dos dados oceanográficos para calcular o quarto. Por exemplo, assumindo salinidade constante e certa escala de profundidade, o <i>Lybin</i> necessita dos valores de temperatura para calcular velocidade do som.....	52
<b>Figura 28</b> – O editor de fundo permite criar um perfil de fundo de acordo com a batimetria no local. O eixo das ordenadas exprime profundidade em metros e o eixo das abcissas distância horizontal em km.....	53
<b>Figura 29</b> – O editor de tipo de fundo determina quais os tipos de fundo dominantes nos intervalos de <i>start</i> e <i>stop</i> definidos.....	53
<b>Figura 30</b> – Menu de edição do ruído próprio do navio por frequência, velocidade, azimute e profundidade.....	54
<b>Figura 31</b> – O editor do sonar permite ao utilizador introduzir dados acerca do sonar da plataforma e guardar como predefinição para operações futuras.....	55
<b>Figura 32</b> – Submenu <i>ray path parameters</i> .....	59
<b>Figura 33</b> – Submenu <i>prediction parameters</i> .....	59
<b>Figura 34</b> – Submenu <i>sonar array options</i> .....	60
<b>Figura 35</b> – Submenu <i>decimate profile options</i> . Permite alterar os fatores de escala relativos ao perfil de temperatura. ....	60
<b>Figura 36</b> – O gráfico <i>Ray plot</i> calcula o trajeto dos raios sonoros.....	61
<b>Figura 37</b> – Gráfico de excesso de sinal. O código de cores assinala intervalos de excesso de sinal de 15 dB, sendo a região cor-de-rosa igual a 0 dB.....	61
<b>Figura 38</b> – Gráfico de contra deteção. À semelhança do gráfico de excesso de sinal, a mudança de cor assinala intervalos de excesso de sinal para a contra deteção de 15 dB.....	62
<b>Figura 39</b> – O programa FAPSO possibilita definir um perfil até aos 300 metros, seja XBT ou XSV, consoante seleção “Aplicar XBT” ou “Aplicar XSV”. O perfil irá sobrepor-se aos perfis da climatologia.....	67
<b>Figura 40</b> – Perfis climatológicos da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição latitude 38,5°N, longitude 20,5°W, profundidade no local igual a 800m. ....	67
<b>Figura 41</b> – Perfis resultantes da aplicação dos valores de temperatura do perfil XBT da Figura 39 aos perfis climatológicos da Figura 40. ....	68

<b>Figura 42</b> – Menu de predefinições sonar. Se a potência, altura e diâmetro do sonar cilíndrico estiverem definidos, o programa calcula autonomamente SL e DI.....	72
<b>Figura 43</b> – O afastamento vertical de dois raios $\Delta h$ e a sua abertura angular no projetor $\Delta\theta$ permitem calcular, no ponto $P$ , o nível de perdas de transmissão. Se $\Delta h$ diminuir, dá-se convergência e conseqüente diminuição de TL, se $\Delta h$ , a situação é de divergência e TL aumenta. ....	73
<b>Figura 44</b> – Definição do valor de $b$ para o método de TL esférico-cilíndrico. ....	74
<b>Figura 45</b> – Estudo efetuado no Reino Unido com os tipos de fundo mais comuns e os seus níveis de espalhamento de retorno. ....	76
<b>Figura 46</b> – Curvas de reverberação de fundo (a vermelho), de superfície (a azul) e total (a preto), para uma área com ruído ambiente igual a 30 dB. ....	77
<b>Figura 47</b> – Gráfico de <i>raytracing</i> . A vermelho os alcances de deteção para cada raio e estimados para o intervalo entre os raios. ....	79
<b>Figura 48</b> – Gráfico de SE com gradiente de coloração igual a variações de 5 dB. ....	80
<b>Figura 49</b> – Exemplo de folha de registo após lançamento de sonda XBT T7. Esta sonda atinge uma profundidade máxima de 760 metros. Após o perfil ser construído, o supervisor sonar seleciona os pontos mais relevantes para utilizar no <i>Raypath</i> ou no <i>Lybin</i> .....	82
<b>Figura 50</b> – Sonda XBT T4 utilizada para leitura do perfil de temperatura para a amostra de valores de teste. ....	83
<b>Figura 51</b> – Perfil de temperatura em função da imersão, de acordo com o perfil da amostra de teste, introduzido no FAPSO. ....	86
<b>Figura 52</b> – Escolha da opção da base de dados e introdução dos valores para latitude e longitude.....	86
<b>Figura 53</b> – Gráficos de perfis para a opção anual, com resolução 1°. ....	87
<b>Figura 54</b> - Gráficos de perfis para a opção verão, com resolução 1°. ....	87
<b>Figura 55</b> - Gráficos de perfis para a opção junho, com resolução 1°. ....	88
<b>Figura 56</b> - Gráficos de perfis para a opção anual, com resolução 0,25°. ....	88
<b>Figura 57</b> - Gráficos de perfis para a opção verão, com resolução 0,25°. ....	89

<b>Figura 58</b> – Perfil de temperatura para a profundidade de 500 metros na posição 38,5°N e 9,5°W, com climatologia de verão. ....	90
<b>Figura 59</b> - Perfil de temperatura para a profundidade de 500 metros na posição 38,5°N e 9,5°W, com climatologia de inverno. ....	90
<b>Figura 60</b> – Introdução dos valores de teste nas caixas de parâmetros sonar, plataforma, meio e alvo. ....	91
<b>Figura 61</b> – <i>Listbox</i> para aceder às predefinições das características dos sonares da Marinha Portuguesa. Esta funcionalidade permite reduzir o tempo necessário na introdução de valores na caixa de parâmetros sonar, porém encontra-se desativada por motivos de segurança da informação. ....	92
<b>Figura 62</b> – Seleção do método de dispersão esférico-cilíndrica com $\beta = 1,4$ . ....	93
<b>Figura 63</b> – Seleção do método de afastamento vertical dos raios. ....	93
<b>Figura 64</b> – <i>Raytracing</i> com alcances de deteção assinalados a vermelho para o método de dispersão esférico-cilíndrica. ....	94
<b>Figura 65</b> – Excesso de sinal com intervalos cromáticos de 5 dB para o método de dispersão esférico-cilíndrica. ....	94
<b>Figura 66</b> – Curvas de reverberação para o método de dispersão esférico-cilíndrica. ....	95
<b>Figura 67</b> - <i>Raytracing</i> com alcances de deteção assinalados a vermelho para o método de afastamento vertical de raios. ....	95
<b>Figura 68</b> - Excesso de sinal com intervalos cromáticos de 5 dB para o método de afastamento vertical de raios. ....	96
<b>Figura 69</b> - Curvas de reverberação para o método de afastamento vertical de raios. ....	96
<b>Figura 70</b> – Caixas de parâmetros relativos ao sonar, ao meio e ao modelo, com os valores de teste inseridos. ....	99
<b>Figura 71</b> – Editor de perfil com os principais pontos do perfil de temperatura definidos. O perfil de salinidade assume-se constante ao longo da coluna de água. ....	100
<b>Figura 72</b> – Gráfico de <i>raytracing</i> e de probabilidade de deteção ativa do alvo. ....	101
<b>Figura 73</b> – Valores introduzidos no <i>Raypath</i> para teste. ....	102

**Figura 74** – Perfil XBT apresentado no *Raypath*. ..... 103

**Figura 75** – Gráfico de *raytracing* de acordo com os parâmetros definidos na Figura 73.. 103

**Figura 76** – Gráfico de excesso de sinal obtido pelo *Raypath*. ..... 104



## Introdução

### Enquadramento geral

A acústica submarina é uma área de estudo que, apesar de amplamente desenvolvida desde a primeira Guerra Mundial, teve início no século XVII com Sir Isaac Newton através do seu conhecido primeiro tratado do som. Apesar das suas semelhanças com a acústica no meio aéreo, a acústica submarina, pela maior velocidade do som no seu meio, caracteriza-se pelo estudo da propagação do som a grandes distâncias.

A alargada permanência da energia sonora na água do mar dá origem aos mais diversificados processos como reflexões no fundo submarino e à superfície, reverberações provocadas por bolhas de ar, seres vivos, entre outras suspensões, amplificação em zonas de convergência ou atenuação por divergência.

Todas estas condicionantes tornam a propagação acústica no oceano num processo bastante difícil de modelar, prever e estudar. Todavia, as tentativas de modelação acompanharam a capacidade de processamento dos computadores e, partindo de certos pressupostos que suavizam a propagação do som no meio oceânico, foram surgindo diferentes modelos assentes em diferentes teorias.

É neste contexto que é utilizado o *raytracing*. Este consiste em simplificar o estudo da propagação das ondas sonoras como se fossem raios sonoros, à semelhança da ótica geométrica. Em particular, o método de *raytracing* admite que superfícies com velocidade de propagação diferente originem o fenómeno refrativo da onda e, conseqüentemente, uma curvatura de raio constante no traçado dos raios de propagação sonora. Contudo, o *raytracing* não permite responder diretamente a questões operacionais como o alcance do sinal acústico ou a contra deteção.

As equações sonar foram formuladas durante a 2ª Guerra Mundial como forma de quantificar a performance dos sonares equipados nos navios de superfície e submarinos, possibilitando, ao mesmo tempo, o cálculo de alcances de deteção e de contra deteção em relação à plataforma inimiga. As mesmas equações sonar foram posteriormente estudadas e serão resolvidas neste trabalho de investigação, de modo a que possam, juntamente com o modelo de *raytracing*, fornecer ao utilizador uma previsão sonar no contexto das operações conduzidas no meio de subsuperfície.

## Âmbito, objetivos e metodologia da dissertação

Este trabalho foi desenvolvido na área da acústica submarina, lecionada na Escola Naval nas cadeiras de Oceanografia e Acústica, Sonar e Armas Submarinas. As unidades curriculares de Análise Matemática, Álgebra, Hidrografia constituem também áreas de conhecimento que ajudam ao enquadramento analítico do tema e compreensão dos cálculos efetuados. No decorrer da investigação foram necessários conhecimentos adquiridos nas unidades curriculares de Programação, lecionadas no primeiro ano e que auxiliaram na construção do modelo de propagação no MATLAB.

O trabalho partiu de objetivos pré-estabelecidos aquando do plano de dissertação, que se materializaram numa questão central:

*QC: Como obter uma previsão sonar em dado local do planeta a partir das equações sonar, utilizando um modelo computacional em linguagem MATLAB?*

A partir desta questão central e, como forma de a analisar de forma mais simplista, surgiram as demais questões derivadas:

*QD1: Quais os pressupostos que devem e podem ser assumidos para modelação da propagação acústica no oceano?*

*QD2: Qual o modelo que melhor se adequa aos pressupostos aceitáveis?*

*QD3: De que forma podem ser modelados os fatores da equação sonar e qual o intervalo de valores que cada um compreende?*

*QD4: Qual a base de dados a utilizar?*

*QD5: Que pode ser feito a nível da linguagem MATLAB para tornar o processo o mais ágil e flexível quanto possível?*

A dissertação recorreu ao método de investigação científica como forma de aquisição e produção de conhecimento, designadamente no teste e tentativa de validação de hipóteses, apoiado por observações e/ou experiências, que consolidem teorias científicas que sejam suficientemente explicativas e possam ser utilizadas para obter, neste caso, uma previsão sonar no oceano. Este método é o mais rigoroso e aceitável, uma vez que assenta num processo racional e que é dotado de um poder descritivo e explicativo dos factos, acontecimentos e fenómenos. Esta investigação recai essencialmente na análise de bibliografia já existente, bem como artigos científicos e modelos já realizados.

O trabalho dividiu-se em três fases, sendo que, a primeira consistiu na análise das variáveis ambientais que caracterizam a propagação acústica num dado local e confronto de modelos elaborados, estudando as equações e conceitos matemáticos que estão na sua base. A segunda fase traduziu-se na aplicação da base de dados WOD2013 e de todo conhecimento analítico para produção de um *software* em linguagem MATLAB que executasse uma previsão sonar em dada posição da base de dados sob determinadas condições meteo-oceanográficas. Por fim, a terceira e última fase compreendeu todos os testes feitos a bordo de unidades navais pelo autor da ferramenta de previsão sonar ou por outros operadores e consequente consolidação do *software*, de modo a acomodar todas as lições aprendidas nos testes.

### **Pertinência do tema**

A 2ª Guerra Mundial provocou uma profunda alteração na forma como o papel dos submarinos é visto pela Marinha de Guerra e pelo Estado de qualquer país. O investimento nos submarinos como arma estratégica de excelência provocou a evolução das suas capacidades sensoriais e de contra deteção. Enquanto os meios de superfície outrora ocupavam uma posição exclusiva para qualquer Marinha, nos dias de hoje encontram-se em desvantagem óbvia em relação aos submarinos.

A estratégia naval partilhada pelos países que fruem de Marinhas com grande capacidade, consiste, atualmente, na construção ou aquisição de submarinos mortíferos e indetetáveis, mas também no desenvolvimento da componente de deteção ativa. Consequentemente, verifica-se a evolução dos sonares que equipam os navios de superfície, assim como a capacidade de leitura e processamento das variáveis ambientais que fazem variar a propagação do som.

A Marinha Portuguesa dispõe atualmente de cinco fragatas com capacidade ASW (*Anti-submarine warfare*) pertencentes a duas classes distintas. A classe “Vasco da Gama” efetuou provas de mar em 1989 e é equipada de origem com o sonar de casco AN-SQS 510. A classe “Bartolomeu Dias” compreende duas fragatas da classe “Karel Doorman” que entraram ao serviço da Marinha Holandesa em 1991, equipadas com o sonar PHS-36. O envelope de sensores ASW, de ambas as classes, prevê o helicóptero Westland Lynx MK95 equipado com o sonar de imersão variável AN-AQS 18V e, exclusivo da classe “Bartolomeu Dias”, a capacidade de emprego de TAS (*towed array sonar*). No entanto, fruto do envelhecimento da esquadra e da insuficiência económica que alimenta o plano de

manutenções das fragatas, cuja longevidade acarreta acréscimo das despesas na sua manutenção e com os helicópteros *Lynx* a abandonar as operações ASW, devido ao seu processo de modernização, a capacidade de luta antissubmarina foi-se degradando.

No contexto de previsão sonar, o *software* que auxilia as operações ASW da Marinha completou, em 2018, vinte e dois anos podendo assumir-se, sem dúvida, algo desatualizado, comparativamente aos sistemas atuais.

É neste contexto que surge esta dissertação de mestrado, cujo objetivo é de desenvolver um *software* de previsão sonar que compita na gama mais avançada de programas *open source*, através de informação atual nesta área, complementando simultaneamente o conhecimento que a Marinha Portuguesa possui atualmente na área da acústica submarina.

### **Estrutura da dissertação**

Ao longo do processo de investigação e de desenvolvimento do trabalho surgiu a necessidade de alterar a estrutura proposta inicialmente no plano de dissertação de mestrado. Na verdade, as expectativas iniciais foram sendo alcançadas e as ilações resultantes justificaram a adição de novos tópicos ao documento e, por sua vez, tornaram outros pouco relevantes, sendo, portanto, removidos. A divisão do trabalho pelos capítulos atuais permite também, a quem lê, compreender melhor a evolução do trabalho, visto que a ordem dos capítulos é semelhante à forma como evoluiu a investigação.

Antes do primeiro capítulo é introduzido o tema de forma generalista, sendo igualmente explanados o âmbito, objetivos a atingir, a metodologia utilizada, pertinência e estrutura do trabalho. É na metodologia que se encontram definidas as questões derivadas e a questão central. Na pertinência do tema encontra-se um conjunto de fatores e acontecimentos que motivaram a escolha do tema, sendo, na sua maioria, características e condições da Marinha Portuguesa, que foi o meio onde a investigação foi conduzida e o trabalho desenvolvido.

No Capítulo 1 encontra-se um enquadramento sumário e explicativo de todos os fatores da equação sonar que são tidos em conta neste trabalho, assim como da teoria de propagação do som designada de *raytracing*, que é a aproximação adotada, onde se considera raios sonoros em vez de ondas sonoras. Uma explicação individual de cada termo é apresentada com base na bibliografia apresentada no final do documento, sendo possível,

em alguns casos, encontrar diferentes teorias, de diferentes autores, devido às diversas possibilidades de atingir o mesmo resultado de previsão.

O segundo capítulo divide-se nas diversas fases do desenvolvimento de uma ferramenta de previsão sonar, que, naturalmente, tem início na análise das características de outros *softwares* similares, o *Lybin* e o *Raypath*. De seguida, uma segunda análise tece um conjunto de críticas e retém todas as potencialidades e fragilidades dos *softwares*. Finalmente, é discutido o modelo desenvolvido, o FAPSO, sendo justificados os métodos de cálculo utilizados e a teoria por trás das funcionalidades do programa.

No terceiro e último capítulo são discutidos alguns dos resultados obtidos pelo programa, ao mudar os valores introduzidos e feita uma comparação de resultados entre o FAPSO, o *Lybin* e o *Raypath*.

Finalmente, são dadas respostas às perguntas que motivaram a investigação e colocados em apêndice, o resumo alargado do trabalho para as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, um manual de utilização do *software* desenvolvido e uma USB *drive* que contém o FAPSO e cópia do trabalho de dissertação.



## Capítulo 1. Enquadramento teórico

### 1.1. Nível de intensidade espectral (ISL) e nível de banda (IL)

A capacidade de audição do ser humano permite-lhe detetar e identificar uma grande variedade de sons, distintos entre si, pela sua diferente distribuição da intensidade sonora por frequência. Aliás, apenas os tons são sinais acústicos de uma única frequência, pelo que são os menos comuns no ambiente subaquático.

Em acústica, o nível de intensidade espectral é definido como a distribuição da intensidade sonora em decibel numa banda de 1Hz. A densidade espectral de intensidade corresponde à variação de intensidade por variação na gama de frequências, ou seja,  $\alpha l = \frac{\Delta I}{\Delta f}$ . Consequentemente,  $ISL = 10 \log \frac{\alpha l \times 1Hz}{I_{ref}}$  (Varela, 2001, p. 2.17). Para a acústica da água a intensidade de referência é  $I_{ref} = 6.67 \times 10^{-19} \frac{W}{m^2}$  (Urlick, 1983, p. 14) e no caso de propagação no meio aéreo,  $I_{ref} = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$  (Nave, n.d.). Pode-se, no entanto, querer analisar o espectro de intensidade numa banda de frequências diferente de 1Hz, ou seja, o seu nível de banda, IL. Este relaciona-se com o ISL, desde que a banda não seja muito larga, da seguinte forma  $IL = 10 \log W$  (Varela, 2001, p. 2.18), sendo  $W$  a largura da banda. Esta relação é bastante importante e utilizada em análise de fontes de ruído. Deve sempre ter-se em conta que apenas é possível somar duas fontes de ruído relativas à mesma banda.

### 1.2. Equações sonar

Segundo Urlick (1983, p. 17), as equações sonar foram criadas depois da 2ª Guerra Mundial com o intuito de facilitar a compreensão dos diversos fatores presentes na deteção de um alvo no mar e o modo como aqueles interagem entre si. Estas equações não só facilitavam os cálculos da previsão sonar, como auxiliavam os técnicos que se ocupavam do desenho e produção de equipamentos sonar.

Devido à relação logarítmica que os fatores das equações assumem, todas as operações necessárias são reduzidas a somas e subtrações. No entanto, deve ser tido em conta que os oceanos, por serem sujeitos a diversos processos físicos e químicos que variam ao longo da sua extensão, são um meio de propagação onde o cálculo preciso da previsão sonar é difícil de obter. Portanto, exprimir estes processos físicos complexos, através de

quantidades relativas e simples, poderá ser a melhor aproximação, para o curto espaço de tempo que caracteriza a atividade operacional.

As equações sonar relacionam termos determinados pelo meio, alvo e equipamento (Figura 1). Sendo os primeiros: perdas de transmissão (TL, na sigla em inglês), nível de reverberação (RL, na sigla em inglês) e nível de ruído ambiente (ANL, na sigla em inglês); os segundos: refletividade do alvo (TS, na sigla em inglês) e nível sonoro do alvo (SL, na sigla em inglês); os terceiros: nível sonoro do projetor (SL, na sigla em inglês)<sup>1</sup>, nível de ruído próprio (SN, na sigla em inglês), índice de diretividade (DI, na sigla em inglês) do recetor<sup>2</sup> e limiar de deteção (DT, na sigla em inglês). Defina-se excesso de sinal (SE, na sigla em inglês) como a diferença entre a intensidade do eco e a intensidade mínima necessária para uma probabilidade de deteção de 50%. Defina-se o nível de ruído (NL, na sigla em inglês) como a soma resultante do ruído ambiente e ruído próprio,  $NL = ANL + SN$ .

---

<sup>1</sup> A utilização de SL do alvo ou SL do projetor depende do tipo de deteção, passiva ou ativa respetivamente.

<sup>2</sup> O DI do projetor não é referido pois é normalmente inserido no SL, sendo este a intensidade direcional do projetor.

Símbolo do parâmetro		Referência	Definição
<i>Source level</i>	S L	1m da fonte no seu eixo acústico	$10 \log \frac{\textit{intensidade da fonte a 1 m}}{\textit{intensidad de referência}}$
<i>Transmission loss</i>	T L	1m da fonte e no alvo ou recetor	$10 \log \frac{\textit{intensidade do sinal a 1m da fonte}}{\textit{intensidade do sinal no alvo}}$
<i>Target strength</i>	T S	1m do centro acústico do alvo	$10 \log \frac{\textit{intensidade do eco a 1m do alvo}}{\textit{intensidade do sinal incidente}}$
<i>Noise level</i>	N L	Na localização do hidrofone	$10 \log \frac{\textit{intensidade do ruído}}{\textit{intensidade de referência}}$
<i>Receiving directivity index</i>	D I	Nos terminais do hidrofone	$10 \log \frac{\textit{ruído recebido por hidrofone omnidireccional equivalente}}{\textit{ruído recebido pelo hidrofone}}$
<i>Reverberation level</i>	R L	Nos terminais do hidrofone	$10 \log \frac{\textit{potência da reverberação nos terminais do hidrofone}}{\textit{potência relativa à intensidade de referência}}$
<i>Detection threshold</i>	D T	Nos terminais do hidrofone	$10 \log \frac{\textit{potência do sinal para permitir deteção}}{\textit{potência do ruído nos terminais do hidrofone}}$

**Figura 1** – Parâmetros da equação sonar que caracterizam o meio de propagação, o alvo e a fonte. É também indicado o método de cálculo destes parâmetros, assim como o local de referência para o cálculo.<sup>3</sup>

### 1.2.1. Equação sonar passivo

$$SE = SL - TL - NL + DI - DT$$

A razão da equação sonar passivo ser a primeira abordada é por ser, de facto, a mais simples. O objetivo de um sistema de deteção passivo é detetar, classificar e atribuir localização a um alvo, sendo, portanto, SL dependente do alvo, TL e NL dependente das condições do meio, e DI, SN e DT dependentes dos componentes do sonar passivo.

<sup>3</sup> Adaptado de Urick (1983).

### 1.2.2. Equação sonar ativo

$$SE = 2TL + TS - NL + DI - DT$$

A equação sonar ativo difere da anterior, visto que SL é função do equipamento da plataforma que procura detecção e, desta forma, tendo o som que se deslocar até ao alvo e voltar após reflexão neste, surgem o 2TL e TS. Estes fatores justificam o duplo caminho que o som tem de percorrer, assim como a dependência da refletividade que a superfície do alvo apresenta.

Existem, no entanto, outras formas de expressar as relações entre os fatores da equação sonar. A Figura de mérito  $FOM = SL + TS - (NL - DI + DT)$  é uma das combinações mais utilizadas e permite avaliar o desempenho de um sonar e atribuir uma distância máxima de detecção, quando igualada a TL, ou, no caso do sonar ativo, quando igualada a 2 TL, sendo  $TS = 0$  dB.

### 1.3. Nível de intensidade (SL)

O termo SL encontra-se presente em ambas as equações sonar passivo e ativo, devido a ser referente a um nível de intensidade sonora resultante do ruído irradiado do alvo e da emissão acústica do projetor sonar, respetivamente.

No contexto de ruído irradiado, esta designação é apenas atribuída a plataformas como navios, submarinos ou torpedos, devido à diversidade de fontes de ruído que as mesmas apresentam. Estas fontes de ruído irradiado coincidem com as fontes de ruído próprio, mudando apenas a perspectiva de análise do ruído produzido.

O ruído próprio entra na equação sonar ativo e corresponde à componente do ruído produzido pela plataforma que afeta a receção do eco<sup>4</sup>, tendo em conta a diretividade do hidrofone.

Em contrapartida, o ruído irradiado é equivalente ao SL do alvo na equação sonar passivo. Para a equação sonar passivo, parte-se do pressuposto que o ruído total produzido pelo alvo é irradiado de forma isotrópica e sofre perdas de propagação até atingir o hidrofone.

---

<sup>4</sup> Sinal acústico após reflexão no alvo.

Na equação sonar ativo, o SL refere-se ao nível sonoro medido a um metro do centro acústico do projetor, na direção do alvo (Urlick, 1983, p. 71). O SL pode exprimir também uma relação entre a intensidade da fonte sonora omnidirecional e a intensidade de referência (Waite, 2002, p. 4).

$$SL = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

No entanto, um projetor é normalmente caracterizado pela sua potência acústica omnidirecional,  $P$ , em *watts*. Se a fonte é omnidirecional, então área intersectada pela onda sonora é igual a  $4\pi r^2$ <sup>5</sup>. Usando a distância de referência,  $r = 1 \text{ m}$ ,

$$SL = 10 \log \frac{P/4\pi}{6,67 \times 10^{-19}} = 10 \log P + 10 \log 1,1846 \times 10^{17} = 10 \log P + 170,8 \text{ dB}$$

(Waite, 2002, p. 4)

Os projetores são, por norma, dotados de diretividade de transmissão (*transmission directivity index* ou  $DI_T$ , do qual resulta um ganho relativo à emissão omnidirecional (Hodges, 2010, p. 64).

$$DI_T = 10 \log \frac{\Omega_T}{4\pi} \text{ dB}$$

Sendo  $\Omega_T$ , o ângulo sólido sonorizado, em relação à componente omnidirecional,  $4\pi$ . Como resultado, o SL de um projetor com diretividade de transmissão obtém-se da seguinte forma:

$$SL = 10 \log P + 170,8 + DI_T \text{ dB}$$

O funcionamento do projetor com potências demasiado elevadas pode aumentar a pressão acústica na superfície do projetor e dar origem a cavitação<sup>6</sup>. Posteriormente, as bolhas de ar formadas podem provocar reverberação e atenuação do sinal, pelo que é importante ter conhecimento do limiar de cavitação do projetor (Hodges, 2010, pp. 64-65), de modo a ajustar a potência de operação do equipamento.

---

<sup>5</sup>  $r$  é a distância ao centro acústico da fonte sonora.

<sup>6</sup> Designação dada ao processo que origina zonas de alta e baixa pressão na extremidade da superfície das pás do hélice. A dado ponto, é possível libertação de bolhas que, ao implodirem, emitem um ruído de alta frequência, que caracteriza o ruído provocado pelos hélices. (Urlick, 1983, pp. 357-359). O mesmo processo é induzido na superfície do domo sonar designando-se por cavitação do projetor.

Segundo Hodges (2010, p. 66), o limiar da cavitação depende não só da potência ( $P$ ), mas também da profundidade ( $z$ ), comprimento do impulso ( $\tau$ ) e frequência ( $f$ ), pelo que a expressão geral que integra os três fatores é a seguinte:

$$I_{limiar} = 4000 \left(1 + \frac{z}{33}\right)^2 (1 + 0,15f + 0,000107^{2,4})^2 \left(1 + \frac{1}{\tau}\right) \quad W/m^2$$

$$P_{limiar} = 10 \log \frac{I_{limiar}}{I_0} \text{ dB}$$

#### 1.4. Índice de diretividade (DI)

No subcapítulo anterior, verificou-se que ao direcionar um feixe acústico se potencia a deteção em relação à fonte omnidirecional equivalente, devido à diminuição da área intersetada pela energia acústica e consequente diminuição da perda de potência. À semelhança do índice de diretividade de transmissão, pode caracterizar-se o índice de diretividade de receção.

Para o efeito, considere-se um meio sonorizado de forma isotrópica por ruído, no qual se propaga uma onda plana ou sinal. O objetivo do equipamento sonar será, portanto, detetar o sinal no meio ruidoso e localizar a fonte do sinal. Será tanto mais eficaz, quanto a sua capacidade de aumentar a relação sinal-ruído (SNR)<sup>7</sup>. Um único hidrofone é um recetor omnidirecional (Figura 2), desta forma incapaz de atribuir direção à fonte do sinal, mesmo que o detete. Admita-se então que a potência do ruído recebido por um hidrofone é:

$$P_{ruído} = 4\pi r^2 I_i$$

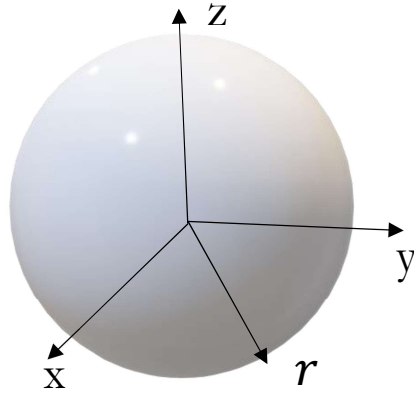
Em que,

$r = \text{distância do local de medição ao hidrofone}$

$I_i = \text{intensidade do ruído no hidrofone}$

---

<sup>7</sup> SNR ou *signal-to-noise ratio* relaciona a potência do sinal e do ruído.  $SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}}$  ou  $SNR = 10 \log \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} \text{ dB}$



**Figura 2** – Padrão omnidirecional que caracteriza a recepção do hidrofone, colocado na origem dos eixos.  $r$  corresponde ao raio da esfera ou distância do hidrofone.

Quando se efetua uma associação de múltiplos hidrofones, a estrutura resultante designa-se *array*. Os *arrays* permitem ao sistema de recepção direcional (Figura 3) reduzir a potência do ruído recebido, que, segundo Tucholski (2006, p. 14.1) passa a:

$$P_{ruído} = \int \int I_i b(\theta, \phi) dA$$

Em que  $dA = r^2 \cos\theta d\theta d\phi$  e  $b(\theta, \phi)$  é a função que define o padrão do feixe.

A integração é feita entre 0 a  $2\pi$  para  $\theta$  e entre  $-\frac{\pi}{2}$  e  $\frac{\pi}{2}$  para  $\phi$ ,

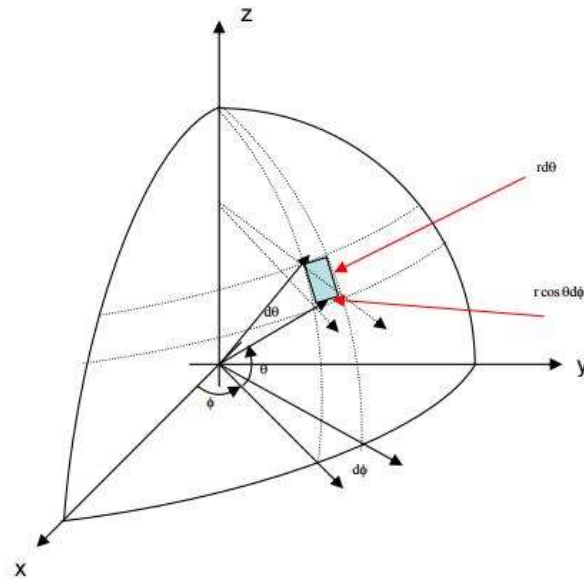
$$P_{ruído} = I_i r^2 \int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} b(\theta, \phi) \cos\theta d\theta d\phi$$

Como a função  $b(\theta, \phi)$  é independente de  $\phi$  e  $b(\theta, \phi) = b(\theta)$  é par, a expressão pode ser simplificada (Tucholski, 2006, p. 14.2):

$$P_{ruído} = I_i r^2 \int_0^{2\pi} d\phi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} b(\theta) \cos\theta d\theta$$

$$P_{ruído} = 2\pi I_i r^2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} b(\theta) \cos\theta d\theta$$

$$P_{ruído} = 4\pi I_i r^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} b(\theta) \cos\theta d\theta$$



**Figura 3** – Capacidade de diretividade do *array* de hidrofones permite reduzir a potência do ruído.

Como referido anteriormente, o DI procura maximizar a relação sinal-ruído, através da diminuição da área de interseção do feixe recetor do *array*, pelo que pode ser exprimido em *dB* como a relação entre o ruído captado pelo hidrofone omnidirecional e o ruído efetivamente captado pelo *array* de hidrofones (Tucholski, 2006, p. 14.3).

$$DI = 10 \log \frac{NL_{omni}}{NL_{array}}$$

Substituindo os NL (*noise level* ou nível de ruído) pela potência de ruído recebido, fica

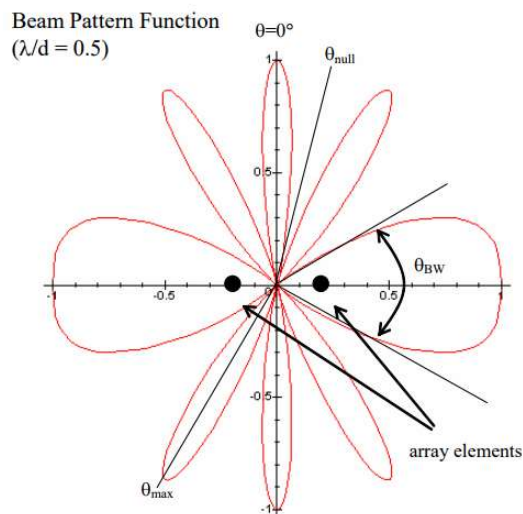
$$DI = 10 \log \frac{4\pi r^2 I_i}{4\pi I_i r^2 \int_0^{\pi} b(\theta) \cos \theta d\theta}$$

$$DI = 10 \log \frac{1}{\int_0^{\pi} b(\theta) \cos \theta d\theta}$$

A definição do índice de diretividade passa pela estimativa de qual o padrão de feixe do *array* ( $b(\theta)$ ) que deve ser utilizado. A expressão geral desta função para duas dimensões é definida por Tucholski (2006, p. 14.3) da seguinte forma:

$$b(\theta) = \left[ \cos^2 \left( \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \right]$$

A função do padrão do feixe depende da distância entre os hidrofones ( $d$ ), do ângulo vertical ( $\theta$ ) como referido na Figura 3 e do comprimento de onda equivalente à frequência central da banda seleccionada para receção. A função varia entre zero e um, dependendo do ângulo  $\theta$  (Figura 4).

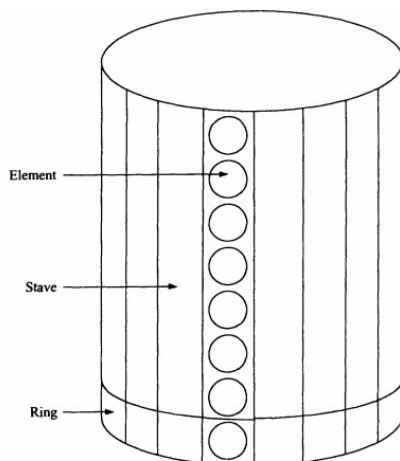


**Figura 4** – Função de padrão do feixe, onde o comprimento de onda é metade da distância entre dois hidrofones. A função varia entre 0 e 1, sendo dependente de  $\theta$ . Quando  $b(\theta) = 0$ , *array* não consegue detetar qualquer sinal. Quando  $b(\theta) = 1$ , a probabilidade de deteção é de 100%.  $b(\theta_{BW})$  equivale à imagem do ângulo de abertura do feixe, em que a probabilidade de deteção é igual ou superior a 50%.<sup>8</sup>

#### 1.4.1. DI de *array* cilíndrico

Os sonares atuais são compostos por dezenas de hidrofones colocados de forma a maximizar a capacidade de deteção de um sinal num ambiente dominado pelo ruído de fundo. As estruturas mais comuns são cilindros ou esferas, pelo que serão abordadas as primeiras (Figura 5), de forma a auxiliar o cálculo realista, porém aproximado, do DI dos sonares que atualmente equipam os navios.

<sup>8</sup> Retirado de Tucholski (2006, p. 190).



**Figura 5** – *Array* cilíndrico composto por *staves* (colunas), *rings* (anéis).<sup>9</sup>

Segundo Waite (2002, pp. 34-35), a equação da função de padrão de feixe pode simplificar-se para:

$$DI = 10 \log(5 h d f_0^2)$$

$h$  - Altura do cilindro em metros

$d$  - Diâmetro do cilindro em metros

$f_0$  - Frequência do sonar em kHz

### 1.5. Reverberação (RL) e ruído (NL)

A deteção, classificação e localização de um sinal acústico baseia-se sempre no SNR, de modo que a intensidade do sinal tem de conseguir ultrapassar o nível de ruído<sup>10</sup> do meio que rodeia os terminais do hidrofone. No caso da equação sonar passivo, só se considera o ANL e SN. Não obstante, quando nos referimos a um sonar ativo, deve ser avaliado o ambiente que rodeia o projetor. Se o sinal emitido se extinguir primeiramente devido ao NL, a relação mantém-se:

$$SE = SL - 2TL + TS - NL + DI$$

<sup>9</sup> Retirado de Waite (2002), pp. 34.

<sup>10</sup> Note-se que este ruído é o conjunto de todos os ecos que não sejam oriundos do alvo e não o ruído ambiente e próprio (*noise level* ou NL).

No entanto, caso o nível de reverberação ultrapasse este NL, o que normalmente se verifica a curtas distâncias do projetor devido ao nível de reverberação de volume, a equação assume a seguinte forma:

$$SE = 2TL + TS - RL - D$$

### 1.5.1 Nível de reverberação (RL)

Ao contrário do ruído, a reverberação apenas entra nos cálculos do sonar ativo. Visto que este sistema procura detecção através da receção do sinal emitido, após este ser refletido pela superfície do alvo, devem ser tidas em conta as possíveis reflexões por outros corpos que não o alvo desejado.

Designe-se, portanto, de espalhador qualquer obstáculo de dimensão inferior ao comprimento de onda do sinal acústico emitido, enquanto que o alvo corresponde ao obstáculo de maiores dimensões relativamente ao comprimento de onda. Os espalhadores interagem com a onda acústica, intercetando-a e reemitindo-a. A soma de toda a energia acústica que é reemitida pelos espalhadores (espalhamento)<sup>11</sup> corresponde ao nível de reverberação (Urlick, 1983, p. 237).

Existem dois tipos de reverberação: a de superfície e a de volume. No mar, a reverberação de superfície ocorre na fronteira entre a água e o ar e na fronteira entre água e solo submarino. A reverberação de volume é provocada pela vida marinha e partículas em suspensão no meio aquático.

Norma geral,

$$RL = 10 \log \frac{I_{RL}}{I_{ref}} \text{ (Figura 1)}$$

No entanto, verificar-se-á que o cálculo da reverberação é dotado de grande complexidade, dependendo de vários fatores, sendo que para diferentes situações, deverão ser adotados modelos e equações distintos. Urlick (1983, p. 240) considera que devem ser assumidas cinco condições, por forma a tornar possível avançar com uma expressão generalista para o RL. Deve ser, portanto, assumida:

1. Propagação retilínea, apenas com perdas de transmissão por dispersão esférica;

---

<sup>11</sup> O espalhamento corresponde à reemissão ou difusão aleatória do sinal por parte de um espalhador.

2. Distribuição homogénea dos espalhadores ao longo da área ou volume de reverberação e sem variação temporal;
3. Área  $dA$  ou volume  $dV$  elementares de reverberação, onde será estudado o fenómeno;
4. *Pulse length* suficientemente pequeno, de forma a desprezar qualquer propagação pelo meio de reverberação;
5. Reverberação múltipla desprezável, ou seja, reverberação que seja provocada pela onda sonora que resulte de anterior reverberação.

O mesmo autor define o RL resultante destas cinco condições como “*equivalent plane-wave reverberation level*”, sendo este o valor por ele considerado na equação sonar.

Como referido anteriormente, o fenómeno da reverberação é um processo similar à deteção de um alvo. Da mesma forma, a expressão da reverberação de volume e de área são semelhantes à expressão do *echo level* ou nível da intensidade do eco.

$$RL_v = SL - 40 \log r + S_v + 10 \log V$$

$$RL_s = SL - 40 \log r + S_s + 10 \log A$$

$$V = \frac{c\tau}{2} \Psi r^2$$

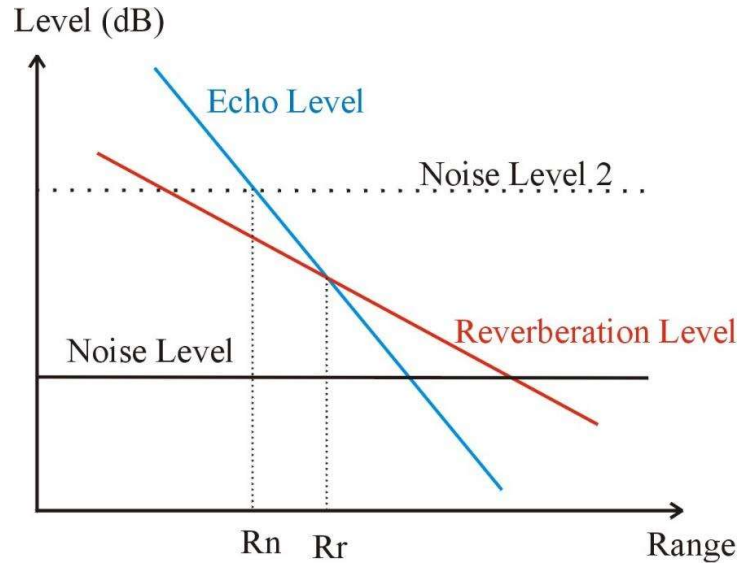
$$A = \frac{c\tau}{2} \Phi r \quad (\text{Urick, 1983, pp. 242 e 245})$$

Em ambas as equações, de volume e superfície, pode-se verificar o fator  $40 \log r$ , que representa as perdas de transmissão no trajeto sonar-espalhador e espalhador-sonar por dispersão esférica<sup>12</sup>, sendo  $r$  a distância em jardas do espalhador. Visto que o sonar procura iluminar o alvo e não o espalhador, a distância  $r$  pode ser determinada através da expressão  $r = \frac{ct}{2}$ , em que  $t$  corresponde ao tempo entre a emissão e receção e  $c$ , a velocidade do som. Da mesma forma, o SL está presente em ambas, visto que o RL é de facto função do nível sonoro emitido, pois quanto maior o SL, maior será o RL. Poderá ainda assumir-se que quanto mais longe da fonte sonora, menor o RL. Como referido anteriormente, o operador sonar deve ter em consideração qual o fator a utilizar, reverberação ou ruído, sendo, neste contexto, a distância do alvo de extrema importância. A distâncias reduzidas sabe-se que

---

<sup>12</sup> A escolha da dispersão esférica resulta do primeiro pressuposto de Urick (1983, p. 240) para o cálculo do RL.

maior o RL, no entanto, após a onda sonora se propagar durante um período de tempo, o nível de ruído pode ultrapassar o nível de reverberação e passar a ser ele o limitador da detecção (Figura 6).



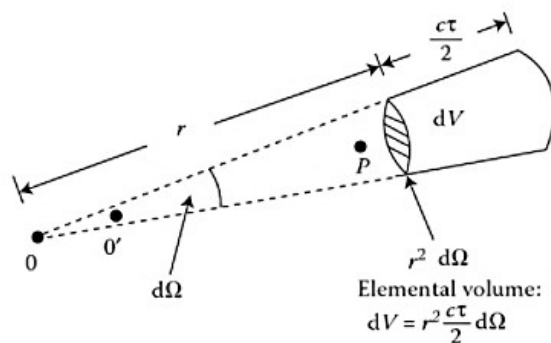
**Figura 6** – A distância a que o alvo se encontra da fonte sonora pode fazer depender a utilização do RL ou NL. Se considerado o ambiente em que o NL seja *Noise Level 2*, o alcance da detecção passa a ser  $R_n$ , se considerado *Noise Level*, a detecção passa a estar limitada pela reverberação, sendo o alcance  $R_r$ .<sup>13</sup>

Abordados os fatores das expressões dos dois tipos de reverberação, explicar-se-á primeiramente o  $S_{s,v}$ . O  $S_v$  e  $S_s$  são designados por Urick (1983, pp. 238-239) como parâmetros de intensidade de espalhamento (traduzido de *scattering strength*). Estes parâmetros exprimem a relação existente entre a intensidade sonora após interação com o espalhador, medida a uma jarda do obstáculo e na direção da fonte emissora e a intensidade sonora incidente, também a uma jarda do obstáculo, ou seja  $S_{v,s} = 10 \log \frac{I_{scat}}{I_{inc}}$ .

Para o caso da reverberação de volume, considera-se  $V = \frac{c\tau}{2} \psi r^2$ , em que  $\frac{c\tau}{2}$  representa a espessura do espalhador<sup>14</sup> e  $r^2$ , a área da face perpendicular ao raio sonoro (Figura 7).

<sup>13</sup> Adaptado de Urick (1983, p. 24).

<sup>14</sup> Na expressão  $\frac{c\tau}{2}$ ,  $\tau$  corresponde à duração do impulso sonoro e  $c$  corresponde à velocidade do som.

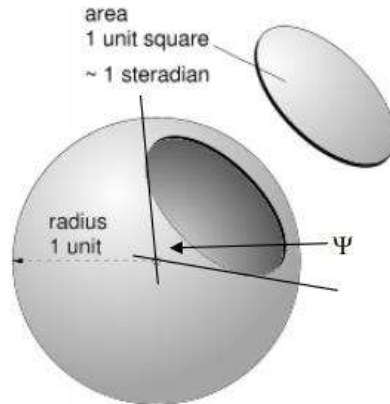


**Figura 7** – Volume elementar,  $V$  e ângulo sólido elementar,  $d\Omega$ , para a reverberação de volume.<sup>15</sup>

$\Omega$  é o símbolo grego aqui utilizado para ângulos sólidos. Para a reverberação de volume,  $\Psi$  indica a largura de feixe equivalente à integração das larguras de feixe do projetor e hidrofone em todos os ângulos. Como tal,  $\Psi = \int_0^{4\pi} b(\theta, \varphi)b'(\theta, \varphi) d\Omega$  (Tucholsky, 2006, p. 18.2).

Quando este ângulo sólido interceta o espalhador, a área intersetada corresponde a  $\Psi r^2$  (Figura 8). O volume de reverberação obtém-se então multiplicando a área pela espessura  $\frac{c\tau}{2}$ .

<sup>15</sup> Retirado de Etter (2013), p. 298.



**Figura 8** – Representação da área  $\Psi r^2$ . A unidade do ângulo sólido é esterradiano ( $sr$ ).<sup>16</sup>

A reverberação de superfície pode surgir de interações da onda sonora com a superfície e com o fundo do mar. Relembrando a equação da reverberação de superfície,

$$RL_s = SL - 40 \log r + S_s + 10 \log A$$

$$A = \frac{c\tau}{2} \Phi r$$

Analogamente ao volume de reverberação, a área de reverberação,  $A$ , depende da duração do impulso,  $\tau$  e velocidade do som,  $c$ . Por sua vez,  $\Phi = \int_0^{2\pi} b(0, \varphi) b'(0, \varphi) d\varphi$ , o que significa que a integração é feita apenas para ângulos horizontais,  $\varphi$ . Neste caso,  $\Phi r$  denomina a extensão da superfície, onde ocorre a reverberação.

Em suma, foram abordadas as expressões teóricas para determinação do valor do RL referente a uma onda plana equivalente, assim como os cinco pressupostos que o permitem calcular. No entanto, dependendo da situação ambiental *in situ*, as expressões teóricas poderão e deverão ser adaptadas para casos de reverberação de volume específicos como presença de bolhas, cardumes de peixe e na *deep scattering layer*.

Para o cálculo de reverberação de superfície, o operador sonar deve ter noção da diferença de espalhamento de fundo para espalhamento de superfície. O tipo de fundo, a

<sup>16</sup> Retirado de Tucholski (2006), p. 269.

frequência de emissão, *grazing angle* ou o complementar do ângulo de incidência<sup>17</sup>, daqui em diante referido apenas como ângulo de incidência, e perfil e rugosidade do fundo submarino não devem ser desprezados em operações com sonar ativo em águas poucas profundas, nas quais o espalhamento de fundo dificulta em muito a detecção. Da mesma forma, se deverá ter em consideração a intensidade do vento, frequência de emissão e ângulo de incidência<sup>18</sup>, quando a abertura do feixe do sonar procura detecção na camada de mistura<sup>19</sup>.

### 1.5.2. Nível de ruído ambiente (ANL)

O ruído ambiente engloba o conjunto de níveis acústicos indesejados que podem impedir a detecção do alvo e cuja fonte ou fontes sejam completamente independentes da plataforma que procura a detecção ou dos seus sistemas sonar (Urlick, 1983, pp. 202-203). As diversas fontes originam sinais acústicos diferentes no que toca à sua densidade espectral, sendo que a sua influência varia com a área em estudo e a profundidade do hidrofone.

Para *shallow waters* ou águas pouco profundas, considere-se profundidade inferior a 200 metros (Richardson, 2013, p. 96), Urlick (1983, pp. 207-218) aponta como principais fontes de ruído ambiente: a densidade de navegação e atividade industrial, ondas geradas pelo vento e vida marinha. Em *deep waters* ou águas profundas, ou seja, profundidade superior a 200 metros, Urlick (1983, pp. 203-209) enumera variadas fontes no sentido crescente no espectro de frequências. Pela ordem crescente de frequência, as marés e efeito hidroestático das ondas encontram-se no extremo inferior do espectro, seguidas das perturbações sísmicas, turbulência oceânica, interações não-lineares entre ondas, densidade de navegação, ondas geradas pelo vento e ruído térmico, como se pode verificar pela Figura 9.

Deduz-se que, pela natureza das fontes emissoras de ruído em águas pouco profundas, estas têm um carácter intermitente (Figura 9), ou seja, que o nível de ruído de

---

<sup>17</sup> O ângulo de incidência é definido na ótica e na acústica como sendo o ângulo entre o raio incidente e a normal da superfície que separa dois meios distintos. O complementar deste ângulo é equivalente ao ângulo entre o raio incidente e a superfície.

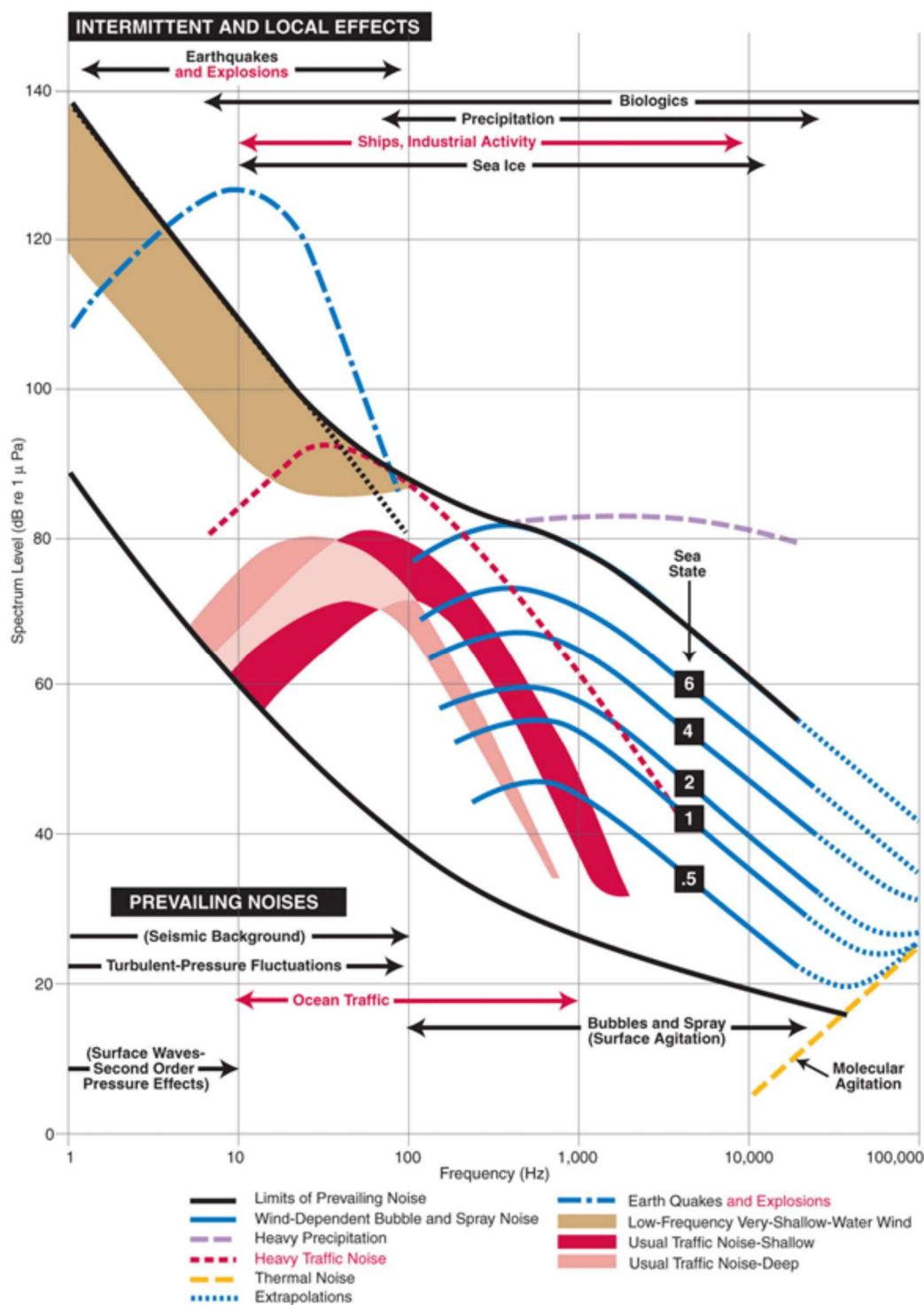
<sup>18</sup> O ângulo de incidência é o ângulo entre o raio incidente e a normal da superfície que separa dois meios distintos.

<sup>19</sup> Camada superficial de espessura variável que, por ação de vento, sofre homogeneização de temperatura e salinidade. Atinge espessuras até 100 metros, no inverno, devido à maior agitação e menor temperatura à superfície. No verão, esta camada reduz-se a escassos metros devido à relativa calma e maior gradiente térmico, por irradiação solar da superfície.

cada uma poderá aumentar ou diminuir em certos períodos, assim como variar dependendo da área em estudo, induzindo grande variabilidade em relação ao ruído de *deep water*, que é, por sua vez, tendencialmente mais estacionário.

Pode afirmar-se, portanto, que o ANL é maior em águas pouco profundas, devido à presença de mais fontes de ruído e à maior proximidade destas, e que este diminui com o aumento de frequências (Tucholski, 2006, p. 11.4), sendo sempre necessário confirmar as condições meteorológicas e oceanográficas à superfície e quantificar a navegação na área, que provocam variabilidade no nível de ruído.

Sabe-se ainda que a propagação do ruído ambiente não se realiza de forma isotrópica, sendo que ruídos próximos, com frequências superiores a 500Hz, propagam-se em profundidade, enquanto que ruídos distantes, com frequências inferiores a 200Hz chegam em ângulos próximos da horizontal (Urick, 1983, pp. 227-231).



**Figura 9** – Espectro de diversos tipos de ruídos existentes em águas profundadas e pouco profundas. Pode distinguir-se o caráter intermitente ou permanente de alguns ruídos. Reimpressão de gráfico das curvas de Wenz (1962) pela National Academy Press, Washington D.C.<sup>20</sup>

### 1.5.3. Nível de ruído próprio (SN)

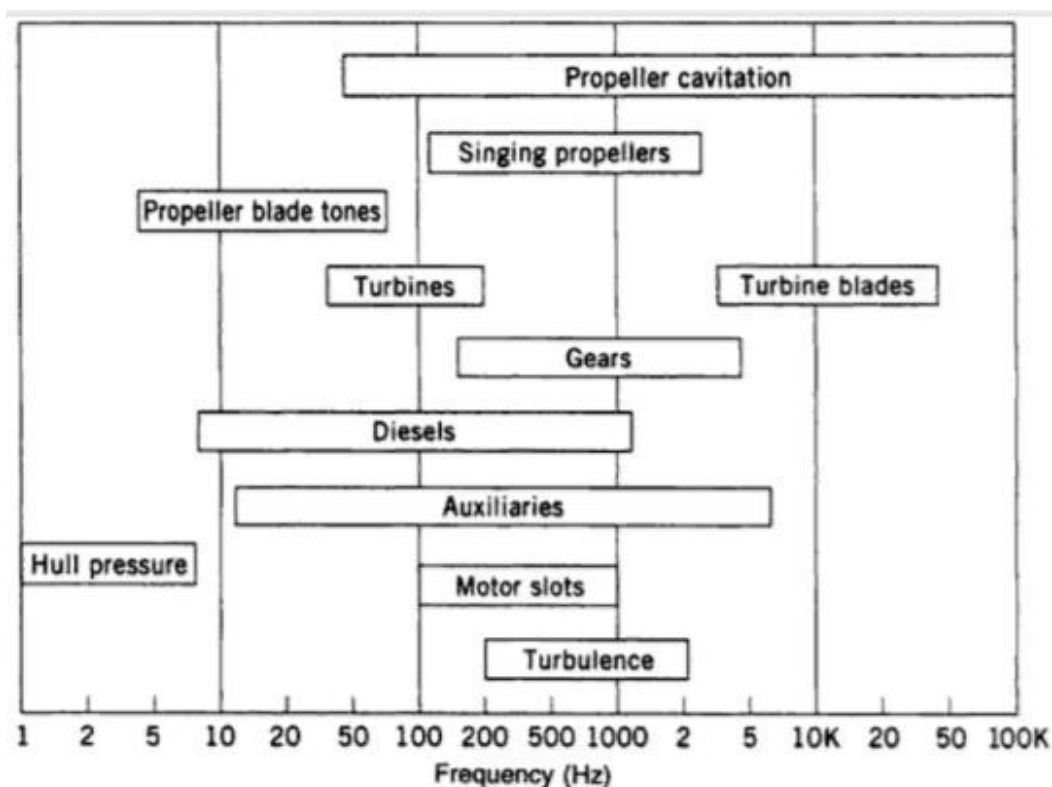
“O ruído próprio é o ruído total que aparece na receção devido ao próprio sistema e ao navio que o transporta” (Varela, 2001, p. 2.27). O ruído próprio distingue-se, de facto, do ruído ambiente, que atua como um filtro que apenas permite a receção clara de sinais que ultrapassem, em intensidade, o nível de ruído ambiente. A plataforma que transporta o sonar, seja esta, navio de superfície, submarino ou torpedo, é também uma fonte de ruído (Figura 10). No entanto, as características técnicas do sistema sonar e a posição onde o mesmo é instalado fazem variar a influência do ruído dos próprios sistemas da plataforma na tentativa de deteção; o índice de diretividade do hidrofone permite reduzir a captação de ruído próprio, enquanto que a posição mais a vante, adotada para o domo<sup>21</sup> permite um maior afastamento dos hélices e máquinas.

$$NL = NL' + DI \text{ (Urick, 1983, pp. 356-357)}^{22}$$

---

<sup>21</sup> O domo do sonar consiste na estrutura que é colocada em redor do transdutor, cujo material permite diminuir a turbulência de arrasto, procurando a transmissão acústica e minimizando reflexões ou refrações na estrutura.

<sup>22</sup> Seja  $NL'$  o nível de ruído próprio que chega ao hidrofone com determinado DI. A expressão é utilizada para calcular o ruído isotrópico próprio, ou para calcular o ruído próprio através do isotrópico equivalente.



**Figura 10** – Fontes de ruído e a sua distribuição pelo espectro de frequências.<sup>23</sup>

Consideram-se fontes de ruído próprio, os hélices, máquinas propulsoras e auxiliares e a turbulência por deslocamento (Varela, 2001, p. 2.27).

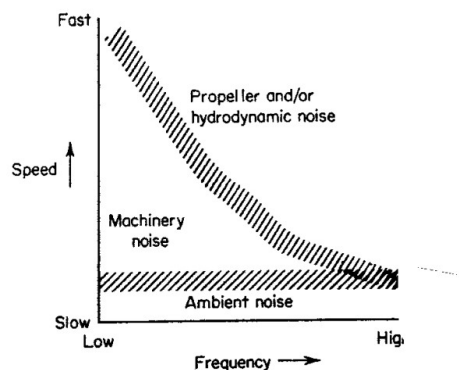
As máquinas propulsoras e auxiliares são fontes de ruído independentes do aumento velocidade do navio, sendo, portanto, a fonte de ruído dominante em regimes de baixa velocidade e no espectro das baixas frequências. As vibrações provocadas pelas máquinas de bordo são transmitidas para a água através de processos de condução das estruturas sólidas e pelo ar, até ao casco (Tucholski, 2006, p. 12.1).

O ruído provocado pelos hélices depende essencialmente do fenómeno de cavitação, que provoca uma radiação acústica mais intensa a ré do navio. Este nível de ruído é proporcional ao aumento de velocidade.

A terceira fonte de ruído principal caracteriza-se pelo deslocamento do domo ou do sonar em relação à água que, tendo viscosidade característica, gera turbulência na superfície da estrutura. A turbulência é originada por mudanças de pressão no fluido que se desloca em

<sup>23</sup> Retirado de Collier (1998, p. 409).

contacto com a superfície do domo. Estas alterações de pressão são recebidas pelo hidrofone como “ecos falsos”, sendo, desta forma, considerados ruído. Quanto maior a velocidade da plataforma, mais elevado o nível de ruído provocado pela turbulência por deslocamento (Figura 11).



**Figura 11** – Regiões de dominância, por frequência e velocidade, das diferentes fontes de ruído próprio.<sup>24</sup>

Apesar dos requisitos técnicos e de instalação cuidada do sistema sonar, o ruído próprio nunca deve ser desprezado na deteção. De facto, o som pode percorrer diversos caminhos até atingir o recetor (Figura 12). O ruído dos sistemas de máquinas propaga-se sob forma de condução através das estruturas e pode, desta forma, atingir o sonar (Figura 12, A). Os hélices, apesar de induzirem uma fonte de ruído, a ré do navio, esta pode propagar-se diretamente até ao domo (Figura 12, B) ou atingi-lo após espalhamento (Figura 12, C) ou reflexão de fundo (Figura 12, D), se a operação decorrer em águas pouco profundas.

<sup>24</sup> Retirado de Urick (1983, p. 359).

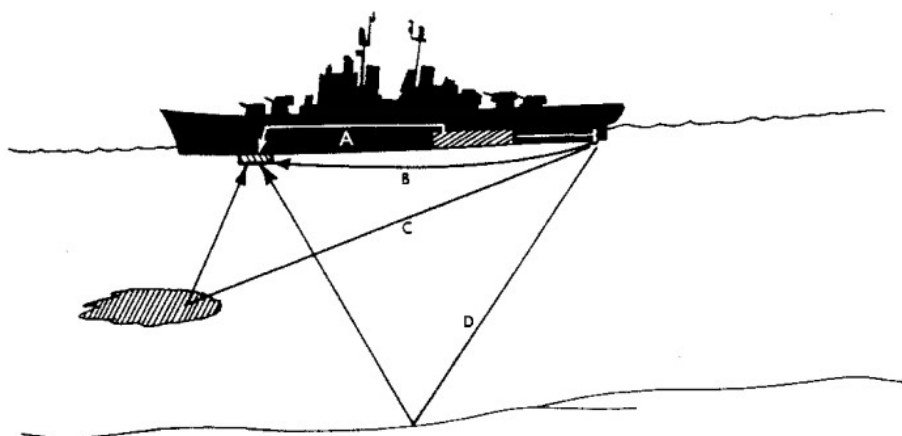


Figura 12 – Possíveis trajetetas percorridos pelo ruído próprio.<sup>25</sup>

## 1.6. Perdas de transmissão (TL)

As perdas de transmissão representam todo o conjunto de características da propagação e do meio e o modo como estes fatores influenciam na diminuição de intensidade do sinal. Pode separar-se as perdas de transmissão por dispersão (Figura 13) e por absorção.

### 1.6.1. Dispersão

A dispersão é a diminuição da intensidade do sinal à medida que o recetor se afasta da fonte por razões de mera geometria da propagação. A dispersão esférica assume que o projetor é omnidirecional e o meio homogéneo, sem limites e sem atenuações. Sabe-se que a potência do sinal é igual ao produto da área com a intensidade do sinal,

$$P = 4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2$$

Sendo que a potência se mantém constante, pode-se inferir uma diminuição da intensidade do sinal devido ao aumento da área afetada pelo som.

Quando o meio se encontra horizontalmente delimitado, a superfície de perdas mantém a sua dimensão ao longo do tempo, podendo aproximar-se a um círculo. Neste caso, a dispersão é cilíndrica. Portanto,

$$P = 2\pi r_1 H I_1 = 2\pi r_2 H I_2$$

<sup>25</sup> Retirado de Urick (1983, p. 358).

Existe ainda um terceiro tipo de dispersão, designada por hiperesférica. Esta dispersão hipotética (Urlick, 1983, pp. 102-103), ocorreria nos canais de som profundos do oceano, onde o sinal sonoro, oriundo de uma fonte pulsada<sup>26</sup>, sofre de extensão temporal, de que resulta menor intensidade.

Urlick (1983, pp. 126-128) apresenta ainda uma forma de resolver o cálculo de TL para modelos de *raytrace*<sup>27</sup>, partindo para uma expressão que integra a distância horizontal à fonte, mas também o afastamento vertical entre raios. A equação é consistente com o fenómeno que sucede em zonas onde o sinal amplifica por convergência ou é atenuado por divergência<sup>28</sup>(Varela, 2001, pp. 3.32-3.36).

Tipo	Varição de intensidade	Perdas de transmissão em dB	Propagação em
Cilíndrica	$r^{-1}$	$10 \log r$	Entre planos horizontais
Esférica	$r^{-2}$	$20 \log r$	Meio livre
Hiperesférica	$r^{-3}$	$30 \log r$	Meio livre com extensão temporal
TL	-	$10 \log \frac{r \Delta h}{\Delta \theta} \frac{c_2}{c_1}$	Modelo de <i>raytrace</i>

**Figura 13** – Caracterização de diversos tipos de dispersão. Para cada dispersão é indicada a forma como varia a intensidade acústica e como deve ser calculada a intensidade resultante.<sup>29</sup>

### 1.6.2. Absorção

O som propaga-se na água devido à transmissão de sucessivas compressões e expansões das partículas da massa de água, que devido ao efeito de mola, não provoca alterações na posição média de cada partícula, mas que tem por efeito a transmissão do impulso em distância. Os sucessivos estados de compressão e descompressão do fluido originam perdas de energia acústica por condutibilidade calorífica, viscosidade dinâmica, viscosidade de volume e relaxação estrutural.

<sup>26</sup> Fonte pulsada é toda a fonte emissor de PW ou *pulsed waves*.

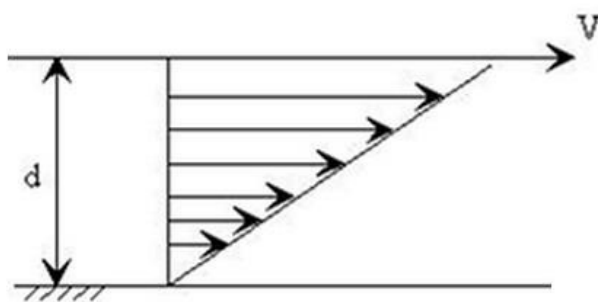
<sup>27</sup> As teorias de *raytrace* simplificam a propagação do som através da sua representação por raios e assumindo gradientes uniformes para a velocidade do som em função da imersão. Como consequência, a trajetória dos raios refratados assume-se circular, facilitando a modelação da propagação. (Urlick, 1983, pp. 120-126).

<sup>28</sup> A divergência pode dar origem a uma zona designada por zona de sombra onde o sinal atinge valores próximos de 0 dB apesar dos valores positivos das zonas que lhe são adjacentes. (Varela, 2001, pp. 3.29-3.30).

<sup>29</sup> Adaptada de Urlick (1983, p. 103).

A condutibilidade calorífica é resultado da diferença de fase em que as partículas do meio se encontram. As partículas na região de compressão transmitem energia térmica para partículas na região de decompressão que se encontram a temperatura inferior.

A viscosidade da água do mar mantém a sua estrutura molecular e iônica estável. Para que haja propagação do som, a energia acústica tem de vencer a resistência estrutural, movimentando porções do fluido. A viscosidade dinâmica é causada pelo movimento de filetes de fluido, que geram forças de atrito proporcionais aos gradientes espaciais de velocidades.

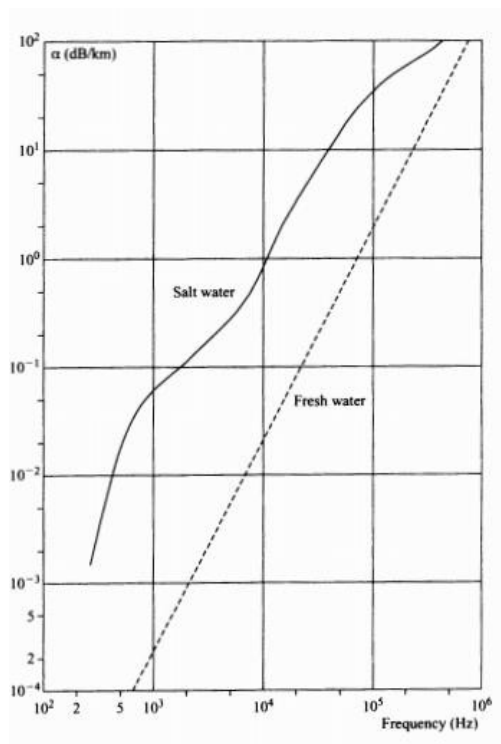


**Figura 14** – Esquema simplista da viscosidade dinâmica (*shear viscosity*). Este tipo de viscosidade justifica o atrito que dois filetes de fluido com velocidades diferentes geram entre si.

A viscosidade de volume depende da incompressibilidade do fluido, sendo que resulta da resistência das moléculas de água em fluir pelos “buracos” da estrutura iônica do fluido. Relembre-se que, tanto a viscosidade dinâmica, como a viscosidade de volume têm valores de referência para água destilada, que fornecem, no entanto, uma aproximação razoável ao previsto para água salgada.

A água do mar possui, porém, uma capacidade de absorção sonora muito superior quando em comparação com a água destilada (Figura 15). Esta diferença deve-se, portanto, ao efeito da relaxação estrutural. A constituição da água do mar conta com inúmeros sais, dos quais devemos referir dois, que apesar da sua parca abundância, em muito influenciam o processo de relaxação. O sulfato de magnésio ( $MgSO_4$ ) e o ácido bórico [ $B(OH)_3$ ] sofrem de dissociação e ligação iônica sucessiva, quando expostos às diferenças de pressão da onda sonora. À relaxação molecular encontra-se associado um tempo de relaxação que, se for coincidente com o período da onda sonora, maximiza as perdas por absorção, o que normalmente se sucede em baixas frequências ( $f < 5 \text{ kHz}$ ) (Urick, 1983, pp. 105-106).

Segundo Urick (1983, p. 107) existe ainda uma causalidade entre a relaxação do ácido bórico  $[B(OH)_3]$  e o pH do fluido, sendo esta maior quanto menor o valor de pH.



**Figura 15** – Coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) para água destilada e água do mar.<sup>30</sup>

Vários estudos foram conduzidos por forma a contabilizar os fatores que influenciam a absorção do som e integrá-los numa fórmula aglutinadora. Thorp (Urick, 1983, p. 108), Fisher-Simmons (Urick, 1983, p. 107) e Ainslie e Mccolm (Ainslie, Mccolm, 1998, pp. 1672-1673) procuram resolver a absorção do som, apresentando um termo  $\alpha$ , coeficiente de absorção, que representa a soma de todos os fatores, por eles considerados importantes, que afetem negativamente a propagação do som.

#### 1.6.2.1 Fórmulas para coeficiente de absorção $\alpha$

No presente tópico são abordadas as fórmulas de Thorp (Urick, 1983, p. 108), de Fisher-Simmons (Urick, 1983, p. 107) e de Ainslie e Mccolm (Ainslie, Mccolm, 1998, pp. 1672-1673)

<sup>30</sup> Retirado de Waite (2002, p. 46).

Thorp desenvolveu uma fórmula simples à qual adiciona um termo constante de 0,003 que traduz a atenuação em frequências muito baixas. A fórmula de Thorp tem maior rigor para a profundidade de 90 metros e temperatura de 4°C.

$$\alpha = \frac{0,1f^2}{1 + f^2} + \frac{40f^2}{4,100 + f^2} + 2,75 \times 10^{-4}f^2 + 0,003$$

Com  $f$  em kHz e  $\alpha$  em dB/Km

Esta é também a fórmula adotada pelo modelo RayPath (Lenk, 1996), programa que será abordado posteriormente.

Fisher e Simmons assumiram uma salinidade de 35 ppt e pH = 8 para a sua fórmula de três fatores, cada um para temperaturas compreendidas entre 0°C e 30°C e pressões de 1 a 400 atm.

$$\alpha = \frac{Af_1f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{Bf_2f^2}{f_2^2 + f^2} + Cf^2$$

$$\alpha = \alpha [B(OH)_3] + \alpha (MgSO_4) + \alpha (H_2O)$$

$$f_1 = 1,32 \times 10^3 (T + 273) e^{\frac{-1700}{T+273}}$$

$$f_2 = 1,55 \times 10^7 (T + 273) e^{\frac{-3052}{T+273}}$$

$$A = 8,95 \times 10^{-8} (1 + 2,3 \times 10^{-2}T - 5,1 \times 10^{-4}T^2)$$

$$B = 4,88 \times 10^{-7} (1 + 1,3 \times 10^{-2}T) \times (1 - 0,9 \times 10^{-3}P_0)$$

$P_0$  = pressão de equilíbrio em atm

$f$  em Hz

A expressão desenvolvida por Ainslie e McColm é considerada uma simplificação realista da fórmula de Fisher e Simmons, com grande abrangência na gama de frequências e no valor de pH, tendo em conta a ação acidificante do aumento de  $CO_2$  nos oceanos.

$$\alpha = 0,106 \frac{f_1f^2}{f_1^2 + f^2} e^{(pH-8)/0,56} + 0,52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) \left(\frac{S}{35}\right) \frac{f_2f^2}{f_2^2 + f^2} e^{-\frac{D}{6}} + 0,00049f^2 e^{-\left(\frac{T}{27} + \frac{D}{17}\right)}$$

$$f_1 = 0,78 \sqrt{\left(\frac{S}{35}\right) * e^{\frac{T}{26}}}$$

$$f_2 = 42 e^{\frac{T}{17}}$$

$D$  em Km

$f$  em kHz

$T$  em °C

$pH \sim 8$

$S$  em ‰

### 1.7. Refletividade do alvo (TS)

A refletividade do alvo é um fator que quantifica a intensidade sonora devolvida por um dado alvo, face à intensidade sonora que lhe é incidente. Este fator é excluído da equação sonar passivo, visto que esta não prevê qualquer tipo de projeção sonora da parte da plataforma que procura deteção. Não obstante, é um fator fulcral para plataformas de superfície que procurem um alvo submarino e para os seus cálculos de alcance de deteção e, como consequência, um segredo bem guardado pelas diversas Marinhas acerca dos seus próprios meios e do que possam saber sobre os meios de outras Marinhas.

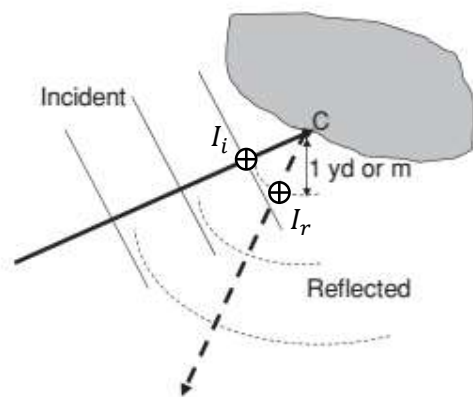
Posto isto, o fator de TS foi bastante estudado para formas simples como esferas (Varela, 2001, p. 2.42), sendo os valores de TS de um dado navio, submarino ou torpedo calculados e obtidos em provas acústicas e posteriormente guardados com grande confidencialidade.

Segundo Hodges (2010, p. 167), a expressão geral que determina o TS de um dado alvo relaciona a intensidade acústica incidente e a refletida, ambas medidas a um metro do centro acústico do alvo (Figura 16).

$$TS = 10 \log \frac{I_r}{I_i}$$

Deve, no entanto, ser dada uma explicação acerca do significado de centro acústico do alvo. Segundo Urick (1983, pp. 291-292), as medições de TS são efetuadas a certa distância do alvo, sendo  $I_i$  e  $I_r$  posteriormente reduzidas para a distância de referência de um metro do centro acústico. O valor de TS aparenta ser sempre negativo, pois de outra forma teria intensidade refletida superior à incidente. No entanto, o centro acústico do alvo é um

ponto virtual do qual a energia acústica incidente parece voltar a irradiar, podendo mesmo encontrar-se “dentro” do alvo, possibilitando a existência de valores positivos.



**Figura 16** – Esquema de reflexão de uma onda plana em dado alvo. TS é calculado com os valores  $I_i$  e  $I_r$  a um metro do centro acústico do alvo (C).<sup>31</sup>

Existe, portanto, uma incerteza acerca do local preciso do centro acústico do alvo, que, aliada à dificuldade de obter um valor de perdas de transmissão realista necessário para reduzir a medição para um metro, torna este método convencional pouco exato.

### 1.7.1. Refletividade de esfera

Se for assumido que uma esfera perfeitamente lisa, de raio  $r$  metros, tem capacidade de reflexão isotrópica e que esta é atingida por uma onda plana de intensidade  $I_i$ , então a energia que é interceptada pela esfera é  $\pi r^2 I_i$ , sendo a seção eficaz de espalhamento<sup>32</sup>  $\pi r^2$ . A intensidade sonora refletida será, portanto,

$$I_r = \frac{\pi r^2 I_i}{4\pi x^2}$$

Se  $x$ , que é a distância em metros onde é medida  $I_r$  a partir do centro da esfera for igual a um metro, a expressão simplifica para:

<sup>31</sup> Adaptado de Hodges (2010, p. 168).

<sup>32</sup> Traduzido de Waite (2002, p. 69), *scattering cross-section*.

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{r^2}{4}$$

$$TS_{esf} = 10 \log \frac{I_r}{I_i} = 10 \log \frac{r^2}{4} \quad (\text{Waite, 2002, p. 68})$$

Existe um método alternativo para calcular o TS de um alvo, se este for de pequenas dimensões. Segundo Urick (1983, p. 293), este consiste em colocar uma esfera de raio dois metros à mesma distância do alvo de TS desconhecido. Substituindo  $r = 2 \text{ m}$ ,

$$TS_{esf} = 10 \log \frac{2^2}{4} = 0 \text{ dB}$$

logo,

$$TS_{alvo} = 10 \log \frac{I_1}{I_0}$$

em que  $I_1$  corresponde à intensidade refletida do alvo, enquanto  $I_0$  é igual à intensidade refletida pela esfera. Este método tem a grande vantagem de não depender das perdas de transmissão, no entanto, não deve ser utilizado para calcular o TS de alvos muito maiores do que a esfera utilizada como referência.

### 1.7.2. Refletividade de minas, torpedos e submarinos

Como foi referido anteriormente, é do interesse das Marinhas manter exclusividade acerca dos valores de TS dos meios e armas. É possível, porém, fazer aproximações a certas formas simples estudadas (Figura 17), sabendo algumas dimensões das plataformas e das suas estruturas.

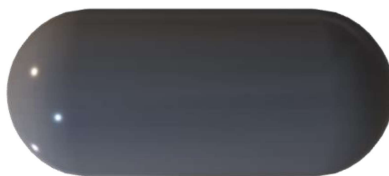
Geometric form	Target strength = 10 log(A)	Direction	Conditions
Sphere (large)	$R^2/4$	All	$kR \gg 1$ $r \gg R$
Sphere (small)	$1082R^6/\lambda^4$	Normal	$kR \ll 1$ $kr \gg 1$
Ellipsoid	$[bc/(2a)]^2$	Parallel to $a, b, c$ are semimajor axis	$ka, kb, kc \gg 1$ $r \gg a, b, c$
Cylinder	$RL^2/(2\lambda)[\sin(\beta)/\beta]^2 \cos^2(\theta)$	At $\theta$ with normal, $\beta = kL \sin(\theta)$	$kR \gg 1$ $r > L^2/\lambda$
Convex surface	$R_1R_2/4$	Normal	$kR_1, kR_2 \gg 1$ $kr \gg 1$
Smooth convex object	$A/(16\pi)$	Average in all directions, $A =$ total surface area	All dimensions and curvature large compared to $\lambda$
Rectangular plate	$L_1L_2/\lambda^2[\sin(\beta)/\beta]^2 \cos^2(\theta)$	At angle $\theta$ to normal in plane of side $L_1$ , $\beta = kL_1 \sin(\theta)$	$r > L_1^2/\lambda$ $kL_2 \gg 1$ $L_1 > L_2$
Circular plate	$(\pi R^2/\lambda)^2 [2J_1(\beta)/\beta]^2 \cos^2(\theta)$	At $\theta$ with normal, $\beta = 2kR \sin(\theta)$	$r > R^2/\lambda$ $kR \gg 1$
Triangular corner reflector	$L^4/(3\lambda^2)(1 - 0.00076\theta^2)$	At $\theta$ to axis of symmetry, $L =$ length of edge	Dimensions large compared to $\lambda$

where  
 $k = 2\pi/\lambda$   
 $\lambda =$  wavelength  
 $R =$  radius or radii of curvature  
 $r =$  range from object  
 $J_1 =$  first-order Bessel function

**Figura 17** – Valores de TS estimados para algumas formas geométricas simples.<sup>33</sup>

Waite (2002, pp. 72-76) calcula TS de minas, torpedos e submarinos através da aproximação da estrutura destas plataformas à forma de cilindro com extremidades hemisféricas (Figura 18).

<sup>33</sup> Retirado de Hodges (2010, p. 173).



**Figura 18** – Modelo utilizado para simplificação de cálculos de TS.

Segundo o autor,

$$TS_{mina,torpedo,sub} = 10 \log \left[ \frac{aL^2}{2\lambda} \left( \frac{\sin x}{x} \right)^2 \cos^2 \theta \right]$$

Com

$a$  = raio

$L$  = comprimento

$$x = \frac{2\pi L}{\lambda} \sin \theta$$

$\theta$  = ângulo em relação à normal

Para uma mina de comprimento igual a dois metros, com raio das extremidades hemisféricas igual a 0,15 metros e comprimento de onda igual a 0,15 metros<sup>34</sup>, teremos

$$TS_{través(\theta=90)} = 10 \log \left[ \frac{0,15 \times 2^2}{2 \times 0,15} \cos^2 0 \right] = 3 \text{ dB}^{35}$$

$$TS_{extr(esfera)} = 10 \log \left( \frac{0,15^2}{4} \right) = -22,5 \text{ dB}$$

Para um torpedo de comprimento igual a cinco metros, com raio da extremidade hemisférica (nariz) igual a 0,5 metros e comprimento de onda igual a 0,15 metros, teremos

$$TS_{través(\theta=90)} = 10 \log \left[ \frac{0,5 \times 5^2}{2 \times 0,15} \cos^2 0 \right] = 16 \text{ dB}$$

<sup>34</sup> Equivalente à frequência de 10 kHz.

<sup>35</sup>  $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$

$$TS_{nariz(esfera)} = 10 \log \left( \frac{0,5^2}{4} \right) = -12 \text{ dB}$$

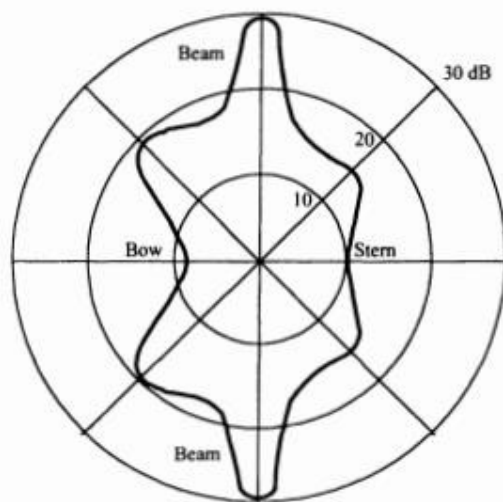
Para um submarino, cuja forma simplificada se aproxima à utilizada anteriormente, de comprimento igual a cinquenta metros, proa hemisférica igual com raio de 4 metros e frequência de detecção igual a 5 kHz, teremos

$$\lambda = \frac{1500}{5000} = 0,3 \text{ m}$$

$$TS_{través(\theta=0)} = 10 \log \left[ \frac{4 \times 50^2}{2 \times 0,3} \cos^2 0 \right] = 42 \text{ dB}$$

$$TS_{proa(\theta=90)} = 10 \log \left( \frac{4^2}{4} \right) = 6 \text{ dB}$$

As estruturas do submarino são, regra geral, bons refletores para frequências entre 5 kHz e 10 kHz. O casco resistente à pressão, tanques de lastro parcialmente preenchidos de ar, superestruturas e antenas, lemes e estabilizadores são as estruturas com maior refletividade num submarino. A variação do TS de um submarino, em função da sua marcação, adota um padrão “borboleta” (Waite, 2002, p. 76), como se pode verificar pela Figura 19. No entanto, a evolução tecnológica dos submarinos, da sua estrutura e da sua camuflagem sonora tornou estas plataformas bastante silenciosas e com baixos TS. Atualmente, o valor expectável de TS de um submarino encontra-se entre 40 dB e -10 dB, sendo que valores exatos não são apresentados devido à classificação de segurança desta informação.



**Figura 19** – Distribuição do TS em função da marcação. O TS no través é bastante superior ao TS da proa e popa.<sup>36</sup>

### 1.8. Limiar de detecção (DT)

A detecção de um sinal acústico num meio ruidoso ou de reverberação influente depende da relação sinal-ruído existente. Enquanto no índice de diretividade de recepção esta relação é potenciada através da redução da potência de ruído recebido, o limiar de detecção (ou *detection threshold*) é caracterizado pela relação da potência do sinal com a potência do ruído ou reverberação existente no meio.

O DT é, portanto, a razão de sinal-ruído/sinal-reverberação existente, no momento exato da detecção do sinal e depende do *design* e características do sistema de receção e da capacidade de discernimento do observador (Urick, 1983, pp. 378-379). É devido a esta variável humana que o DT se torna difícil de calcular e programar, sendo o seu valor muitas vezes determinado pela experiência e intuição do operador.

De seguida apresentar-se-ão os métodos utilizados por Urick (1983, pp. 383-403) para cálculo do DT em condições ambientais dominadas por ruído, que procuram apresentar valores realistas, através de cálculos simples. Para que tais métodos possam ser referidos, torna-se necessário partir das seguintes definições:

<sup>36</sup> Retirado de Waite (2002, p. 76).

$$DT = 10 \log \frac{S}{N_0}$$

$S$  – Potência do sinal na banda de recepção

$N_0$  – Potência do ruído em nível espectral<sup>37</sup>, na banda de recepção

Recorde-se que o valor de DT não é calculado por medição *in-situ* das duas potências, mas sim uma estipulação da proatividade e experiência do operador na leitura do *display* do sonar. Relembrando as equações sonar ativo e passivo, respetivamente:

$$SE = SL - 2TL + TS - NL + DI - D$$

$$SE = SL - TL - NL + DI - DT$$

Desta forma, o DT é um fator que influencia a deteção negativamente, sendo que quanto maior o seu valor, maior o SNR necessário e, conseqüentemente, menor a capacidade combinada do sistema-operador e menor o excesso de sinal recebido. Logo, o limiar de deteção caracteriza o valor mínimo de SNR para que o operador sonar tome uma decisão, face à presença efetiva ou ausência de sinal (Figura 20).

		Decisão	
		Sinal presente	Ausência de sinal
Situação real	Sinal presente	Deteção efetiva $p(D)$	Falha na deteção $1 - p(D)$
	Ausência de sinal	Falso alarme $p(FA)$	Deteção impossível $1 - p(FA)$

**Figura 20** – Matriz de decisão face à situação de presença ou ausência de sinal num meio ruidoso.<sup>38</sup>

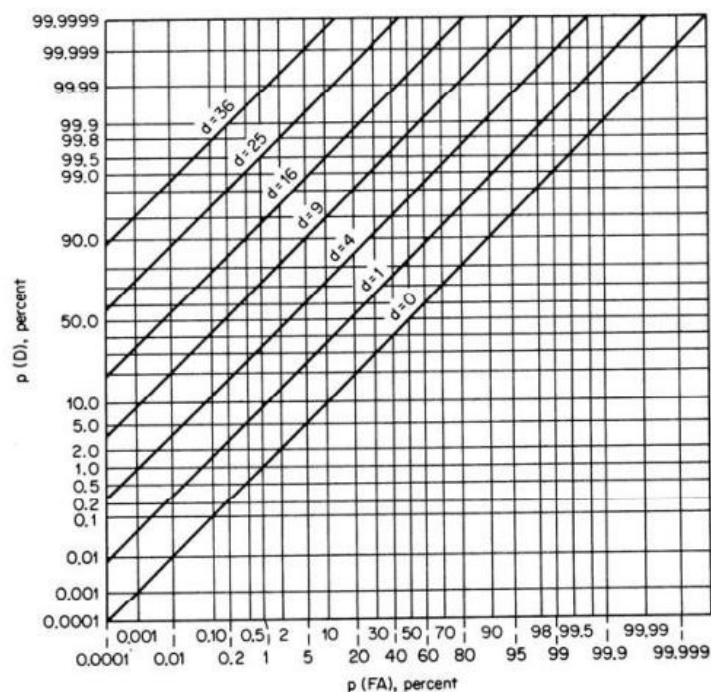
Os quatro acontecimentos possíveis no processo de decisão são apresentados na forma de probabilidades, sendo que  $p(D)$  e  $p(FA)$  são independentes e utilizados em conjunto para avaliar qual o índice de deteção ( $d$ ) a utilizar, pelas curvas ROC<sup>39</sup> (Figura 21). Estas curvas expressam a evolução de  $p(D)$  e  $p(FA)$  de acordo com o limiar de deteção

<sup>37</sup> É importante relembrar que o nível espectral de um sinal é definido como a sua intensidade em dB numa banda de 1 Hz.

<sup>38</sup> Adaptado de Urick (1983, p. 379).

<sup>39</sup> As curvas ROC ou *Receiver-operator-characteristic* assentam nos princípios de distribuição gaussiana do ruído para relacionar o índice de deteção com as probabilidades de falso alarme e deteção. Este modelo foi desenvolvido por Peterson e Birdsall, em 1953, no âmbito do estudo da teoria de deteção.

estabelecido. O critério que define a qualidade de um sonar é, de facto, a sua capacidade de identificação de um eco disperso num meio ruidoso, evitando, tanto quanto possível, os falsos alarmes. Posto isto, um valor de DT elevado reduz a quantidade de falsos alarmes, no entanto, aumenta a probabilidade de falha na deteção ( $1 - p(D)$ ). Por outro lado, se baixarmos o limiar de deteção, o sistema-operador originará demasiados falsos alarmes (Urlick, 1983, pp. 390-392).



**Figura 21** – Curvas ROC de Peterson and Birdsall para teoria de deteção de sinais, em gráfico de coordenadas de probabilidade.<sup>40</sup>

O índice de deteção ( $d$ ) das curvas ROC é utilizado para calcular o DT, de duas formas distintas. Urlick (1983, pp. 393-396) apresenta dois casos, ditos extremos, para o cálculo de DT. O primeiro caso aplica-se quando o sinal é perfeitamente conhecido, enquanto que o segundo é para sinal desconhecido num fundo de ruído gaussiano<sup>41</sup>. O DT calcula-se respetivamente da seguinte forma:

<sup>40</sup> Retirado de Urlick, 1983, p. 383).

<sup>41</sup> Para o efeito, considera-se o ruído distribuído por função de Gauss. A função  $P(a)$  caracteriza a função de densidade da probabilidade em função da amplitude  $a$  do ruído.

$$DT = 10 \log \frac{d}{2t}$$

$$DT = 5 \log \frac{dw}{t}$$

$d$  – Índice de detecção

$t$  – Duração do sinal em s

$w$  – Largura da banda de receção em Hz

Para o segundo caso, poderá igualmente ser interessante analisar a probabilidade de detecção e de falsos alarmes para períodos de integração superiores à duração do impulso. Defina-se o período de observação,  $T$ . Neste caso,

$$DT = 5 \log \frac{dw}{t} + \left| 5 \log \frac{T}{t} \right|$$

Para o caso de sinal-reverberação, Urick (1983, pp. 395-396) apresenta uma expressão semelhante ao segundo caso:

$$DT_R = 5 \log \frac{dw}{t}$$

Em que  $w = \frac{1}{t}$  se o impulso com duração  $t$  for de sinal sinusoidal de intensidade constante na banda de frequências e  $w = f_2 - f_1$  se o impulso for FM<sup>42</sup> e evoluir de  $f_1$  para  $f_2$  durante o impulso.

### 1.9. Teoria de propagação por traçamento de raios

A propagação do som no oceano é um processo complexo que depende de diversas propriedades físicas e químicas da água. Neste sentido, a previsão do trajeto do som deverá ser bem informada de todas as condições oceanográficas e da evolução das mesmas no trajeto do projetor ao hidrofone, o que é, muitas das vezes, impossível.

Torna-se necessário partir de certos pressupostos que permitam aos sistemas de previsão predeterminar o trajeto da propagação sonora. Surgiram então os diversos métodos

---

<sup>42</sup> FM ou *frequency modulated* caracteriza um sinal modelado em frequência.

ou modelos de previsão da propagação, sendo os mais conhecidos o *raytracing*, expansão modal e as técnicas de integração do número de onda (Hovem, 2013, p. 1).

Segundo Hovem (2013, p. 1), o *raytracing* assume que o som se propaga ao longo de raios perpendiculares às frentes da onda, que correspondem a superfícies isofásicas da propagação. Apesar deste modelo ter aplicação tridimensional, quando utilizado em duas dimensões permite simplificar a visualização, visto que transforma a dispersão tridimensional do som, ou seja, uma função de distância transversal, longitudinal e profundidade, em função bidimensional, variável apenas em distância horizontal e profundidade.

A teoria de *raytracing* tem por objetivo permitir o cálculo da trajetória de cada raio a partir de métodos computacionais, procurando resultados fiáveis, em tempo útil. Um método prático, explicado por Hovem (2013, pp. 1-3), e bastante utilizado em *softwares* que aplicam o *raytracing* consiste em dividir a coluna de água em intervalos regulares,  $dz$ , em que a velocidade do som sofre alteração linear,

$$g(z) = \frac{dc(z)}{dz} = cte$$

$c(z)$  - Velocidade do som na profundidade  $z$

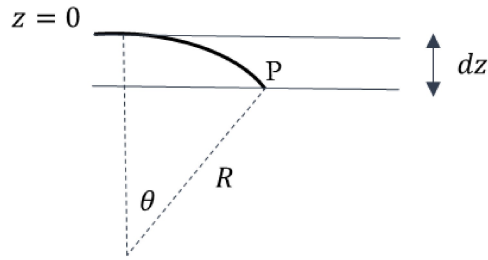
De seguida, assume-se, pela lei de Snell<sup>43</sup>, que qualquer raio, que intersete um segmento  $dz$  com velocidade do som diferente, sofre refração seguindo trajetória circular de raio  $R$  constante. Segundo Urick (1983, p. 124), o círculo de raio  $R$  une as várias posições do raio sonoro e é horizontal na fonte sonora, onde  $c(z_0) = c_0$  (Figura 22). Se  $\theta$  representar o ângulo entre  $R$  na posição inicial ( $\theta_0$ ) e os raios que unem as seguintes posições ( $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_z$ ), então  $\theta_0 = 0, \cos \theta_0 = 1$ . Pela lei de Snell,

$$\cos \theta_z = \frac{c_z}{c_0}$$

Sendo que o gradiente de velocidade é linear,

$$\begin{aligned} c(z) &= c_0 + g dz \Rightarrow \\ \Rightarrow dz &= \frac{c(z) - c_0}{g} \end{aligned}$$

<sup>43</sup> Pela lei de Snell,  $\frac{\cos \theta_1}{c_1} = \frac{\cos \theta_2}{c_2}$ , onde  $c_1$  e  $c_2$  são as velocidades de propagação e  $\theta_1$  e  $\theta_2$  os ângulos de incidência do raio nos meios 1 e 2, respetivamente.



**Figura 22** – Arco de circunferência que une o ponto inicial ao ponto P. O raio mantém-se constante, devido ao gradiente de velocidade do som linear.<sup>44</sup>

Segundo a lei de Snell e todas as equações dela derivadas,  $R$  pode ser calculado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 R - R \cos \theta &= dz \Rightarrow \\
 \Rightarrow R - R \left( \frac{c_z}{c_0} \right) &= \frac{c(z) - c_0}{g} \Rightarrow \\
 \Rightarrow R - R \left( \frac{c_0 + g dz}{c_0} \right) &= \frac{c_0 + g dz - c_0}{g} \Rightarrow \\
 \Rightarrow -R \left( g \frac{dz}{c_0} \right) &= dz \Rightarrow \\
 \Rightarrow R &= -\frac{c_0}{g}
 \end{aligned}$$

Neste caso, como se pode verificar pela Figura 22, a velocidade do som aumenta em função do aumento da profundidade, aproximando-se da normal quando sofre refração. Visto que,  $g(z) = \frac{dc(z)}{dz} = ct$  e que  $dc(z) > 0$  e  $dz < 0$ , pois  $dz$  é igual à profundidade final menos a inicial. Sendo este incremento negativo, pois o raio propaga em sentido descendente. Então,  $g(z) < 0$ . No caso em que a velocidade do som aumente no sentido ascendente, então  $dc(z) > 0$  e  $dz > 0$  e  $g(z) > 0$ . Para estes dois casos distintos,  $R$  assume valores positivos e negativos, respetivamente, tendo em conta a localização relativa do centro da circunferência. Isto é, quando esta se encontra em profundidade, assume-se um sentido positivo, se, por outro lado, se encontrar acima da superfície, assume-se sentido negativo. Na verdade, se  $R$  for considerado um valor meramente escalar, sendo apenas a distância do

<sup>44</sup> Adaptado de Urick (1983, p. 124).

centro da circunferência ao traçado do raio num dado ponto, o valor positivo ou negativo poderá ser negligenciado e  $R = -\frac{c_0}{g} \Rightarrow R = \left| -\frac{c_0}{g} \right|$ .

Posto isto, o *raytracing* pode ser aplicado sempre que o pressuposto da linearidade do gradiente da velocidade do som for aplicável aos intervalos criados na coluna de água, sendo uma teoria que alimenta *softwares* desde 1943 (Urick, 1983, p. 122) até à data.



## Capítulo 2. Desenvolvimento do modelo de previsão sonar

A previsão sonar baseia-se na estimativa do alcance sonar e de contra detecção. O alcance sonar depende das condições ambientais, mas também do sistema sonar, da plataforma e do alvo. A contra detecção surge no contexto da detecção ativa e consiste na distância máxima à qual um sistema de detecção passiva poderá detetar a plataforma responsável pela projeção sonora. Um exemplo perceptível pode utilizar-se, por forma a facilitar a compreensão. Quando um navio com sonar em modo ativo procura um submarino, o alcance sonar será a distância máxima à qual o navio poderá detetar o submarino, enquanto que o alcance de contra detecção será a distância máxima a que o sonar passivo deteta o navio a “pingar”<sup>45</sup>.

O alcance sonar e alcance de contra detecção são resultado direto de características do sonar, mas também da forma como o som se propaga no oceano. Tornou-se então necessário calcular a propagação do som por métodos numéricos, recorrendo à programação em linguagem MATLAB, como forma de acelerar o processo de previsão sonar, facilitar a visualização e possibilitar o seu uso em contexto académico, mas também operacional.

A fase inicial do desenvolvimento do *software* passou pelo *benchmarking*<sup>46</sup> de outros modelos e ferramentas computacionais, assim como pela análise crítica do seu desempenho. Sendo a propagação acústica um fenómeno de carácter quase estocástico, a aplicação de modelos teóricos à programação requer que alguns pressupostos sejam assumidos. De acordo com o critério da “navalha de Occam”<sup>47</sup> os pressupostos possibilitam a resolução do problema por métodos computacionais, visto que tanto maior a dimensão de cálculos, maior o tempo de resposta ao problema

Ao longo do segundo capítulo serão abordadas as diversas fases do desenvolvimento do programa de previsão sonar, fazendo referência aos programas já existentes, aos

---

<sup>45</sup> Navio a “pingar” designa, em contexto de operações navais, o navio que faz uso do seu equipamento sonar ativo de forma contínua e consistente durante uma operação. O próprio termo advém da impressão auditiva causada pelos impulsos sonoros emitidos.

<sup>46</sup> *Benchmarking* consiste na comparação de métodos, produtos e serviços de outras empresas, com o objetivo de aprendizagem das melhores práticas e aperfeiçoamento do desempenho.

<sup>47</sup> *Occam's razor* é a teoria postulada por William of Ockham que defendia que a resolução mais simplista do problema tende a ser a mais correta.

pressupostos que foram assumidos, à base de dados utilizada e outros parâmetros, cálculos e valores apresentados pelo programa.

## 2.1. Softwares de previsão sonar estudados

A previsão sonar é um fator de base para o planeamento e execução de operações antissubmarinas e, como tal, é objeto de estudo por órgãos especializados das Marinhas mais influentes, mas também por entidades da comunidade científica civil. Optou-se pelo estudo de modelos de previsão militares, pelo facto do âmbito do trabalho e do ambiente em que foi construído e testado ser a Marinha. Não obstante, sendo os operadores sonar da Marinha militares com reduzido tempo de formação na área de acústica, os *softwares* militares são mais apelativos quanto à visualização, mas também mais simplistas quanto aos valores de entrada, sem prejuízo dos cálculos necessários. Os modelos estudados foram o *Lybin 6.0*<sup>48</sup> e o *Raypath 3.0*<sup>49</sup>.

O objetivo do estudo das duas ferramentas de previsão sonar consistiu em recolher valiosas lições acerca da melhor forma de programar e apresentar um *software* de previsão sonar, facto que justificou a elaboração de uma análise crítica dos dois programas, baseada em cinco pontos: introdução e leitura de parâmetros; características do modelo de propagação; cálculo de excesso de sinal; deteção passiva; e capacidade de emprego operacional. Para cada um dos pontos foram detetadas várias potencialidades e fragilidades do *Lybin 6.0* (ver sub-subcapítulo 2.1.2) e *Raypath 3.0* (ver sub-subcapítulo 2.1.4).

### 2.1.1 *Lybin 6.0*

Desenvolvido pela Marinha norueguesa para uso próprio, os criadores do *Lybin 6.0* (daqui em diante apenas *Lybin*) disponibilizam o manual de utilizador pela internet (Dombestein, 2011), tendo sido esta a fonte de informação utilizada como referência para o presente subcapítulo.

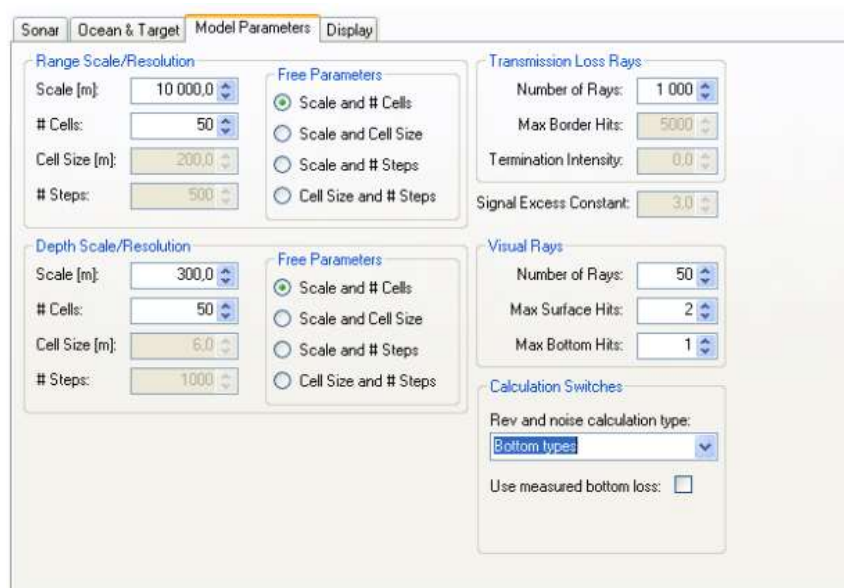
O programa simula a propagação num espaço bidimensional, variável em profundidade e em distância. Baseia-se na teoria de *raytracing* e prevê reflexões no fundo e à superfície da água.

---

<sup>48</sup> O *Lybin 6.0* foi desenvolvido pelo *Norwegian Defence Research Establishment* (FFI) no ano de 2011.

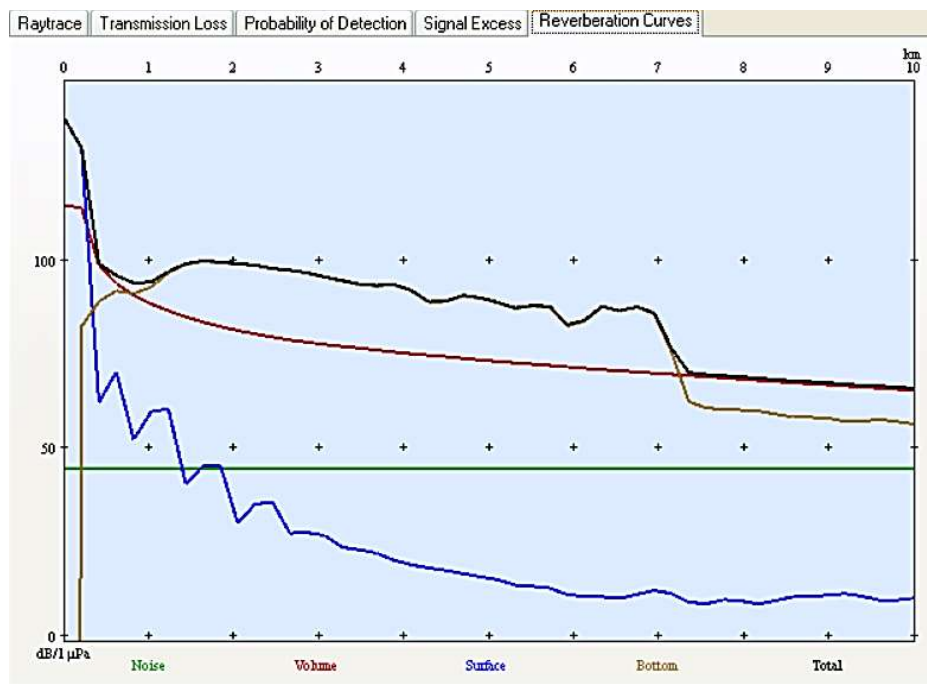
<sup>49</sup> O *Raypath 3.0* foi desenvolvido por Peter Lenk para a Marinha canadiana, em 1996.

As perdas de transmissão são fundamentais para o cálculo da previsão sonar, pois são um fator que confere realismo ao modelo e o aproxima da atenuação que o som enfrenta na realidade. Como fora referido, o *Lybin* aplica a teoria de *raytracing*, a qual utiliza para calcular o fator TL. Com o efeito, as perdas de transmissão são calculadas tendo em conta a dispersão cilíndrica na horizontal, separação de raios na vertical, absorção térmica da água do mar e perdas por interação com o fundo e superfície. O *raytracing* é aplicado para cálculo de TL, mas também para visualização da propagação, podendo o utilizador editar ambos os parâmetros (Figura 23).



**Figura 23** - Janela de edição de escala e valores para funções *raytrace*.

Relembrando as equações sonar, a reverberação de superfície, de fundo e de volume e o nível de ruído não podem ser descuradas nos cálculos de previsão. Com o efeito, o *Lybin* calcula estes valores e gera gráficos de curvas de reverberação e nível de ruído (Figura 24).

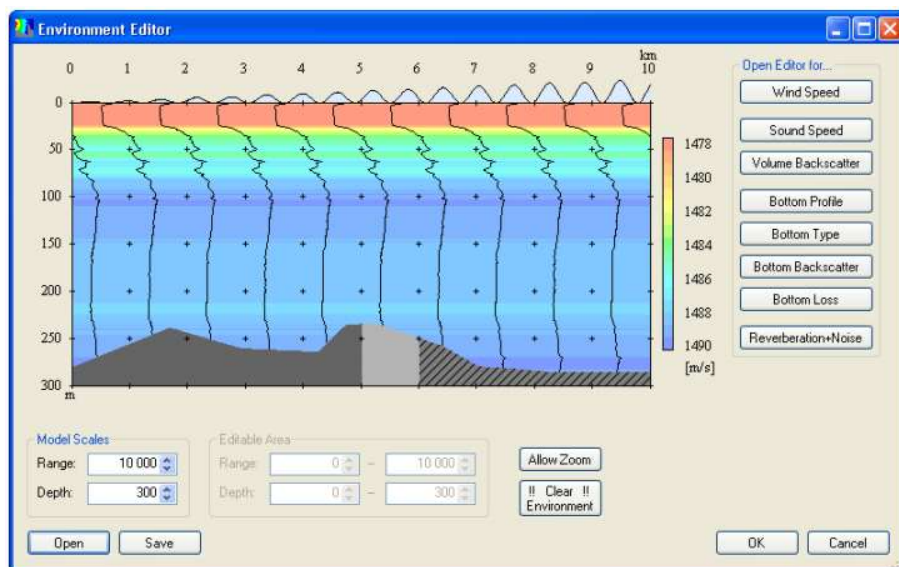


**Figura 24** - Curvas de reverberação de superfície (a azul), de fundo (a castanho), de volume (a vermelho), total (a preto) e nível de ruído (a verde). O eixo vertical corresponde a níveis de reverberação em dB e o eixo horizontal a distância em km.

Por sua vez, o ruído assume distribuição isotrópica ao longo da propagação, como se verifica pela Figura 24.

O *Lybin* permite ao utilizador introduzir ou editar uma panóplia de valores de entrada que podem ser agrupados em ambientais, sonar e navio. Poderá fazê-lo utilizando os painéis sonar, meio e alvo, parâmetros do modelo e visualização ou aproveitando os menus de edição que serão abordados.

O utilizador poderá modificar diversas funções ambientais de edição entre as quais, editor da velocidade do vento (Figura 26), editor de perfil de velocidade do som (Figura 27), editor de perfil de fundo (Figura 28) e editor de tipo de fundo (Figura 29). O conjunto destas funções resulta na compilação de um gráfico de características ambientais em função da distância na horizontal (Figura 25).



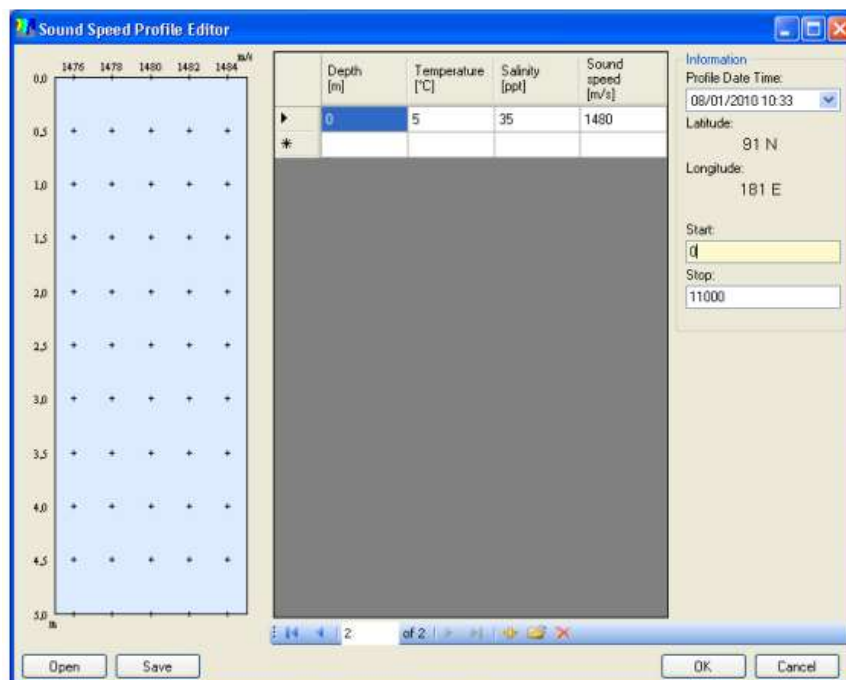
**Figura 25** – O *Lybin* suporta variações em distância da velocidade de vento, dos perfis de velocidade do som e perfis e tipos de fundo.

Todas as funções ambientais, ou seja, todos os editores em função de distância horizontal são introduzidos de forma discreta, em intervalos bem definidos, com início nos *Start* e fim nos *Stop*. O utilizador deve, portanto, escolher a distância máxima para a propagação e, caso a quantidade de dados introduzidos seja insuficiente para acomodar a escala, o *Lybin* faz interpolação dos dados, de forma a suavizar a visualização do gráfico ambiental.

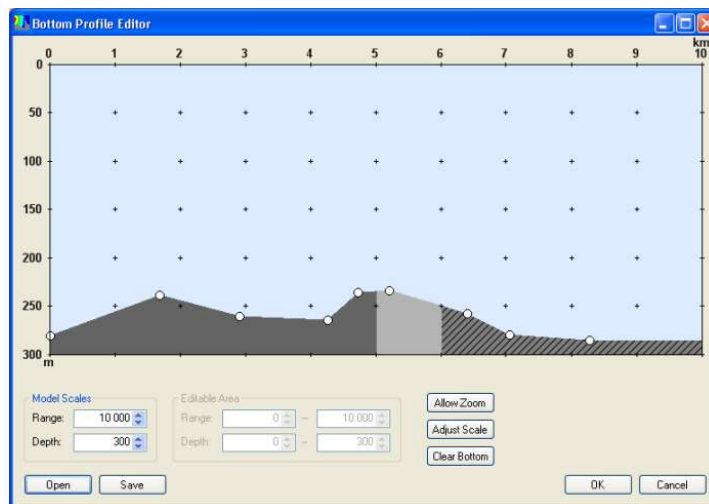
O gráfico ondulatorio, que sobrepõe a profundidade zero ou a superfície no gráfico da Figura 25, expressa a altura de onda em função dos valores introduzidos no perfil de velocidade do vento (Figura 26).



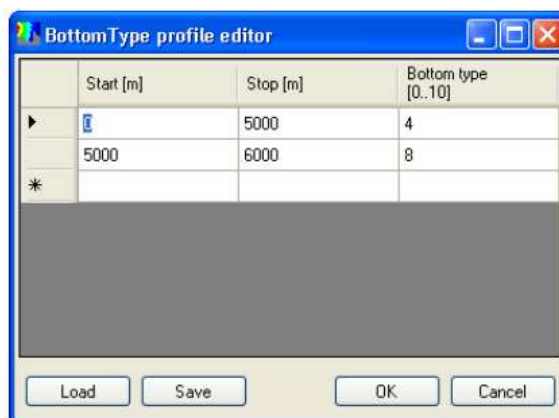
**Figura 26** – Editor de perfil da velocidade de vento (em m/s) em função da distância (em m).



**Figura 27** – Editor do perfil de velocidade do som (em m/s) a partir da profundidade (em m), da temperatura (em °C) e da salinidade (em ppt). O programa necessita que o utilizador introduza pelo menos três dos dados oceanográficos para calcular o quarto. Por exemplo, assumindo salinidade constante e certa escala de profundidade, o *Lybin* necessita dos valores de temperatura para calcular velocidade do som.

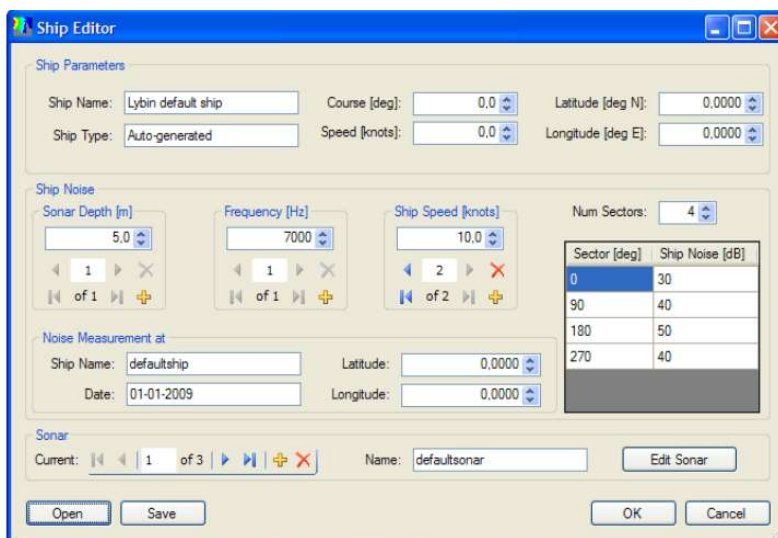


**Figura 28** – O editor de fundo permite criar um perfil de fundo de acordo com a batimetria no local. O eixo das ordenadas exprime profundidade em metros e o eixo das abcissas distância horizontal em km.



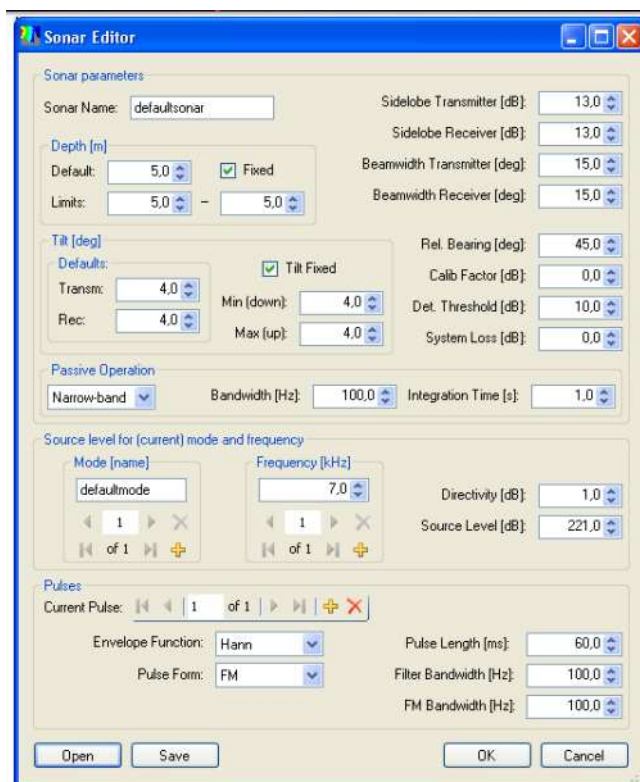
**Figura 29** – O editor de tipo de fundo determina quais os tipos de fundo dominantes nos intervalos de *start* e *stop* definidos.

Apesar da contribuição dos fatores ambientais para a previsão sonar, os fatores dependentes do navio afetam parâmetros como ruído próprio ou irradiado, que podem, juntamente com o ruído ambiente, dificultar a recepção de sinal. O *Lybin* solicita ao utilizador que guarde os valores nível de ruído próprio por frequência, azimute, velocidade e profundidade (Figura 30).



**Figura 30** – Menu de edição do ruído próprio do navio por frequência, velocidade, azimute e profundidade.

Os parâmetros do equipamento sonar (Figura 31) podem também ser introduzidos e guardados, por forma a agilizar futuras utilizações do *software*.



**Figura 31** – O editor do sonar permite ao utilizador introduzir dados acerca do sonar da plataforma e guardar como predefinição para operações futuras.

### 2.1.2. Análise crítica do *Lybin 6.0*

O *Lybin* é, de facto, uma ferramenta poderosa, rápida e bastante estética, no que toca à previsão sonar. No entanto, como consequência do algoritmo do programa ser vedado ao utilizador, apenas foi possível estudar o modo como este interage com o utilizador e alguns parâmetros e funções que são referidas no manual.

Quanto ao ponto de introdução e leitura de dados, o *Lybin* não possui capacidade de leitura automática de sonda XBT<sup>50</sup> ou XSV<sup>51</sup>; o perfil de temperatura, salinidade ou velocidade do som pode ser carregado, editado e introduzido manualmente. O programa permite ao utilizador modelar o ruído próprio do seu navio por profundidade, distância e azimute relativamente ao navio, sendo, no entanto, um método demasiado rigoroso que requer dados recolhidos em provas acústicas, que muitas vezes não são realizadas com a

<sup>50</sup> XBT (*eXpendable Bathy Thermograph*) é uma sonda que mede temperatura por profundidade.

<sup>51</sup> XSV (*eXpendable Sound Velocimeter*) é uma sonda que mede velocidade do som por profundidade.

devida regularidade. Vários parâmetros ambientais como vento, tipo de fundo, perfil de fundo, níveis de RL de fundo, superfície e volume são definidos pelo utilizador em sistema *start and stop*, ou seja, em intervalos de distância horizontal à fonte. Apenas os valores de RL de volume ficam por calcular na ausência de *input* do utilizador. Os restantes valores ambientais são automaticamente calculados, desde que o perfil de vento e de fundo estejam construídos. O sistema *start and stop* é de facto uma mais valia do *software*, porém no caso do perfil de vento poderá não ser adequado, visto que é difícil prever corretamente a velocidade do vento e a forma como esta varia com o aumento da distância. Quanto ao perfil de fundo, o *Lybin* estipula uma escala de zero a dez que define a capacidade especular do fundo, o que poderá também não ser adequado, visto que o utilizador deve adivinhar qual o valor a atribuir a um tipo de fundo específico, por exemplo, qual de zero a dez equivale o fundo de areia fina? Excetuando as lacunas encontradas, as barreiras naturais à propagação ficam bastante bem caracterizadas e os seus valores e perfis podem ser guardados e carregados posteriormente. Os parâmetros relativos ao sonar e às suas características podem também ser introduzidos e guardados para utilização futura do navio ou para outro navio da mesma classe. No entanto, parâmetros como a diferença de energia acústica nos lobos secundários, o tipo de filtro do sistema, e o *pulse form* requerem um utilizador com mestria de alguns conhecimentos na área, que dificilmente se encontra nos típicos operadores sonar das Marinhas.

O modelo de propagação utilizado pelos criadores do *Lybin* é o *raytracing*, o mesmo do *Raypath 3.0*, pelo que o importante na análise deste ponto será estudar a liberdade de opções que é dada ao utilizador. Posto isto, o *Lybin* possibilita a definição da distância de extinção do raio acústico a partir do número de interações com a superfície e o fundo; distingue o número de raios que são mostrados no *raytracing* do número de raios que utiliza para calcular a TL, desta forma nunca deteriorando o cálculo da TL em função de uma escolha gráfica do utilizador; os cálculos da propagação são efetuados raio a raio nas designadas células, cuja dimensão e quantidade podem ser escolhidas pelo utilizador, refinando a resolução da propagação.

Relativamente ao ponto de cálculo de excesso de sinal, o *software* permite ao utilizador escolher e determinar diversos parâmetros ambientais, do sonar e da plataforma que, de forma muito completa e válida, recolhem informação relativa aos termos da equação sonar,

que será resolvida em função do SE (ou excesso de sinal). Deve lembrar-se que a equação sonar ativo é:

$$SE = SL - 2TL + TS - NL(\text{ou } RL) + DI - DT$$

No sub-subcapítulo anterior apurou-se que TL é resolvida de forma elegante, assim como o ruído (NL) que é dividido em ruído próprio, ruído ambiente e ruído do sistema e a reverberação que pode ser definida pelo utilizador ou calculada em função do vento e do tipo de fundo. A reverberação de volume é o único tipo de reverberação que tem de ser parametrizado pelo utilizador, se este o quiser ver considerado no resultado. O DI e DT são, porém, o verdadeiro “calcanhar de Aquiles” do *Lybin*, visto que o programa requer conhecimento prévio, da parte do utilizador, dos valores destes parâmetros para o sistema sonar da sua plataforma, para que a previsão seja realizada. Nos subcapítulos 1.4. e 1.8. são abordadas resoluções práticas simples para estes valores. É ainda importante referir que o *Lybin* coloca na interface o parâmetro de *sonar calibration factor* (fator de calibração sonar, em português), que tipicamente é um valor que afeta o DT, e que, apesar de se encontrar indisponível no programa, continua a surgir desnecessariamente na interface com o utilizador.

Quanto ao ponto de deteção passiva e do cálculo que é efetuado pelo *Lybin*, o programa solicita que seja selecionado o modo passivo para efetuar os cálculos de SE da equação passiva e coloca alguns parâmetros específicos como *integration time* (tempo de integração, em português) e tipo de filtro do hidrofone. É importante referir que a deteção passiva parte de pressupostos diferentes da deteção ativa e que qualquer previsão feita através da equação sonar passiva

$$SE = SL - TL - NL + DI -$$

deve ser abordada com alguma reserva, visto que a forma como tipicamente ocorre a deteção passiva é por triangulação de vários azimutes tirados a uma fonte de ruído, designada por TMA (*Target Motion Analysis*). O *Lybin* apenas trata de azimutes na definição de ruído próprio da plataforma, não fazendo referência a qualquer azimute do alvo ou da evolução do mesmo ao longo do tempo. Acrescenta-se que a previsão do *Lybin* é estacionária, tem carácter pontual e é definida em distância na horizontal e profundidade, algo que poderá não ir ao encontro dos pressupostos e cálculos que devem ser feitos para a previsão passiva.

A capacidade operacional do *Lybin* é bastante aceitável no que toca à previsão da deteção ativa, deixando algumas reservas em relação à deteção passiva. De forma geral, permite fazer cálculos com grande precisão, se todos os valores forem corretamente introduzidos, o que poderá ser difícil em alguns casos. Após os fatores serem parametrizados poderão ser guardados e carregados no futuro, agilizando o processo. Deve lembrar-se que o *Lybin* foi construído para a Marinha norueguesa, que opera em grande parte em águas pouco profundas, onde o perfil de fundo pode fazer variar bastante a propagação. No entanto é descurada a propagação em águas profundas, sendo a profundidade máxima atingida pelas sondas XBT ou XSV limitadora do *software*.

### **2.1.3. *Raypath 3.0***

O *Raypath 3.0*, daqui em diante simplesmente *Raypath*, foi desenvolvido por Peter Lenk em 1996 para a Marinha canadiana. É atualmente utilizado pela Marinha e reconhecido como o *software* de previsão sonar a utilizar no contexto das operações navais pelos navios portugueses. Foi utilizado o manual do *Raypath* como referência para estudo do *software* e desenvolvimento do presente sub-subcapítulo (Lenk, 1996).

O *Raypath*, assim como o *Lybin*, efetua os cálculos através de *raytracing* e propagação ao longo de um plano bidimensional, de distância e imersão. No entanto, ao invés do *Lybin*, o modelo construído por Peter Lenk é bastante mais simples e considera apenas os valores essenciais para o cálculo de previsão.

A operação deve começar pela leitura ou introdução manual de perfis de temperatura ou de velocidade do som por imersão. O utilizador poderá alterar pontualmente o perfil a utilizar. De seguida, devem ser escolhidos os parâmetros que afetam o *raytracing*, os fatores de escala, os parâmetros da equação sonar e características do *array* sonar.

Por conseguinte, o menu opções é composto por diversos submenus que agregam todos os fatores passíveis de alteração.

O submenu *ray path parameters* (Figura 32) contém todos os parâmetros que alteram a propagação dos raios como a profundidade no local, do transdutor e abertura angular do feixe de raios.

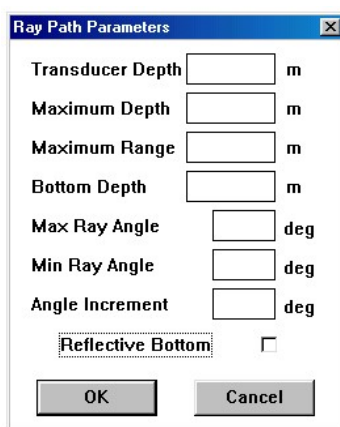


Figura 32 – Submenu *ray path parameters*.

As opções relativas aos fatores da equação sonar que afetam a propagação encontram-se no submenu *prediction parameters* (Figura 33) e são: DI; DT; SL; NL e TS. A TL pode ainda ser modelada introduzindo os valores de perdas por interação de superfície e de fundo. A frequência de operação pode ser também alterada neste submenu.

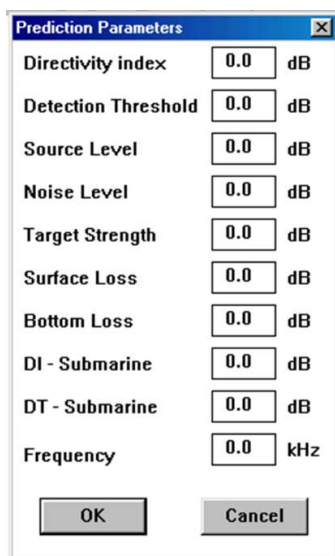
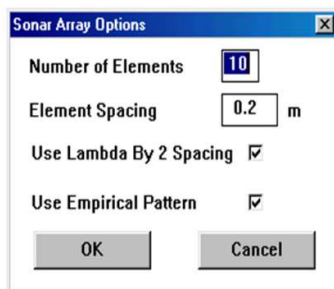


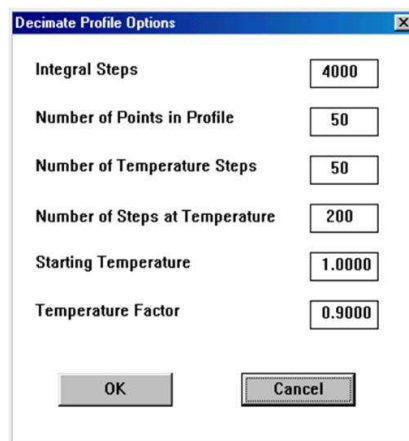
Figura 33 – Submenu *prediction parameters*.

O submenu *sonar array options* (Figura 34) permite alterar parâmetros do sistema sonar como o número de hidrofones por coluna e o espaçamento entre os mesmos. É ainda possível modificar o padrão de feixe do sistema para o equivalente a um único hidrofone em modo omnidirecional ou para o modo empírico que confere direccionalidade ao *array*.



**Figura 34** – Submenu *sonar array options*.

Por último, todos os fatores de escala relativos ao perfil de temperatura podem ser alterados pelo utilizador, nomeadamente o número de valores utilizados em relação ao número de valores introduzidos e as regras de integração para valores intermédios (Figura 35).



**Figura 35** – Submenu *decimate profile options*. Permite alterar os fatores de escala relativos ao perfil de temperatura.

Considerados todos os parâmetros alterados ou *default*, o programa calcula o trajeto dos raios (Figura 36), o gráfico de excesso de sinal (Figura 37) e o gráfico de contra deteção (Figura 38).

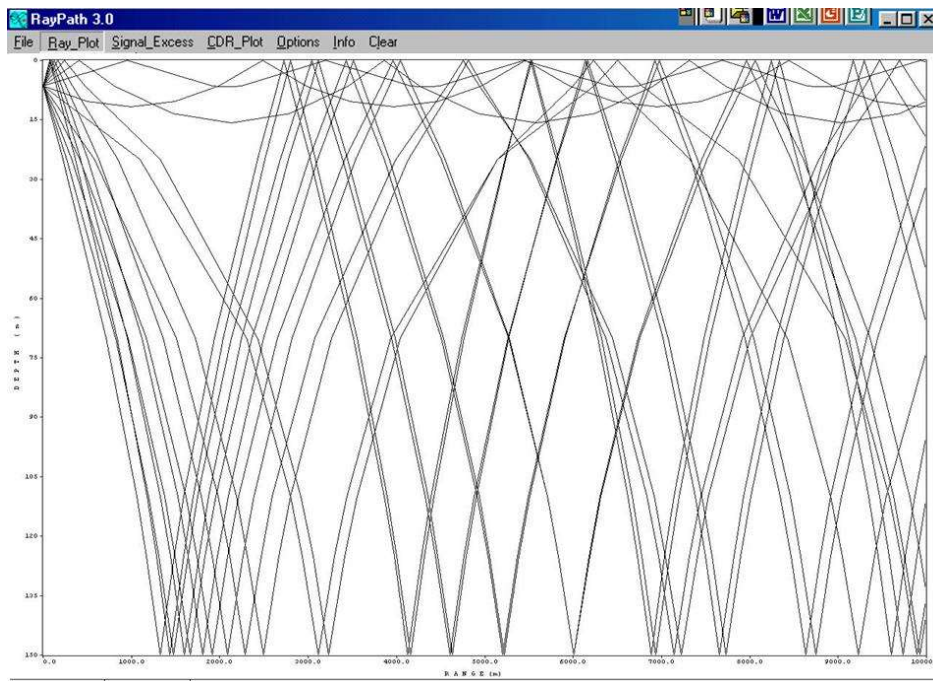


Figura 36 – O gráfico *Ray plot* calcula o trajeto dos raios sonoros.

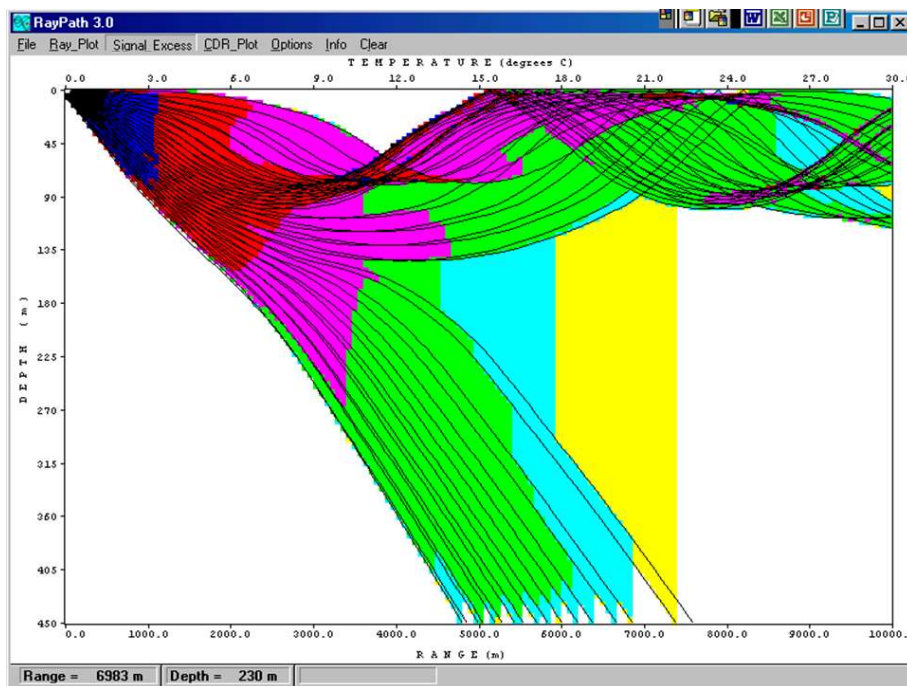
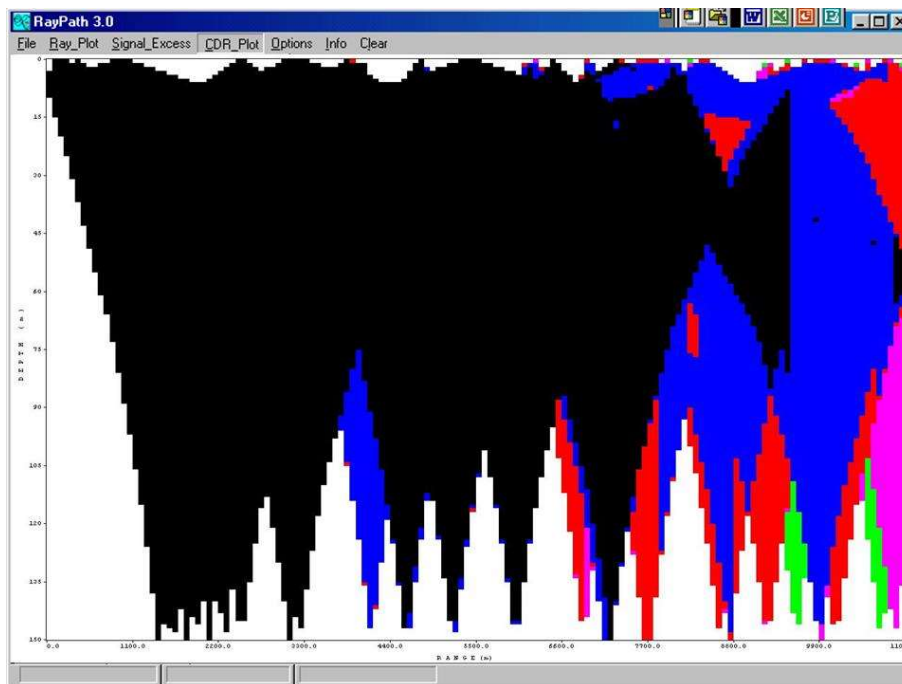


Figura 37 – Gráfico de excesso de sinal. O código de cores assinala intervalos de excesso de sinal de 15 dB, sendo a região cor-de-rosa igual a 0 dB.



**Figura 38** – Gráfico de contra detecção. À semelhança do gráfico de excesso de sinal, a mudança de cor assinala intervalos de excesso de sinal para a contra detecção de 15 dB.

#### 2.1.4. Análise crítica do *Raypath 3.0*

Peter Lenk disponibilizou o *Raypath* à Marinha canadiana em 1996 e desde esse momento muitos foram os navios e Marinhas que o utilizaram, apreciando as suas previsões simples e práticas. O *Raypath* é, de facto, um *software* que se caracterizou por possibilitar a compreensão de diversos fenómenos da propagação acústica aos operadores menos experientes, sendo assim utilizado para fins académicos e operacionais.

À imagem da análise feita para o *Lybin*, a abordagem para o *Raypath* pretende ser focalizada nos mesmos cinco pontos previamente definidos.

Relativamente à introdução ou leitura de dados, o *Raypath* encontra-se munido de uma capacidade, que lhe permite ler automaticamente os dados de uma sonda XBT ou XSV que esteja ligada ao sistema batitermógrafo Sippican MK8. Para navios que possuam este sistema a bordo, o utilizador pode seleccionar quantos pontos do perfil deseja integrar no *Raypath* e a leitura desses pontos é feita automaticamente. É também possível suavizar o perfil introduzido pela função *decimate* e alterar pontualmente o perfil pela função *smooth*. No entanto, a qualidade do processo deteriora-se aquando da introdução dos parâmetros ambientais, do sonar e da plataforma, onde os diversos parâmetros da equação sonar, como

NL, DT, DI, TS, devem todos ser conhecidos pelo utilizador, devido ao programa não ter forma de os calcular a partir de vento, precipitação, estado do mar, densidade de navegação. Os valores que devem ser introduzidos por forma a modelar o sonar apenas se referem à quantidade de hidrofones na *stave* (ou coluna), ao espaçamento entre os mesmos e a frequência de operação, quando pelo sub-subcapítulo 1.4.1. a forma mais simples de cálculo do DI de um sonar cilíndrico exige também o diâmetro do sonar.

À semelhança do *Lybin*, o modelo de propagação utilizado pelo *Raypath* é o *raytracing*, sendo necessário o utilizador parametrizar a abertura vertical do feixe de raios. Excetuando estes valores, não é dada qualquer opção ao utilizador no que toca a alteração de fatores de escala de *raytracing* ou da forma como os raios surgem no gráfico.

Quanto ao cálculo do excesso de sinal, deve referir-se por um lado a simplicidade resultante do número de parâmetros ser bastante reduzido, que acarreta, por outro lado, a perda significativa da fiabilidade dos resultados obtidos. Com efeito, pode verificar-se que o *Raypath* trata do ruído como um valor único, não havendo capacidade de definir ruído próprio e ruído ambiental. Deve partir-se também do pressuposto que o nível de ruído introduzido é o nível de banda para a banda de receção do sonar, visto que nenhum valor de largura de banda é solicitado ao utilizador. Tanto os valores de DT, como DI e TS têm de ser definidos pelo utilizador, assim como as perdas por interação de superfície e fundo, o que pode ser extremamente difícil, devido ao grande conhecimento dos parâmetros ambientais e à forma como estes afetam as perdas por reflexão terem de ser dominados pelo operador.

A deteção passiva é tratada no *Raypath* como contra deteção, que significa assumir a radiação sonora pelo navio ou por outro submarino tal como foi parametrizada para a previsão sonar ativo, a partir da qual um dado submarino, com dado DI e DT e com os hidrofones na mesma banda, procura o contacto. Tendo em conta que a deteção passiva torna a previsão pelo método do *Raypath* extremamente desadequada, a solução apresentada por Peter Lenk de assumir que a propagação se encontra bem modelada e que o submarino procura o contacto em modo passivo, sem alteração recíproca de azimute e de forma estacionária no tempo, poderá ser a única forma de prever a deteção passiva pelo método de *raytracing*. Será a forma mais completa e correta do operador prever a sua capacidade de deteção passiva? Muito possivelmente não o é.

Por último, não é surpresa que o *Raypath* seja muito prezado pela comunidade operacional das Marinhas que o utilizam. Afinal, a sua capacidade de se integrar com sistemas

de bordo e simplicidade de operação possibilitaram a sua implementação nos navios. Não obstante, não deve ser esquecido que o *Raypath* é um *software* que data de 1996, não sendo, portanto, o mais fiável. Pelas lacunas existentes no modelo de propagação e insuficiência de parâmetros que caracterizem o ambiente, a plataforma e o sonar, o *Raypath* perde para o *Lybin* na qualidade de sistema de previsão operacional. De modo análogo, a estética desatualizada do *software* torna-o pouco apelativo para fins académicos.

## 2.2. FAPSO

O FAPSO (Ferramenta de Apoio à Previsão Sonar Operacional) é uma aplicação computacional que procura dar resposta ao problema da previsão sonar de forma eficaz e eficiente, no contexto do planeamento das operações navais ASW, da formação e do ensino nesta área de aplicação.

A ferramenta procura dar resposta fundamentada aos pontos sensíveis do *Lybin* e do *Raypath* (ver subcapítulo 2.1.), enquanto permite uma utilização “*stand-alone*”<sup>52</sup> que facilita a sua utilização fora do contexto operacional. A previsão efetuada pelo FAPSO é resultante da resolução da equação sonar ativo e passivo e, conseqüentemente, dos termos que as compõe (ver subcapítulo 1.2.).

Apesar do facto do FAPSO ter sido desenvolvido com o contributo da comunidade operacional da Marinha, deve-se ter em conta que o trabalho foi desenvolvido no sentido de evitar divulgação de informação classificada dentro da comunidade científica, pelo que nenhum dos parâmetros predefinidos do FAPSO coincide propositadamente com valores dos equipamentos e navios da Marinha. Não obstante, a ferramenta poderá ser facilmente modificada de modo a acomodar um conjunto de definições específicas para um navio e para o seu sonar, refinando assim a experiência do operador.

Com a vista à apresentação do trabalho de dissertação na 5ª Edição das Jornadas de Engenharia Hidrográfica, foi ainda desenvolvida uma versão variante do FAPSO, designada por “Delfim” (apêndice A).

O FAPSO foi desenvolvido em linguagem MATLAB, sendo o seu código (*fapso.m*), a sua GUI (*Guide User Interface*) (*fapso.fig*), todos as funções e bases de dados essenciais para

---

<sup>52</sup> Pretende-se que seja o máximo independente de outros sistemas e sensores que apenas possam ser acedidos a bordo dos navios.

o seu funcionamento, assim como um guia de instruções para utilização do programa colocados em *pen* USB (apêndice C).

### 2.2.1. Base de dados

Efetuada a devida análise crítica ao *Lybin* e *Raypath*, verificou-se que uma das lacunas transversais aos dois *softwares* é, de facto, a incapacidade de prever a propagação acústica em imersões superiores ao limite operacional das sondas XBT e XSV. Após investigação, descobriu-se solução ao adotar e integrar uma base de dados climatológica com perfis de temperatura e salinidade distribuídos espacialmente à escala mundial.

Posto isto, verificou-se que a NOAA<sup>53</sup> possui uma base de dados, de carácter *open source*, de perfis de temperatura, salinidade, níveis de oxigénio, entre outros parâmetros de interesse oceanográfico, distribuídos pelo globo.

A base de dados WOD2013 é a versão mais atualizada disponível e apresenta resolução espacial de cinco graus, de um grau e de um quarto de grau de latitude e longitude. Para o âmbito do projeto de dissertação foram apenas consideradas a resolução de um grau e de um quarto de grau. Estas resoluções representam uma grelha espacial que tem, como unidade, uma área de um grau de latitude por um grau de longitude ou um quarto de grau de latitude por um quarto de grau de longitude, respetivamente. Apesar de a resolução de quarto de grau permitir trabalhar com áreas 16 vezes mais pequenas e, portanto, com maior rigor, a falta de dados comparativamente à escala de um grau poderá por em causa os cálculos e resultados e levar à utilização preferencial da resolução de um grau. Esta situação será também estudada, por forma a determinar a resolução mais adequada.

A NOAA agrupou ainda, por estações e meses, as observações que constituem os perfis da WOD2013, sendo que existe uma grelha de perfis mundial para cada mês do ano, para as estações verão e inverno e anual. A última sem discriminação da data de recolha de dados. Será também analisado qual destes perfis climatológicos proporciona resultados mais coerentes, visto que da escala anual para a escala mensal, existirá sempre perda no volume de dados fornecidos.

---

<sup>53</sup> A NOAA (*National Oceanographic and Atmosphere Administration*) atua como entidade responsável pela produção, divulgação e administração do conhecimento oceanográfico e atmosférico para os Estados Unidos da América.

A base de dados foi transferida através do portal da WOA (*World Ocean Atlas*)<sup>54</sup> 2013 que agrupa os dados da WOD2013 por tipo de parâmetro observado e permite fazer a transferência em formato .csv (*comma separated values*), ASCII ou para *software* ArcGIS da distribuição mundial, por profundidade, desse mesmo parâmetro. A base de dados lida pelo FAPSO apresenta formato .csv.

Por fim, deve referir-se que a abundância de dados na WOA 2013 deve-se ao facto de possuir valores observados entre 1955 e 2013, pelo que a evolução dos sistemas sondadores de temperatura e salinidade e a alteração da distribuição destas propriedades no oceano, ao longo do tempo, poderão afastar valores da WOA 2013 dos valores atuais, em casos pontuais. Não obstante, o objetivo da base de dados climatológica é suprir a falta de dados em imersões superiores à profundidade das sondas XBT e XSV, onde, por norma, a temperatura e salinidade não sofrem mudanças significativas.

### **2.2.2. Inclusão de XBT ou XSV**

A utilização de climatologia para definição dos perfis de temperatura e de salinidade é uma potencialidade relativa aos demais programas similares que foram estudados, pelo facto de não estar dependente de qualquer equipamento de leitura de sondas XBT ou XSV. Em análise ao caso da Marinha, as sondas utilizadas com mais frequência são as XBT. O perfil de temperatura recolhido é utilizado para delimitar o perfil de velocidade do som, sendo desprezado o perfil de salinidade e a influência, apesar de pequena, que este fator tem para o cálculo da velocidade de propagação do som. Continuando o estudo de caso desta organização, quando é impossível efetuar lançamento de uma sonda XBT ou XSV, são utilizados dados climatológicos retirados de uma publicação desatualizada, o que resulta numa previsão sonar inadequada.

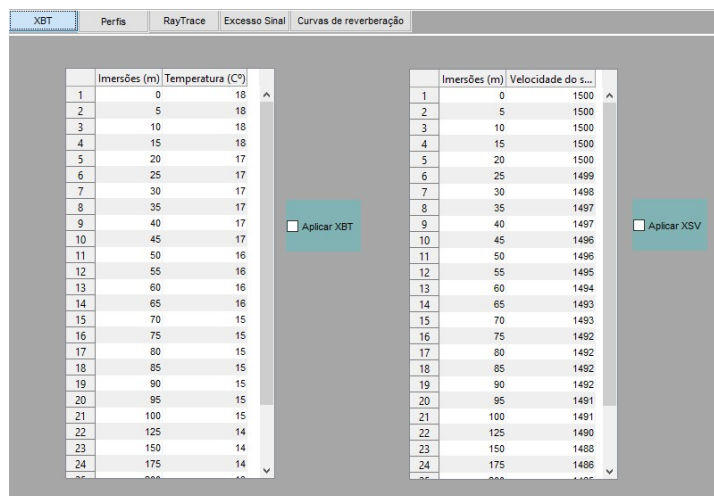
Independentemente dos erros que possam ser cometidos ao utilizar as sondas, é importante referir que a climatologia WOD2013, tal como qualquer outra, não é a solução perfeita para obter um perfil de velocidade de som exato. As sondas continuam a ser o melhor método para alimentar a previsão sonar até à profundidade limite que possam atingir.

É por este motivo que o FAPSO permite ao utilizador introduzir o perfil de temperatura ou de velocidade do som até aos 300 metros para profundidades de 5 em 5

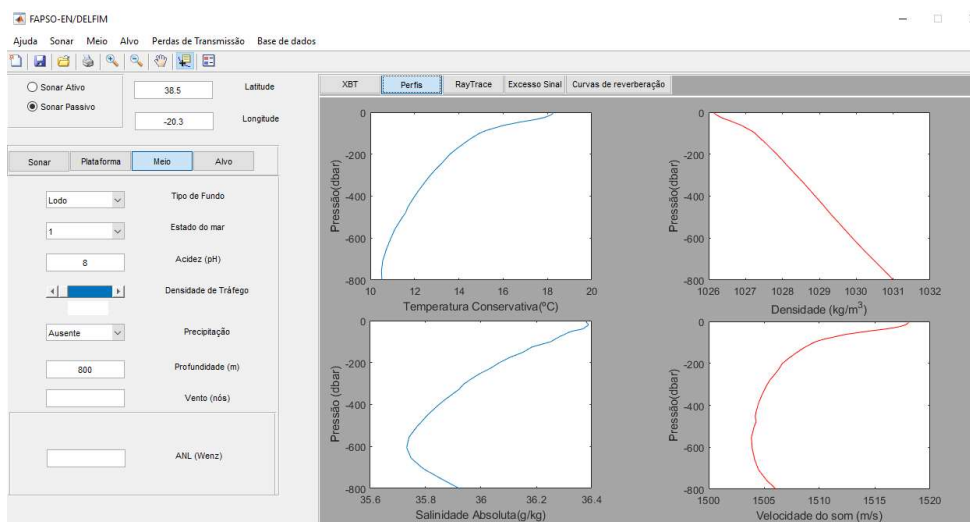
---

<sup>54</sup> <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/woa13data.html>

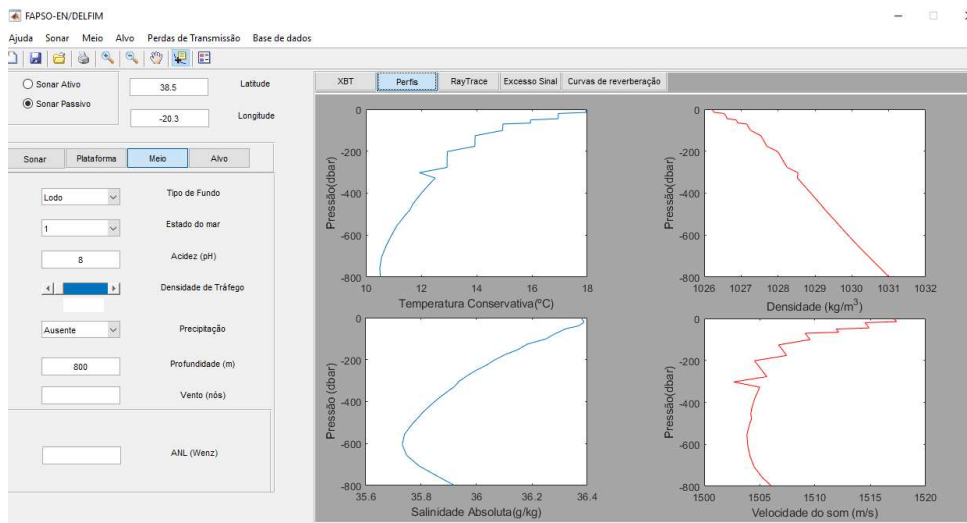
metros até aos 100 metros e de 25 em 25 metros até aos 300 metros, conforme Figura 39. Se o perfil inserido for resultante de sonda XBT, é então sobreposto ao perfil de temperatura da posição definida, sendo o perfil resultante utilizado para calcular os perfis de densidade e de velocidade do som (Figura 40). Caso o perfil introduzido seja de sonda XSV, o mesmo é sobreposto ao perfil de velocidade do som calculado apenas a partir de perfis da base de dados.



**Figura 39** – O programa FAPSO possibilita definir um perfil até aos 300 metros, seja XBT ou XSV, consoante seleção “Aplicar XBT” ou “Aplicar XSV”. O perfil irá sobrepor-se aos perfis da climatologia.



**Figura 40** – Perfis climatológicos da base de dados anual, com 1° de resolução espacial, para a posição latitude 38,5°N, longitude 20,5°W, profundidade no local igual a 800m.



**Figura 41** – Perfis resultantes da aplicação dos valores de temperatura do perfil XBT da Figura 39 aos perfis climatológicos da Figura 40.

### 2.2.3. Função *raytrace*

À semelhança dos *softwares Lybin* e *Raypath*, o FAPSO utiliza uma função de *raytracing* (ver subcapítulo 1.9.) para modelar a propagação. Para o efeito, foi utilizado o algoritmo de Val Schmidt (2009), da Universidade de New Brunswick: obtido através do website <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26253-raytrace>, denominado *raytrace* e desenvolvido em MATLAB.

A função *raytrace* permite calcular o trajeto de um raio de som que se propaga num meio com distribuição horizontal isotrópica do perfil de velocidade do som. O algoritmo necessita de um vetor de velocidades do som associado a um vetor de imersões; da posição inicial da propagação, nas componentes vertical e horizontal; do ângulo inicial do raio, em relação à horizontal, e do tempo de propagação previsto. Introduzidos os parâmetros, a função calcula o trajeto do raio sonoro e devolve quatro vetores: os vetores de coordenadas verticais e horizontais, o vetor de tempo efetivo de propagação e o vetor de distância percorrida pelo raio.

Por fim, a função *raytrace* resolve as eventuais interações do raio sonoro com a superfície e fundo, existindo ainda a possibilidade de alterar a variável *MAXBOUNCES* no código da função por forma a limitar o número de reflexões e extinção do raio.

#### 2.2.4. Funções TEOS-10

Considerando que a função *raytrace* requer um perfil de velocidade do som, encontrou-se forma de, através dos perfis de salinidade e temperatura obtidos da base de dados da NOAA, calcular o perfil de velocidade do som utilizando as funções da TEOS-10 (*Thermodynamic and Equation of State of Seawater*)<sup>55</sup>.

A TEOS-10 é a convenção aceita pela *Intergovernmental Oceanographic Commission* (IOC), pela *International Association for the Physical Sciences of the Oceans* (IAPSO), pelo *Scientific Committee on Oceanic Research* (SCOR) e pela *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG) e atualmente em vigor para cálculo das propriedades termodinâmicas da água do mar (Pawlowicz, 2013, pp. 1-10). Esta convenção surgiu com o propósito de substituir a EOS-80 (*Equation of State of Seawater*) e permitir o cálculo de todas as propriedades termodinâmicas da água do mar, considerando as propriedades químicas da água e atribuindo à salinidade uma nova unidade de medida. Consequentemente, a TEOS-10 garante o cálculo das propriedades da água do mar, de forma mais realista e exata.

No âmbito da aplicação da TEOS-10 ao *software*, fez-se uso do conjunto de funções da *Gibbs-SeaWater* (GSW) *Oceanographic Toolbox* na versão compatível com o MATLAB.

É importante referir que o conjunto de funções GSW utilizadas tiveram como propósito direto o cálculo da velocidade do som a partir da climatologia da NOAA. Houve, porém, necessidade de transformar os valores de salinidade e temperatura, que se encontravam em unidades de salinidade prática (psu) e temperatura in-situ (em °C) respectivamente, em salinidade absoluta (g/kg) e temperatura conservativa<sup>56</sup> (°C). Também a imersão (m) foi transformada em pressão (dbar).

A pressão é parâmetro de entrada para todas as transformações posteriormente efetuadas e foi calculada pela função *gsw\_p\_from\_z* a partir dos 108 valores de imersão pré-definidos: da superfície aos 100 metros por incrementos de 5 metros, dos 100 aos 500 metros por incrementos de 25 metros, dos 500 aos 2000 metros por incrementos de 50 metros e dos 2000 aos 5000 metros por incrementos de 100 metros.

---

<sup>55</sup> Disponível em <http://www.teos-10.org>.

<sup>56</sup> A temperatura conservativa é a entalpia potencial dividida pelo calor específico da água na superfície do mar a pressão constante  $C_{p0} = 3991,86795711963 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . A diferença entre temperatura potencial e temperatura conservativa pode ser tão grande quanto 0,14° C.

A SA (salinidade absoluta) foi uma das alterações implementadas na TEOS-10 em relação à EOS-80 e exprime a salinidade como fração de massas, enquanto que a SP (salinidade prática) é função da condutividade elétrica à temperatura de 15°C e pressão de 0 dbar (IOC *et al.*, 2010, pp. 9-10) de uma amostra de água do mar. Desta forma, foi utilizada a função *gsw\_SA\_from\_SP* para exprimir os valores de salinidade de acordo com a convenção.

Analogamente, foi utilizada a função *gsw\_CT\_from\_t* para transformar a temperatura *in situ* da base de dados em temperatura conservativa, que é utilizada, em conjunto com a SA e pressão para determinar a velocidade do som.

Por fim, a velocidade do som foi calculada com recurso à função *gsw\_sound\_speed*.

### **2.2.5. Cálculo de distâncias percorridas**

A função de *raytracing* atribuída a Val Schmidt, conforme descrito no sub-subcapítulo 2.2.3., devolve um vetor de distância percorrida pelo raio, sendo este o valor de distância máxima da propagação desse raio, vulgarmente referido como o alcance. Face à necessidade premente de saber qual a distância ponto a ponto, para estimar as perdas de transmissão em função distância percorrida, gerou-se um algoritmo baseado no teorema de Pitágoras. Desta forma, o intervalo entre dois valores de posição vertical e o intervalo entre duas posições horizontais são utilizados para calcular a distância, que é sucessivamente acumulada.

Como resultado, obtém-se um vetor de distâncias que varia sempre que a coordenada vertical ou horizontal do raio varia, pronto a ser empregue em cálculos de perdas de transmissão ou de outros fatores que variem em distância e onde seja importante reter os seus valores pontuais.

### **2.2.6. Interações com a superfície e o fundo**

Assim como foi referido no sub-subcapítulo 2.2.3., o algoritmo de Val Schmit prevê o fenómeno de reflexão do raio de som quando este atinge a superfície e o fundo. De facto, a função *raytrace* necessita de receber o perfil de velocidade do som e assume que o valor inicial corresponde à superfície ( $z=0$ ) e o valor final corresponde à profundidade no local.

Em análise à base de dados na NOAA utilizada, verifica-se que, em algumas posições no globo com valores de profundidade elevados, nem sempre foram sondadas todas as profundidades. Nestes casos, o perfil de velocidade de som construído a partir dos perfis de

salinidade e temperatura poderá estar incompleto e os cálculos efetuados poderão ser feitos com um valor de profundidade irrealista. Com vista à colmatação deste problema é fornecida uma caixa de texto, editável pelo utilizador, que deve ser sempre alimentada com o valor de profundidade no local. Caso se verifique que a profundidade no local é inferior ao último valor do perfil, este fica limitado à profundidade introduzida pelo utilizador e são desprezados os restantes valores. Se, no entanto, for introduzida uma profundidade superior à profundidade máxima sondada, o perfil não fica limitado.

As interações com a superfície e com o fundo podem, para além da reflexão, também provocar espalhamento do som e reverberação. Ambos são consequência do tipo de fundo, que é também editável pelo utilizador e que pode ser conhecido com recurso a estudos hidrográficos ou a cartas eletrónicas ou em papel.

A solução encontrada para as perdas por espalhamento residiu em encontrar valores de referência de perdas por interação para vários tipos de fundo, o que, é prático e permite simplificar o algoritmo, mas que elimina fatores como o ângulo de incidência, rugosidade do fundo e relevo submarino. Os valores utilizados são referência para a Marinha e podem ser encontrados em guias de previsão sonar de navios com capacidade antissubmarina.

### **2.2.7. Introdução dos termos da equação sonar**

As equações sonar ativo e passivo (ver subcapítulo 1.2.) são as principais linhas orientadoras do algoritmo que constitui o FAPSO, sendo o objetivo do *software* resolver as equações em função do termo excesso de sinal, por forma a obter o alcance de deteção estimado ou o *predicted sonar range* (PSR)<sup>57</sup> e o alcance estimado para a contra deteção ou *counterdetection range* (CDR)<sup>58</sup>.

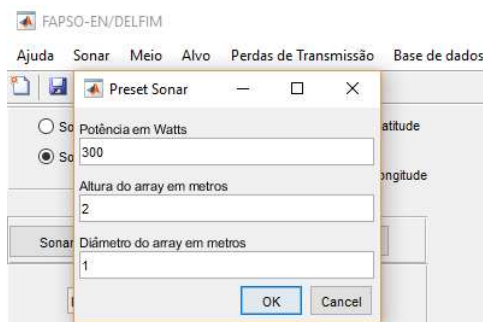
Os termos das equações sonar devem, portanto, ser definidos, por forma a obter os valores da previsão. Os fatores TL, RL são exclusivamente calculados pelo programa e são vetores constituídos pelos valores de TL e RL em função da distância percorrida pelo raio de som. Os restantes termos são escalares, ou seja, constantes em função da distância

---

<sup>57</sup> O PSR é um valor determinado para todas as unidades navais com capacidade ASW e depende dos seus sensores, condições oceanográficas e do alvo. O valor de PSR é, por norma, calculado para uma probabilidade de deteção de 50% (ATP1(G) Vol.1, 2015).

<sup>58</sup> O CDR de um navio depende das suas próprias transmissões sonar, do ruído irradiado e emissões eletromagnéticas, como rádio ou radar (ATP28(B), 2008).

percorrida pelo som. Para TL e RL, é impossível ao operador introduzir diretamente na GUI, enquanto que, para SL, DI, DT, NL e TS o utilizador deve definir o seu valor através da GUI. Para SL e DI, o algoritmo apresenta uma forma alternativa de cálculo, como redundância à introdução direta pelo utilizador. Deve lembrar-se que, para o cálculo de SL, deve ser conhecida a potência e o  $DI_T$  do equipamento sonar (ver subcapítulo (1.2.) e que pelo método referido no sub-subcapítulo 1.4.1.,  $DI = DI_T = DI_R$  é calculado a partir da frequência de operação, da altura e do diâmetro do *array*. Desta forma, o DI e SL podem ser calculados, se o utilizador introduzir os valores no menu sonar (ver Figura 42).



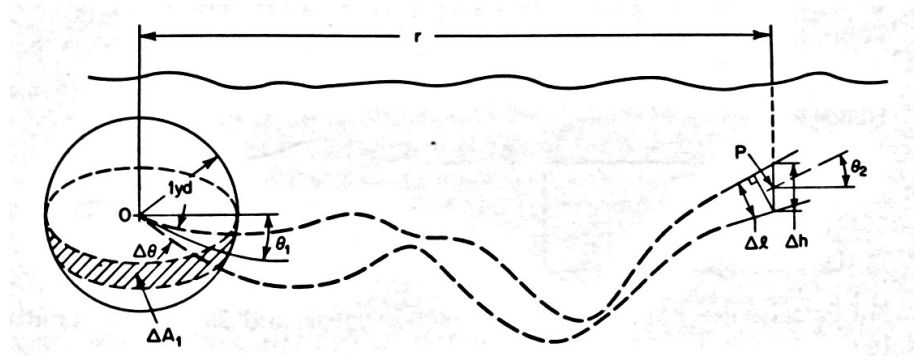
**Figura 42** – Menu de predefinições sonar. Se a potência, altura e diâmetro do sonar cilíndrico estiverem definidos, o programa calcula autonomamente SL e DI.

### 2.2.8. Métodos de cálculo de TL

As perdas de transmissão (ver subcapítulo 1.6.) são calculadas tendo em conta a previsão da dispersão geométrica da onda sonora e os fenómenos de absorção pela água do mar.

No FAPSO, a componente de absorção do som é calculada de acordo com a função de Ainslie e Mccolm (1998), que representa, na prática, uma atenuação, na ordem dos 0,05 dB por quilómetro, dependendo da temperatura da água, da sua salinidade, acidez e frequência do som em propagação. No modelo desenvolvido, parte-se do pressuposto da distribuição horizontal homogénea destas características, variando apenas em função da imersão. Para o valor de pH, o valor médio predefinido é de  $\text{pH} = 8$ , podendo este parâmetro ser alterado pelo operador. Para os valores de temperatura e salinidade, são calculados os valores médios dos perfis de temperatura e salinidade para a posição definida pelo utilizador, da base de dados por ele também selecionada. A frequência de operação é também selecionada pelo utilizador, tendo em conta as características do sonar.

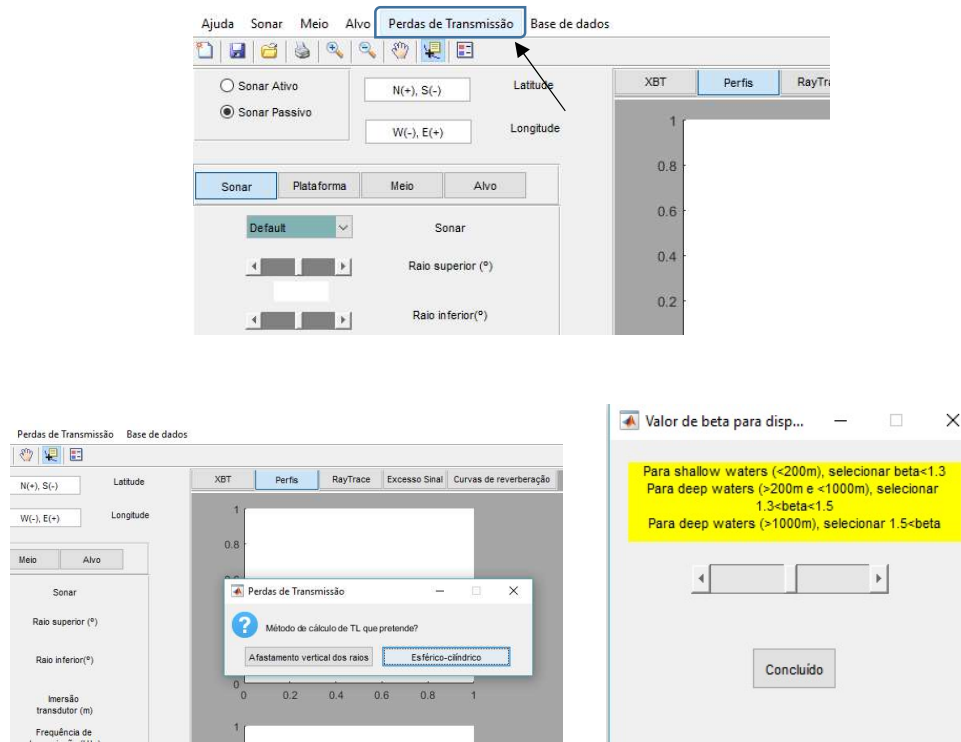
Os métodos utilizados para a dispersão geométrica são o afastamento vertical de raios e a dispersão esférico-cilíndrica. O afastamento vertical de raios é, por norma, utilizado pelos *softwares* que se apoiam em teorias de *raytracing* como o *Lybin* (Dombestein, 2011, p. 3) e o *Raypath* (Lenk, 1996, p. 19) e consiste na estimativa do valor de TL baseado na distância vertical entre dois raios e na distância ao projetor. Desta forma, esta teoria prevê os fenómenos de convergência e divergência e a forma como as perdas são menores em zonas de convergência de raios e maiores em zonas de divergência ou zonas sombra (Figura 43).



**Figura 43** – O afastamento vertical de dois raios  $\Delta h$  e a sua abertura angular no projetor  $\Delta\theta$  permitem calcular, no ponto  $P$ , o nível de perdas de transmissão. Se  $\Delta h$  diminuir, dá-se convergência e conseqüente diminuição de TL, se  $\Delta h$ , a situação é de divergência e TL aumenta.<sup>59</sup>

A dispersão esférico-cilíndrica recebe o nome por intercalar a dispersão cilíndrica,  $TL = 10 \log r$  e a dispersão esférica,  $TL = 20 \log r$ , resultando na expressão  $TL = 10 * b * \log r$ . O utilizador deve escolher o valor  $1 < b < 2$ , no menu “perdas de transmissão - dispersão esférico-cilíndrica” (Figura 44) tendo em conta a profundidade do local. Para maiores profundidades ou águas profundas, a propagação assume uma dispersão aproximadamente esférica, sendo aconselhado  $b = 1,8$  para profundidades iguais ou superiores a 1000 metros, enquanto que para águas pouco profundas, ou profundidades na ordem dos 200m,  $b = 1,2$ .

<sup>59</sup> Adaptado de Urick (1983, p. 127).



**Figura 44** – Definição do valor de  $b$  para o método de TL esférico-cilíndrico.

Por fim, apesar de mais simples, o método de afastamento vertical de raios recorre a um maior volume de cálculos, inerente da maior complexidade do algoritmo que o define, pelo que poderá, em casos pontuais, acumular erros numéricos e apresentar um resultado menos fiável. Por sua vez, o método de dispersão esférico-cilíndrica tem um algoritmo simples e produz resultados fiáveis, quando introduzido o valor adequado para  $b$ , sendo para tal devida mais atenção e sensibilidade da parte do operador.

### 2.2.9. Nível de reverberação

O nível de reverberação (RL) pode ser dividido em nível de reverberação de fundo, de superfície do mar e de volume (ver sub-subcapítulo 1.5.1.).

O valor da reverberação de volume é função da presença de dispersões ou seres vivos, ao longo da coluna de água, que possam causar reflexões indesejadas da onda sonora de volta para o transdutor, dificultando a receção do eco desejado. A RL de volume integra os vários valores de *backscattering* (espalhamento de retorno, em português) a cada profundidade da coluna de água que variam também em função do tempo e da frequência de emissão, visto

que a presença de várias espécies de vida marinha varia em profundidade ao longo do dia. Por estes motivos, o valor de RL de volume deve ser estimado com recurso estudos oceanográficos e biológicos efetuados para a área de operações (Hodges, 2010, p. 152).

Posto isto, o FAPSO calcula então o RL total com recurso apenas aos valores de RL de superfície do mar e de fundo e considera o seu valor como resultado de uma soma da intensidade destes dois fatores em função da distância à qual se dá a reflexão do raio sonoro.

A reverberação pode ser calculada à semelhança do processo de deteção ativa, que depende da intensidade do sinal emitido (SL), da capacidade refletora do espalhador ( $TS_{rev}$ ) e das perdas de transmissão associadas à distância a que o reverberador se encontra do transdutor ( $2TL_{rev}$ ), através da seguinte equação (Hodges, 2010, p. 154):

$$RL = SL + TS_{rev} - 2TL_{rev}$$

Em que, segundo Hodges (2010, p. 154),

$$TS_{rev} = BS_{rev} + 10\log(A \text{ ou } V)$$

Visto que o modelo de propagação utilizado é o *raytracing* e que cada raio é normal às superfícies isofásicas de uma onda assumida plana, a área abrangida pela interação é impossível de ser quantificada. Por forma a dar continuidade ao cálculo, assumiu-se que a área da superfície de reverberação de cada raio é igual a 1 metro quadrado, em que

$$TS_{rev} = BS_{rev}$$

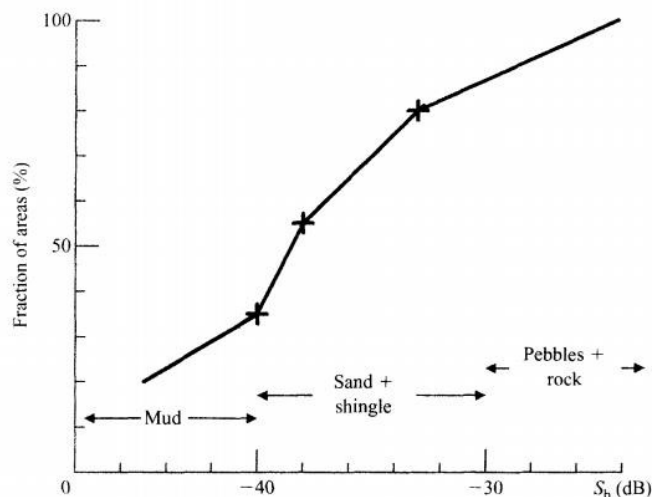
Para o espalhamento de retorno da superfície do mar é utilizada a seguinte equação (Hodges, 2010, 8.28):

$$BS_s = 9,9 \log [ f h \sin(\varphi) ] - 45.3$$

Em que  $f$  é a frequência de operação em kHz,  $h = 0.0026 v (5/2)$ , sendo  $v$  o vento verdadeiro em nós,  $h$  a rugosidade da superfície do mar em pés e  $\varphi$  o ângulo de incidência na superfície. Esta equação é aplicável desde a incidência não seja aproximadamente normal à superfície.

O espalhamento de retorno do fundo depende essencialmente do tipo de fundo, do ângulo de incidência e da frequência de emissão. Foi consultada a Figura 6.8 de Waite (2002) e retirados os seguintes valores (Figura 45):  $BS_{lodo} = -45\text{dB}$ ,  $BS_{areiafina} = -40\text{dB}$ ,  $BS_{areiafina} = -36\text{dB}$ ,  $BS_{areiafina} = -36\text{dB}$ ,  $BS_{rocha c/areia} = -33\text{dB}$  e  $BS_{rocha} = -27\text{dB}$ , resultantes do estudo de BS para os tipos de fundo presentes nas águas pouco

profundas do Reino Unido. Hodges (2010, pp. 152-153) admite que para fundos de lodo e areia o BS aumenta, acompanhando um aumento de frequência, enquanto para fundos de rocha e rocha com areia, o BS é independente da frequência de operação.



**Figura 45** – Estudo efetuado no Reino Unido com os tipos de fundo mais comuns e os seus níveis de espalhamento de retorno.<sup>60</sup>

O cálculo de RL de superfície e fundo, é efetuado, numa fase inicial, raio a raio, ou seja, para cada raio é guardado o RL em função da distância percorrida pelo raio sonoro. Na prática, para um sinal com dado SL, o raio sofre atenuação ( $2*TL$ ) até atingir o espalhador e de volta até ao transdutor, dependendo das características de espalhamento de retorno do objeto (BS), resulta um valor de RL final recebido que é função da distância à qual ocorre a interação. Como se considera espalhamento de retorno, a atenuação sofrida até ao espalhador é igual à atenuação no sentido oposto até ao projetor.

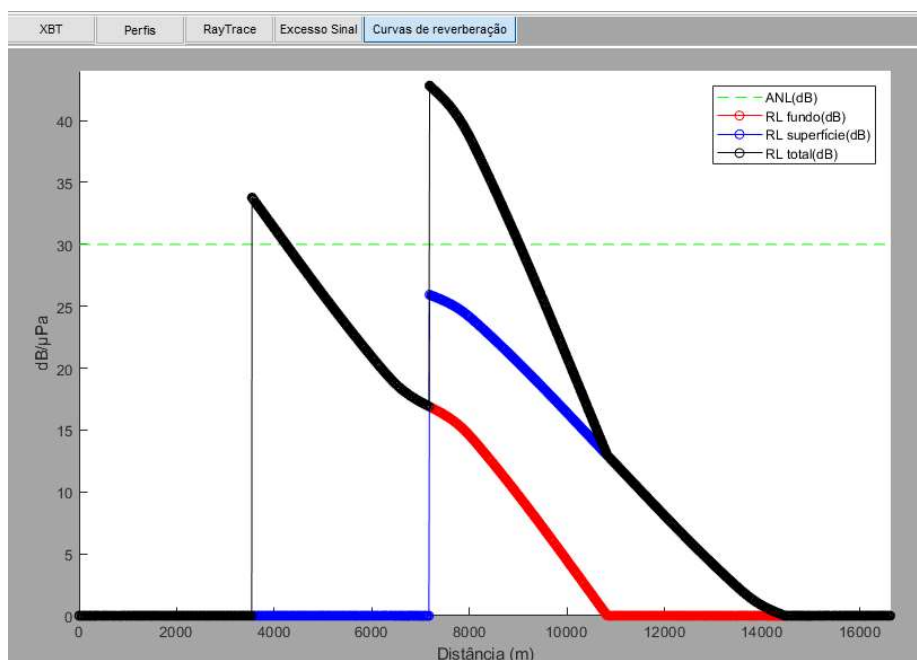
Em suma, o  $RL_{fundo}$  varia em função da distância ao espalhador, sendo que as capacidades refletoras dos objetos são modeladas no programa apenas a partir do tipo de fundo, se  $RL_{fundo}$ , assumindo que a frequência é inferior a 10 kHz, que corresponde essencialmente à banda de frequências mais utilizadas pelos sonares militares. Para o  $RL_{superfície}$  o processo é semelhante, sendo que uma distância superior à superfície do mar reduz o valor de RL. O BS da superfície do mar depende, por sua vez, do ângulo de

<sup>60</sup> Retirado de Waite (2002), Fig. 2.8.

incidência, mas também da frequência do sinal e da agitação marítima induzida pela velocidade do vento no local.

Posteriormente, são desprezados os valores negativos de RL de fundo e de superfície, visto que equivalem a distâncias às quais a atenuação induziria valores negativos de RL, que não afetam o processo de detecção. É então calculado o valor médio de RL de fundo e superfície entre raios e, conseqüentemente, a distância média das interações. Segundo este modelo, o valor de RL seria zero e teria picos ou valores positivos nas distâncias onde houvesse incidência do raio médio com uma das superfícies, o que não é inteiramente realista. Sabe-se que o processo de reverberação é na verdade uma reflexão da frente de onda, em que RL atinge um pico e decresce gradualmente com o aumento de distância ao espalhador. Este fenómeno é simulado, forçando a diminuição linear, de declive igual a um, entre dois pontos do gráfico em que RL assume diferentes valores.

Finalmente, são somadas as funções RL de fundo (a vermelho) e de superfície (a azul), por forma a obter o  $RL_{total}$  (a preto) e comparar com o nível de ruído (a verde tracejado) conforme Figura 46.



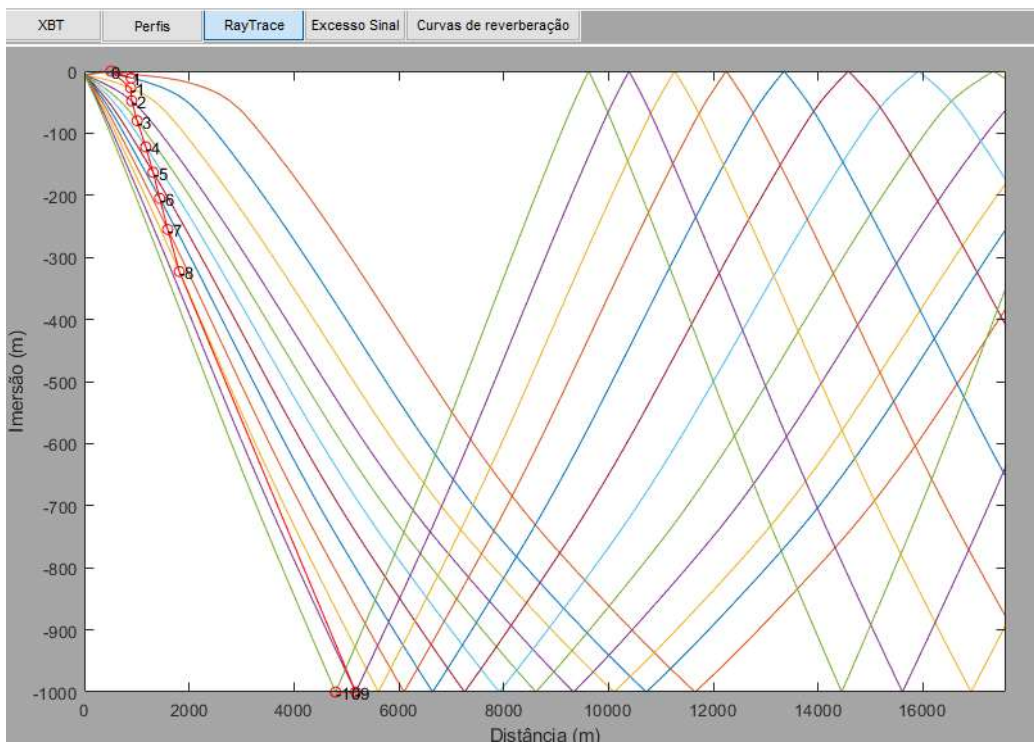
**Figura 46** – Curvas de reverberação de fundo (a vermelho), de superfície (a azul) e total (a preto), para uma área com ruído ambiente igual a 30 dB.

### 2.2.10. Cálculo do excesso de sinal

O excesso de sinal é o fator que se procura obter ao resolver as equações sonar definidas no subcapítulo 1.2. É a quantificação do nível sonoro em dB do sinal em relação a todos os fatores que atenuam a propagação ou características do sonar ou alvo que dificultam o processo de detecção.

Alguns dos métodos utilizados para o cálculo dos vários fatores da equação sonar ativo foram sendo abordados ao longo do subcapítulo 2.2., no entanto é conveniente descrever faseadamente o algoritmo, desde que é calculado o trajeto dos raios sonoros, até ao momento em que é apresentado o alcance de detecção no gráfico de *raytracing* e o gráfico de excesso sinal.

O algoritmo começa por definir um vetor de coordenadas horizontais e coordenadas verticais para cada raio, a partir dos resultados obtidos pela função *raytrace* atribuída a Val Schmidt. De seguida, é calculado o vetor que guarda a distância percorrida por cada raio em cada ponto de coordenadas verticais e horizontais, de acordo com o sub-subcapítulo 2.2.5.. Esta distância será posteriormente utilizada para encontrar os pontos onde ocorrem interações com o fundo e com a superfície e onde haverá perdas do nível sonoro por espalhamento, como é explicado no sub-subcapítulo 2.2.8., entre muitos outros cálculos, incluindo os próprios alcances de detecção. Posteriormente, às perdas à superfície e no fundo, são calculadas as perdas de transmissão raio a raio, em função da distância percorrida, do fator definido para as perdas de absorção (sub-subcapítulo 2.2.8.) e do método escolhido para a dispersão, esférico-cilíndrico ou por afastamento vertical de raios (sub-subcapítulos 1.6.1. e 2.2.8.). O RL (ver sub-subcapítulo 1.2.9.) é calculado imediatamente a seguir e são lidos os restantes fatores da equação sonar. É feita comparação ao longo do vetor de RL entre o seu valor e o valor de ANL, pois ao longo da distância percorrida pelo som, o excesso de sinal dependerá do maior destes dois valores, sendo para essa distância percorrida, esse o fator que limita a detecção. Finalmente, o programa calcula o vetor SE em função da distância percorrida e define o alcance de detecção para cada raio como a distância onde  $SE = 0 \text{ dB}$ . Os valores de alcance de detecção são mostrados no gráfico de *raytracing* a vermelho, e unidos, de modo a estimar o alcance de detecção na zona do gráfico entre dois raios (Figura 47).



**Figura 47** – Gráfico de *raytracing*. A vermelho os alcances de detecção para cada raio e estimados para o intervalo entre os raios.

O gráfico de SE não efetua quaisquer cálculos adicionais em relação aos que foram previamente enunciados, sendo a sua função definida pelo algoritmo que atribui, segundo gradiente de  $SE = 5 \text{ dB}$ , uma cor diferente às respectivas áreas do gráfico. Da mesma forma, é identificada a transição de uma área com SE superior 5 dB à adjacente com uma linha que une aproximadamente os pontos com mesmo valor de SE (Figura 48).

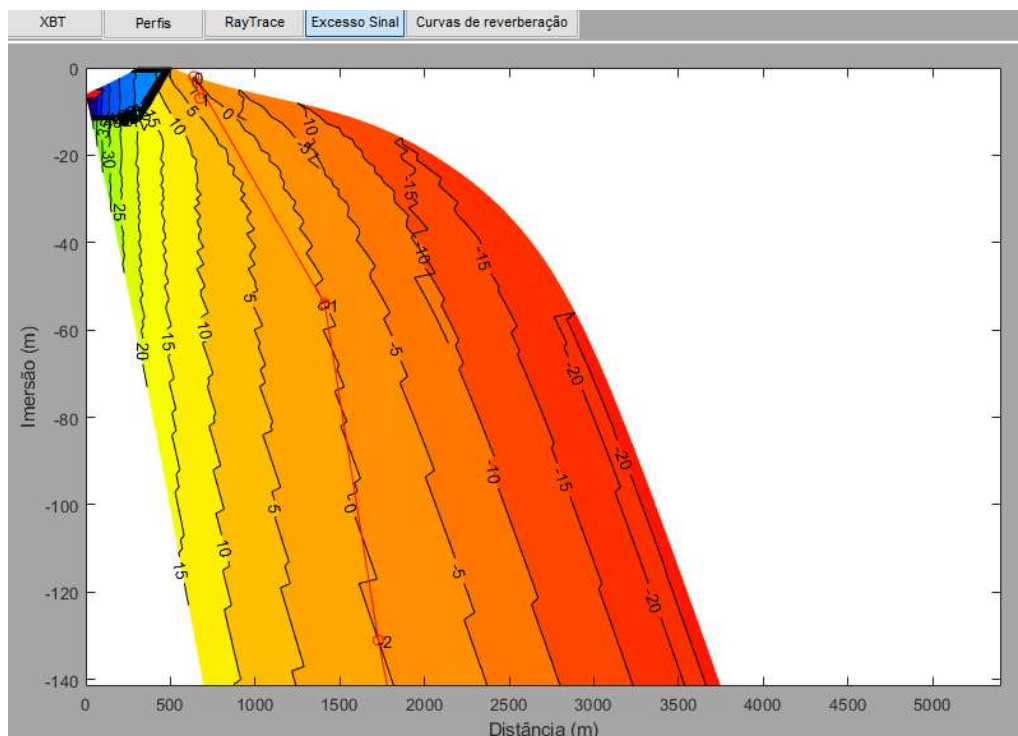


Figura 48 – Gráfico de SE com gradiente de coloração igual a variações de 5 dB.

### Capítulo 3. Discussão de resultados

O presente capítulo pretende analisar com detalhe todos os resultados obtidos ao utilizar o *software* de previsão sonar desenvolvido no âmbito da dissertação. Em paralelo, procura-se comparar os resultados do FAPSO aos produtos resultantes da utilização dos *softwares* que são também analisados neste trabalho, ou seja, o *Raypath* e o *Lybin*.

Por forma a conferir realismo aos resultados, foi selecionada uma amostra de valores de entrada que foi utilizada nos testes efetuados aos três programas de previsão. Com efeito, a amostra de valores corresponde ao conjunto de valores recolhidos pelo SOAS (Serviço de Operações Antissubmarinas) do NRP “D. Francisco de Almeida”, aquando do exercício multinacional SWORDFISH 2018, realizado entre 20 de junho de 2018 e 28 de junho de 2018.

O objetivo final deste capítulo será de apresentar as principais desigualdades entre os três modelos de previsão, mas também a forma como a escolha de certas funcionalidades no FAPSO poderão influenciar os resultados. Deste modo, os objetos de estudo deverão ser os diferentes gráficos de perfis, *raytracing*, excesso de sinal, no FAPSO ou probabilidade de deteção, no caso do *Raypath* e do *Lybin* e curvas de reverberação, apenas para o FAPSO e *Lybin*.

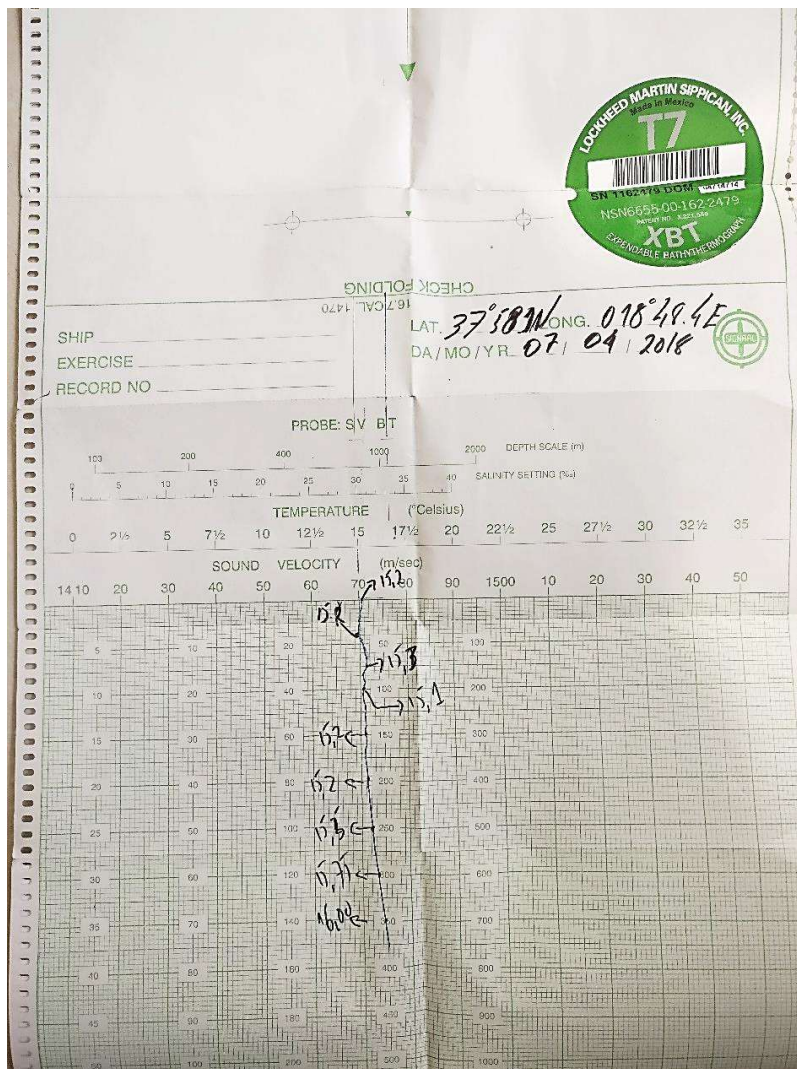
#### 3.1. Valores de teste

A amostra de valores para teste dos programas foi recolhida a bordo de uma unidade naval envolvida em operações ASW, nomeadamente, o NRP “D. Francisco de Almeida” antes de um exercício de deteção e combate contra um submarino, enquanto a navegar em força naval.

A série teve início às 15h20 do dia 26 de junho na posição 38°08’N/009°10’W. O vento soprava de oeste com intensidade igual a 10 nós, a vaga oriunda do mesmo setor tinha uma elevação de 0,5 metros. A profundidade no local era de 500 metros e o fundo constituído maioritariamente por areia fina. Assume-se que a acidez da água do mar seja pH=8, tendo em conta a impossibilidade de leitura deste valor a bordo da fragata “D. Francisco de Almeida”.

O perfil de temperatura foi construído após lançamento e registo dos valores recolhidos por sonda XBT. A folha de registo do perfil foi analisada pelo supervisor sonar,

que escolheu os principais pontos de temperatura/imersão ao longo do perfil. Estes pontos deverão ser escolhidos onde a variação de temperatura for maior, sendo fundamental selecionar os principais pontos de inflexão da temperatura, visto que correspondem, normalmente, à separação de duas camadas de água com temperatura distintas, vulgarmente conhecidas por profundidades de camada. Um exemplo de uma folha de registo após lançamento de sonda XBT é mostrado na Figura 49. Na Figura 50, é apresentada a sonda XBT utilizada para recolha dos valores de teste. Esta sonda é do tipo T4, sendo que recolhe valores até aos 460 metros de profundidade, altura em que o fio de cobre parte por atingir o seu alcance máximo.



**Figura 49** – Exemplo de folha de registo após lançamento de sonda XBT T7. Esta sonda atinge uma profundidade máxima de 760 metros. Após o perfil ser construído, o supervisor sonar seleciona os pontos mais relevantes para utilizar no *Raypath* ou no *Lybin*.



**Figura 50** – Sonda XBT T4 utilizada para leitura do perfil de temperatura para a amostra de valores de teste.

Os valores retirados do perfil foram os seguintes (ler metros-temperatura em celsius):

- 00 - 18,5
- 20 - 14,5
- 100 - 14,5
- 150 - 13,5
- 200 – 13,0

A sonda deixou de registrar valores aos 250 metros, sendo o valor terminal 13,0°C.

Tratados os valores ambientais que são necessários para a previsão, passou-se a definir os valores a atribuir aos parâmetros do sonar e da plataforma da fragata “D. Francisco de Almeida” e do alvo, neste caso o NRP “Arpão”. Devido à sensibilidade deste tipo de dados, que justifica muitas vezes a sua classificação de segurança nacional como CONFIDENCIAL ou superior, foram utilizados valores próximos dos verdadeiros, sendo qualquer coincidência com valores reais meramente fortuita.

Para os parâmetros sonar foram definidos  $SL = 220$  dB;  $DI = 25$  dB, ou seja,  $DI_{tx} = DI_{rx} = 25$  dB;  $DT = 12$  dB;  $d$  (imersão do transdutor) = 6 m;  $R_{inf}$  (raio inferior) =  $-5^\circ$ ;  $R_{sup}$  (raio superior) =  $0^\circ$ ;  $F$  (frequência de operação do sonar) = 7 kHz. Relativamente à plataforma,  $SN = 70$  dB. Quanto ao alvo,  $TS = 0$  dB.

### 3.2. Comparação entre funcionalidades do FAPSO

O FAPSO foi o *software* que pôs em prática toda a investigação elaborada no âmbito do presente trabalho e onde se procurou integrar a experiência e sugestões de melhoria dos operadores deste tipo de *softwares* na Marinha.

A previsão sonar é, de facto, um processo que relaciona diversos fatores e onde a complexidade permite um certo grau de subjetividade no cálculo dos alcances de previsão. Com efeito, o FAPSO apresenta uma e, por vezes, duas formas distintas de atingir os resultados, sendo o objetivo deste subcapítulo comparar resultados quando apenas uma variável é alterada, por forma a avaliar, sempre que possível, qual a melhor opção.

Em primeiro lugar, foi comparada a forma como as diferentes opções da base de dados se ajustam ao perfil da amostra de teste. Foram comparados perfis de temperatura da climatologia do mês de junho, anual de 1°, anual de 0,25°, de verão de 1° e de verão de 0,25°, de forma a verificar qual o perfil que melhor se assemelha ao que foi lido pela sonda XBT da “D. Francisco de Almeida” no dia 26 de junho, às 15h20.

De seguida, efetuou-se o teste entre as duas diferentes formas de calcular as perdas de transmissão, por dispersão esférico-cilíndrica, com alteração do valor de beta (ver sub-subcapítulo 2.2.8.) e por afastamento vertical dos raios. Ao mesmo tempo, procurou-se também interpretar os valores obtidos para alcances de deteção, excesso de sinal e de reverberação e verificar a sua validade e pertinência.

#### 3.2.1. Comparação de bases de dados

Inicialmente, deve considerar-se que para ser selecionado um perfil de temperatura, o FAPSO necessita saber qual a posição (em latitude e longitude) em que o utilizador deseja ter o perfil definido.

Para qualquer opção da base de dados que seja escolhida, o sinal negativo é atribuído às latitudes sul e longitudes oeste. Se for escolhida uma opção com resolução espacial de 1°, todas as coordenadas deverão terminar em .5, ou seja 38.5 e -9.5 por exemplo. Enquanto que, se o utilizador optar por uma opção com resolução de 0,25°, as coordenadas deverão terminar em .125, .375, .625, .875. Por forma a simplificar a introdução da posição o FAPSO transforma qualquer coordenada mal inserida no seu valor mais próximo que exista na opção selecionada da base de dados WOD 2013.

A sonda XBT que registou o perfil da amostra de teste foi lançada na posição 38°08'N e 009°10'W, pelo que para as resoluções de 1°, os valores a inserir para latitude e longitude deverão ser 38.5 e -9.5 e para as resoluções de 0,25°, serão 38.125 e -9.125.

De seguida, deve ser colocado o perfil XBT no FAPSO, com base nos valores de imersão definidos pelo supervisor sonar, onde a mudança de temperatura é mais relevante. Visto que o perfil XBT introduzido no FAPSO irá sobrepor-se ao perfil da base de dados e que a profundidade máxima aceite pelo FAPSO para definir o perfil XBT é de 300 metros, assumiu-se que a temperatura permaneceu constante nos 13,0°C entre os 250 e os 300 metros, apesar de a sonda não ter registado qualquer valor. Transformando o perfil simplificado da amostra de teste (ler metros-temperatura em celsius):

- 00 - 18,5
- 20 - 14,5
- 100 - 14,5
- 150 - 13,5
- 200 – 13,0
- 250 – 13,0
- 300 – 13,0

O FAPSO requer que todos os valores da sua tabela XBT sejam preenchidos, pelo que se assumiu uma variação linear de declive unitário entre os valores definidos. O perfil resultante é apresentado na Figura 51.

A Figura 52 permite visualizar os locais para introdução de valores para latitude e longitude, assim como onde é escolhida a base de dados. A escolha de utilizar ou não o perfil XBT definido é possível através da *checkbox* “Aplicar XBT”, sombreada a azul.

As Figuras 53 a 57 mostram os diferentes resultados obtidos ao sobrepor o perfil XBT à opção da base de dados definida.

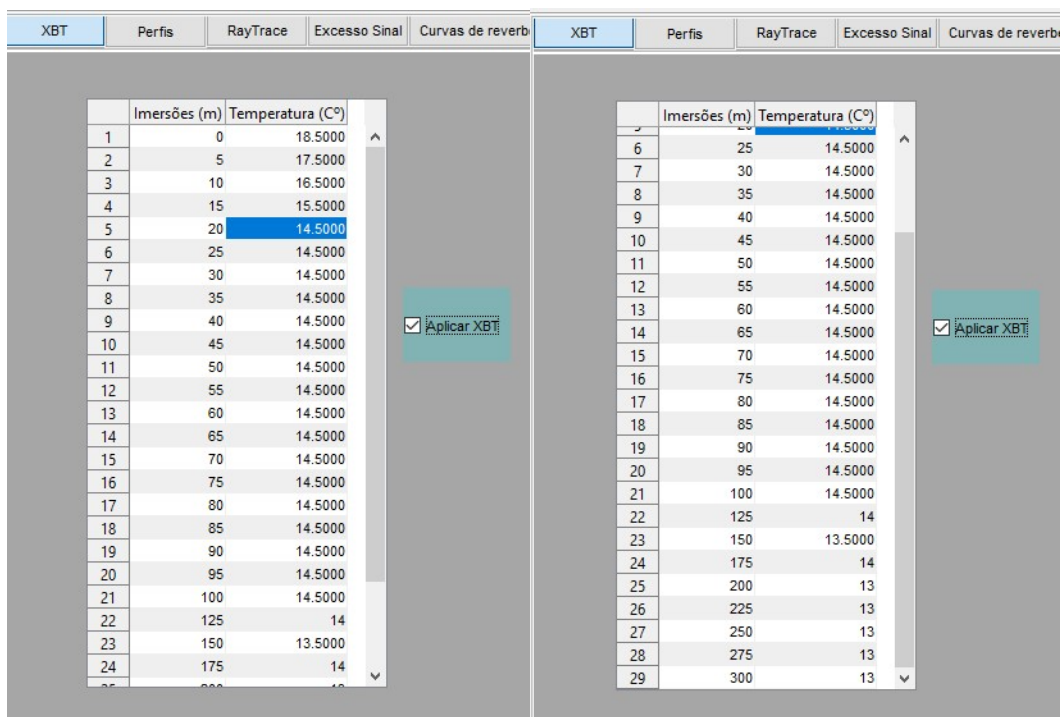


Figura 51 – Perfil de temperatura em função da imersão, de acordo com o perfil da amostra de teste, introduzido no FAPSO.

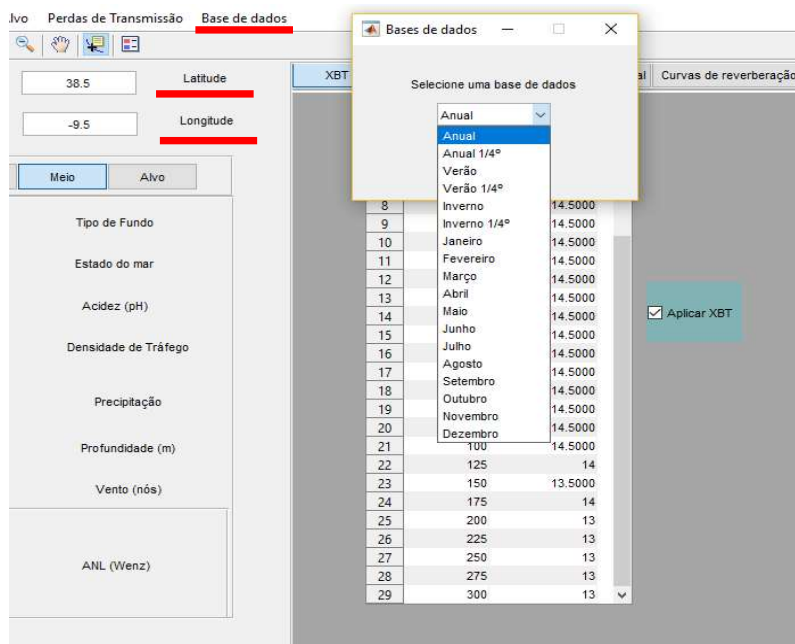


Figura 52 – Escolha da opção da base de dados e introdução dos valores para latitude e longitude.

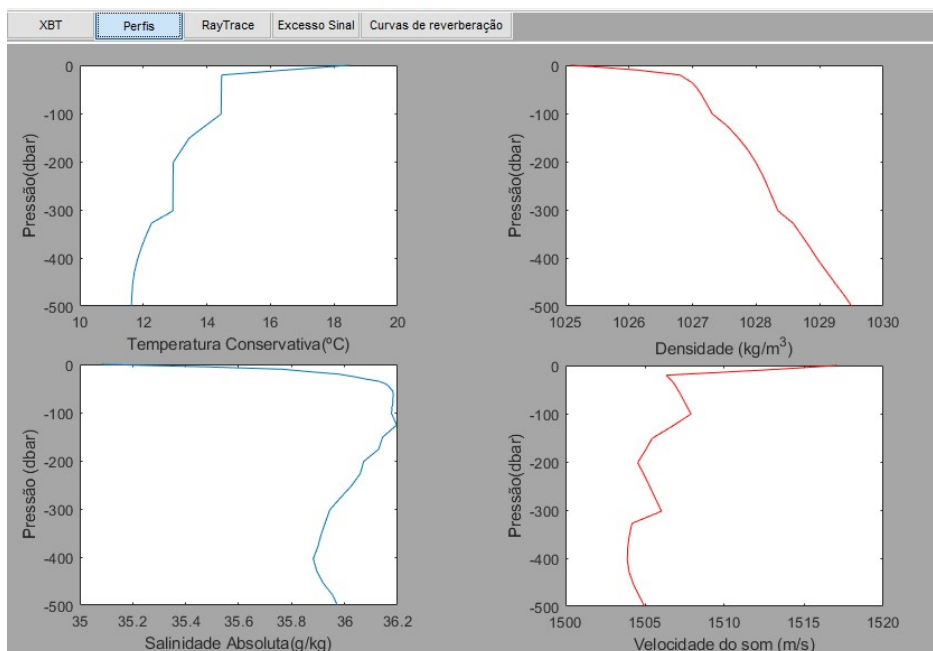


Figura 53 – Gráficos de perfis para a opção anual, com resolução 1°.

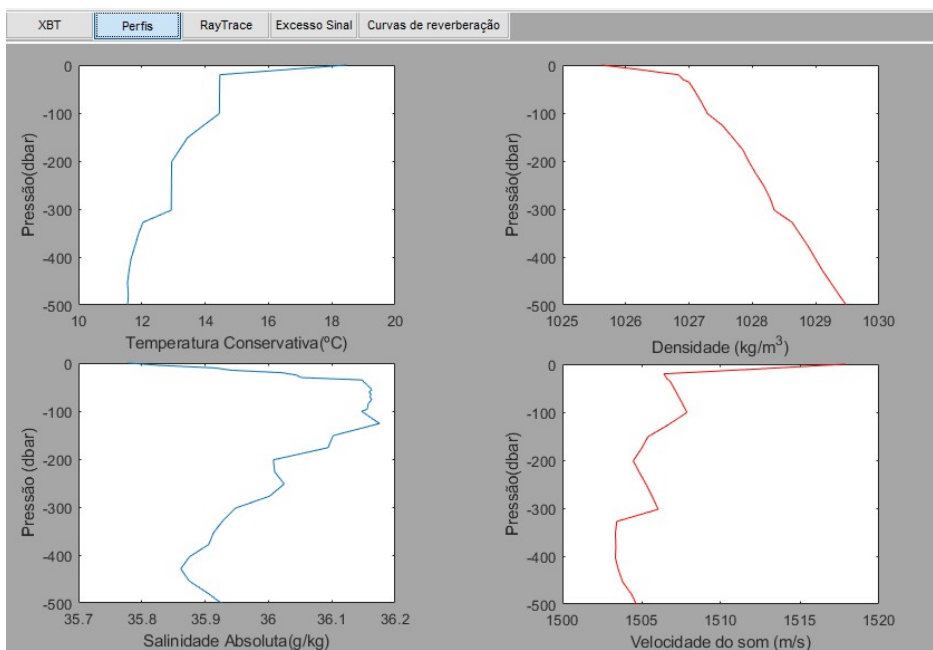


Figura 54 - Gráficos de perfis para a opção verão, com resolução 1°.

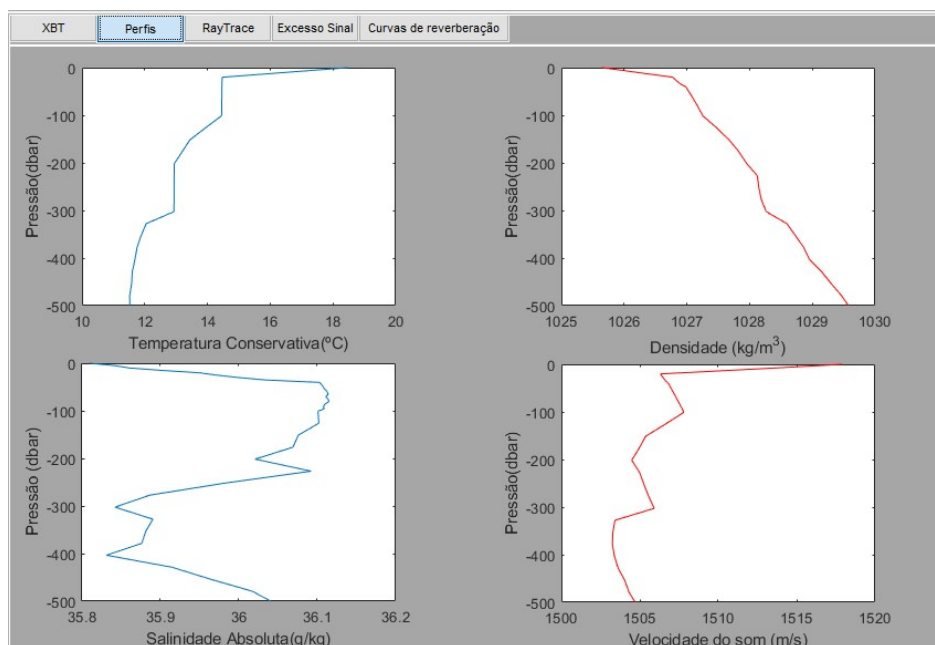


Figura 55 - Gráficos de perfis para a opção junho, com resolução 1°.

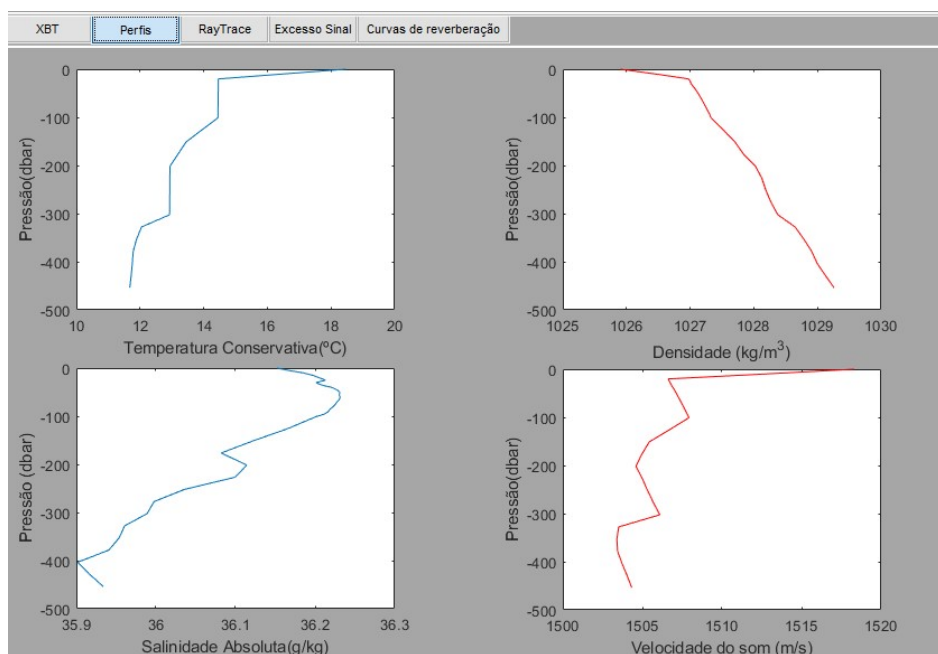
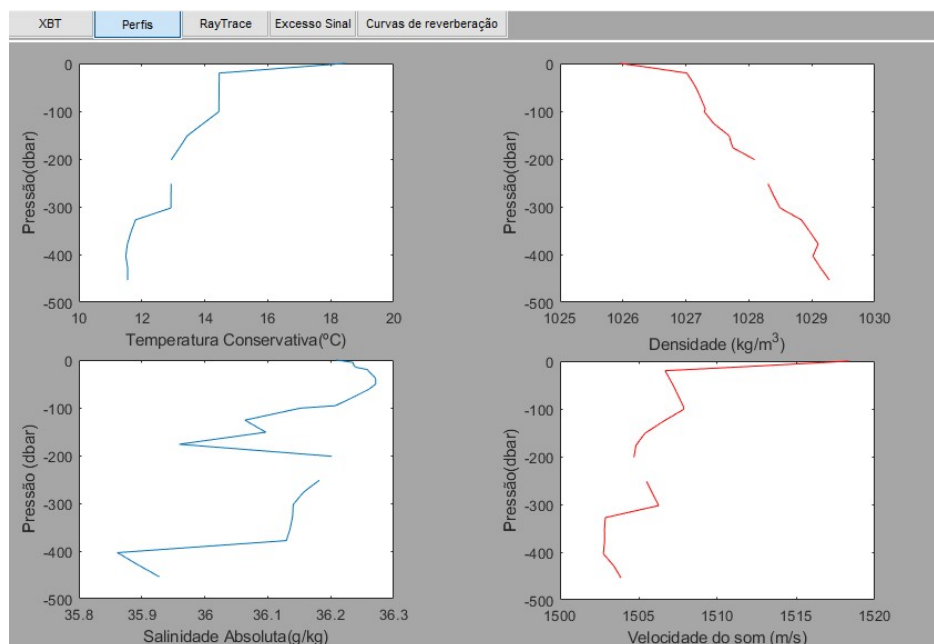


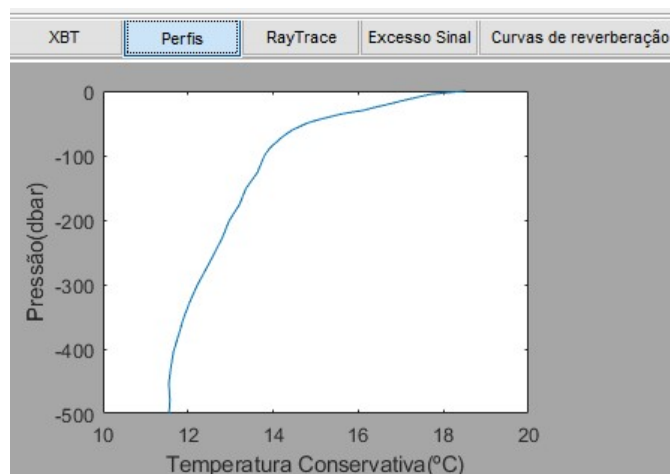
Figura 56 - Gráficos de perfis para a opção anual, com resolução 0,25°.



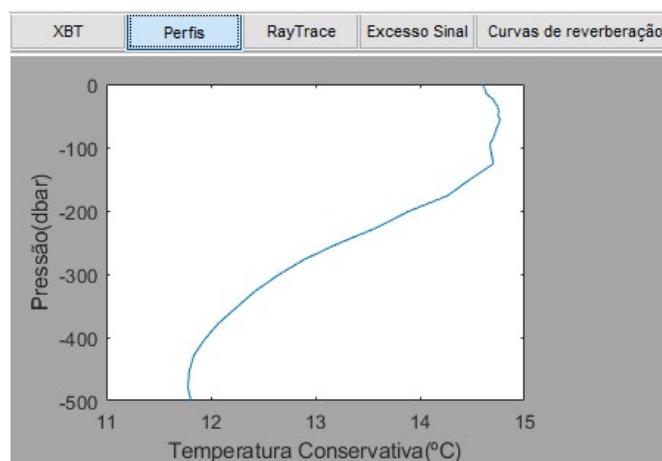
**Figura 57** - Gráficos de perfis para a opção verão, com resolução 0,25°.

Atente-se à falta de dados relativamente ao perfil de temperatura para as opções de 0,25° (Figura 56 e 57), facto que se prende com a maior dificuldade da NOAA de conseguir uma base de dados completa para maiores resoluções, ou seja, com maior número de valores.

Não obstante, verifica-se que, para a profundidade de 500 metros, as alterações entre as corridas usando diferentes opções da base de dados são pouco significantes no perfil de temperatura. De facto, ao sobrepor o perfil XBT até à profundidade dos 300 metros, as diferenças entre climatologia anual, de estação ou mensal para profundidades superiores seriam expectavelmente reduzidas. Isto deve-se ao facto de as principais variações de temperatura sucederem nas camadas superiores por incidência da radiação solar mais intensa e duradoura nos meses de verão em relação aos meses de inverno, como se verifica pela análise das Figuras 58 e 59, referentes ao uso da base de dados com opção de inverno e de verão, na posição 38,5°N e 9,5°W. Como consequência, o perfil de velocidade do som sofre pequenas alterações. Pode assumir-se que, a opção escolhida da base de dados não seja um fator determinante para a previsão sonar, neste caso específico.



**Figura 58** – Perfil de temperatura para a profundidade de 500 metros na posição 38,5°N e 9,5°W, com climatologia de verão.



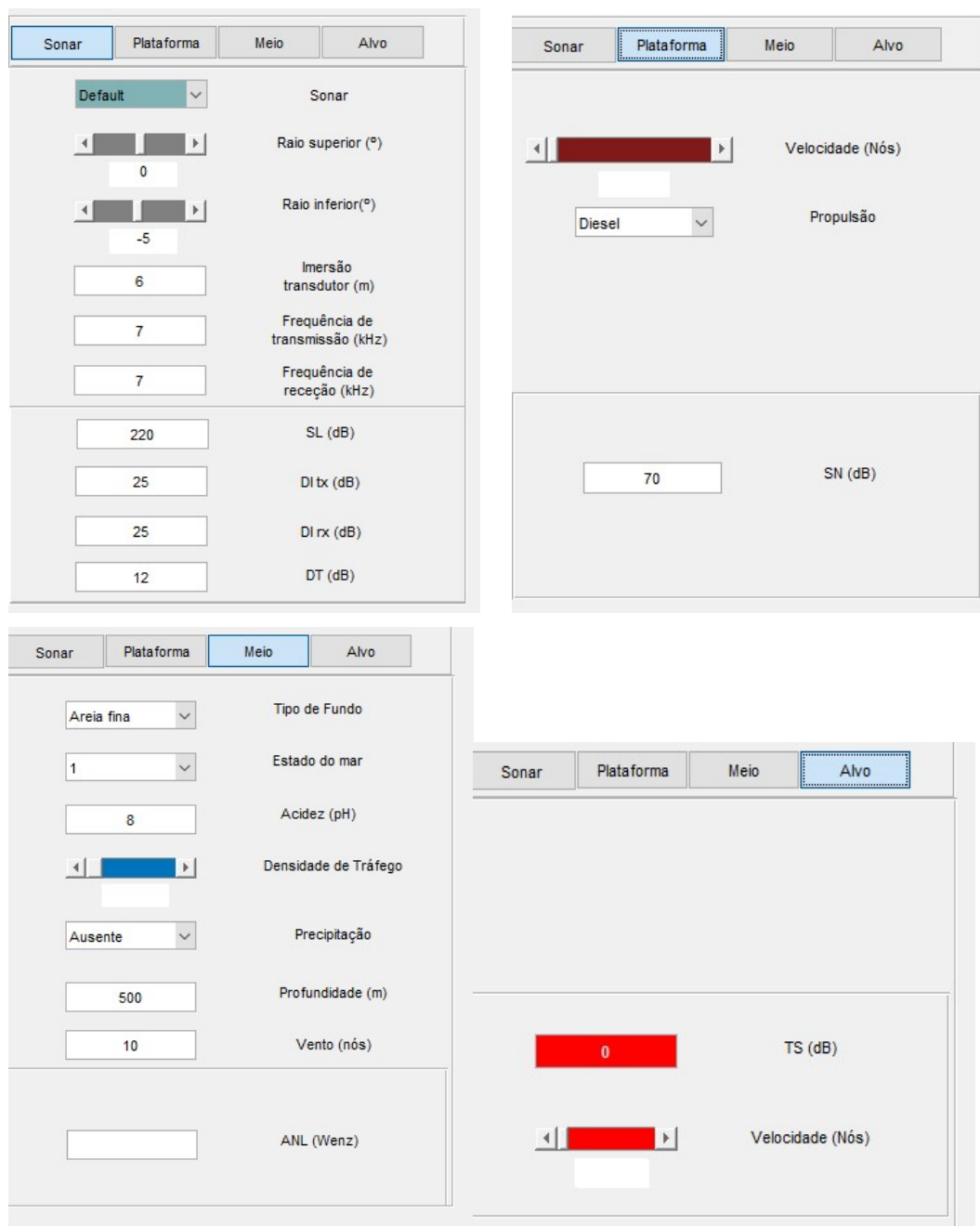
**Figura 59** - Perfil de temperatura para a profundidade de 500 metros na posição 38,5°N e 9,5°W, com climatologia de inverno.

### 3.2.2. Comparação entre métodos de cálculo de TL

Pretende-se com o presente sub-subcapítulo testar os dois métodos de cálculo das perdas de transmissão, por forma a avaliar possíveis diferenças. Deverão ser revistos o subcapítulo 1.6. e sub-subcapítulo 2.2.8. para melhor compreensão deste teste.

Tendo chegado à conclusão de que a opção de base de dados pouco influencia na definição do perfil de velocidade do som quando sobreposto o perfil de XBT, assumiu-se a utilização da opção anual com resolução de 1° com sobreposição do perfil XBT definido. Esta opção permite escolher a base de dados mais robusta e, em comparação com resoluções de 0,25°, mais pequena, agilizando os cálculos do FAPSO.

A Figura 60 mostra a introdução dos valores de teste no *software*, nas caixas correspondentes aos parâmetros sonar, plataforma, meio e alvo, respetivamente.

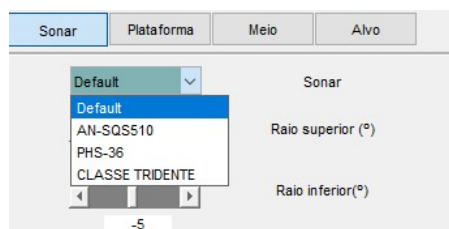


**Figura 60** – Introdução dos valores de teste nas caixas de parâmetros sonar, plataforma, meio e alvo.

Verifica-se que alguns parâmetros não são introduzidos ou alterados, nomeadamente o tipo de sonar na caixa de parâmetros sonar, o tipo de propulsão e velocidade na caixa de

parâmetros da plataforma, o estado do mar, densidade de navegação, precipitação e ANL nos parâmetros ambientais e a velocidade do alvo.

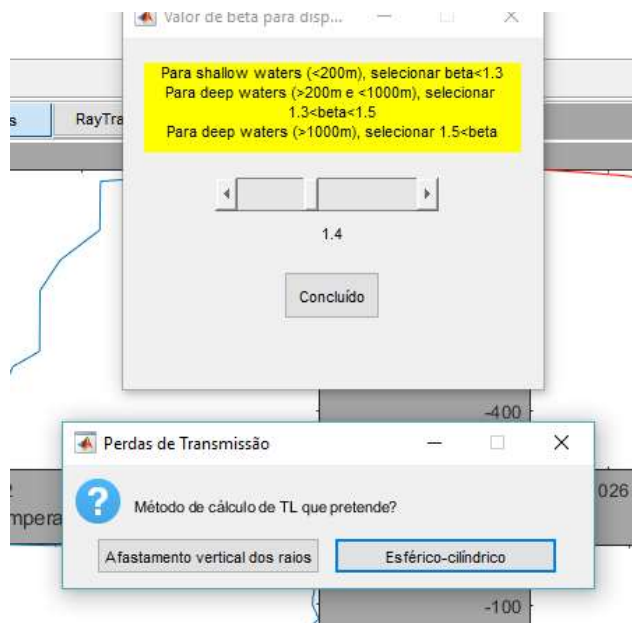
No caso do tipo de sonar, encontram-se previstos três sonares, o AN-SQS 510, o PHS 36 e o sonar da classe “Tridente”, ou seja, da classe de submarinos portuguesa (Figura 61). Estes são os três sonares utilizados na Marinha Portuguesa e o objetivo da escolha do sonar na *listbox* seria permitir um atalho que rapidamente preenchesse os valores da caixa de parâmetros sonar. Por motivos de classificação de segurança das características dos sonares da Marinha, esta funcionalidade encontra-se desativada.



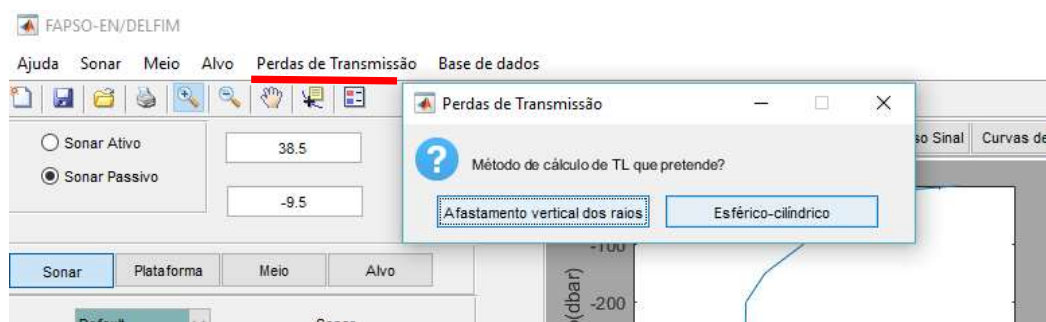
**Figura 61** – *Listbox* para aceder às predefinições das características dos sonares da Marinha Portuguesa. Esta funcionalidade permite reduzir o tempo necessário na introdução de valores na caixa de parâmetros sonar, porém encontra-se desativada por motivos de segurança da informação.

Para os restantes parâmetros, a introdução e seleção de valores ou alteração do seu estado não produz qualquer efeito. De facto, procurou-se complementar estas lacunas na continuação deste trabalho, visto que são parâmetros que tornam a previsão sonar mais completa e robusta.

Tendo sido introduzidos todos os valores de teste, segue-se a seleção do método de perdas de transmissão a adotar para a previsão (Figuras 62 e 63). Foram testados os métodos de afastamento vertical de raios e de dispersão esférico-cilíndrica, sendo para este último definido um valor de beta de 1,4 devido à profundidade local.

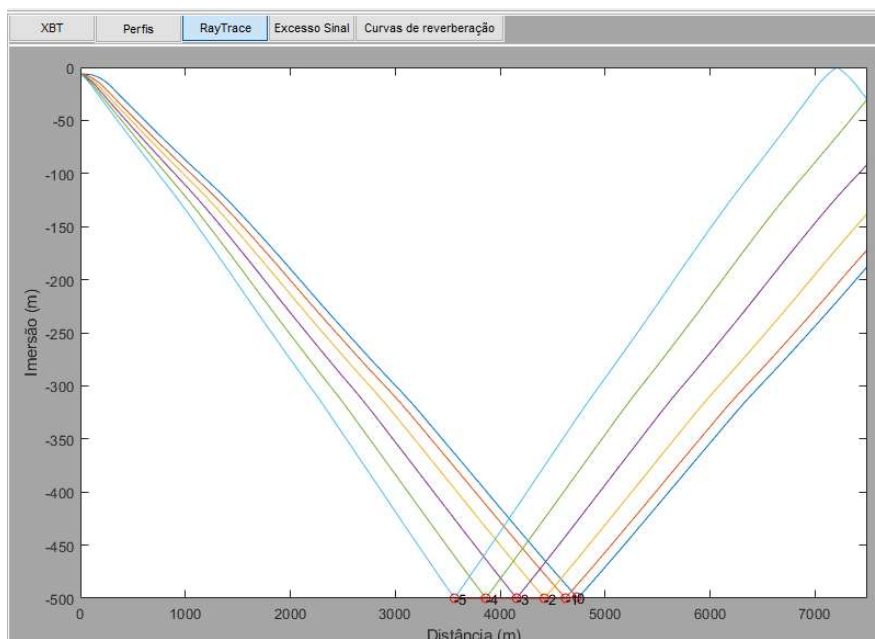


**Figura 62** – Seleção do método de dispersão esférico-cilíndrica com  $\beta = 1,4$ .

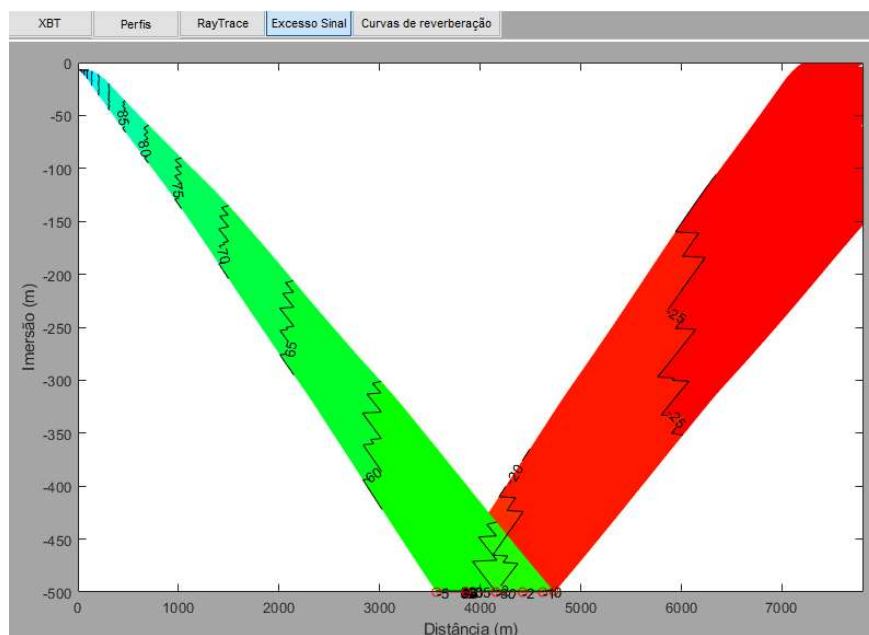


**Figura 63** – Seleção do método de afastamento vertical dos raios.

As Figuras 64 a 66 apresentam os gráficos de *raytracing*, excesso de sinal e curvas de reverberação obtidos pelo método de dispersão esférico-cilíndrica, enquanto que as Figuras 67 a 69 apresentam os mesmos gráficos para o método de afastamento vertical de raios. A escala dos gráficos foi alterada com a ferramenta de *zoom*, por forma a permitir uma melhor visualização de resultados.



**Figura 64** – *Raytracing* com alcances de detecção assinalados a vermelho para o método de dispersão esférico-cilíndrica.



**Figura 65** – Excesso de sinal com intervalos cromáticos de 5 dB para o método de dispersão esférico-cilíndrica.

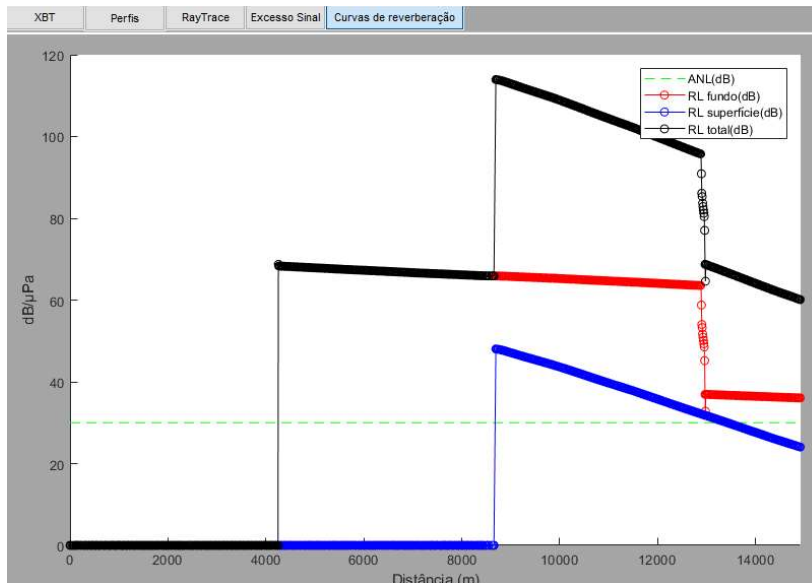


Figura 66 – Curvas de reverberação para o método de dispersão esférico-cilíndrica.

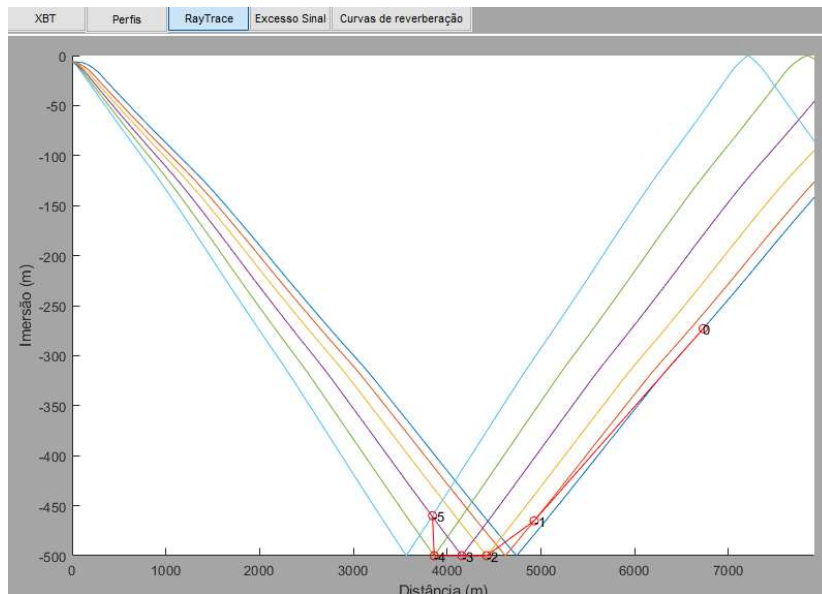
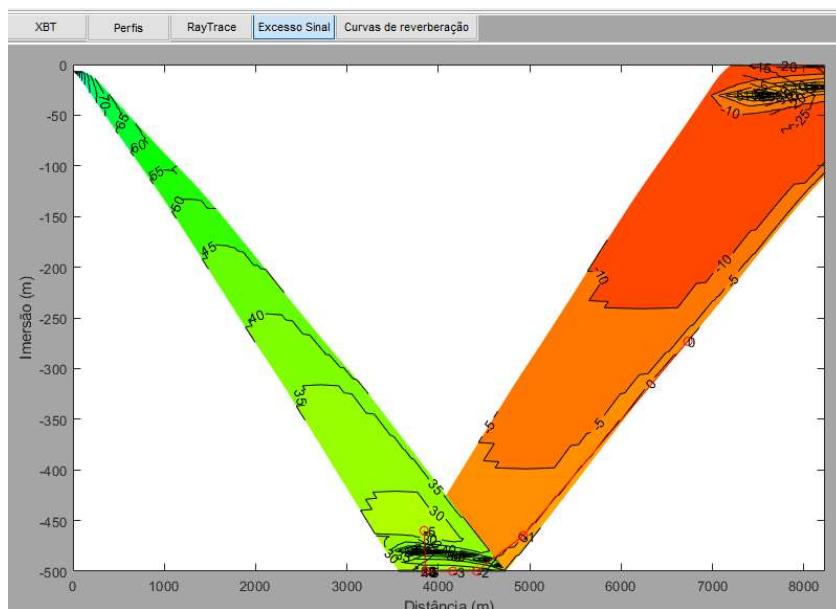
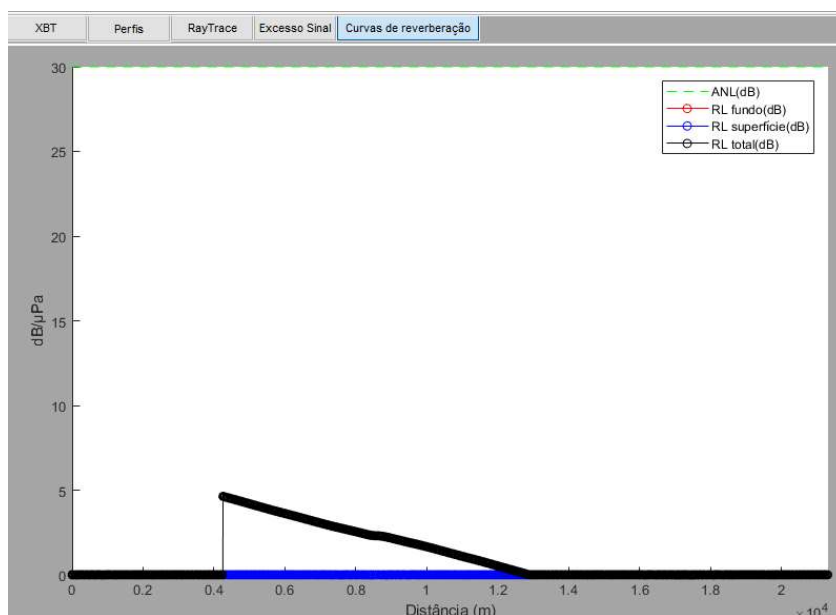


Figura 67 - Raytracing com alcances de detecção assinalados a vermelho para o método de afastamento vertical de raios.



**Figura 68** - Excesso de sinal com intervalos cromáticos de 5 dB para o método de afastamento vertical de raios.



**Figura 69** - Curvas de reverberação para o método de afastamento vertical de raios.

A função utilizada para traçar o percurso dos raios de som ou *raytracing* é independente do método de TL escolhido, sendo que entre as Figuras 64 e 67, o importante é analisar as variações dos alcances de detecção dos diversos raios. Pela Figura 64, verifica-se que o alcance de detecção é bem delimitado, sendo que a detecção só é possível até a primeira

interação com o fundo, enquanto que na Figura 67, a detecção é possível depois da primeira interação com o fundo para 3 dos 6 raios emitidos pelo sonar.

Após análise dos gráficos de excesso de sinal (Figuras 65 e 68), retira-se que os valores de excesso de sinal, antes de atingir o fundo são superiores quando utilizado o método de dispersão esférico-cilíndrico, porém o alcance médio de detecção é inferior. Isto deve-se ao importante papel que o nível de reverberação assume na limitação da detecção ativa, visto que é um fator dependente da quantidade de energia sonora que é empregue pelo sonar do navio. Os valores superiores de excesso de sinal do sonar até ao fundo, na utilização da dispersão esférico-cilíndrica, significam que as perdas de transmissão são inferiores, neste caso, ao aplicar este método. Não obstante, o cálculo da reverberação não é dependente do método de cálculo de TL escolhido e ao atingir o fundo com maior SE, e, portanto, maior SL, o RL produzido é maior (Figura 67) e maior é a perda de SE na interação. No caso da Figura 68, verifica-se que o menor excesso de sinal antes da interação, e, portanto, menor SL, induz um RL mais reduzido (Figura 69). Por conseguinte, a perda de SE é também menor e possibilita a detecção após interação por parte de alguns dos raios.

Nos gráficos de curvas de reverberação (Figura 66 e 69) surge também um tracejado verde, que é definido pelo programa como valor *default* do nível de ruído ambiental, sendo igual a 30 dB. No primeiro caso, pode dizer-se que a reverberação domina o ruído como fator limitante da detecção, enquanto que, no caso do afastamento vertical de raios, o ruído ambiente ultrapassa o nível de reverberação e é, por sua vez, o fator limitante da detecção. Note-se ainda, na Figura 67, que existem valores positivos de reverberação de superfície, apesar de o excesso de sinal ter já valores negativos. Isto deve-se ao facto de SL possuir ainda um valor suficiente para que ocorra reverberação à superfície, mas insuficiente para prevalecer sobre os fatores que influenciam a detecção negativamente.

### **3.3. Comparação com outros *softwares***

O desenvolvimento do FAPSO, como *software* de previsão sonar, procurou apoiar-se nos modelos de previsão já existentes. A escolha do *Raypath* e do *Lybin* deveu-se ao meio em que estes *softwares* foram desenvolvidos, assim como o ambiente para o qual se propunham a operar, sendo este meio as Marinhas do Canadá e da Noruega e o seu objetivo, a aplicação em contexto de operações navais ASW. Por sua vez, o FAPSO propõe-se a resolver a

previsão sonar em meio operacional, tendo também capacidade para emprego na formação e aprendizagem.

Tanto o *Lybin* 6.0 como o *Raypath* foram estudados e analisados no subcapítulo 2.1., sendo que é aconselhável a revisão do mesmo subcapítulo para melhor compreensão do funcionamento de ambos os *softwares*.

Apesar do estudo do *Lybin* 6.0, a comparação de resultados foi efetuada com recurso ao *Lybin* 3.0, devido à impossibilidade de acesso ao executável deste programa.

O objetivo desta comparação cruzada foi de efetuar o balanço do comportamento do FAPSO em relação aos dois *softwares* que lhe serviram de linhas orientadoras para o seu desenvolvimento. Os principais pontos de comparação serão o *raytracing*, o excesso de sinal e os alcances de deteção.

### 3.3.1. *Lybin* 3.0

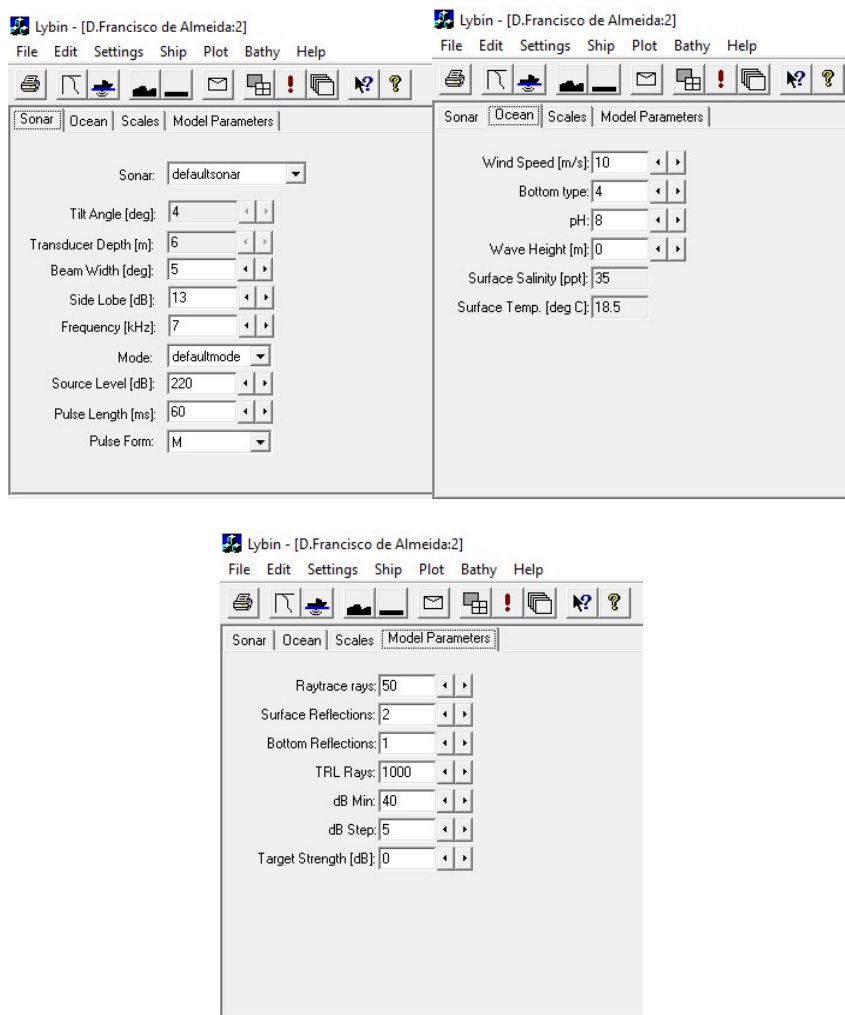
O *Lybin* 3.0 foi desenvolvido em 2003, por Elling Tveit, Karl Thomas Hjelmervik e Elin Dombestein, sendo que Hjelmervik e Dombestein faziam parte da equipa que 8 anos mais tarde desenvolveu a versão 6.0 do *software*.

Em relação à versão 6.0, as principais limitações do *Lybin* 3.0 são: não possuir ainda um método para cálculo da reverberação e não ter capacidade para assumir variação horizontal de certos parâmetros como perfil de temperatura, vento, ondulação e tipo de fundo. À exceção destas principais limitações, o *software* é bastante avançado para o ano em que foi apresentado. Desta forma, o *Lybin* 3.0 permite definir o perfil de ruído próprio e permite reconstituir fielmente as várias especificidades do sistema sonar.

Por último, o *Lybin* 3.0 permite ainda a exportação automática dos valores de previsão para o formato de comunicado oceanográfico da doutrina da NATO, assim como se demonstra muito prático no que toca a exportação de gráficos e ao guardar predefinições da plataforma e do sonar.

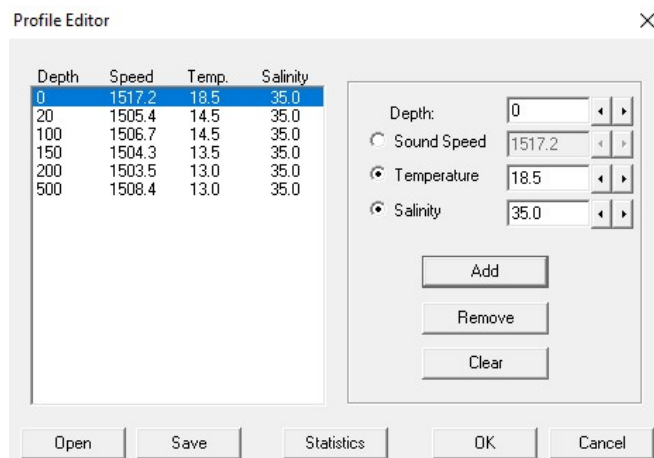
Para efeito de comparação de resultados entre os *softwares*, foram introduzidos ou selecionados os valores da amostra teste (subcapítulo 3.1.) no *Lybin* 3.0. Os parâmetros do modelo que ficam sem valor atribuído como o *side lobe* ou o *pulse form*, por exemplo, permaneceram com o seu valor *default* atribuído. As Figuras 70 e 71 apresentam as caixas de

parâmetros com os valores de teste inseridos e o perfil construído através da sonda XBT lançada pela fragata “D. Francisco de Almeida”.



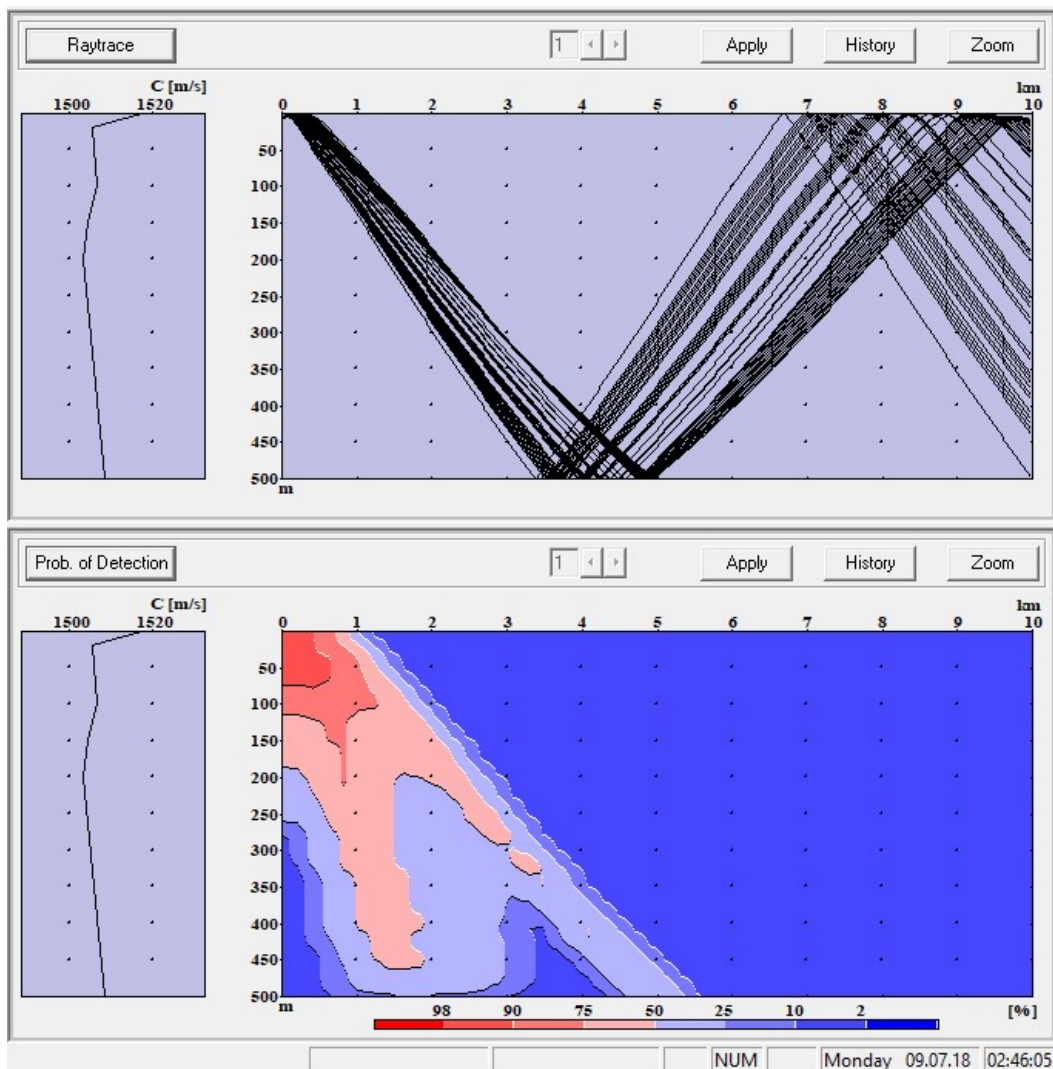
**Figura 70** – Caixas de parâmetros relativos ao sonar, ao meio e ao modelo, com os valores de teste inseridos.

Para construção do perfil de velocidade do som, assumiu-se salinidade constante (Figura 71).



**Figura 71** – Editor de perfil com os principais pontos do perfil de temperatura definidos. O perfil de salinidade assume-se constante ao longo da coluna de água.

Introduzidos os valores de teste, foram calculados os gráficos de *raytracing* e de probabilidade de deteção (Figura 72). O gráfico de probabilidade de deteção assemelha-se ao gráfico de excesso de sinal e o alcance da deteção pode ser determinado como sendo o limiar da região do gráfico, em que a probabilidade de deteção é igual a 50 %.



**Figura 72** – Gráfico de *raytracing* e de probabilidade de detecção ativa do alvo.

Ao efetuar comparação com os resultados obtidos com o FAPSO, a função de *raytracing* é praticamente idêntica, sendo que a primeira interação com o fundo se dá aproximadamente nos 4000 metros e a primeira reflexão à superfície aos 8000 metros.

Analisando o gráfico de probabilidade de detecção, verifica-se que o alcance de detecção é máximo na profundidade de 325 metros, à distância de 3,5 quilómetros, sendo a estimativa de previsão ligeiramente mais pessimista do que a calculado pelo FAPSO, onde o alcance máximo é atingido no fundo à distância de 4 quilómetros.

Modo geral, as previsões do *Lybin* 3.0 e do FAPSO são bastante semelhantes, sendo a função de *raytracing* do *Lybin* 3.0 quase idêntica à função atribuída a Val Schmidt, que é utilizada pelo FAPSO.

### 3.3.2. *Raypath*

O *Raypath* é o *software* de previsão sonar certificado e utilizado pela Marinha Portuguesa tanto a nível de formação, como no planeamento e execução de operações ASW. Os sub-subcapítulos 2.1.3. e 2.1.4. explicam o funcionamento do *Raypath* e exploram as suas funcionalidades através de análise crítica.

No que toca à comparação de resultados com o FAPSO, o teste do *Raypath* foi executado com os valores da amostra definida no subcapítulo 3.1., sendo os mesmos introduzidos nas respetivas *textboxes*, como se exhibe na Figura 73.

The image shows two side-by-side dialog boxes from the Raypath software. The left dialog, titled 'Ray Path Parameters', contains the following fields: Transducer Depth (6.0 m), Maximum Depth (500.0 m), Maximum Range (10000.0 m), Bottom Depth (500.0 m), Max Ray Angle (0.0 deg), Min Ray Angle (-5.0 deg), Angle Increment (0.200 deg), and a checked 'Reflective Bottom' checkbox. The right dialog, titled 'Prediction Parameters', contains: Directivity index (25.0 dB), Detection Threshold (25.0 dB), Source Level (220.0 dB), Noise Level (70.0 dB), Target Strength (0.0 dB), Surface Loss (5.0 dB), Bottom Loss (3.0 dB), DI - Submarine (0.0 dB), DT - Submarine (0.0 dB), and Frequency (7.0 kHz). Both dialogs have 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

Parameter	Value	Unit
Transducer Depth	6.0	m
Maximum Depth	500.0	m
Maximum Range	10000.0	m
Bottom Depth	500.0	m
Max Ray Angle	0.0	deg
Min Ray Angle	-5.0	deg
Angle Increment	0.200	deg
Reflective Bottom	<input checked="" type="checkbox"/>	
Directivity index	25.0	dB
Detection Threshold	25.0	dB
Source Level	220.0	dB
Noise Level	70.0	dB
Target Strength	0.0	dB
Surface Loss	5.0	dB
Bottom Loss	3.0	dB
DI - Submarine	0.0	dB
DT - Submarine	0.0	dB
Frequency	7.0	kHz

Figura 73 – Valores introduzidos no *Raypath* para teste.

O perfil de temperatura utilizado (Figura 74) corresponde ao perfil introduzido nos três *softwares* para comparação de resultados.

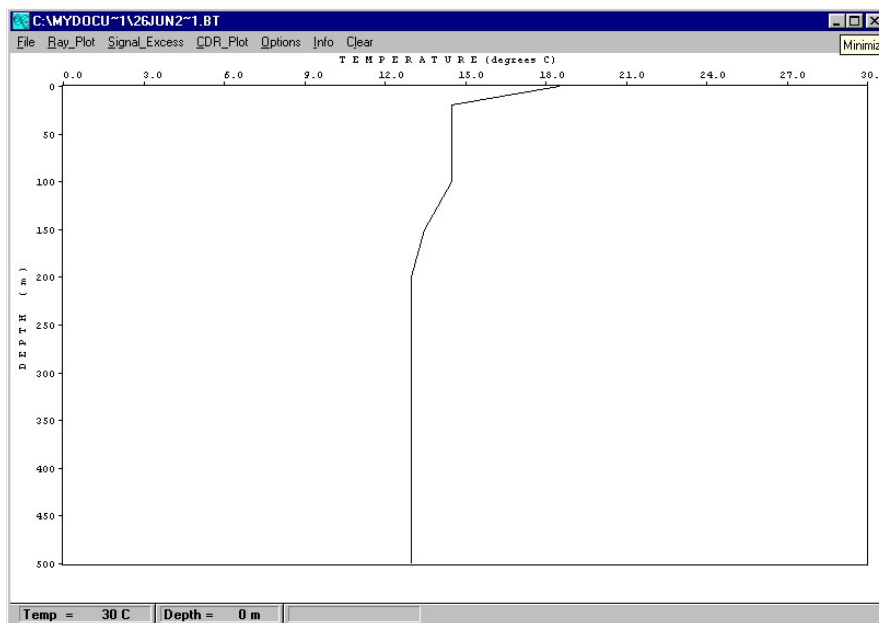


Figura 74 – Perfil XBT apresentado no Raypath.

A Figura 75 apresenta função de *raytracing* utilizada pelo Raypath. A partir das primeiras interações no fundo e à superfície, que sucedem na ordem dos 4000 metros e 8000 metros, verifica-se que a o *raytracing* se correlaciona com o do FAPSO.

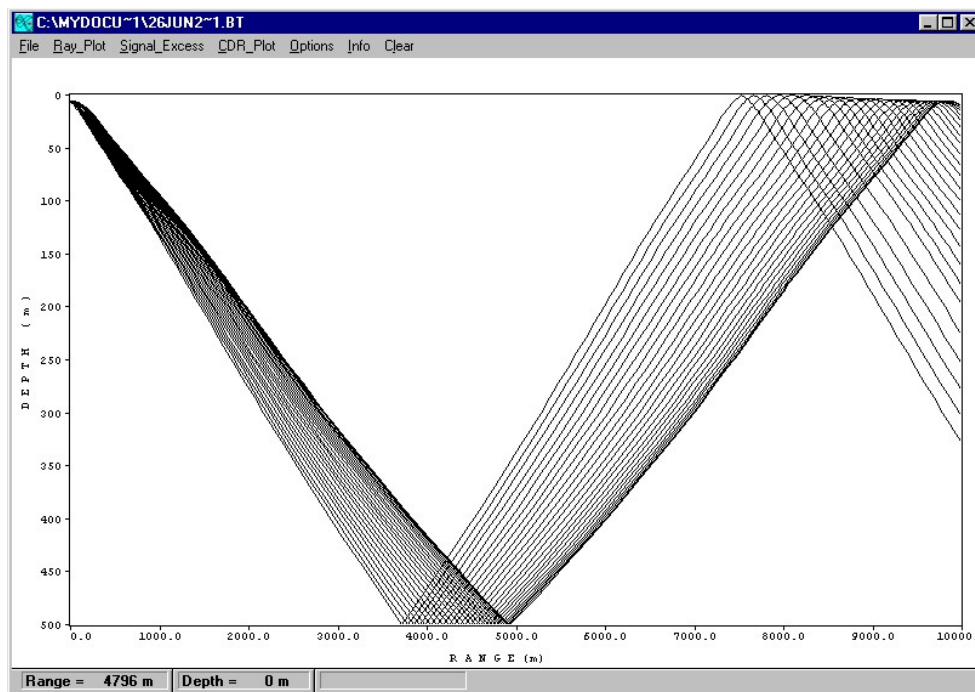
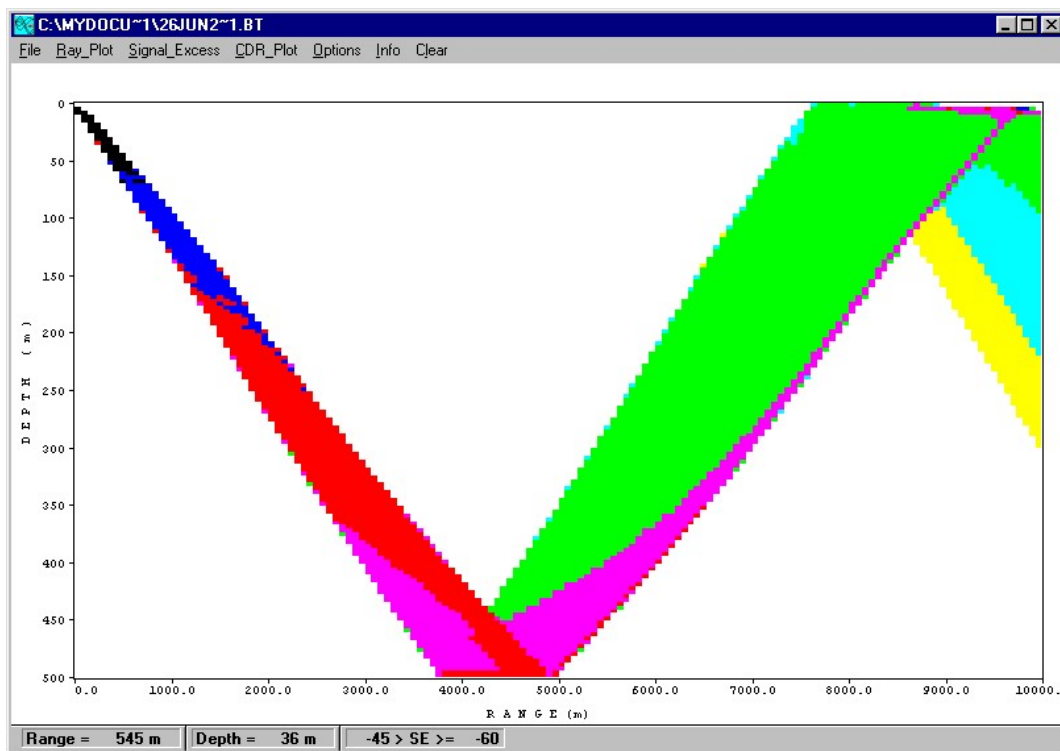


Figura 75 – Gráfico de *raytracing* de acordo com os parâmetros definidos na Figura 73.

O gráfico da Figura 76 corresponde ao gráfico de excesso de sinal resultante. A gradação de cores é definida para intervalos de 15 dB, sendo a cor rosa equivalente a valores de  $SE = 0$  dB.



**Figura 76** – Gráfico de excesso de sinal obtido pelo *Raypath*.

No FAPSO, o alcance de detecção é definido quando  $SE = 0$  dB, pelo que, aplicando o mesmo pressuposto, se retira um alcance de detecção médio igual a 4500 metros, ligeiramente superior ao alcance médio de 4000 metros obtido pelo FAPSO. Numa análise mais pormenorizada, se comparados os gráficos de SE do *Raypath* e do FAPSO, quando utilizado o método de TL de afastamento vertical de raios, a forma do gráfico é praticamente idêntica.

## Conclusões

A previsão sonar é um tópico complexo e controverso do tema da acústica submarina. A investigação e trabalho desenvolvido permitiram não só adquirir conhecimento científico da propagação sonora no mar e do processo de deteção, como valências técnicas na área de programação, mas também sensibilidade às adversidades da previsão sonar operacional aplicada ao planeamento de operações navais na área de ASW.

Os métodos e modelos de previsão sonar estudados suportam o facto de este ser um tópico em que é difícil apresentar resultados certos, com intervalos de confiança bem definidos ou desvios-padrão imutáveis, devido à forma quase aleatória como certos fatores que afetam a propagação se podem modificar. Na verdade, o que de mais relevante se pode retirar deste trabalho é de que existem diversas formas de chegar a uma previsão sonar razoável, que por sua vez se procura ser consistente com os resultados obtidos numa operação real do equipamento sonar no mar e o mais completa possível, pesando os vários fatores que possam maximizar ou dificultar a deteção.

Não obstante, a dissertação partiu de determinadas questões derivadas, originadas a partir de uma questão central, que acicataram a curiosidade para o trabalho e impulsionaram a investigação e às quais, segundo a metodologia utilizada, são devidas respostas.

*QD1: Quais os pressupostos que devem e podem ser assumidos para modelação da propagação acústica no oceano?*

Tal como foi referido, é impossível admitir que todos os pressupostos assumidos no trabalho de dissertação sejam inteiramente corretos, no entanto deve atentar-se ao facto de a propagação no oceano ser um processo aproximadamente estocástico, onde é fundamental estabelecer princípios e pressupostos, por forma a conseguir apresentar uma solução razoável, em tempo útil. Entre muitos fatores a ter em conta, deve ser considerada uma teoria que resolva a propagação acústica de forma consistente, como o *raytracing*. As equações sonar são igualmente uma forma ponderada de transformar processos cientificamente muito diferentes em quantidades que podem ser adicionadas.

*QD2: Qual o modelo que melhor se adequa aos pressupostos aceitáveis?*

Após análise dos modelos de previsão, que são utilizados pela Marinha e por outras Marinhas, conclui-se que o *Lybin*, apesar de algumas limitações devidamente assinaladas,

apresenta uma resposta ponderada em diversos fatores que, pela sua complexidade são muitas vezes ignorados, como é o caso da reverberação recebida e o modo como esta pode sobrepor-se ao ruído e limitar a deteção ativa.

*QD3: De que forma podem ser modelados os fatores da equação sonar e qual o intervalo de valores que cada um compreende?*

A solução reside em retirar ao operador a possibilidade de introduzir valores que estejam claramente errados. Exemplos de como isto foi realizado são os níveis de RL, SL, DI, ANL e TL, que podem ser definidos através da introdução de parâmetros mais simples, por exemplo, em vez de pedir ao utilizador o valor em dB do DI, solicitar características do sonar que se encontrem nos manuais de instruções.

*QD4: Qual a base de dados a utilizar?*

A base de dados que melhor resolveu esta questão e que se revelou ser a mais compatível com o MATLAB foi a base de dados WOD2013 da NOAA.

*QD5: Que pode ser feito a nível da linguagem MATLAB para tornar o processo o mais ágil e flexível quanto possível?*

A utilização de uma janela de interface GUI permite ao utilizador introduzir valores de forma mais simples, enquanto possibilita agrupar visualmente parâmetros que possam ser semelhantes. A partir dos botões disponibilizados pela GUI, o utilizador pode ainda ajustar a forma como vê os gráficos, seleccionar e estudar pontos específicos e ainda exportar ou imprimir resultados obtidos para utilização futura.

*QC: Como obter uma previsão sonar em dado local do planeta a partir das equações sonar, utilizando um modelo computacional em linguagem MATLAB?*

Tendo contribuído para esta resposta as respostas às perguntas derivadas, a base de dados permitiu a obtenção de uma previsão sonar fundamentada em qualquer ponto do planeta que seja navegável. Apesar da utilização da base de dados, deve ser privilegiada a utilização de sondas para estabelecer o perfil nas primeiras centenas de metros, onde principalmente a temperatura poderá depender das estações do ano, ou mesmo da hora do dia. O programa desenvolvido permitiu não só modelar a propagação através do modelo de *raytracing*, mas também integrar as equações sonar para estimar os alcances de deteção e contra deteção e apresentar as curvas de reverberação.

Por fim, deve referir-se que a presente dissertação de mestrado e o método de previsão sonar desenvolvido serão revistos de modo a aumentar a credibilidade e confiança nos diversos pressupostos que estiveram na sua génese e desenvolvimento. Uma futura dissertação de mestrado da cadete, da classe de Marinha, Ana Torres, propõe-se a inovar o modelo desenvolvido, alimentando-o com uma base de dados oceanográficos mais atual, com uma base de dados de batimetria global e resolvendo de forma mais consistente o cálculo de reverberação e os fatores da equação sonar.



**Lista de referências**

- AINSLIE, M., MCCOLM, J., (1998), "A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol 103(3), 1671-1672.
- ATP1(G) Vol.1, (2015), p. 407
- ATP28(B), (2008), p. 248
- COLLIER, R. (1998), "Ship and Platform noise, Propeller noise", *Handbook of Acoustics*, editado por Malcolm J. Crocker, John Wiley & Sons, Inc., Canadá, 1998, pp. 407-424.
- COSTA, C., (2017), Apontamentos sobre acústica submarina e equações do sonar, Escola Naval, Alfeite.
- DISCOVERY OF SOUND IN THE SEA, (n.d.), *What are common underwater sounds?*, retirado de <http://dosits.org/science/sounds-in-the-sea/what-are-common-underwater-sounds/>, acessado em Março de 2018
- DOMBESTEIN, E. *et al.*, (2011), *LYBIN 6.0 – user guide*, Norwegian Defence Research Establishment (FFI).
- ETTER, P., (2013), *Underwater acoustic modeling and simulation*, Taylor & Francis Inc, ed.4.
- FISHER, F., SIMMONS, V., (1977)., "Sound Absorption in Sea Water", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 62:558.
- HODGES, R., (2010), *Underwater acoustics. Analysis, design and performance sonar*, John Wiley and Sons Ltd., Inglaterra, ed.1.
- HOVEM, J., (2013), "Ray Trace Modeling of Underwater Sound Propagation", *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices*, editado por Marco G. Beghi, InTech, DOI: 10.5772/55935, <https://www.intechopen.com/books/modeling-and-measurement-methods-for-acoustic-waves-and-for-acoustic-microdevices/ray-trace-modeling-of-underwater-sound-propagation>, acessado em Março de 2018.
- IOC, SCOR e IAPSO, (2010), *The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties*, Manuals and Guides No. 56, UNESCO

- LENK, P., (1996), *RAYPATH Instruction Manual*, Department of National Defence of Canada.
- LENK, P., (1996), *Raypath plotting programme operation manual*, version 3.0, Department of National Defence of Canada.
- NAVE, R., (n.d.), *Sound intensity*, Retirado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/intens.html> em 28/11/2017.
- PAWLOWICZ, R., (2013), *What every oceanographer needs to know about TEOS-10 (The TEOS-10 Primer)*, [http://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10\\_Primer.pdf](http://www.teos-10.org/pubs/TEOS-10_Primer.pdf), acedido em Novembro de 2017.
- RICHARDSON, W. *et al.*, (2013), *Marine mammals and noise*, Academic Press, ed. 1.
- TUCHOLSKI, E., (2006), *Underwater Acoustics and Sonar SP411 Handouts and Notes*, Physics Department, pp. 169-179, USNA.
- URICK, R., (1983), *Principles of underwater sound*, United States of America: McGraw-Hill, Inc., ed.3.
- VARELA, A., (2001), *Apontamentos de armas submarinas e sistemas de deteção e armamento submarino*, Escola Naval, Alfeite.
- WAITE, A., (2002), *Sonar for Practicing Engineers*, John Willey and Sons Ltd., Inglaterra, ed.3.

## Apêndice A – Resumo alargado para a 5ª Edição das Jornadas de Engenharia Hidrográfica, realizado de 19 a 21 de junho de 2018

### Método de previsão sonar operacional

**Autores: P. Vale Marques (1), C. Lopes da Costa (2)**

- (1) Escola Naval, Marinha, vale.marques@Marinha.pt
- (2) Escola Naval, Marinha e CINAV, carlos.lopes.costa@Marinha.pt

**Resumo:** Foi construída a ferramenta ‘Delfim’ em MATLAB para, a partir da base de dados WOD (*World Oceanographic Database*) de 2013 da NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*), com as funções da toolbox GSW (*Gibbs-SeaWater*), calcular o perfil de velocidade do som. Obtido este, em qualquer parte do oceano, resolve a propagação do som, através do método de *raytracing*, bem como as perdas de transmissão ao longo da propagação de cada raio. Com os restantes termos da equação sonar ativo ou passivo, resolve a propagação acústica e apresenta valores de alcance de deteção, anexos a um gráfico de excesso de sinal em função da distância percorrida pelos raios de som. Os resultados obtidos procuram auxiliar o planeamento e execução de operações submarinas e antissubmarinas.

**Palavras-chave:** *raytracing*, Delfim, equação sonar, deteção.

### 1. INTRODUÇÃO

A alargada permanência da energia sonora na água do mar dá origem aos mais diversificados processos como reflexões no fundo submarino e à superfície, reverberações provocadas por bolhas de ar ou seres vivos, amplificação em zonas de convergência ou atenuação por divergência. Todas estas condicionantes tornam a propagação acústica no oceano num processo complexo e, conseqüentemente, bastante difícil de modelar, prever e estudar. É neste contexto que surgem as teorias de modelação como o *raytracing*, que procuram o processamento automático de dados e, como consequência, uma previsão sonar válida e em tempo útil. A ferramenta Delfim – designação dada por alusão a cetáceo que vive no mar e que emite e recebe sons – pretende dar um contributo.

## 2. O DELFIM – PRESSUPOSTOS EMPÍRICOS

De forma semelhante aos inúmeros modelos de previsão sonar construídos até à data, também o Delfim partiu de pressupostos empíricos que garantissem a rapidez de processamento em tempo útil para o ambiente operacional, sem prejudicar a validade e coerência da previsão.

O *raytracing* foi utilizado como modelo de propagação, enquanto que as equações sonar possibilitaram o cálculo integrante de todos os fenómenos associados ao alvo, ao meio de propagação e ao equipamento sonar.

### 2.1. *Raytracing*

Segundo Urick (1983) p. 122, o *raytracing* assume que o som se propaga ao longo de raios perpendiculares às frentes da onda, que correspondem a superfícies de igual fase da propagação. De modo a permitir o cálculo computacional, o perfil de velocidade do som, da área em estudo, deve ser dividido em intervalos pequenos o suficiente para que se possa admitir que, em cada intervalo, a velocidade do som varie de forma linear (Urick, 1983, p. 125). Cumprido o pressuposto da linearidade do gradiente da velocidade do som assume-se que, para um dado intervalo do perfil de velocidade do som, o trajeto do raio é um arco de circunferência com raio constante.

Para calcular as trajetórias dos raios sonoros, assim como as suas interações com a superfície e com o fundo do mar, é usada a função MATLAB atribuída a Val Schmidt, *University of New Hampshire* (acedido e retirado de [https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26253-raytrace?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26253-raytrace?s_tid=srchtitle)).

### 2.2. *Equações sonar*

Segundo Urick (1983) p. 17, as equações sonar foram criadas depois da 2ª Guerra Mundial com o intuito de facilitarem a compreensão dos diversos fatores presentes na deteção de um alvo no mar e o modo como estes interagem entre si. Devido à relação logarítmica (valores expressos em dB) que os fatores das equações assumem, todas as operações necessárias são reduzidas a somas e subtrações, o que permite reduzir o volume de cálculos por cada previsão sonar. As equações sonar foram utilizadas em contexto ativo e passivo, respetivamente:

$$SE = SL - 2TL + TS - NL + DI -$$

$$SE = SL - TL - NL + DI -$$

Ambas equações foram resolvidas de modo a obter o termo excesso de sinal (SE), que se traduz na quantidade (em dB) de sinal que ultrapassa o limiar de deteção definido (DT).

Os restantes fatores das equações representam sempre quantidades positivas e, consoante o operador que o precede, representam ganhos ou perdas de excesso de sinal. Os fatores SL, TS e DI representam nomeadamente o nível sonoro da fonte, a refletividade do alvo e o índice de diretividade do equipamento. Intuitivamente, estes três termos potenciam a deteção, quanto maior for o seu valor. As perdas de transmissão (TL) resultam do somatório das dispersões geométricas e absorção da água do mar, que são função da distância percorrida pelo raio de som, e das perdas por interações com a superfície e o fundo. No caso da equação sonar ativo, as perdas de transmissão devem ser contabilizadas nos dois sentidos, transdutor-alvo-transdutor. O NL (nível de ruído) representa o conjunto de ruído produzido pela própria plataforma e ruído ambiente para uma dada frequência de receção. Sempre que o nível de ruído for superior ao nível do sinal, a deteção é improvável. Ainda que o nível do sinal seja superior ao nível do ruído a deteção pode não ser conseguida, tendo em conta o limiar de deteção (DT) estabelecido. Este valor representa a relação sinal-ruído necessária para que ocorra deteção do alvo e implica sempre uma perda no excesso de sinal.

### *2.3. Nível de reverberação*

Ao contrário do ruído, a reverberação apenas entra nos cálculos do sonar ativo. Visto que o sonar ativo procura deteção através da receção do sinal emitido, após este ser refletido pela superfície do alvo, deve ser tida em conta possíveis reflexões por outros corpos que não o alvo desejado. A soma destas reflexões indesejadas designa-se por reverberação.

A equação do sonar ativo adaptada a contexto de reverberação a dominar o ruído:

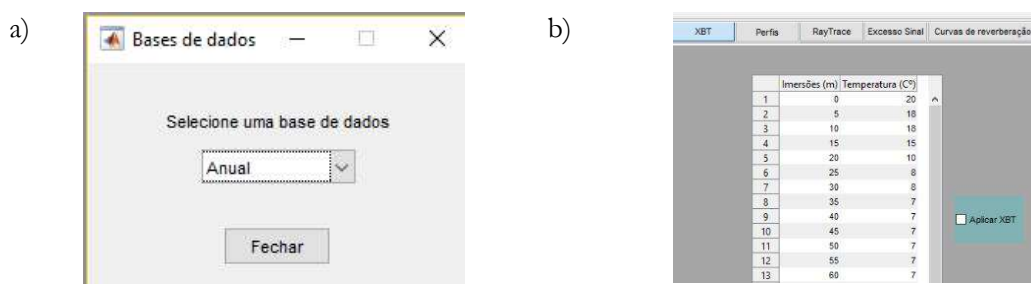
$$SE = SL - 2TL + TS - RL + DI -$$

A reverberação é, na prática, um valor que é estimado com recurso a estudos oceanográficos recorrentes e que é guardado fielmente pelas Marinhas com capacidade de os produzirem, pelo que se recorreu a alguns métodos empíricos de Hodges (2010) pp. 149-154 e valores de referência referidos por Waite (2002) pp. 112-116.

### 3. O DELFIM – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

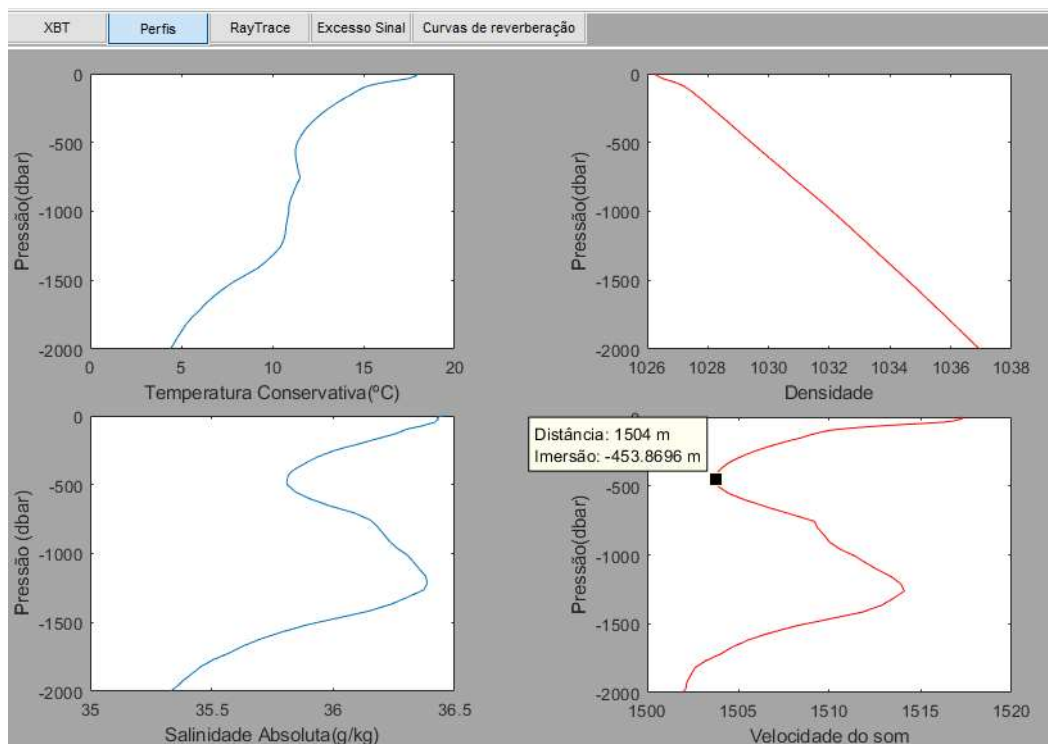
A linha orientadora do desenvolvimento do Delfim caracterizou-se pela simplificação do trabalho do utilizador operacional e visualização simples, mas apelativa dos resultados.

O Delfim é alimentado pela base de dados oceanográfica da NOAA de 2013 (Figura 1a), sendo, portanto, possível utilizar o *software* na ausência de um perfil de temperatura ou de velocidade do som. Esta capacidade de utilização em modo *stand-alone* não deve descurar informação atualizada, recolhida por via de sondas XBT. Posto isto, o Delfim possibilita introduzir o perfil de temperatura, substituindo o perfil climatológico nos pontos onde existir informação introduzida pelo utilizador (Figura 1b).



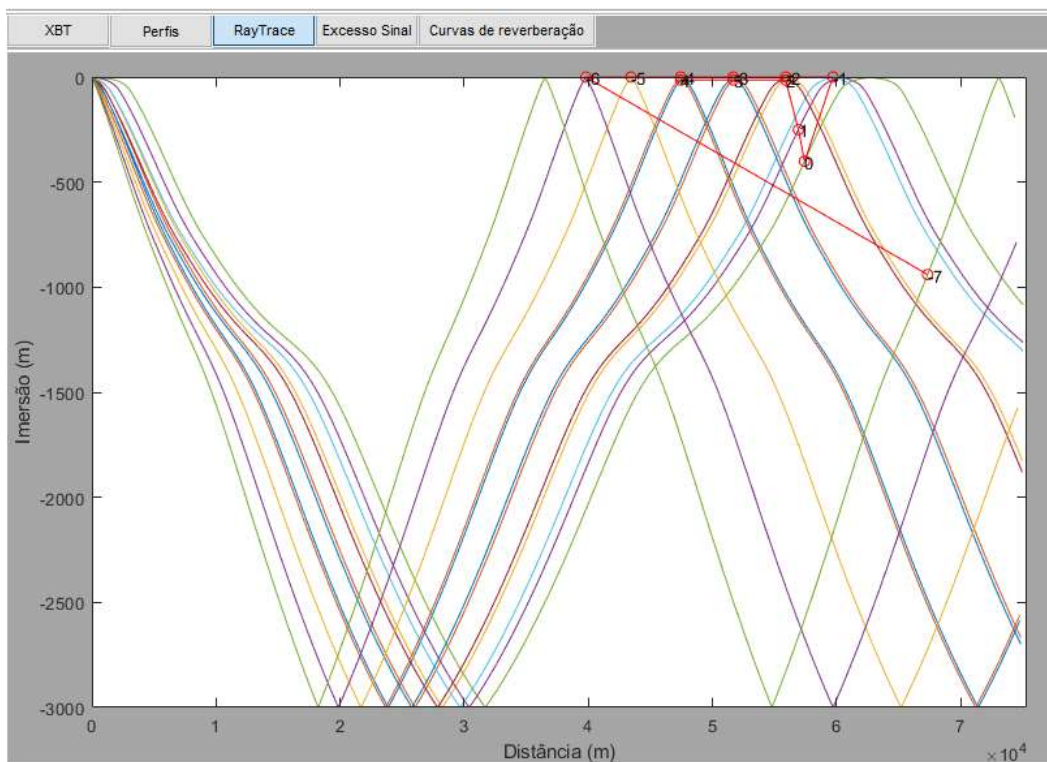
**Fig.1.** Menu de escolha da base de dados da NOAA (a). O utilizador pode escolher a base de dados anual ou por estação do ano com escala espacial de  $1^\circ$  ou  $1/4^\circ$  de latitude por longitude ou por mês com escala de  $1^\circ$ . O utilizador pode ainda preencher a tabela XBT com o perfil de temperatura da sua posição (b).

O utilizador pode visualizar os perfis de temperatura, salinidade, densidade e velocidade do som, com possibilidade de aceder às coordenadas de cada ponto dos gráficos (Figura 2). Esta funcionalidade está disponível para qualquer gráfico do Delfim.



**Fig.2.** Janela de visualização dos gráficos de perfis de temperatura, salinidade, densidade e velocidade do som.

O perfil de velocidade do som resultante é posteriormente utilizado pela função *raytrace*, que calcula o traçado dos raios sonoros, como se mostra na Figura 3.



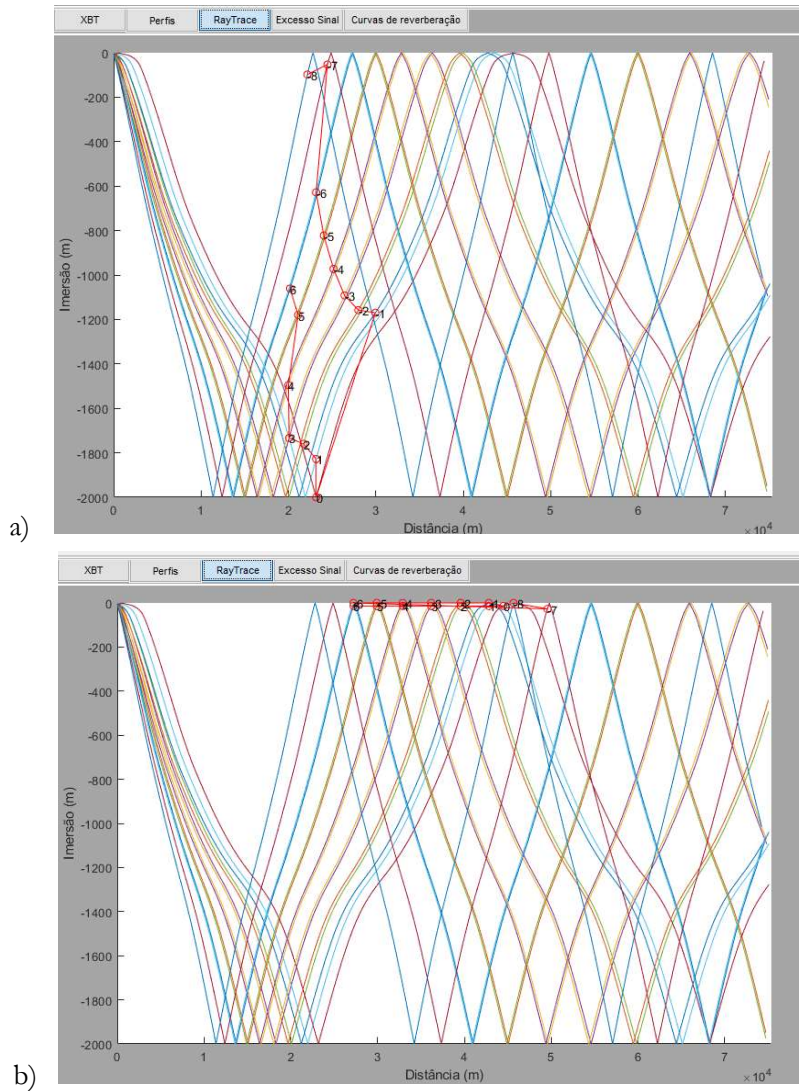
**Fig. 3.** *Raytracing* resultante do perfil de velocidade do som.

É importante referir que todos os cálculos de distâncias, de fatores que afetem a propagação e consequentes alcances de detecção são calculados raio a raio. Desta forma, os pontos de cor vermelha, presentes na Figura 3, representam o alcance de detecção calculado para cada raio e os segmentos retos que os unem são uma estima do alcance entre raios.

O alcance de detecção é disponibilizado no gráfico de *raytracing*, já que todos os cálculos de excesso de sinal (SE) foram efetuados pelo programa.

Para o fator perdas de transmissão (TL) foi utilizada a fórmula de coeficiente de absorção de Ainslie e McColm de 1998 (Ainslie e McColm, 1998) e, no que diz respeito às perdas por dispersão geométrica, são apresentados dois métodos distintos. O método da dispersão esférico-cilíndrica permite adaptar o fator  $\beta$  da equação  $10 * \beta * \log(r)$ , de modo que, se  $\beta=1$ , dispersão cilíndrica e se  $\beta=2$ , dispersão esférica (Urlick, 1983, pp. 99-105). O método de afastamento vertical dos raios, também estudado por Urlick (1983) apresenta ainda uma forma de resolver o cálculo de TL para modelos de *raytrace*, partindo para uma expressão

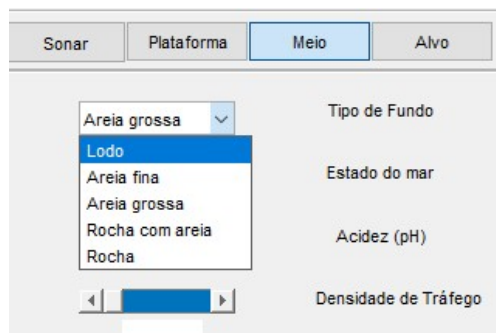
que integra a distância horizontal à fonte, mas também o afastamento vertical entre raios. A equação é consistente com o fenômeno que ocorre em zonas onde o sinal amplifica por convergência ou é atenuado por divergência e é expressa pela fórmula,  $10 \log \frac{r \Delta h}{\Delta \theta} \frac{c_2}{c_1}$  (Urick, 1983, pp. 126-128). Os dois métodos apresentam diferenças significativas, na ordem de 1 a 2 km para  $\beta=1,55$ , como se verifica pela Figura 4.



**Fig. 4.** Cálculo da distância de detecção com recurso ao método de afastamento vertical dos raios (a) e esférico-cilíndrico (b).

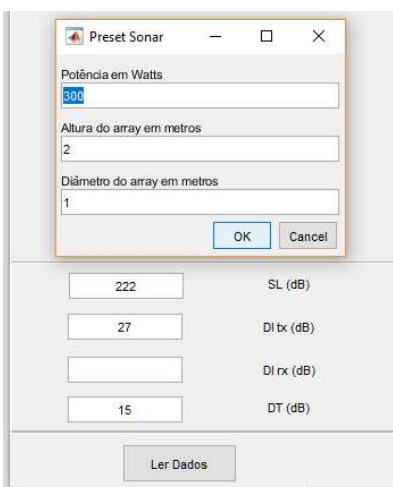
No que toca a TL, o algoritmo de traçado dos raios de som resolve as reflexões dos raios de som no fundo e na superfície. No entanto, devem ainda ser calculadas as perdas associadas a estas interações. Posto isto, o Delfim tem um valor predefinido (em dB) por

cada interação com a superfície e dependendo do tipo de fundo (Figura 5), acumula as perdas por interação com o fundo.



**Fig. 5.** Cada tipo de fundo acarreta um valor pré-definido de perda (em dB) por interação.

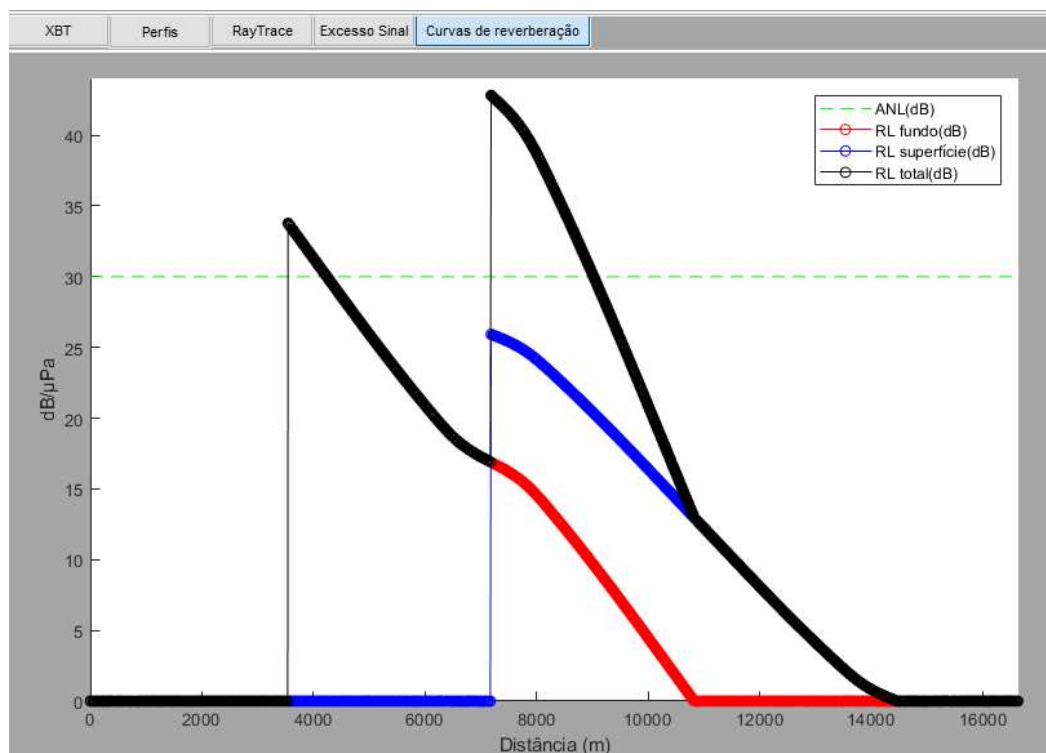
O valor de índice de diretividade (DI) é estimado através da fórmula apresentada por Waite (2002) p. 34,  $DI = 10 \log(5 h d f_0^2)$ , aplicável sempre que o sonar do navio seja do tipo *array* cilíndrico e o utilizador introduza a altura (h), diâmetro (d) e frequência de trabalho ( $f_0$ ) (Figura 6). Se as condições anteriores não se verificarem, existe sempre possibilidade de introdução do valor de DI diretamente na interface do Delfim.



**Fig. 6.** Menu de introdução dos parâmetros do sonar. O utilizador pode também optar por introduzir diretamente o valor estimado de DI para o sonar (DI rx).

O Delfim considera igualmente o nível de reverberação (RL) na sua previsão sonar. É feita uma comparação entre o RL e o nível de ruído (NL), sendo, este último, uma soma dos valores pré-definidos de nível de ruído ambiental (ANL) e de ruído próprio. Visto que a deteção pode ser influenciada maioritariamente por um dos dois fatores, é escolhido o predominante, ou seja o que tiver um valor superior (em dB). O RL é dividido em de fundo,

de superfície do mar e de volume, devendo ser estimado com recurso a estudos oceanográficos e biológicos efetuados para a área de operações (Hodges, 2010, p. 152). O Delfim calcula o RL total com recurso apenas à soma dos valores de RL de superfície e de fundo, em função da distância à qual se dá a reflexão. O RL pode ser calculado com o SL, com a capacidade refletora do alvo ( $TS_{rev}$ ) e com as perdas de transmissão associadas à distância a que o reverberador se encontra do transdutor ( $2TL_{rev}$ ), através de  $RL = SL + TS_{rev} - 2TL_{rev}$  (Hodges, 2010, p. 154), em que  $TS_{rev} = BS_{rev} + 10\log(A \text{ ou } V)$ . Assume-se que a área da superfície de reverberação é igual a 1 m<sup>2</sup> e  $TS_{rev} = BS_{rev}$ . Para o espalhamento de retorno da superfície do mar é utilizada a  $BS_s = 9,9 \log [f h \sin(\varphi)] - 45,3$  (Hodges, 2010, 8.28, p. 151). Nela  $f$  é a frequência (kHz) e  $h = 0,0026 v (5/2)$ , sendo  $v$  o vento (nós) e  $\varphi$ , o ângulo de incidência(°). O espalhamento de retorno do fundo depende do tipo de fundo, do ângulo de incidência e da frequência de emissão. Foi consultada a Figura 6.8 de Waite (2002) p. 115 e retirados os seguintes valores:  $BS_{lodo} = -45\text{dB}$ ,  $BS_{areiafina} = -40\text{dB}$ ,  $BS_{areiagrossa} = -36\text{dB}$ ,  $BS_{rochacomareia} = -33\text{dB}$  e  $BS_{rocha} = -27\text{dB}$ , aplicáveis para ângulos de incidência inferiores a 10° e frequências até 10kHz. Desta forma é calculado o RL que, mesmo que não seja dominante comparativamente ao NL é colocado no gráfico das curvas de reverberação (Figura 7), em que RLfundo tem cor vermelha, RLsuperfície, azul e RLtotal tem cor preta.



**Fig. 7.** Gráfico de curvas de reverberação, de superfície (a azul), de fundo (a vermelho) e total (a preto).

Finalmente, é apresentado o gráfico de excesso de sinal (Figura 8), que de certa forma indica a probabilidade de deteção do alvo, tendo em conta os fatores previamente introduzidos e calculados.

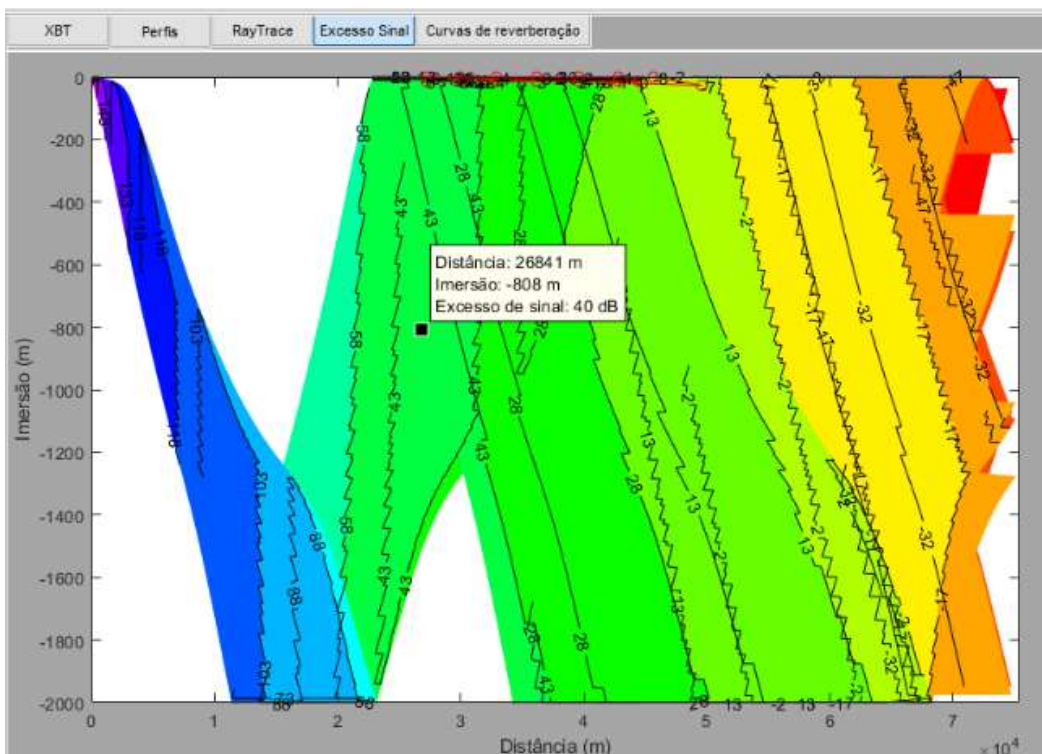


Fig. 8. Gráfico de excesso de sinal (em dB) por distância.

## CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um modelo de previsão sonar com base nas teorias de *raytracing*, equações sonar e conhecimento empírico acerca dos fatores ambientais, do sonar e do alvo, influentes no processo de detecção acústica submarina.

O objetivo do projeto foi desenvolver um *software* de aplicação à escala global, apoiado na climatologia, sem necessidade de recorrer a dados com classificação de segurança ou estudos oceanográficos reservados às Marinhas e organismos que os desenvolvem. O Delfim está preparado para sobrepor dados XBT à climatologia, o que confere mais realismo no contexto de operações submarinas e antissubmarinas. O uso de apenas climatologia permite ser aplicado em contextos de planeamento de operações ou de apoio à formação e treino.



## **Apêndice B – Guia para utilização e interpretação de resultados do FAPSO**

### **OBJETIVO**

O FAPSO (Ferramenta Auxiliar à Previsão Sonar Operacional) procura resolver as equações sonar ativo, prever a propagação do som no meio oceânico e disponibilizar informação útil e relevante para planeamento e execução de operações submarinas e antissubmarinas.

Com base nas condições geográficas, ambientais e parâmetros sonar, da plataforma e do alvo, é apresentado o alcance sonar num gráfico de *raytracing* e num gráfico de excesso de sinal. O *software* informa ainda o utilizador acerca dos níveis de reverberação consequentes do uso ativo do sonar.

### **REQUISITOS**

- Sistema operativo de 64 bits;
- 2 Gb de espaço livre no disco rígido.

### **INSTRUÇÕES PARA INSTALAÇÃO**

- Caso não possua o *Matlab Compiler Runtime* instalado, instalar o ficheiro “MCRInstaller.exe”;
- Copiar a pasta “FAPSO executável” para uma localização no computador.

### **INICIAR O FAPSO**

- Abrir a pasta “FAPSO executável”;
- Duplo clique em “FAPSO.exe”.

### **ORGANIZAÇÃO DOS MENUS**

O FAPSO encontra-se dividido em vários menus que permitem agrupar parâmetros que sejam relacionados. Os menus da barra superior (Figura 1) possuem parâmetros cuja manipulação é de carácter opcional para o funcionamento do programa e, com efeito, devem ser considerados opções avançadas.



**Figura 1** – Menus da barra superior.

Os menus “Sonar”, “Perdas de Transmissão” e “Bases de Dados” alteram o modelo e produzem alterações em relação às predefinições do programa. Os menus “Meio” e “Alvo” não produzem ainda qualquer efeito, pelo que poderão ser utilizados em versões futuras do *software*. O menu “Ajuda” abre o presente documento, de modo a resolver qualquer questão que possa surgir.

Os menus de manipulação obrigatória para que o programa efetue os cálculos encontram-se agrupados à esquerda da janela de *interface* (Figuras 2 e 3) e agrupam os vários parâmetros por forma a definir as características do sonar, da plataforma em que este se encontra, do meio e do alvo. O utilizador deverá ter uma noção dos parâmetros que aqui são apresentados, pelo que, a leitura deste guia não invalida o conhecimento *a priori* dos conceitos básicos de acústica submarina e da deteção ativa. A dissertação de mestrado que se encontra na *pen* USB que contém o FAPSO possui um subcapítulo de descrição do *software* (2.2. FAPSO) que deverá ser consultado para maximizar a utilização da ferramenta. O capítulo 1. Enquadramento teórico, poderá também ser consultado se o utilizador desejar compreender a teoria que define cada parâmetro e que suporta os cálculos efetuados pelo FAPSO.

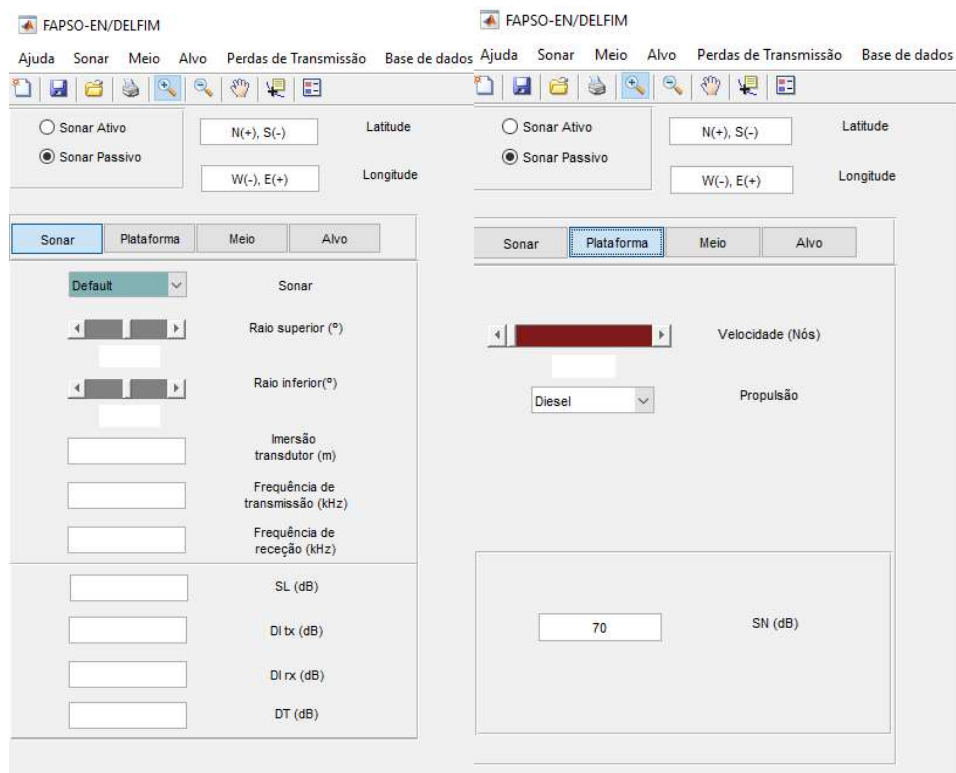
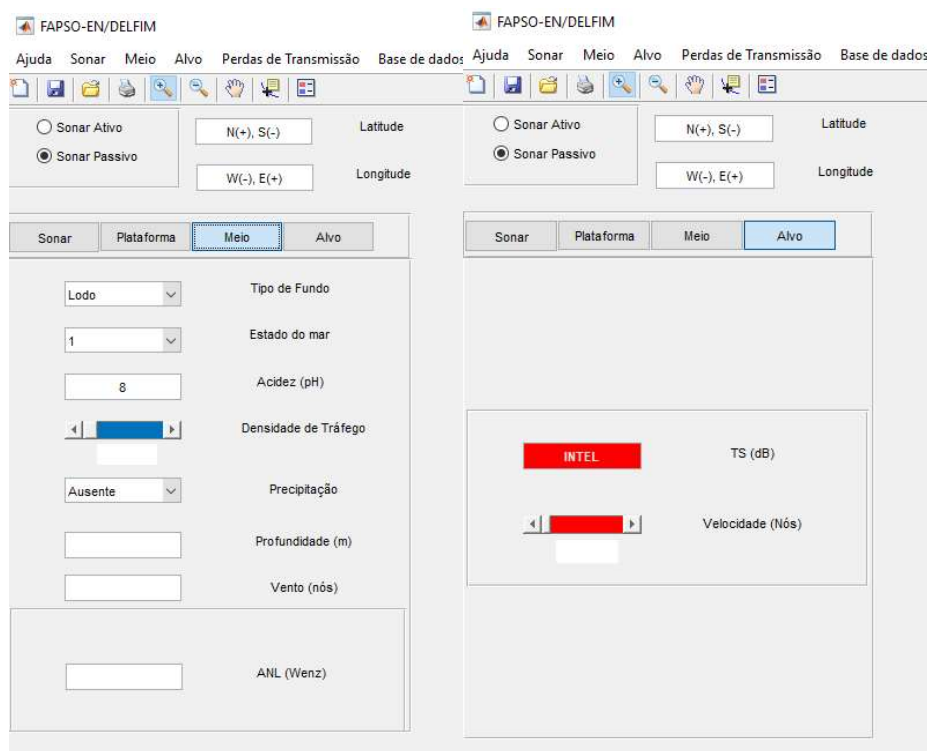


Figura 2 – Menus de parâmetros sonar (à esquerda) e da plataforma (à direita).



**Figura 3** – Menus de parâmetros do meio (à esquerda) e do alvo (à direita).

### PAINÉIS DE RESULTADOS

Os painéis de resultados ocupam grande parte da *interface* e são compostos por 5 funcionalidades:

- O painel XBT (Figura 4) é o único painel que se encontra na zona dos resultados, mas que, de facto, serve o propósito de introdução de valores de temperatura ou velocidade do som, em função da profundidade ou imersão. Estes valores são normalmente retirados do perfil construído pela leitura de sondas XBT, no caso de leitura de temperatura, e XSV, para leitura de velocidade do som. Ao selecionar a opção “Aplicar XBT” ou “Aplicar XSV”, o perfil definido irá sobrepor-se ao perfil da base de dados WOD 2013 da posição geográfica, para as imersões em que se encontra definido, ou seja, até aos 300 metros.

	Imersões (m)	Temperatura (C°)
1	0	18.5000
2	5	17.5000
3	10	16.5000
4	15	15.5000
5	20	14.5000
6	25	14.5000
7	30	14.5000
8	35	14.5000
9	40	14.5000
10	45	14.5000
11	50	14.5000
12	55	14.5000
13	60	14.5000
14	65	14.5000
15	70	14.5000
16	75	14.5000
17	80	14.5000
18	85	14.5000
19	90	14.5000
20	95	14.5000
21	100	14.5000
22	125	14
23	150	13.5000
24	175	13.2500

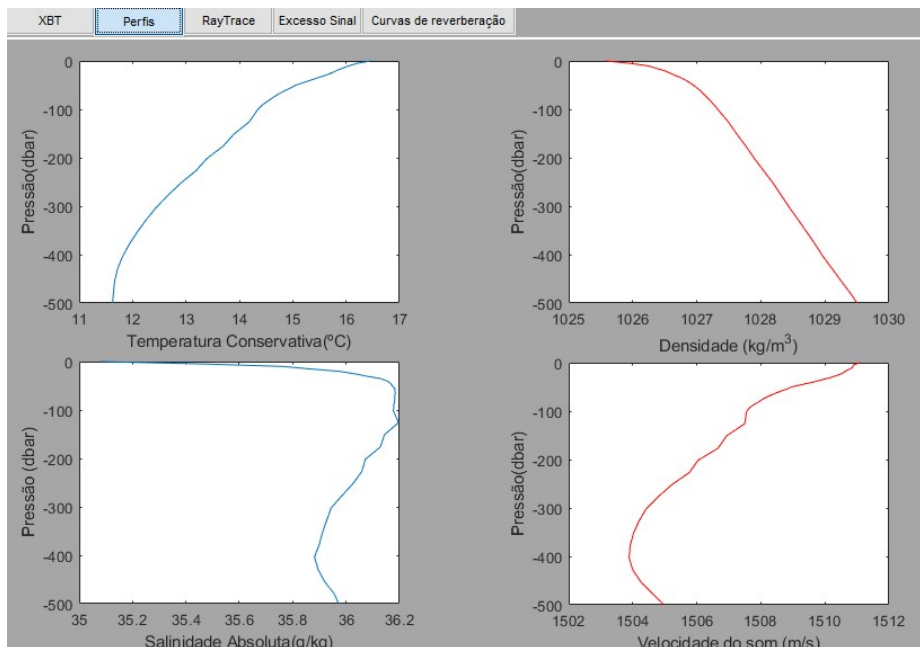
Aplicar XBT

	Imersões (m)	Velocidade do s...
1	0	1500
2	5	1500
3	10	1500
4	15	1500
5	20	1500
6	25	1499
7	30	1498
8	35	1497
9	40	1497
10	45	1496
11	50	1496
12	55	1495
13	60	1494
14	65	1493
15	70	1493
16	75	1492
17	80	1492
18	85	1492
19	90	1492
20	95	1491
21	100	1491
22	125	1490
23	150	1488
24	175	1486

Aplicar XSV

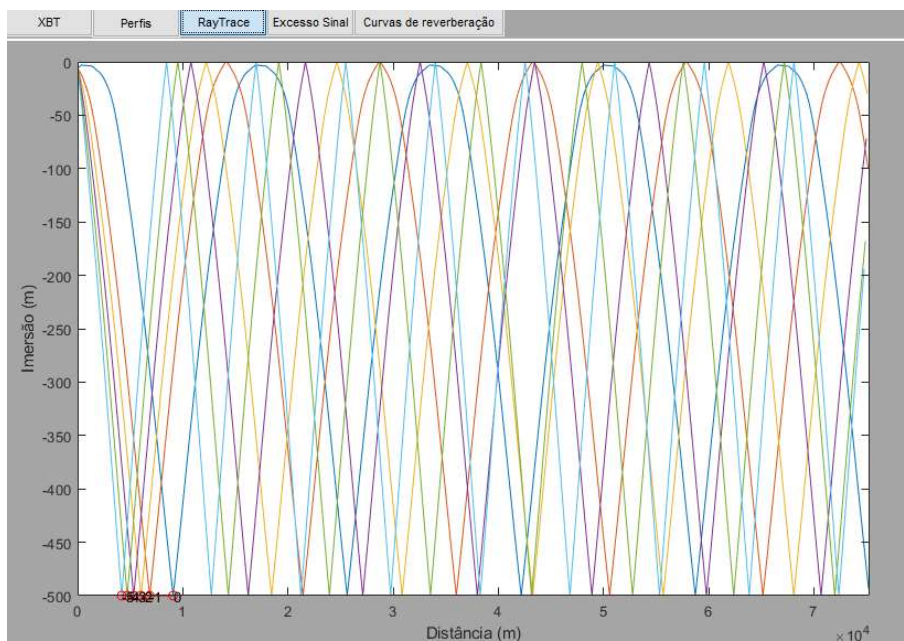
**Figura 4** – Painel de introdução de valores do perfil XBT ou XSV.

- O painel dos perfis (Figura 5) apresenta os perfis climatológicos da base de dados WOD 2013 de temperatura, salinidade e densidade e velocidade do som resultantes. Se a aplicação dos perfis XBT ou XSV for selecionada, estes sobrepõem-se aos valores da climatologia.



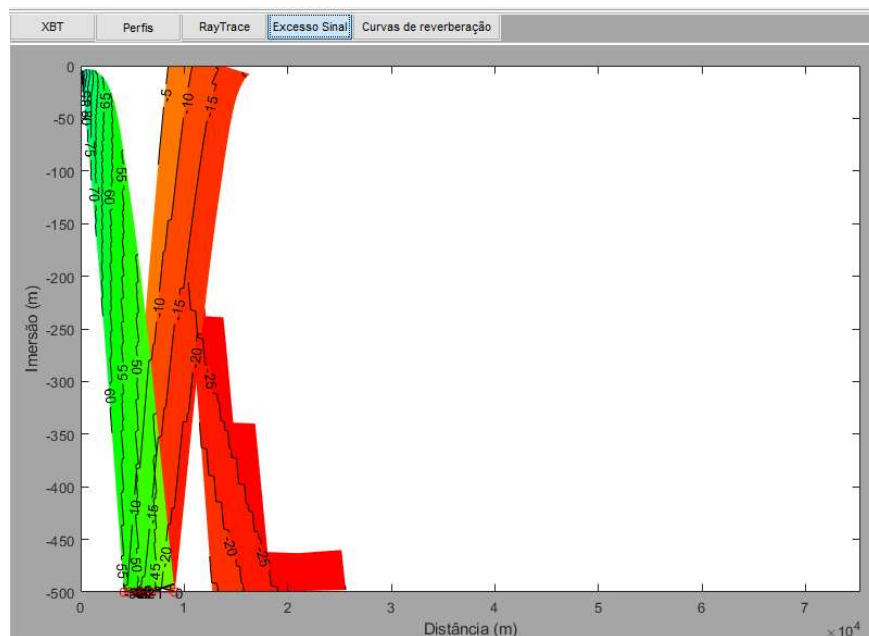
**Figura 5** – Painel com os gráficos de perfil de temperatura, salinidade, densidade e velocidade do som em função da imersão.

- O painel do *Raytrace* (Figura 6) permite visualizar o traçado dos raios sonoros e o alcance de deteção, assinalado a vermelho, resultante da integração da função de *raytracing* utilizada com os parâmetros introduzidos pelo utilizador.



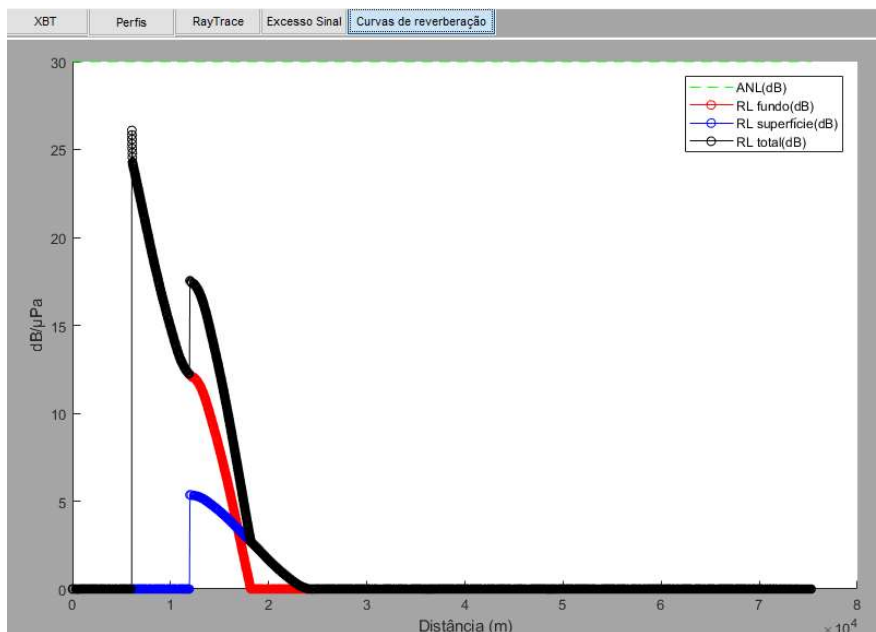
**Figura 6** – Painel de apresentação do *raytracing* e dos alcances de deteção (a vermelho).

- O painel excesso de sinal (Figura 7) permite visualizar a evolução deste parâmetro ao longo da propagação, em intervalos de 5 dB. O valor de excesso de sinal igual a zero deverá coincidir aproximadamente com o alcance médio de detecção.



**Figura 7** – Painel com gráfico de excesso de sinal com variação cromática a cada 5 dB.

- O painel das curvas de reverberação (Figura 8) apresenta a variação do nível de reverberação total (desenhado a preto) em função da distância percorrida pelo som e é definido no programa como sendo a soma do nível de reverberação de superfície (desenhado a vermelho) e de fundo (desenhado a azul). É ainda apresentado um valor *default* de nível de ruído ambiental igual a 30 dB, por forma a facilitar ao utilizador a determinação de qualquer o fator mais limitante para a deteção, a reverberação ou o ruído ambiental.



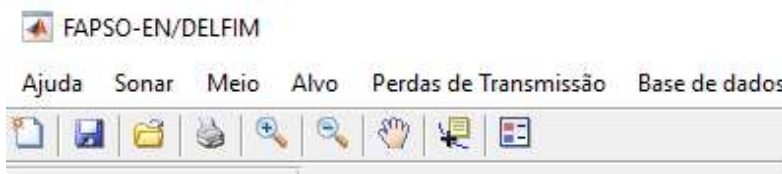
**Figura 8** – Painel com curvas de reverberação e nível de ruído ambiental igual a 30 dB.

### **CORRER O FAPSO PASSO A PASSO**

- Introduzir a posição geográfica, tendo em conta que o sinal positivo deve preceder latitudes sul e longitudes oeste;
- Selecionar a base de dados, o método de cálculo das perdas de transmissão e parametrizar o sonar através dos menus da barra superior (este passo é opcional);
- Alterar, selecionar e introduzir os valores dos menus de manipulação obrigatória, ou seja, os parâmetros sonar, plataforma, meio e alvo;
- Introduzir o perfil de XBT ou XSV lido pela sonda anteriormente lançada (opcional);
- Se pretender utilizar o perfil XBT ou XSV definido, deve selecionar a opção “Aplicar XBT” ou “Aplicar XSV” (opcional);
- Pressionar o botão “Perfis” e visualizar resultados;
- Pressionar o botão “Raytrace” e visualizar resultados;
- Pressionar o botão “Excesso de Sinal” e visualizar resultados;
- Pressionar o botão “Curvas de Reverberação” e visualizar resultados;

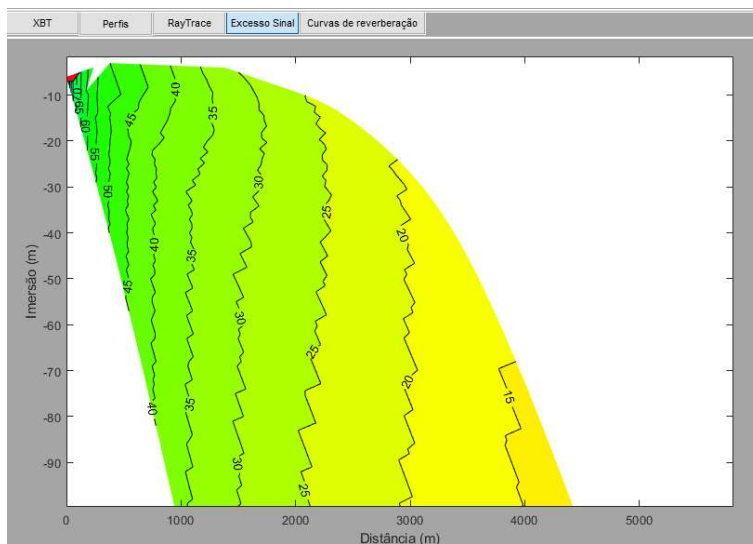
## FERRAMENTAS AUXILIARES

O FAPSO possui diversas ferramentas que auxiliam a visualização de resultados, localizadas por baixo da barra de menus superior (Figura 9).

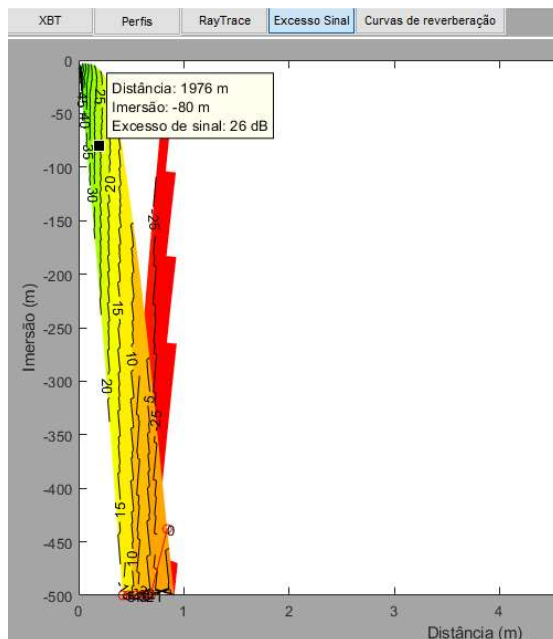


**Figura 9** – Barra de ferramentas auxiliares do FAPSO.

Da esquerda para a direita as ferramentas permitem: criar um perfil de XBT ou XSV, guardar resultados, abrir um perfil guardado de XBT ou XSV, imprimir resultados, ampliar ou *zoom in* de acordo com a parte do gráfico selecionada (Figura 10), diminuir ou *zoom out*, mover ao longo dos gráficos, leitura de posição (Figura 11) ou *data cursor* e mostrar ou ocultar legenda. As quatro primeiras ferramentas auxiliares encontram-se indisponíveis nesta versão do *software*.



**Figura 10** – Exemplo da utilização da ferramenta de ampliar ou *zoom in*.



**Figura 11** – Exemplo da utilização da ferramenta de leitura da posição ou *data cursor*.

### NOTAS IMPORTANTES

- Todos os números decimais devem ser inseridos no programa com ponto e não com vírgula (ex. 14.3; 0.5);

- As seguintes funcionalidades encontram-se indisponíveis para esta versão do *software*:

- A seleção de sonar ativo ou passivo;
- O *pop-up menu* de sonares predefinidos nos parâmetros sonar;
- A velocidade e tipo de propulsão nos parâmetros da plataforma;
- O estado do mar, densidade de tráfego e precipitação nos parâmetros do meio;
- A velocidade nos parâmetros do alvo.

Procurar-se-á estudar e desenvolver métodos que permitam parametrizar ou utilizar estas funcionalidades em versões futuras do FAPSO.

## Apêndice C – USB *drive* com o FAPSO e dissertação

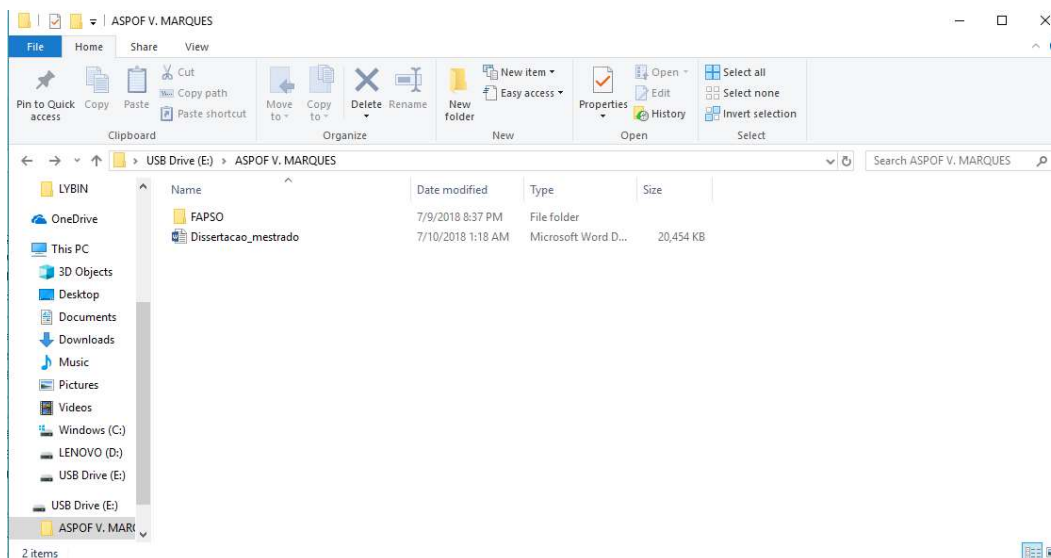


Figura 1 – Raíz da USB *drive* com a pasta do FAPSO e a dissertação de mestrado.

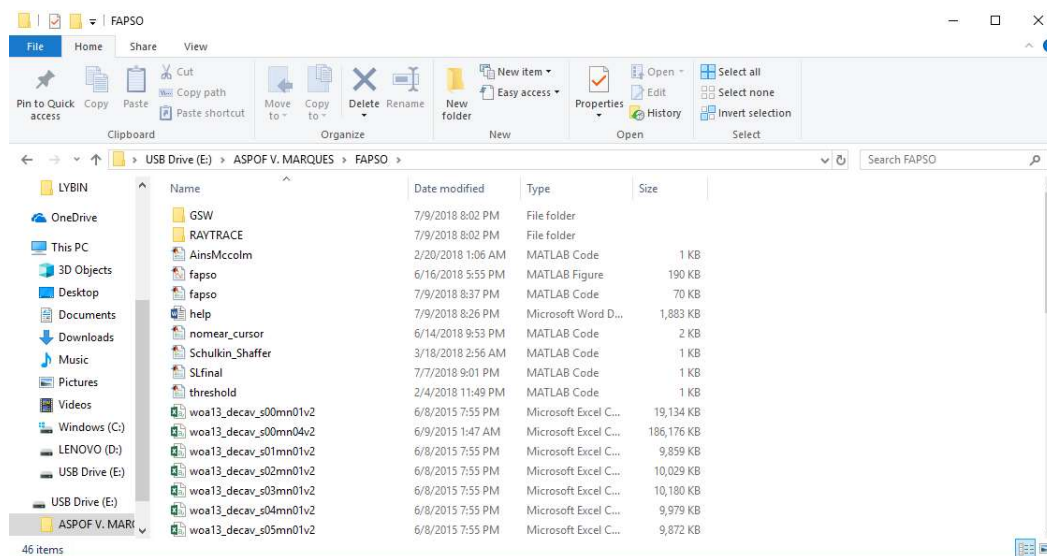


Figura 2 – Conteúdos da pasta FAPSO incluem a base de dados e funções auxiliares.