



Maria Isabel Freitas Valério

PROPAGAÇÃO E INFLUÊNCIA DO RUÍDO EM AMBIENTES AQUÁTICOS

PROPAGATION AND INFLUENCE OF NOISE IN AQUATIC
ENVIRONMENT

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,
orientada pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho

Coimbra, 8 de setembro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Maria Isabel Freitas Valério

Propagação e Influência do Ruído em Ambientes Aquáticos

Propagation and Influence of Noise in Aquatic Environment

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,
orientada pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes e pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Coimbra, 8 de setembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Desde o momento inicial da presente dissertação de mestrado pude contar com o apoio e confiança de inúmeras pessoas, sendo que é com muita satisfação que expresso aqui o meu eterno agradecimento.

Em primeiro lugar, não poderia deixar de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Paulo Amado Mendes e Professor Doutor Luís Godinho, pelo apoio e dedicação prestados ao longo de todo o semestre. Um muito obrigado por toda a motivação, orientação e disponibilidade nestes últimos meses.

Aos meus pais e irmão, o maior agradecimento de todos, que nunca será suficiente para todo o amor e apoio incondicional demonstrado ao longo da minha vida.

À minha família, agradeço do fundo do meu coração o apoio incansável, o carinho e a presença em todos os momentos e etapas, são sem duvida um suporte fantástico.

À minha prima Raquel, por todos os momentos que partilhamos nesta aventura por Coimbra, com uma palavra de entusiasmo por todos aqueles que ainda estão para vir.

Ao meu namorado, um enorme obrigado por todo o amor e descomplicação nos momentos de maior desânimo, por toda a paciência, por todo o tempo, por tudo. Ainda uma palavra de apreço à sua família por ser, também, a minha família longe de casa.

Um obrigado à Catarina Dinis, à Cátia Bento e à Raquel Louro por toda a amizade e companhia que fez deste um caminho, sem dúvida, mais simples. Deixo ainda uma palavra de esperança para que o futuro nos continue a trazer missões.

Por fim, um agradecimento a todos os amigos e colegas que, de uma forma direta ou indireta, contribuíram para tornar esta uma jornada inesquecível e de crescimento pessoal.

RESUMO

Os oceanos sempre foram meios essenciais para a humanidade e usados para as mais diversas atividades. A ideia que prevaleceu durante muito tempo de que estes eram locais silenciosos já foi refutada e o desenvolvimento antropogénico tem levado a um aumento dos níveis de ruído nestes meios, situação que provoca uma alteração do estado natural e perturba a vida aquática.

Denominada *Propagação e Influência do Ruído em Ambientes Aquáticos*, esta dissertação visa explorar a temática da acústica em meios marinhos e o modo como o ruído induz impacto na vida subaquática, salientando os principais desafios e a importância de mais investigação na área.

Neste trabalho, é feita uma contextualização ao desenvolver a temática da acústica subaquática enumerando algumas das principais fontes de ruído, tanto naturais como antropogénicas, e explorando a influência nos comportamentos da vida marinha. São apresentados os métodos de monitorização e redes existentes, possíveis medidas de mitigação e os modelos desenvolvidos até ao momento que permitem um auxílio aos investigadores.

A simulação de alguns cenários simples de propagação com recurso a um software de modelação acústica subaquática, na perspetiva de perda de transmissão, foi feita de modo a melhor interpretar as informações apresentadas.

A necessidade de mais e melhor investigação é um dos pontos explorados, salientando questões onde existem muitas lacunas entre os tópicos da propagação do som e os impactos na vida marinha.

ABSTRACT

As an essential environment for humankind, the oceans have always been used for a large variety of activities. The preconceived idea that the ocean is a quiet place has already been refuted and the anthropogenic development led to an increase of underwater noise levels which modify the natural state and disturbs ocean life that depends on sound to survive.

Propagation and influence of noise in aquatic environments is the title of this master's dissertation which aims to explore the theme of ocean acoustics and how the noise impacts the underwater life while making sure to point out major challenges and the value of further investigation in this area.

In this work, an introduction to the main concepts of ocean noise propagation is made where some of the major noise sources in the environment such as natural and anthropogenic are listed and the influence in animal behavior. Existing monitoring methods and networks are presented, some mitigation measures too and propagation models developed until today, which allow to assist the researchers.

Simple scenario simulations using an underwater acoustic modelling software are performed in terms of transmission loss in order to try to authenticate the information given. The need for more and better research is mentioned, pointing out the major gaps in knowledge between both topics, propagation of sound and the impacts on life underwater.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
1 Introdução.....	1
2 Som.....	3
2.1 Conceitos Gerais	3
2.2 Propagação do Som em Meio Aquático	6
2.3 Canais de Propagação	11
2.3.1 Canal de Superfície.....	12
2.3.2 Canal em Profundidade	13
2.3.3 Canal de Águas Pouco Profundas.....	15
2.3.4 Canal do Ártico.....	16
3 Ambiente Sonoro Submarino	17
3.1 Ruído Ambiente	17
3.2 Fontes de Ruído Natural	18
3.2.1 Fontes Físicas e Geofísicas.....	19
3.2.2 Fontes Biológicas	22
3.3 Fontes de Ruído Antropogénicas	23
3.3.1 Sonar.....	23
3.3.2 Explosivos	24
3.3.3 Dispositivos Acústicos de Dissuasão e Assédio.....	25
3.3.4 Atividades Industriais	26
3.4 O Som e os Animais	30
3.4.1 Problemática do Ruído na Vida Marinha	31
3.5 Monitorização	35

3.6	Medidas de Mitigação.....	37
3.7	Legislação, Gestão de Risco e Desafios Futuros	39
4	Modelação de Fenómenos de Propagação	44
4.1	Fontes Sonoras Pontuais	44
4.1.1	Modelo de Raios.....	45
4.1.2	Modelo dos Modos Normais	46
4.1.3	Modelo da Função de Green.....	47
4.1.4	Modelo dos Elementos Finitos	47
4.1.5	Modelo da Equação Parabólica	48
4.1.6	Modelos Tridimensionais	49
4.2	Fontes Sonoras Distribuídas	50
4.3	Modelação dos Efeitos do Ruído nos Mamíferos	50
4.4	Bases de Dados	52
5	Exemplos de simulação Numérica	54
5.1	Método.....	54
5.2	Resultados e Discussão.....	56
6	Conclusões	64
	Referências Bibliográficas.....	66
	Anexo A – Ambientes Simulados.....	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Propagação do som. Fonte: http://www.dosits.org/ (2017)	4
Figura 2 – Amplitude da onda. Fonte: http://www.dosits.org/ (2017).....	4
Figura 3 – Representação de um ciclo da onda. Fonte: http://www.dosits.org/ (2017)	5
Figura 4 – Propagação esférica. Fonte: http://www.dosits.org/ (2017).....	7
Figura 5 – Propagação cilíndrica. Fonte: http://www.dosits.org/ (2017)	7
Figura 6 – Variação da temperatura, salinidade e pressão com a profundidade, respetivamente. Fonte: http://www.dosits.org/ (2017)	9
Figura 7 – Perfil de velocidades para latitudes médias. Fonte: http://www.dosits.org/ (2017)..	9
Figura 8 – Variação do perfil de velocidades com a latitude. Fonte: http://www.dosits.org/ (2017)	10
Figura 9 – Comparação do perfil de velocidades do ártico com os climas temperados. Fonte: http://www.dosits.org/ (2017).....	11
Figura 10 – Representação dos caminhos de propagação nas diferentes situações. Fonte: Jensen et al., 2011, p.16	12
Figura 11 – Exemplo de propagação do som no canal de superfície. Fonte: Jensen et al., 2011, p.26	13
Figura 12 – Exemplo de propagação do som no canal SOFAR. Fonte: Jensen et al., 2011, p.25	14
Figura 13 – Exemplo de propagação do som em águas pouco profundas e no verão. Fonte: Jensen et al., 2011, p.29.....	15
Figura 14 – Exemplo de propagação do som no ártico. Fonte: Jensen et al., 2011, p.27.....	16
Figura 15 – Espectro do ruído ambiente médio para águas profundas. Fonte: Urick, 1975, p.210	18
Figura 16 – Perfil de velocidade linear.....	55
Figura 17 – Perfil de velocidades de Munk.....	56
Figura 18 - Simulação de ambiente sonoro com variação da profundidade da coluna de água. Em cima a simulação identificada como número 1 e em baixo a número 5.	57
Figura 19 - Comparação entre o solo a e solo b num ambiente com 3500 metros de profundidade. Em cima a simulação identificada como número 3 e em baixo a número 4.	58
Figura 20 - Comparação entre o solo a e solo b num ambiente com 5000 metros de profundidade. Em cima a simulação identificada como número 5 e em baixo a número 6.	59
Figura 21 - Impacto dos diferentes perfis de velocidade no campo sonoro. Simulações 5, 11 e 17, respetivamente	60
Figura 22 - Impacto da profundidade da fonte num ambiente com 2000 metros, com a fonte a 5 e 100 metros de profundidade, em cima e em baixo, respetivamente. Resultados relativos à simulação número 13.....	62

Figura 23 - Impacto da profundidade da fonte num ambiente com 5000 metros com a fonte a 5 e 100 metros de profundidade, em cima e em baixo, respetivamente. Resultados relativos à simulação número 17..... 63

1 INTRODUÇÃO

A proteção dos oceanos é uma temática que tem ganho importância com o passar do tempo, visto ser visível o impacto do homem neste meio. Apesar da propagação do som nestes ambientes ser objeto de investigação há largos anos, o impacto do aumento dos níveis de ruído nos mares apenas começou a ser uma preocupação mais recentemente. Alguns animais marinhos, em especial os mamíferos, utilizam o som para diversas atividades que garantem a sua sobrevivência e a da sua espécie. O aumento dos níveis de ruído nos oceanos pode ter influência na utilização da acústica por parte da vida marinha, modificando comportamentos que poderão comprometer a vida do indivíduo ou de uma população inteira.

O objetivo deste documento consiste na recolha de informação bibliográfica relativa às principais fontes de ruído em meios marinhos, percebendo como esse ruído se propaga no meio e de que forma afeta as espécies animais e o seu comportamento. A recolha de informação é complementada por simulações computacionais.

Esta dissertação encontra-se dividida em duas grandes partes, a primeira dedicada à teoria da acústica subaquática e do ambiente marinho, e a segunda é relativa à simulação computacional de diferentes cenários acústicos.

A primeira parte inicia com o enquadramento do tema, ao explorar os conceitos básicos da acústica marinha e de que forma o som é influenciado pelo ambiente que o rodeia, dando especial enfoque ao fenómeno de variação da velocidade de propagação do som no meio.

É feita uma análise ao panorama acústico ambiente antes de explorar as fontes pelas quais é feita a introdução de energia sonora no meio marinho, sejam elas naturais ou antropogénicas, e investigados os possíveis impactos dessa introdução na vida marinha. Sendo de grande importância, são ainda apresentadas as tecnologias existentes para a monitorização dos oceanos, de que modo é possível atuar para mitigar os efeitos negativos da introdução extra de energia neste meio, os documentos legais existentes de maior relevância, que permitem regular as atividades humanas introdutoras deste tipo de poluição, de que forma se procede a avaliação de riscos e, por fim, os desafios futuros.

O quarto capítulo, pertencente à parte inicial, incide sobre a modelação de fenómenos de propagação. A modelação é dividida em duas categorias, uma para fontes pontuais e uma para fontes distribuídas. É, ainda, referida a modelação da influência do som nos indivíduos e populações de mamíferos marinhos e as bases de dados existentes que permitem a consulta de dados acústicos.

Na segunda parte (capítulo cinco), e com recurso a um software de modelação acústica subaquática disponível sem limitações, são apresentados exemplos de simulação computacional e de que forma a propagação do som é influenciada pelas diferentes características do meio modeladas, como a profundidade da fonte sonora, o perfil de velocidades do som no meio, a altura da coluna de água e o tipo de fundo assumido. Isto permite uma melhor interpretação e validação de afirmações apresentadas na primeira parte do documento.

2 SOM

O quotidiano das pessoas encontra-se repleto de sons, seja na cidade ou no campo, que num país desenvolvido ou em vias de desenvolvimento, são parte integrante do dia a dia e emitidos com diferentes propósitos, mas nem sempre intencionais.

A sua utilidade prática é inegável e, por essa razão, a evolução deu-se no sentido da sua utilização, mas os seres humanos e as suas atividades elevam sempre a fasquia até ao ponto de rotura. O ruído, descrito como um som desagradável ou indesejável, apesar da sua perceção depender das pessoas, é evitado pelas mesmas seja para habitação, a nível de escolas, hospitais e escritórios ou mesmo para atividades ruidosas onde é obrigatória a utilização de proteções sonoras.

O mesmo se passa nos oceanos, onde muitas espécies utilizam o som, em diversas aplicações e, também, intencionais ou não. Mas ao contrário dos humanos, a utilização do som não evoluiu no sentido de quebrar barreiras e puxar limites, pelo menos pela parte da vida marinha. Esses limites estão a ser ultrapassados devido às atividades humanas.

A ideia preconcebida de que os oceanos são lugares silenciosos não poderia estar mais errada sendo necessário mudar essa perspetiva. Além dos sons emitidos pelos diversos animais, é ainda possível captar ruído do vento na superfície do oceano, da chuva, de atividades sísmicas e de muitas outras origens naturais. As atividades humanas, no mar ou em zonas costeiras, estão a elevar esses níveis sonoros ao ponto de interferir com a vida marinha de forma prejudicial.

De modo a conseguir uma melhor compreensão, é necessário fazer uma introdução aos conceitos básicos de acústica e da sua propagação no meio aquático, mais especificamente em ambiente marinho.

2.1 Conceitos Gerais

O som diz-se existir quando há uma perturbação que se propaga em meio acústico (ar ou água, por exemplo) que provoca alterações de pressão ou deslocamento de partículas nesse meio. A perturbação representa-se através de uma onda longitudinal, que se propaga através de compressões e de expansões, como representado na Figura 1. Isto significa que a direção do movimento vibratório das partículas é a mesma onda que se propaga, e consiste num movimento ordenado das mesmas em torno da sua posição de equilíbrio, onde o movimento é zero e a pressão é constante e igual à do meio. Portanto, cada partícula do meio move-se para a frente e para trás com a mesma frequência da fonte, mas não ao mesmo tempo.

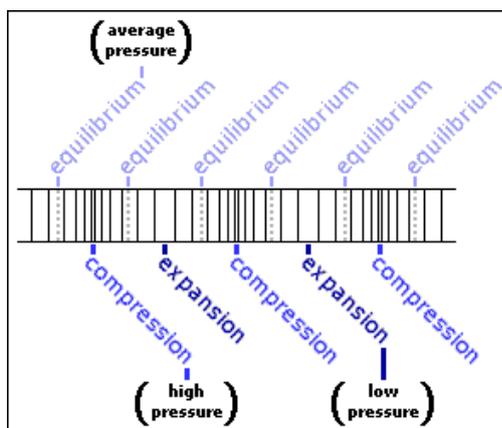


Figura 1 – Propagação do som. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2017)

A amplitude é uma das características da onda sonora e é relativa ao deslocamento da partícula, particularmente ao deslocamento máximo que esta realiza a partir do equilíbrio, deslocamento que representa o máximo de pressão atingido num ciclo, como demonstra a figura 2. Este valor está diretamente relacionado com a quantidade de energia que transporta.

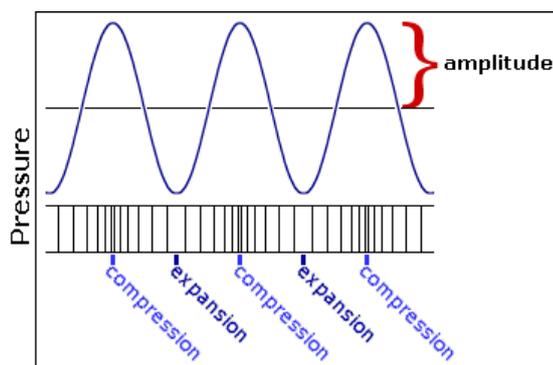


Figura 2 – Amplitude da onda. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2017)

De modo a quantificar a energia por unidade de tempo, é utilizado o conceito de potência que, na acústica, vem associado ao conceito de intensidade. Assim sendo, a intensidade é definida como a potência transmitida por unidade de área. A intensidade encontra-se, ainda, relacionada com a pressão sonora, que corresponde à força por unidade de área, através da seguinte fórmula:

$$I = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (W/m^2) \quad (1)$$

onde p é a pressão, ρ é a densidade do meio e c a velocidade do som.

O nível da intensidade sonora é dado pelo valor da intensidade desse som relativamente ao nível de intensidade de referência (I_0), referente ao limiar de audibilidade, como mostra a equação 2.

Este nível é medido pelas unidades Bel mas, dada a sensibilidade associada ao ouvido humano, estas tornam-se impraticáveis já que são captados valores 1/10 da unidade base. Por essa razão, para os níveis de intensidade usam-se normalmente as unidades decibel (dB).

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (dB)} \quad (2)$$

É importante salientar que unidades dB são unidades relativas e não absolutas. Por essa razão, e de modo a ser possível comparar dados, é necessário definir uma pressão de referência. Para o estudo do som em meio aéreo, a comunidade científica definiu a pressão de referência no valor de 20 μPa . Por outro lado, o valor estipulado para o meio aquático foi de 1 μPa , identificado na literatura como “dB re 1 μPa ”.

Relativamente, ainda, à intensidade, esta relaciona-se com a amplitude no sentido em que se aumentarmos esta última, a sua intensidade também aumenta, o que resulta no aumento do nível sonoro, tornando-o mais elevado. Contrariamente, ao reduzir a amplitude, o som baixa.

Uma outra característica da onda sonora é a frequência (f); esta é uma grandeza física que corresponde ao nível de ciclos completos por segundo, unidade também conhecida por Hertz (Hz). Um ciclo corresponde à variação de pressão entre dois pontos de repouso, passando por uma compressão e uma expansão, como é possível observar pela figura 3. O tempo que leva a efetuar essa oscilação é chamado de período (P).

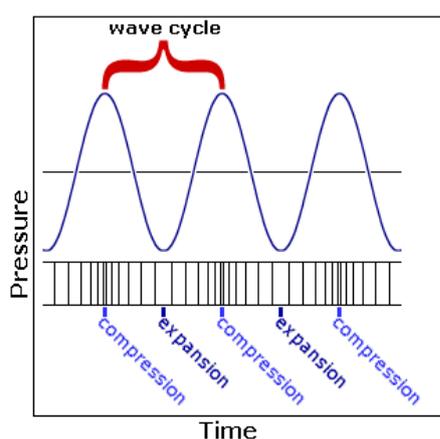


Figura 3 – Representação de um ciclo da onda. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2017)

Uma onda sonora pode ainda caracterizar-se pelo seu comprimento de onda (λ). Esta é a distância entre duas compressões sucessivas ou de um ciclo de vibração. De um ponto de vista matemático, o comprimento de onda é definido como a velocidade do som (c) dividida pela frequência da vibração.

$$\lambda = c/f \quad (3)$$

onde λ representa-se em metros, c em metros por segundo e a frequência em ciclos por segundo (Hertz).

2.2 Propagação do Som em Meio Aquático

Ao atravessar os oceanos, um sinal sonoro subaquático é exposto a condições que provocam o seu atraso e distorção, devido às variações de velocidade do som no meio, e enfraquecimento, devido à perda de transmissão associada à propagação e absorção.

A perda por transmissão, ou *transmission loss* (TL) em inglês, é o parâmetro que quantifica o enfraquecimento de uma onda sonora entre dois pontos (Urlick, 1975). Esta é a medida standard de alterações na força do sinal acústico e é definida como o rácio, em decibéis, entre a intensidade acústica num ponto do campo e a intensidade a um metro da fonte (Jensen, Kuperman, Porter, & Schmidt, 2011). Este parâmetro tem em conta os diversos efeitos que um sinal sonoro sofre tendo em conta a propagação no mar.

$$TL = -10 \log \frac{I}{I_0} = -20 \log \frac{|p|}{|p_0|} \text{ (dB)} \quad (4)$$

Ao imaginar uma fonte sonora com determinadas características, é fácil perceber que quanto mais perto da fonte um recetor estiver, maior será o seu nível sonoro relativamente a outro recetor que esteja mais longe dessa mesma fonte. Uma das razões pela qual isto acontece é devida à dissipação de energia com o aumento da distância à fonte, tendo em conta que a energia total da onda se mantém à medida que a distância aumenta. Isto resulta numa redução dessa energia por unidade de comprimento.

Como já foi referido, a amplitude está diretamente relacionada com a quantidade de energia transportada pela onda sonora e, por esta razão, o aumento da distância à fonte provoca uma redução da amplitude devido à diminuição da quantidade de energia por unidade de comprimento.

A perda por transmissão associada à propagação pode ocorrer de diferentes maneiras tendo em conta a situação do meio. Em águas profundas, com condições para uma propagação uniforme em todas as direções, como demonstrado na figura 4, a TL é esférica e a intensidade diminui com o quadrado da distância (Urlick, 1975),

$$TL = 10 \log(r^2) = 20 \log r \text{ (dB)} \quad (5)$$

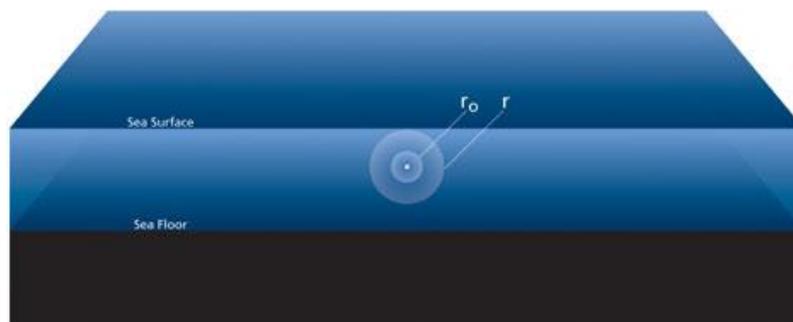


Figura 4 – Propagação esférica. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2017)

Por outro lado, se o meio não for homogêneo e for estratificado, possuindo limites em forma de plano paralelo acima e abaixo, como exemplificado na figura 5, a TL dá-se de um modo cilíndrico (Urlick, 1975),

$$TL = 10 \log r \text{ (dB)} \quad (6)$$

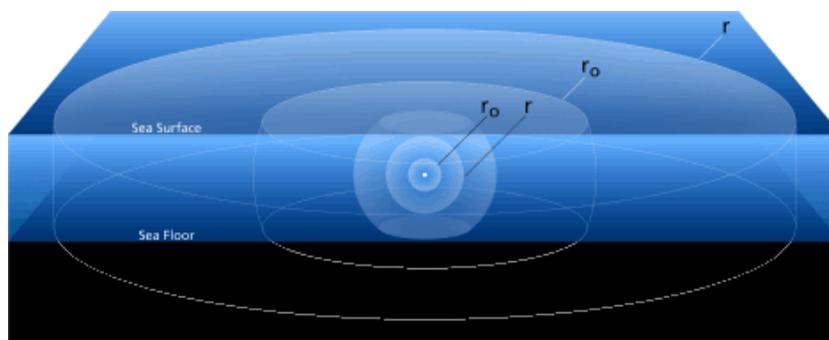


Figura 5 – Propagação cilíndrica. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2017)

Urlick (1975) ainda sugere um terceiro tipo de propagação, sem expansão. Refere que este seria um caso acadêmico que considera uma propagação em tubo, sem perdas e de secção constante, onde ao longo da propagação, a pressão, intensidade e TL são independentes da distância à fonte.

É necessário salientar que as explicações apresentadas para a dissipação de energia não têm em conta as refrações que acontecem devido à dependência da velocidade do som em profundidade mas, apesar disso, é um bom método para obter níveis sonoros estimados sem a necessidade de realizar cálculos complexos (Discovery of Sound in the Sea, 2016).

Para o caso das águas pouco profundas, além do alargamento da frente de onda, a TL acontece devido à refração e reflexão, tanto na superfície do oceano como no fundo. Este conceito é aplicável quando a distância da fonte ao recetor é superior à profundidade da coluna de água e resulta numa menor perda de intensidade relativamente à propagação esférica (Discovery of Sound in the Sea, 2016).

Uma outra contribuição para o enfraquecimento da onda sonora, e que não está relacionada com a propagação da mesma, é a absorção da energia pelas moléculas do meio. Na água do mar, a absorção é superior relativamente à água pura. Segundo Urick (1975), isto deve-se a várias razões. Uma delas, a viscosidade do meio, exige que a energia seja a suficiente para superar a resistência ao movimento oferecida pelo meio de modo a fazer vibrar as moléculas, de forma a transformar a energia acústica em calor. Outra, com maior predominância, é a relaxação iónica das moléculas de sulfato de magnésio ($MgSO_4$) presentes na água. Este é um processo de desassociação-reassociação que acontece abaixo dos 100 kHz. A relaxação iónica boro-borato é uma fonte de atenuação adicional para frequências inferiores a 5 kHz.

A absorção é, ainda, dependente de outros fatores, tanto do meio como das características da onda sonora emitida pela fonte. A frequência é um fator determinante na quantidade de energia que irá ser absorvida, isto porque quanto maior a frequência, maior será o número de ciclos por unidade de tempo e, consecutivamente, maior será a vibração do meio, o que corresponde a uma maior perda de energia da onda (Discovery of Sound in the Sea, 2016).

A pressão do meio exerce, ainda, alguma influência no enfraquecimento do sinal através da redução do coeficiente de absorção (Urick, 1975). Este autor aponta para decréscimos no valor de 2% por cada 1000 pés, ou seja, aproximadamente 305 metros, de um modo teórico experimental. Refere, ainda, que foi registada uma maior dependência da profundidade em medições *in situ*, o que sugere que a atenuação do som a grandes velocidades poderá ser ainda menor que o esperado.

Um sinal sonoro ao navegar nas águas marinhas sofre atrasos e distorções pelas alterações que se geram relativamente à velocidade do som.

Sabe-se que, de um modo geral, o som propaga-se mais rápido na água, atingindo velocidades aproximadas dos 1500 m/s, relativamente à velocidade de propagação no ar, esta admite valores muito mais baixos na ordem dos 340 m/s.

A velocidade que a onda acústica atinge no mar depende de diversos fatores, que vão desde a sua posição no oceano até às propriedades físicas da água. Apesar da velocidade variar com a estação do ano, localização geográfica e tempo numa determinada localização, os fatores que

mais influência têm, no rumo que a onda sonora toma, são as propriedades físicas como a temperatura, pressão e salinidade. De um modo geral, estes são, com exceção das bolhas de ar e dos organismos vivos, as únicas propriedades físicas que afetam o percurso da onda sonora.

De um modo geral, sabe-se que a velocidade de propagação aumenta com a temperatura, com a salinidade e com a pressão (Urlick, 1975). Tanto a salinidade como a pressão aumentam com a profundidade, apesar da primeira ter um impacto pouco significativo. Ao contrario das anteriores e sabendo que a temperatura do mar depende muito da zona em análise, admite-se que esta diminui com a profundidade até atingir um valor aproximadamente constante. (Discovery of Sound in the Sea, 2016; Urlick, 1975). Na figura 6 é possível observar o comportamento descrito, relativo às três variáveis.

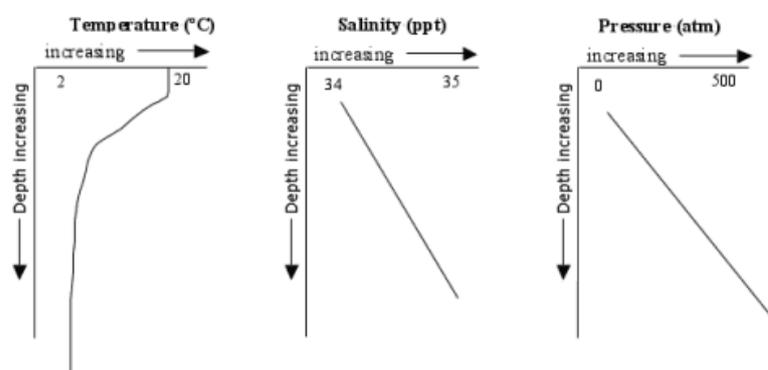


Figura 6 – Variação da temperatura, salinidade e pressão com a profundidade, respetivamente. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2017)

Conjugando as três variáveis resulta no perfil de velocidades em águas profundas identificado na figura 7, isto é, na variação de velocidade do som com a profundidade do oceano.

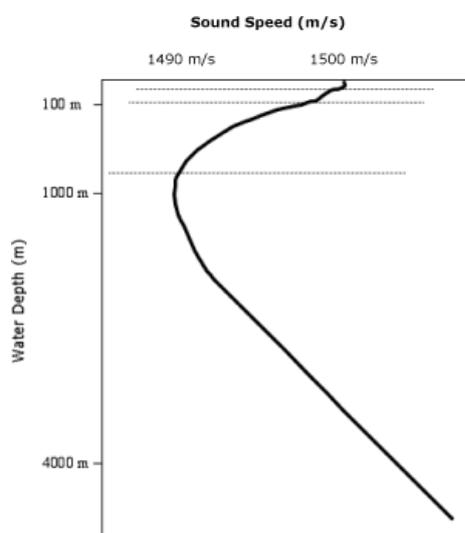


Figura 7 – Perfil de velocidades para latitudes médias. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2017)

A velocidade perto do nível da água do mar é superior, dada a natureza mais quente das águas à superfície. Nesta altura, nem a pressão nem a salinidade têm muito impacto no rumo do perfil, associado à baixa profundidade. Com a temperatura do mar a descer, a velocidade da onda acústica também diminui até ao momento que a temperatura da água estabiliza aproximadamente no valor 2°C. A partir deste momento, a influência da pressão e salinidade começa a sentir-se, resultando num aumento estável da velocidade com a profundidade.

Segundo Urick (1975), este perfil pode ser dividido em várias camadas dadas as diferentes características. Mais à superfície, a camada de superfície, onde a velocidade é suscetível a mudanças diárias e locais, com alterações no aquecimento e ação do vento. Logo abaixo encontra-se a termoclina sazonal, com gradiente negativo de velocidade que varia com as estações. Esta camada, no verão e outono, com as águas de superfície mais quentes, é mais forte e bem definida quando comparado com o inverno, primavera e com o ártico, onde tende a ficar indistinguível da camada de superfície. A camada seguinte, a termoclina permanente ou principal, é influenciada pela estação de um modo ligeiro apenas. Por último existe a camada isotérmica profunda que apresenta uma temperatura mais ou menos constante, e por essa razão a velocidade do som aumenta com a profundidade sob o efeito maioritário da pressão.

É importante salientar que a ocorrência e espessura das camadas varia com a latitude, estação, hora do dia e condições meteorológicas. Na figura 8 é possível observar alguns exemplos destas variações, segundo os locais.

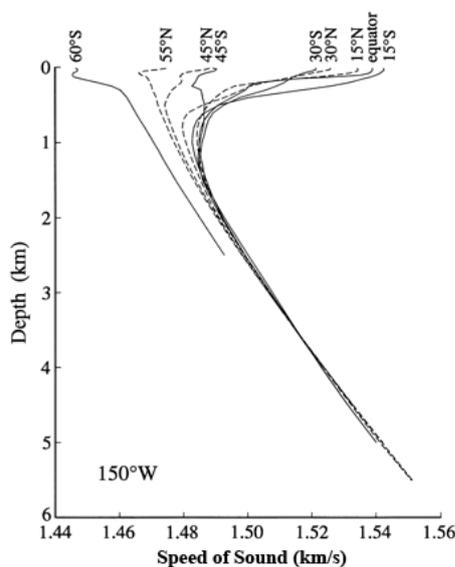


Figura 8 – Variação do perfil de velocidades com a latitude. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2017)

Relativamente ao perfil de velocidades associado às águas pouco profundas, este, contrariamente ao das águas profundas, é irregular e imprevisível, sendo muito influenciado

por diferentes variáveis como o aquecimento da superfície, as alterações na salinidade e pelas correntes (Urlick, 1975).

Em ambientes árticos, que correspondem a latitudes elevadas, existem características peculiares da zona que influenciam muito a propagação do som. As mais relevantes são a camada de gelo permanente que cobre a superfície e o perfil da velocidade na água (Diachok, 1980). Esta última é, geralmente, crescente em função da profundidade (Diachok, 1980; Mellen & Marsh, 1965), como é possível verificar pela figura 9.

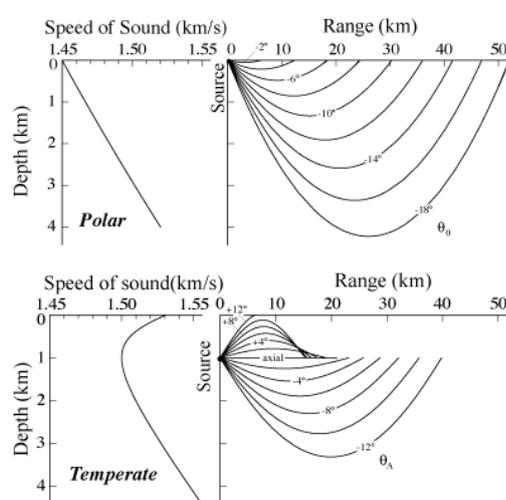


Figura 9 – Comparação do perfil de velocidades do ártico com os climas temperados e respetivo comportamento dos raios sonoros. Fonte: <http://www.dosits.org/> (2017)

2.3 Canais de Propagação

Durante a propagação, o som pode ser conduzido por reflexão e/ou refração para zonas onde a dispersão de energia é menor, permitindo assim um maior alcance. Essas zonas são chamadas canais de som e mantêm a energia acústica confinada dentro de limites.

Os caminhos de propagação podem ser compreendidos através da Lei de Snell, que relaciona os ângulos dos raios, relativamente à horizontal, com a velocidade do som. Isto significa que o som é desviado, localmente, em direção às regiões onde a velocidade do som é menor (Jensen et al., 2011)

Segundo Jensen et al. (2011), existe uma classificação alternativa da propagação dos raios no oceano, que distingue quatro tipos de raios. Os primeiros são os raios que se propagam apenas por via da refração, chamados *refracted refracted* (RR) e identificados na figura 10 pela letra C. Os raios que são refletidos apenas na superfície do oceano são chamados *refracted surface-reflected* (RSR) e são representados pelos caminhos de propagação A, B e D. O caminho de

propagação E refere-se aos raios *refracted bottom-reflected* (RBR) e dizem respeito aos que se refletem no fundo do oceano. Por fim, os raios que são refletidos em ambas as superfícies, identificam-se como *surface-reflected bottom reflected* (SRBR) e representam o caminho de propagação F.

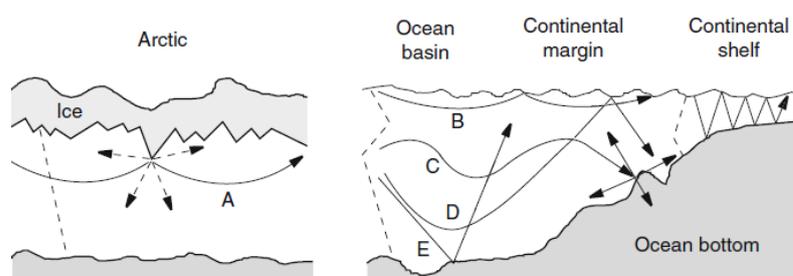


Figura 10 – Representação dos caminhos de propagação nas diferentes situações. Fonte: Jensen et al., 2011, p.16

Existem diversos canais de som, promovidos pelas condições do ambiente que os rodeiam, que foram descritos por Urick (1975), e sendo complementado por outros autores, que são apresentados de seguida.

2.3.1 Canal de Superfície

Em zonas nubladas e ventosas do planeta, o perfil de temperaturas, apresentado na figura 11, exhibe a presença de uma camada isotérmica logo abaixo da superfície. Esta camada é criada e mantida por ventos turbulentos que se misturam com a água do mar junto à superfície e, dentro da camada, a velocidade do som aumenta com a profundidade devido ao efeito da pressão (Jensen et al., 2011; Urick, 1975).

Com origem neste aumento de velocidade, a energia acústica é refratada no sentido ascendente, mantendo essa energia perto da superfície, resultando na “captura” do som na camada. Urick refere, ainda, que a qualidade da transmissão varia muito com a espessura da camada, com as condições dos limites e com a frequência do sinal sonoro.

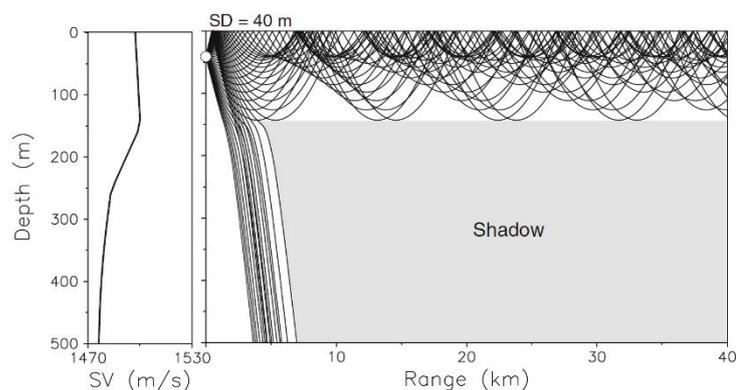


Figura 11 – Exemplo de propagação do som no canal de superfície. Fonte: Jensen et al., 2011, p.26

Para uma fonte a 40 metros de profundidade, o diagrama de raios mostra, na figura 11, que a energia emitida entre $\pm 3^\circ$ na vertical fica retida no canal de superfície, segundo Jensen et al. (2011). Por outro lado, os raios mais íngremes saem do canal e propagam-se via caminhos refratados, resultando na formação de zonas de sombra limitada superiormente pela fronteira inferior do canal de propagação, aproximadamente nos 150 metros de profundidade, e lateralmente pelos raios com ângulos superiores ao ângulo crítico (Jensen et al., 2011).

É necessário salientar que, para as baixas frequências, a imagem é enganadora, dado que o canal não consegue aprisionar a energia acústica quando o comprimento de onda é muito grande (Jensen et al., 2011).

Relativamente à espessura da camada, e para curtas distâncias, Urick (1975) evidencia que esta pode variar devido às ondas internas da camada termoclina abaixo, dadas as mudanças de temperatura num ponto fixo do oceano.

2.3.2 Canal em Profundidade

O canal em profundidade, ou canal *SOund Fixing and Ranging* (SOFAR), é característico das águas profundas e é uma consequência do formato que o perfil de velocidade do som adquire. Esse perfil de velocidades provoca a refração dos raios para o interior do canal, permitindo a sua propagação somente por refração e a grandes distâncias, sem interações significativas no fundo nem na superfície. Este canal é caracterizado por raios RR (Jensen et al., 2011).

Como foi possível ver anteriormente, o perfil de velocidades das águas profundas possui, entre a termoclina e a camada isotérmica profunda, um mínimo que, em latitudes médias, se situa à profundidade aproximada dos 1000 metros, profundidade correspondente ao eixo do canal (Urick, 1975). As ondas sonoras que passam nas profundidades próximas tendem a ser refratadas no sentido do eixo, criando assim uma área de baixa velocidade onde as baixas

frequências viajam por longa distância, dada a baixa perda de transmissão associada ao canal (Discovery of Sound in the Sea, 2016; Urick, 1975).

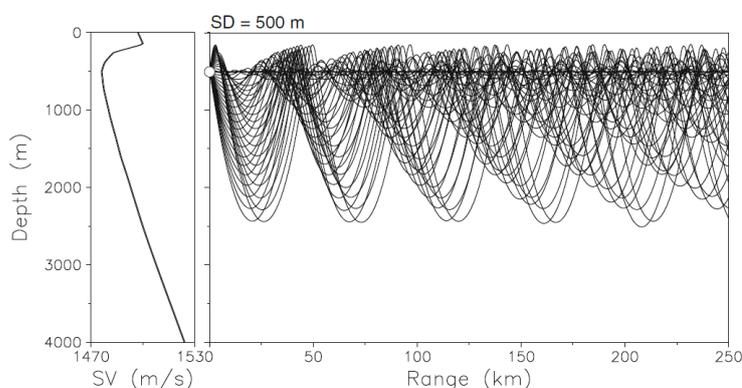


Figura 12 – Exemplo de propagação do som no canal SOFAR. Fonte: Jensen et al., 2011, p.25

No canal SOFAR, entre a fonte e um ponto a grandes distâncias, existem vários caminhos de propagação refratados por onde os raios sonoros podem seguir, como é possível verificar pela figura 12, cada um com o seu tempo de viagem e diferentes intervalos entre cruzamentos com o eixo (Urick, 1975). A porção de energia que fica retida no canal é diretamente proporcional à abertura dos ângulos dos raios que propagam como raios internos refratados e que, para uma fonte no eixo, é diretamente calculado pela Lei de Snell (Jensen et al., 2011),

$$\theta_{max} = \arccos(c_0/c_{max}) \quad (7)$$

onde c_0 é a velocidade do som no eixo e c_{max} é a velocidade máxima encontrada entre o canal e a superfície.

No exemplo da figura 12, a abertura máxima da fonte é de $\pm 10^\circ$. Esta abertura é maior em latitudes médias e decresce em direção aos polos (Jensen et al., 2011).

Apesar disto, apenas algumas ondas sonoras se mantêm no canal sem interagirem com a superfície ou com o solo oceânico. Para conseguir atingir grandes distâncias “à boleia” do canal, as ondas sonoras têm que viajar com ângulos inferiores a 12° na horizontal, a partir da fonte (Discovery of Sound in the Sea, 2016). Apenas ondas com ângulos na gama dos $\pm 12^\circ$ são refratadas novamente para o interior em direção ao eixo. Ondas com ângulos superiores são, na mesma, refratados, mas sem a intensidade necessária para evitar a colisão com a superfície ou o solo. É importante ter em conta que o canal não é igualmente eficaz em todas as latitudes, visto que o eixo varia em profundidade desde os 1000 metros, em latitudes médias, até à superfície, nas regiões polares (Jensen et al., 2011).

Existe ainda, nas águas profundas, uma zona de propagação convergente, que se repete com a distância. Esta zona existe porque o som emitido por uma fonte, junto à superfície, forma um feixe que é direcionado para baixo. Este feixe irá seguir um caminho de refração a grandes profundidades e acabará por surgir, novamente, à superfície, criando uma zona sonora de alta intensidade a uma grande distância da fonte (Jensen et al., 2011).

Segundo os mesmos autores, as zonas de convergência do Atlântico Norte encontram-se espaçadas em, aproximadamente, 65 quilómetros com um ganho de 20 dB, para a propagação esférica.

2.3.3 Canal de Águas Pouco Profundas

Neste contexto, o conceito de águas pouco profundas identifica as águas onde a propagação do som se dá em plataformas continentais com profundidade até aos 200 metros (Jensen et al., 2011), por repetidas reflexões da onda no solo e reflexões na superfície. O canal de som é criado por esses mesmos limites (Urlick, 1975), como exemplificado na figura 13. Segundo Jensen et al., o perfil de velocidades deste canal provoca uma refração descendente, ou quase constante, ao longo da profundidade, fazendo com que os raios importantes sejam os RBR e SRBF.

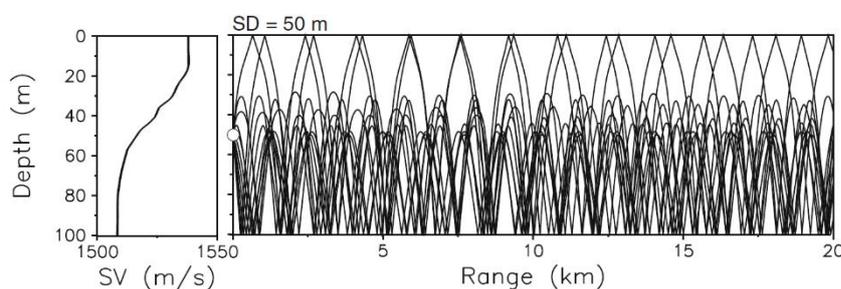


Figura 13 – Exemplo de propagação do som em águas pouco profundas e no verão. Fonte: Jensen et al., 2011, p.29

A perda de transmissão (TL) depende de muitas variáveis naturais do ambiente, tanto por parte da superfície do oceano, como do meio e ainda do fundo (Urlick, 1975).

Visto que a fronteira inferior é o fundo oceânico, como já foi referido, a propagação neste tipo de águas é dominada por perdas por reflexão nas frequências baixas e médias, abaixo dos 1kHz, e por difusão para as frequências altas (Jensen et al., 2011).

Segundo estes autores, existe ainda uma variabilidade sazonal na estrutura do perfil de velocidades, sendo que, no inverno, as condições apresentam quase velocidade constante, o que irá resultar numa menor interação com o fundo e, conseqüentemente, menores perdas e águas mais ruidosas, comparativamente com o verão.

2.3.4 Canal do Ártico

A propagação no ártico efetua-se de maneira diferente do resto dos oceanos. O canal de som, apesar de ser uma extensão do canal SOFAR, possui o seu eixo junto à superfície ou logo abaixo (Diachok, 1980)

O perfil de velocidades associado a estas águas e o facto do eixo do canal de som ser junto à superfície, resultam numa combinação de reflexões à superfície e refrações ascendentes, associadas ao limite inferior, criando efeitos de propagação únicos (Mellen & Marsh, 1965). Este comportamento encontra-se exemplificado na figura 14, para uma fonte a 100 metros de profundidade.

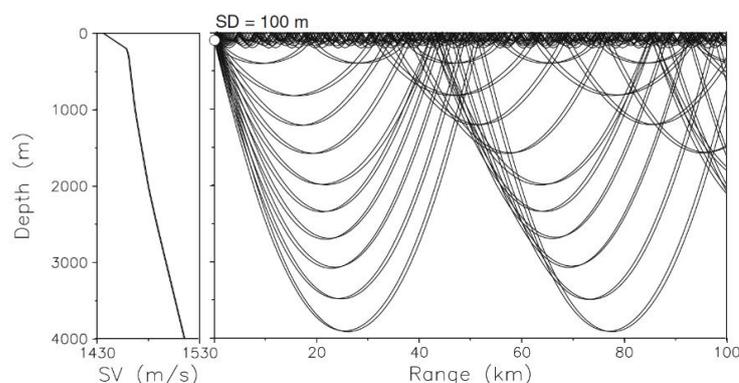


Figura 14 – Exemplo de propagação do som no ártico. Fonte: Jensen et al., 2011, p.27

O gradiente da camada superior é causado pelos aumentos de temperatura e salinidade com a profundidade, o que provoca um canal de superfície forte (Jensen et al., 2011). Segundo o mesmo autor, a baixa salinidade junto à superfície resulta da contribuição da água doce que derrete.

Este canal caracteriza-se pela predominância das ondas de frequências baixas (Diachok, 1980). Tanto as frequências altas como as muito baixas são rapidamente atenuadas devido às perdas associadas à reflexão e ao facto de as ondas não ficarem eficazmente aprisionadas no canal, respetivamente. Por essa razão, existe uma banda estreita de frequências onde a propagação é mais eficaz, que é entre os 15 e os 30 Hz (Jensen et al., 2011; Urlick, 1975).

Relativamente à distância à fonte, segundo Mellen e Marsh (1965), esta influencia a propagação dos sinais acústicos. Para longas distâncias, e tendo em conta o perfil de velocidade, os sinais que se propagam a uma maior profundidade chegam primeiro e, devido às perdas produzidas por repetidas dispersões na superfície, poucas harmónicas são observadas. Por outro lado, para curtas distâncias, visto que as perdas são menores, um maior número de harmónicas e com maior variedade de frequências são detetadas.

3 AMBIENTE SONORO SUBMARINO

Segundo a Comissão Europeia, um dos parâmetros a analisar para uma boa condição ambiental é a introdução de energia nos oceanos, mares e águas costeiras (European Commission, 2016).

Como energia entende-se a introdução no meio de luz, eletricidade, calor, ruído, radiação eletromagnética, ondas rádio ou vibrações. Esta adição de energia é difícil de explicar e quantificar, e o seu impacto é importante visto que altera as condições do sistema físico.

A Comissão Europeia enuncia ainda que as atividades humanas podem alterar, de um modo desproporcional, as quantidades de energia do sistema, podendo provocar efeitos negativos no meio marinho, dando especial interesse ao ruído.

A introdução de energia acústica no meio aquático pode ser feita através de diferentes fontes, tanto naturais com antropogénicas.

3.1 Ruído Ambiente

Urlick (1975) diferenciou, na sua obra, dois tipos de ruído ambiente: o de águas profundas, ilustrado pela figura 15, e o de águas pouco profundas, dadas as suas diferentes características de propagação.

Para as águas profundas, dividiu o espectro de frequências em várias gamas compostas por segmentos de diferentes declives e comportamentos, quando expostas a diferentes condições de excitação. A complexidade é interpretada como resultado da multiplicidade de fontes de ruído ao longo da extensão do espectro.

O segmento até 1Hz é a parte mais desconhecida do espectro, sendo que o ruído associado pode ser de origem hidrostática ou agitação sísmica. No segundo segmento, até aos 20 Hz, o ruído provém, maioritariamente, da turbulência oceânica e poderá ter uma ligeira associação à velocidade do vento. A terceira gama, até aos 500 Hz, é dominada pelo tráfego marítimo e a quarta, até aos 50000 Hz, pelo espectro de Knudsen. Por fim, o quinto segmento, relacionado com o ruído térmico encontra-se associado ao movimento molecular do oceano.

Para Urlick (1975), o cálculo das previsões para os valores de ruído ambiente é feito através da utilização dum espectro de ruído ambiente médio representativo para as diferentes condições.

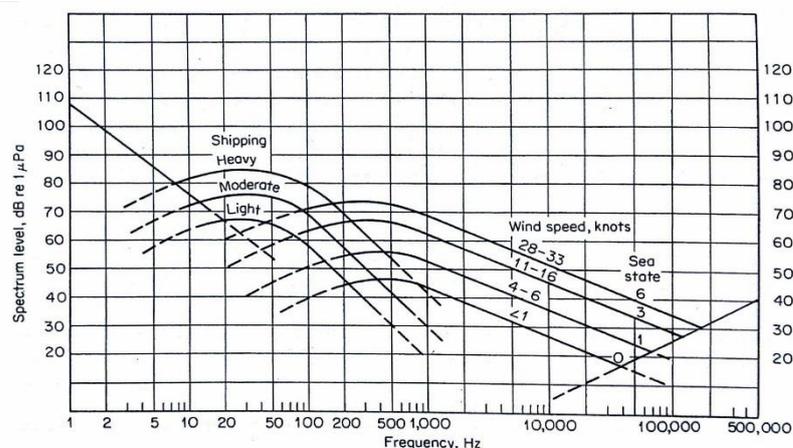


Figura 15 – Espectro do ruído ambiente médio para águas profundas. Fonte: Urick, 1975, p.210

Relativamente às águas pouco profundas, o ruído ambiente está sujeito a grandes variações em tempo e espaço principalmente em áreas como águas costeiras, baías e portos. O ruído é proveniente de um conjunto de fontes como barcos, ruído industrial, vento e fontes biológicas.

Dada a grande variabilidade a que o ambiente está sujeito apenas é possível obter uma estimativa grosseira dos níveis de ruído esperados (Urick, 1975).

Este autor refere ainda que em valores baixos de frequência e de velocidade do vento, estas águas podem ser apreciavelmente mais calmas relativamente aos valores de ruído ambiente de águas profundas, graças à fraca propagação do som. Por outro lado, na presença de ruído antropogénico ou natural, estas águas são consideravelmente ruidosas.

Ainda segundo Urick (1975), se o meio não regista ruído de tráfego e biológico, o vento é o principal contribuidor para o ruído ambiente, sendo os níveis reportados na literatura surpreendentemente concordantes, não só entre eles como também relativamente às águas profundas. Por outro lado, dado o perfil de velocidades com declive negativo, que provoca uma propagação do som no sentido descendente, na placa continental, são criadas excelentes condições de propagação na direção do canal de som das águas profundas.

3.2 Fontes de Ruído Natural

Dentro das fontes de origem natural é, ainda, possível a classificação segundo a origem do ruído. Para este trabalho, consideraram-se as fontes físicas e geofísicas, que incluem outras fontes como a superfície do oceano, atmosféricas, geológicas e os efeitos do gelo, e as fontes biológicas, associadas à vida no meio.

3.2.1 Fontes Físicas e Geofísicas

3.2.1.1 Superfície do Oceano

A velocidade do vento é uma das contribuições naturais com origem na superfície do oceano. A turbulência associada ao vento juntamente com a rugosidade dos oceanos, relativa às ondas de superfície, permitem que as pressões turbulentas da sua interação resultem em variações de pressão que se propagam em sentido descendente para os oceanos (Urlick, 1984).

Esta fonte de ruído natural pode contribuir para o ruído ambiente numa vasta gama de frequências. Estes valores podem variar entre 1 Hz e 100 kHz, estando muito dependentes da velocidade do vento (J. Hildebrand, 2004; Urlick, 1975). O nível de ruído que se observa, gerado pelo vento, depende ainda da duração e da distância por este percorrida (*fetch*), da profundidade da água, da topografia do fundo e, por fim, da distância à costa (WDCS, 2003).

Um outro contributo de origem natural para o nível de ruído nos oceanos é o estado do mar. O espectro do ruído associado a esta fonte pode ser descrito, de um modo empírico, através das curvas de Knudsen.

Estas curvas, descritas por Knudsen em 1948, são linhas de densidade espectral em função da frequência, numa escala logarítmica, e a sua natureza empírica apenas permite obter uma aproximação aos valores do nível de ruído verificado no ambiente marinho. O paralelismo das linhas entre os diferentes estados do mar permite indicar que o nível de ruído aumenta de forma aproximadamente constante em todas as frequências, quando a agitação do estado do mar aumenta.

Apesar de serem conhecidas há bastante tempo, as curvas de Knudsen continuam a ser largamente utilizadas para obtenção de estimativas do ruído ambiente para frequências entre 1 e 100 kHz (NRC, 2003), mas trabalhos mais recentes têm vindo a sugerir que o ruído e a velocidade do vento obtêm melhores e mais precisos resultados (J. Hildebrand, 2004).

A agitação da superfície do oceano contribui, também, para os níveis de ruído nesse ambiente. O movimento da superfície em si pode provocar ruído e, apesar de ser claro que este gera a maior porção de energia acústica, os processos pelos quais isso acontece ainda são incertos. Apesar disso, sugerem-se algumas possibilidades, como através da geração e rebentação das ondas, processo diretamente relacionado com a velocidade do vento, e através da cavitação provocada pela ação das ondas turbulentas (Urlick, 1975).

O nível de ruído emitido pela rebentação das ondas depende ainda do tipo de rebentação observado. O som criado pelas ondas deslizantes está associado a frequências altas enquanto que as ondas mergulhantes emitem ruído em maior nível e em maior largura de banda (NRC,

2003). Estas ondas podem aumentar os níveis de ruído em mais de 20 dB na gama de frequências entre 10 Hz e 10 kHz (J. Hildebrand, 2004).

A interação das ondas, quando duas ondas de superfície com o mesmo comprimento de onda viajam em direções opostas, produz uma onda estacionária. Neste caso, a pressão não diminui com a profundidade, como aconteceria em condições normais, mas mantém-se constante e a frequência passa para o dobro dos valores individuais das ondas de superfície (Urlick, 1984). Estas interações não lineares entre as ondas de superfície contribuem para o ruído ambiente abaixo dos 5 Hz (NRC, 2003).

O efeito hidrostático das ondas ajuda, também, a elevar o nível de ruído nos oceanos. Segundo Urlick (1975), este efeito provoca variações de pressão com amplitude relativamente elevada e muito baixa frequência. A gama dos valores de frequência associada a este efeito está abaixo dos valores de interesse para o som nos oceanos e as amplitudes decaem rapidamente com o aumento da profundidade e redução do comprimento de onda.

A turbulência oceânica, considerada na forma de correntes irregulares e aleatórias, de grande ou pequena escala, é capaz de criar ruído de fundo de diversas formas (Wenz, 1962). Uma, através do ruído próprio provocado pela interação com o hidrofone, que possui um rápido decaimento, e a segunda por variação da pressão dentro da região turbulenta que causa, possivelmente, ruído de baixa frequência (Urlick, 1975; Wenz, 1962).

A chuva que cai na superfície do oceano é, também, uma contribuição para o nível de ruído presente no meio. Segundo Hildebrand (2004), esta fonte de som pode aumentar em 35 dB o nível de ruído, na banda de algumas centenas de hertz até mais de 20 kHz.

Por último, deve referir-se o ruído térmico. Este encontra-se associado à agitação molecular local, junto ao hidrofone, e é o mecanismo que desloca o ruído ambiente para frequências altas, isto é, acima dos 50 kHz (J. Hildebrand, 2004; J. A. Hildebrand, 2009). Segundo o mesmo autor, este ruído é espacialmente isotrópico.

3.2.1.2 Atmosféricas

Em estudos realizados anteriormente, foram feitas gravações de uma tempestade, com relâmpagos e trovões, que se encontrava a uma distância entre 5 e 10 quilómetros. Estas gravações demonstraram um pico de ruído entre os 50 e 250 Hz, que permitiu alcançar um aumento no ruído ambiente na ordem dos 15 dB. Permitiu, ainda, detetar energia na gama dos 10 Hz até 1 kHz (NRC, 2003).

3.2.1.3 Geológicas

Os acontecimentos de origem geológica têm impacto no ruído ambiente, seja em grande escala ou pequena.

Os processos tectónicos são um exemplo de contribuição de grande escala para o nível de ruído nos oceanos. Processos como a subducção, cisalhamento e divergência das placas, vulcões e sismos e, ainda, a atividade hidrotérmica, seja no fundo ou nas margens dos oceanos, são fonte natural de ruído no meio marinho (NRC, 2003).

A contribuição da energia sísmica para o espectro de ruído é feita através da fase terciária, ou fase T, que é relativa à energia presente no solo subaquático, quando esta passa para os oceanos (J. Hildebrand, 2004). Segundo o mesmo autor, a distâncias inferiores a 10 quilómetros, a energia desta fase pode atingir a frequências superiores a 100 Hz, com o pico de energia a chegar a valores de 5 a 20 Hz. Estes valores podem significar um aumento de energia acústica, relativamente ao ruído ambiente, entre 30 a 40 dB.

Uma outra contribuição relativa à atividade sísmica são os microssismos. Estes são fontes fortes e quase contínuas com emissões em baixa frequência (Urlick, 1975).

Ainda relativamente às fontes geológicas, o movimento dos sedimentos com as correntes, no fundo do oceano, pode ser considerado uma fonte significativa de ruído. Esta fonte atua nas frequências que vão desde 1 kHz até valores superiores a 200 kHz.

3.2.1.4 Efeitos da Presença do Gelo

Nas zonas árticas, o gelo é um fator adicional de aumento dos níveis de ruído através de diferentes interações com o ambiente.

A quebra do gelo introduz ruído no meio marinho que tem origem nos stresses térmicos provocados pelo decréscimo da temperatura, mas apenas acontece quando a camada de neve é inexistente ou muito fina (Urlick, 1975). O ruído emitido tem, tipicamente, uma duração de poucos milissegundos e um espectro de frequência largo, com os valores a irem desde 100 Hz até 1 kHz (NRC, 2003; Urlick, 1975)

O vento é capaz de produzir som quando passa na superfície rugosa do gelo, gerando ruído nas frequências acima de 1 kHz (Urlick, 1975). Segundo o mesmo autor, para a gama entre 3.2 e 6.4 kHz, o aumento do ruído com o vento é superior sobre a camada de gelo, relativamente à superfície rugosa da água.

A interação dos limites do gelo com as ondas tem igualmente a capacidade de provocar ruído através do impacto (Urlick, 1975). Os valores atingidos variam conforme o gelo é compacto ou difuso (NRC, 2003).

Por fim, quando a camada de gelo não é contínua, a produção de ruído dá-se através do choque lento dos blocos de gelo. Estes sons são de baixo nível e podem ser, ainda, produzidos em pequenos rebentamentos, associados ao stress por cisalhamento (Urlick, 1975)

3.2.2 Fontes Biológicas

Além das fontes físicas e geofísicas, a vida no meio marinho produz, também, ruído que faz aumentar os níveis de som nos oceanos.

3.2.2.1 Mamíferos

A utilização de sons por parte dos mamíferos marinhos tem diferentes utilidades, seja para comunicação, orientação e navegação, como ainda para alimentação (Convention on Biological Diversity, 2012).

A emissão de sons, designadas por vocalização, não é característica de todos os mamíferos marinhos. Esta é, maioritariamente, atributo dos pinípedes e dos cetáceos e podem cobrir uma vasta extensão de frequências, desde valores inferiores a 10 Hz até valores acima dos 200 kHz (NRC, 2003).

Ainda segundo o relatório, “*Ocean noise and marine mammals*”, a contribuição do ruído provocado por estes animais pode ser significativa em curtos períodos de tempo e espaço, no meio de grandes conjuntos de animais vocalmente ativos. Este relatório, produzido pelo *National Research Council*” em 2003, refere que, durante a época de reprodução, a contribuição dos cetáceos para o ruído marinho, aumenta significativamente. Em gravações realizadas no início de maio, registaram-se os sons mais elevados, nas frequências 100-150 Hz, 250-350 Hz e 600-650 Hz coincidindo com a época de reprodução (NRC, 2003).

Segundos os mesmos autores, estimativas precisas dos níveis de ruído são difíceis de obter dada a incerteza na localização dos animais.

3.2.2.2 Peixes

Apesar das diferenças para as vocalizações dos mamíferos marinhos, muitas espécies de peixes produzem sons associados a comportamentos como nadar e comer, e ainda uma variedade de comportamentos associados à reprodução, comportamento territorial e a comportamento agressivo. (Convention on Biological Diversity, 2012; NRC, 2003).

Os sons produzidos por essas espécies são sinais emitidos em frequências, geralmente, inferiores a 1 kHz (NRC, 2003). Quando emitido em grupo, o aumento do ruído em frequências baixas pode chegar a valores entre 20 e 30 dB (Convention on Biological Diversity, 2012). Apesar disto, informações sobre a contribuição dos peixes para o ruído ambiente nos oceanos são ainda escassas.

3.2.2.3 Invertebrados

Além dos mamíferos e dos peixes, os invertebrados podem produzir sons e contribuir, assim, para o aumento do nível de ruído nos oceanos. Apesar de menos reconhecidos como fontes sonoras, algumas espécies de invertebrados produzem som em grupo, podendo assumir alguma variabilidade diurna (NRC, 2003).

O camarão-estalo é um exemplo de invertebrado que produz sons e, possivelmente, a espécie com maior impacto nesta categoria. A emissão sonora acontece através do processo de criação e emissão de um jato de água, que se acredita ser utilizado para a defesa contra predadores, e o ruído criado está associado ao fenômeno de cavitação (NRC, 2003). Esta espécie é considerada uma fonte dominante de ruído ambiente em águas tropicais e subtropicais, com capacidade para aumentar os níveis sonoros do ruído ambiente em 20 dB, em frequências médias até aos 200 kHz (Convention on Biological Diversity, 2012; NRC, 2003).

Existem ainda outros invertebrados com capacidade para contribuir para o aumento dos níveis sonoros no ambiente marinho, em zonas corais, tais como lulas, caranguejos, lagostas e ouriços (Convention on Biological Diversity, 2012).

3.3 Fontes de Ruído Antropogénicas

3.3.1 Sonar

Os sistemas sonares são fontes intencionais de ruído emitidos por equipamentos que utilizam energia acústica para sondar os oceanos. A utilização do som permite procurar informação sobre objetos na coluna de água, no fundo do mar ou nos sedimentos, através das características do eco da energia refletida ou dispersada nos obstáculos.

Os sistemas sonares para uso militar podem ser divididos em categorias segundo a gama de frequências que utilizam.

Os sonares de baixa frequência (LFA) são sonares de banda larga que são utilizados para vigilância e desenhados para longos alcances (NRC, 2003). Estes sonares são constituídos por diversas fontes sonoras suspensas, por baixo de um navio e com orientação vertical, que

projetam energia na direção horizontal. O sinal enviado é caracterizado por uma frequência constante e modelado com uma largura da banda de 30 Hz (J. A. Hildebrand, 2009).

Estes sonares permitem a detecção de submarinos a partir de várias centenas e até alguns milhares de quilômetros de distância (J. Hildebrand, 2004).

O alcance dos sonares de frequência média reduz-se a algumas dezenas de quilômetros, sendo utilizados para localização e rastreamento de alvos (J. Hildebrand, 2004; NRC, 2003).

Por fim, os sistemas de frequências altas. Estes sonares são armas, como torpedos e minas, ou usados contra armas e desenhados para um alcance de algumas centenas de metros até alguns quilômetros, e o seu uso está limitado a áreas operacionais, que representam apenas uma pequena porção do espaço total marítimo (NRC, 2003).

Os sonares com fins comerciais e civis são sonares desenhados para a detecção, localização e classificação de diversos alvos submarinos. Estes sonares, relativamente aos militares, produzem a energia acústica, ao nível da fonte, com valores inferiores (J. A. Hildebrand, 2009).

Este tipo de sonar opera, tipicamente, em frequências mais altas, quando comparado com os militares, projetam menos potência e têm uma resolução espacial diferente, onde os padrões dos feixes de emissão são mais estreitos e os pulsos mais curtos (NRC, 2003).

Hildebrand (2009) identificou diferentes tipos de sonares com finalidades comercial e civil, cada um com as suas características tendo em conta os seus objetivos. Os sonares utilizados para o mapeamento do fundo enviam pulsos de som direcionados para o solo oceânico. Estes pulsos, e de acordo com a distância ao fundo, podem ser de frequência média para as águas profundas, com valores a rondar os 12 kHz, e de frequências altas com valores entre os 70 e 100 kHz, para as águas pouco profundas. Um outro tipo de dispositivo, os sonares de hidroacústica, são utilizados na detecção de organismos vivos e partículas no oceano através da transmissão de som nas frequências médias e altas, com valores na gama dos 20 aos 100 kHz. Por fim, podem referir-se os sonares de exploração, usados na defesa dos portos e na procura e recuperação marinhas.

3.3.2 Explosivos

A utilização de explosivos no meio marinho pode ter diferentes objetivos e dimensões. Este tipo de fontes atua numa banda larga de frequências atingindo um nível sonoro na fonte muito elevado (NRC, 2003).

Relativamente aos explosivos de âmbito nuclear, até ao Tratado de não proliferação de armas nucleares (TNP), que entrou em vigor em 1970, eram testados frequentemente diversos dispositivos nucleares. Os testes eram realizados em diferentes locais, inclusive nos oceanos.

Estes testes consistiam em fontes de ruído extremamente fortes e é possível que tenham tido um impacto significativo no meio oceânico e na vida marinha. Dadas as características físicas dos oceanos, permitindo a propagação do som em longas distâncias, a rede de monitorização ao abrigo daquele tratado possui apenas 11 estações, localizadas maioritariamente no hemisfério sul.

As explosões químicas são utilizadas mais frequentemente e com diversos objetivos. No passado foram utilizadas na exploração sísmica, mas foram, entretanto, substituídas por tecnologia mais recente. O recurso a este tipo de explosões faz-se por parte da indústria do petróleo, primeiramente, para a construção e remoção de estruturas (J. Hildebrand, 2004). Além disso, e segundo o mesmo autor, podem ser utilizadas para exploração oceânica, construção, testes militares e por pescadores para deter os leões marinhos, focas e outras espécies que condicionam a captura de peixe. São, ainda, utilizadas em testes de choque para medição do stress do casco, nas novas classes de navios militares, ou para afundar os mais antigos.

As explosões de origem química possuem características que variam de acordo com o peso da carga utilizada e, também, com a profundidade de detonação (J. Hildebrand, 2004). Estas criam um impulso de pressão, que se propaga de igual forma em todas as direções e abrange um largo espectro de frequências, que inclui ainda valores baixos de frequência. (J. A. Hildebrand, 2009).

3.3.3 Dispositivos Acústicos de Dissuasão e Assédio

Estes dispositivos acústicos são utilizados com o objetivo de modificar o comportamento de determinados mamíferos, através da emissão de sons na gama das frequências médias e alta, resultando assim no seu afastamento dos equipamentos de pesca e/ou instalações de aquacultura (J. A. Hildebrand, 2009). Este tipo de dispositivos enfrenta um problema mais geral ao tentar dissuadir os animais de obter uma refeição nutritiva de um modo relativamente fácil (Würsig & Gailey, 2002).

Os dispositivos acústicos de dissuasão (ADD em inglês) permitem a redução da captura acidental de mamíferos ao desencorajar, através do som de baixo nível na fonte, a sua aproximação dos equipamentos (Convention on Biological Diversity, 2012; MMC, 2007). Esses sons atingem, tipicamente, os 150 dB re 1 μ Pa @ 1m (J. A. Hildebrand, 2009).

Com diferentes características, os dispositivos acústicos de assédio (AHD em inglês) emitem sons de nível elevado na fonte que podem atingir os 250 dB re 1 μ Pa @ 1m. A energia acústica

com as características descritas provoca uma resposta aversiva ao local, evitando assim a presença destes animais na área (J. A. Hildebrand, 2009). Os sons emitidos pelos AHD caracterizam-se como estridentes, com as frequências entre os valores 12 e 17 kHz (Würsig & Gailey, 2002)

De modo a evitar a habituação, que resultaria num desvio permanente relativamente ao comportamento dos animais ao evitar a zona, estes dispositivos têm a capacidade de transmitir uma variedade de ondas com intervalos aleatórios entre transmissões (J. Hildebrand, 2004). Segundo o mesmo autor, estes dispositivos têm níveis na fonte elevados, sendo capazes de provocar lesões auditivas nos mamíferos que estão nas imediações.

Existe, ainda, um outro dispositivo de dissuasão, desta vez associado aos peixes. Estes são usados, maioritariamente, em zonas de habitats costeiros ou junto às margens dos rios, com intuito de desviar temporariamente a passagem dos peixes nas áreas com potencial risco (Convention on Biological Diversity, 2012). Dadas as diferentes características entre as espécies alvo, há uma grande variabilidade entre os dispositivos, em termos da gama de frequências em que atuam.

3.3.4 Atividades Industriais

3.3.4.1 Cravação de Estacas

As estacas são utilizadas para trabalhos em portos, construção de pontes, instalação de plataformas de petróleo ou gás e na construção da fundação de parques eólicos. O ruído produzido pela cravação de estacas entra diretamente na coluna de água e propaga-se, também, através do fundo marinho. Os níveis sonoros que a fonte atinge dependem do diâmetro da estaca e do método de instalação (Convention on Biological Diversity, 2012).

Segundo Hildebrand (2009), a propagação depende ainda do tipo de fundo marinho. Este autor caracteriza a fonte como produção de ruído de baixas frequências com níveis elevados de ruído na fonte.

3.3.4.2 Perfuração

A atividade de perfuração, caracterizada pelo ruído quase contínuo, pode ser realizada de diferentes formas.

A perfuração feita em ilhas, naturais ou artificiais, produz um ruído que tem sido descrito como moderado, sendo comparado ao ruído associado às plataformas fixas, apesar de ligeiramente inferior (Convention on Biological Diversity, 2012). A atividade sonora destes dois tipos de fontes abrange, predominantemente, as frequências médias e baixas (J. A. Hildebrand, 2009).

A perfuração feita através de navios é o maior produtor de ruído nesta categoria e, visto que necessita do funcionamento dos propulsores de modo a manter a posição do navio, o ruído associado a esta atividade é o resultante da mistura do ruído da perfuração com o ruído das hélices da embarcação (Convention on Biological Diversity, 2012). Segundo Hildebrand (2009), os sinais sonoros são registados na gama de frequências médias e baixas.

A rápida evolução tecnológica na área da perfuração e dos equipamentos associados vai, possivelmente, alterar os padrões de ruído desta atividade (NRC, 2003).

3.3.4.3 Indústria do Petróleo

Durante a extração e produção do petróleo, o ruído tem origem em atividades como a escavação do poço, aplicação do revestimento e cimentação, o bombeamento, a colocação de tubos, o apoio através de barcos e/ou helicópteros e os trabalhos que decorrem na própria plataforma.

Apesar dos trabalhos desta indústria serem feitos, maioritariamente, em águas pouco profundas, esta situação tem, nos últimos anos, sofrido alterações. O início da exploração de petróleo e gás em águas profundas (profundidade superior a 500 metros) veio contribuir para um aumento dos níveis de ruído ambiente, dadas as características de propagação dos oceanos e do canal de propagação de águas profundas (J. A. Hildebrand, 2009).

Ainda segundo Hildebrand (2009), as áreas que têm apresentado mais atividade são Alasca e Estados Unidos da América, Canadá, México, Venezuela, Brasil, Argentina, África Sul e Oeste, mar do Norte, médio oriente, Austrália, Nova Zelândia, sul da China, Indonésia e mar de Okhotsk.

3.3.4.4 Dragagem

A atividade de dragagem, no meio marinho, é usada para manter as rotas dos navios e dos oleodutos e para proceder à extração de recursos geológicos, emitindo um ruído contínuo, de banda larga, com um espectro de frequências, maioritariamente, baixas (Convention on Biological Diversity, 2012).

3.3.4.5 Parques Eólicos Offshore

Os parques eólicos offshore criam som de baixa frequência com níveis de ruído na fonte elevados durante a sua construção, mas com níveis moderados na exploração do parque (Convention on Biological Diversity, 2012). Segundo o mesmo documento, o ruído relativo à operação depende do tipo de construção, das dimensões dos dispositivos e do parque, das condições ambientais como profundidade, topografia, estrutura do sedimento e hidrografia e da velocidade do vento. Deve referir-se, ainda, que os trabalhos de manutenção e reparação do parque irão contribuir para os níveis de ruído ambiente, incluindo a movimentação de navios.

3.3.4.6 Energia das Ondas

O aproveitamento energético da energia das ondas é uma tecnologia relativamente recente e, por essa razão, a informação do registo acústico é, ainda, limitada. Segundo a informação disponível, as turbinas parecem emitir um ruído de banda larga que cobre as frequências de 10 Hz até 50 kHz (Convention on Biological Diversity, 2012).

3.3.4.7 Levantamento Sísmico

O levantamento sísmico utiliza as características do oceano e da propagação do som para medir os padrões de reflexão. Esta tecnologia envolve enviar um pulso de som de grande energia direcionado para o fundo do mar e medir a reflexão das ondas (Convention on Biological Diversity, 2012). Segundo os mesmos autores, as fontes sonoras do levantamento sísmico podem ser emitidas por diferentes tipos de equipamento e o seu alcance irá depender, entre outras coisas, da profundidade de penetração requerida.

A indústria que mais utiliza o levantamento sísmico é a indústria do petróleo e gás, com o objetivo de localizar reservas de combustível fóssil. Além disso, é também utilizado por cientistas para estudar a geologia do fundo marinho e da crosta da terra, e o seu papel nas placas tectónicas (Convention on Biological Diversity, 2012; MMC, 2007). Nos documentos consultados, é ainda indicada a utilização desta tecnologia com fins governamentais.

De todas as fontes enumeradas, as mais utilizadas são as pistolas de ar. Estas enviam um volume de ar em alta pressão que promove a criação de uma onda de som através da expansão e contração das bolhas de ar libertadas (Convention on Biological Diversity, 2012). Segundo Hildebrand (2009), quando são necessárias grandes níveis de intensidade acústica nos ensaios, são utilizadas diversas pistolas com tempos precisos de disparos sincronizados, de modo a produzir um pulso combinado coerente.

Estes levantamentos sísmicos em meio marinho podem ser realizados tanto em duas dimensões (2D) como em três dimensões (3D), de acordo com os dados desejados. A escolha do tipo de levantamento a efetuar terá influência, não só nos dados obtidos, como também na extensão e na duração da exposição aos níveis elevados de som que esta tecnologia emite (WDCS, 2003). Por esta razão, é essencial adequar o tipo de levantamento ao tipo de resultados pretendidos de modo a minimizar os potenciais efeitos adversos no meio.

A tecnologia a 2D utiliza apenas um conjunto de pistolas de ar, ou uma grelha, e uma fila de hidrofones. Uma grelha pode variar de acordo com o número de pistolas a utilizar, podendo ir desde 18 até 48 pistolas de ar. Segundo a Sociedade de Conservação de Baleias e Golfinhos (WDCS), este tipo de levantamento é usado para amostragem e é capaz de cobrir uma grande área geográfica.

Por sua vez, e segundo o relatório da WDCS, o levantamento a três dimensões é caracterizado pelo registo de dados em grelha e é, geralmente, utilizado para definir o potencial ou a existência de depósitos de hidrocarbonetos, reduzindo assim a utilização de poços de exploração. Este tipo de levantamento exige um posicionamento preciso e a utilização de várias linhas paralelas de microfones que funcionam em conjunto com múltiplas grelhas de pistolas de ar.

Deve ter-se em conta que a natureza do sinal é de baixa frequência, possibilitando assim a sua propagação a longas distâncias e que, apesar do som ser emitido verticalmente em direção ao fundo oceânico, alguma energia é emitida horizontalmente (Hatch & Wright, 2007).

Apesar disso, de entre as novas tecnologias que têm vindo a ser desenvolvidas, as fontes vibratórias aparentam ter as características adequadas para uma substituição das pistolas de ar, pelo menos em águas profundas (Cluster Maritime Français, 2014).

3.3.4.8 Tráfego Marítimo

Especialmente em frequências baixas, o tráfego marítimo é o principal contribuidor para o ruído dos oceanos. O ruído das embarcações tem origem na cavitação provocada pelas hélices dos motores, na maquinaria de propulsão, nos equipamentos, no fluxo hidrodinâmico no casco do navio e noutros dispositivos auxiliares como geradores e motores a diesel (NRC, 2003). Neste documento, os autores afirmam ainda que, com o aumento na velocidade do navio, os mecanismos de geração de ruído, como a cavitação e o fluxo hidrodinâmico no casco, tornam-se predominantes relativamente aos equipamentos mecânicos.

Os navios de grandes dimensões produzem sons com elevada intensidade e predominantemente de baixa frequência, com valores situados entre os 10 e 50 Hz. Este ruído caracteriza-se de igual forma para águas profundas ou pouco profundas, dominando assim o ruído ambiente nos oceanos a nível mundial (Convention on Biological Diversity, 2012). Segundo o mesmo documento, os navios individuais produzem um registo acústico único, dependendo ainda da velocidade do navio, da carga que transporta, do modo operacional e de qualquer outra implementação de medidas relativamente à redução do ruído.

Por outro lado, Hildebrand (2009) salienta a incerteza de como se relacionam o tamanho e a tonelagem do navio com ruído ambiente radiado. O autor distingue, ainda, a densidade de tráfego entre os hemisférios, afirmando a existência de uma assimetria entre os mesmos. Essa assimetria poderá justificar o valor de 20 dB superior no hemisfério norte, relativamente ao hemisfério sul, em termos de ruído ambiente.

Muitos dos navios considerados de dimensões médias têm tamanhos relativamente grandes e sistemas de propulsores complexos, tais como rebocadores, navios especializados para transporte de funcionários de plataformas offshore, navios de abastecimento, navios de

investigação e alguns de pesca, o que os torna similares aos de grandes dimensões quanto ao nível de ruído, apesar do nível de ruído na fonte ser, geralmente, mais baixo (Convention on Biological Diversity, 2012).

No mesmo documento é, ainda, possível verificar que este tipo de navios passam a maior parte do seu tempo operacional em zonas costeiras ou de plataforma continental, o que faz com que estes ruídos se sobreponham, em tempo e espaço, com diversas espécies de mamíferos que utilizam as mesmas águas para atividades como alimentação e reprodução.

Por último, referem-se os barcos de pequenas dimensões, com motor integrado ou não, e que produzem ruído que se enquadra nas gamas de frequências médias, entre 1 e 5 kHz, com níveis moderados, entre 150 e 180 dB, apesar de depender da velocidade da embarcação (Convention on Biological Diversity, 2012; J. A. Hildebrand, 2009). Apesar destes valores, este tipo de navios não traz grandes preocupações no contexto geral do aumento de ruído, dado que não é de frequência baixa, embora seja fonte dominante nas zonas e ambientes costeiros.

3.3.4.9 Quebra-gelo

Segundo o documento da Convenção de Diversidade Biológica (2012), no processo de quebra-gelo foram identificados dois tipos de ruído, o da cavitação, com frequências até 20 kHz, e o ruído associado aos sistemas de borbulhador. Este último consiste num sistema que sopra ar a alta pressão para a água em redor do navio de modo a afastar o gelo que está a flutuar. O ruído associado é contínuo enquanto o sistema está em funcionamento, com um espectro de frequências até pelo menos 5 kHz.

3.3.4.10 Telemetria Acústica

Esta tecnologia é utilizada para comunicação, comando e controlo de veículos remotamente, para comunicação com mergulhadores, monitorização e registo de dados, monitorização de redes de arrasto e outras aplicações de investigação e industriais que requerem comunicação sem fios e na água (Convention on Biological Diversity, 2012)

3.4 O Som e os Animais

Como já foi visto, alguns animais utilizam as propriedades físicas dos oceanos, relativamente à propagação do som, para realizar diversas atividades. No caso dos mamíferos marinhos, como referido, utilizam a energia sonora para comunicar, como forma de reconhecimento, para evitar predadores e detetar presas, orientação, e outros comportamentos.

Os cetáceos, mamíferos marinhos que incluem as duas subordens *Mysticeti* e *Odontoceti*, de um modo geral, utilizam o som para atividades como ecolocalização, navegação, comunicação e caça.

Relativamente à primeira, a ecolocalização, esta é a habilidade que os animais possuem de produzir sons em frequências médias ou altas, sendo as últimas as mais usuais, para deteção de ecos vindos de objetos distantes, de modo a determinar as propriedades físicas do ambiente que os rodeia. Esta emissão sonora permite, ainda, fornecer informação precisa e detalhada, com um alcance de alguns centímetros até centenas de metros de distância e, até ao momento, pensa-se ser apenas utilizada pela subordem *Odontoceti* (WDCS, 2003).

A emissão de som com intuito de auxiliar na navegação é atribuída à subordem *Mysticeti*. Estes chamamentos são de baixa frequência e de alto nível na fonte, e são utilizados de uma maneira similar à ecolocalização. Segundo o documento da Sociedade de Conservação de Baleias e Golfinhos (WDCS), este tipo de navegação parece ser essencial nas longas migrações e na localização de limites do gelo, no caso das espécies polares, onde se concentram as presas para a sua alimentação.

Quanto à comunicação, esta é referente à emissão de sinais que são recebidos por um outro organismo, estimulando uma resposta. Segundo os mesmos autores, os cetáceos comunicam com elementos da mesma e de outras espécies, muitas das vezes através da emissão de sinais sonoros. Esta comunicação poderá ter diferentes objetivos como seleção intrasexual, seleção intersexual, coesão mãe/cria, coesão de grupo, reconhecimento individual e evitar perigos.

Por fim, na atividade de caça, a emissão de energia acústica tem o objetivo de atordoar e debilitar as presas através de ondas sonoras intensas (WDCS, 2003).

Os peixes utilizam, também, o som para determinadas atividades do seu quotidiano. Entre estas destacam-se a utilização de energia acústica para a navegação e seleção de habitats, acasalamento, para evitar predadores e detetar presas e, ainda, para comunicação (Convention on Biological Diversity, 2012). Para estes autores, a interferência do som antropogénico pode causar distúrbios nestas funções vitais.

Este relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) identifica que, apesar do estudo do som nos invertebrados ser ainda limitado, muitas espécies possuem sensores mecânicos que têm algumas semelhanças com os ouvidos dos vertebrados e que, muitos dos invertebrados marinhos, são sensíveis a sons e estímulos.

3.4.1 Problemática do Ruído na Vida Marinha

A introdução de som por parte de fontes sonoras de origem antropogénica vem aumentar os níveis de ruído ambiente presentes nos oceanos. Esse ruído extraordinário altera a distribuição da energia acústica no meio, desestabilizando a vida marinha.

Relativamente aos mamíferos marinhos, nas espécies em que a sensibilidade auditiva já foi testada, esta aparenta corresponder aos presumíveis níveis do ruído ambiente dos oceanos primordiais, para qualquer frequência (MMC, 2007). Em experiências já realizadas, em que humanos foram submergidos e expostos a fontes de som subaquáticas, com intensidades de 150 a 180 dB re 1 μ e com frequências entre 0.7 e 5.6 kHz, foram detetados danos temporários ao nível de desvios no limiar de audição. Esta experiência pode servir como exemplo grosseiro, para determinar as intensidades que poderão causar o mesmo tipo de problema em cetáceos, apesar da sensibilidade auditiva destes animais ser superior (WDCS, 2003).

Segundo a *Marine Mammal Commission*, os mecanismos adaptativos destas espécies permitem, até certo ponto, um normal funcionamento das mesmas, apesar da presença de ruído de origem antropogénica além do ruído natural.

3.4.1.1 Efeitos de Curta Duração

Para determinar se o efeito do ruído é significativo, ter em consideração as respostas comportamentais poderá fornecer informações úteis mas, para isso, será necessário que o conhecimento do comportamento normal do cetáceo em análise seja preciso, que as alterações introduzidas sejam mensuráveis, que seja possível relacionar essas alterações com o ruído e, ainda, que os investigadores consigam detetar essas alterações de comportamento, o que é difícil dado que grande parte do seu tempo é passado abaixo da superfície (WDCS, 2003)

Relativamente às respostas comportamentais, o ruído no limite de deteção ou acima poderá desencadear uma resposta desta categoria e depende das características do som, como a frequência, duração e padrão temporal, e do animal em si (MMC, 2007). Segundo os mesmos autores, nestes comportamentos estão incluídas alterações na utilização do habitat, nos padrões de mergulho, na direção do movimento e na vocalização, através da intensidade, frequência, repetição e duração. Algumas das respostas poderão ter efeitos nas funções vitais. As alterações comportamentais e de comportamento vocal foram detetados, não só nos cetáceos, como também em algumas espécies de peixes e invertebrados (WDCS, 2003)

Quando os animais saem da superfície do oceano, transportam nos seus órgãos e sangue oxigénio suficiente para esse mergulho, contudo a existência de uma fonte ruidosa inesperada e forte o suficiente para alterar o padrão do animal, poderá tornar essas reservas insuficientes (WDCS, 2003). Foi identificado, também, na mesma obra, que certos níveis de ruído levam aos cetáceos evitar certos habitats. Este comportamento poderá ter efeitos profundos a nível ecológico, através da deterioração das suas populações.

Quando um som se torna mais complicado de ouvir ou detetar devido ao aumento dos níveis de ruído, poderá ocorrer o seu encobrimento e o animal é afetado. O transtorno verifica-se ao nível

da reprodução, caso a fêmea seja incapaz de ouvir as vocalizações de um potencial macho, ao nível da conexão e reconhecimento entre mãe e cria, ao nível da deteção de presas e alimentação de modo cooperativo, dada a falha na comunicação, e por fim, na sua própria sobrevivência, se for o caso de não conseguir detetar possíveis predadores e outros perigos (MMC, 2007).

Para os mesmos autores, os níveis de ruído associados às fontes sonoras de origem natural, por si só, já conseguem atingir valores que permitem o encobrimento de sinais importantes e, por essa razão, os mamíferos evoluíram no sentido de ultrapassar essas dificuldades, através da alteração de padrões temporais, do aumento dos níveis e da alteração das frequências das vocalizações. Estas alterações poderão ser usadas como método de ultrapassar as dificuldades impostas pelas fontes sonoras antropogénicas, mas, apesar disso, o ruído associado ao tráfego marítimo continua a ser preocupante, dado que ocorre em toda a banda de frequências utilizada pelas baleias para comunicação.

Tem sido assumido que os mamíferos marinhos respondem aos ruídos significativos através do seu afastamento da fonte, mas esta reação implica que o animal tenha conseguido tanto localizar a fonte como reconhecê-la como uma ameaça, o que nem sempre acontece devido ao à sua ocultação. Segundo o relatório WDCS (2003), os ruídos desconhecidos podem provocar respostas de curiosidade, por parte dos animais, levando-os a aproximarem-se da fonte, tornando-se suscetíveis a danos mais severos e permanentes.

Para estes autores, a disrupção social é também um efeito de curta duração provocado pelos sons antropogénicos. Este tipo de comportamento torna-se especialmente importante quando a mãe e uma cria são separados, bem como em situações de descanso em que os animais são mais vulneráveis. Assim, a contínua perturbação no padrão de deslocamento destes animais poderá ter consequências graves ao nível populacional.

3.4.1.2 Efeitos de Longa Duração

As consequências e efeitos de longo prazo, na vida marinha, apenas serão mais visíveis quando forem conduzidas investigações neste sentido, investigações que necessitam dum conhecimento mais generalizado e detalhado do comportamento das espécies em análise.

A exposição a determinados sons poderá desencadear reações fisiológicas. Estas reações poderão ser, tanto ao nível do sistema auditivo, como efeitos fisiológicos não auditivos, tais como stress e lesões nos tecidos. O stress é uma condição geralmente associada à libertação de cortisol, que aumenta com o ruído. Um aumento dessa hormona está, normalmente, associado a alterações no comportamento, nos padrões de respiração e, ainda, no comportamento social (WDCS, 2003)

Relativamente aos efeitos auditivos, estes poderão ser alterações temporárias nos limites de deteção ou mesmo perda auditiva temporária (MMC, 2007; WDCS, 2003). Apesar do contexto temporário, estes animais utilizam o som para as mais diversas atividades, muitas delas vitais e, por isso, uma perda auditiva torna-os mais vulneráveis.

Por outro lado, os sons muito intensos, mesmo que emitidos por curtos períodos de tempo, os sons moderados, numa janela temporal mais alargada ou, ainda, sons intermitentes, mas repetitivos, com capacidade para provocar lesões temporárias, poderão causar danos físicos auditivos permanentes, através da perda de células sensoriais e fibras nervosas (MMC, 2007).

A sensibilização, quando o animal é exposto a um sinal sonoro doloroso e passa a evitar a fonte, ou a habituação, quando o sinal já não é novo são, também, dois comportamentos associados aos efeitos de longo prazo (WDCS, 2003). Para estes autores, a surdez gradual pode ser facilmente confundida com um aumento da tolerância ou habituação ao ruído.

No documento *Oceans of Noise*, da WDCS, é ainda enunciado e sugerido um outro efeito que começa a ser investigado. A doença descompressiva, mais conhecida por afetar os mergulhadores, pode ser desencadeada, nos animais, por via acústica, através de duas maneiras, seja por alterações comportamentais ou por ativação física direta de microbolhas, anteriormente estáveis.

Relativamente aos efeitos por alterações de comportamento do animal, este tipo de comportamento diz respeito, como já foi falado, a alterações não desejáveis ou incomuns no padrão de mergulho dada a presença de um campo acústico. Um sinal acústico de nível elevado poderá provocar a doença descompressiva através de alterações de comportamento se o animal mergulhar ou vier à superfície com rapidez, se induzir ao animal muito esforço físico ao desviar da fonte ou se, também de modo a evitar a fonte, é encorajado a passar mais tempo à superfície, em alternativa às águas superficiais, falhando o exercício de diminuição de risco que iria normalmente realizar (WDCS, 2003).

Segundo os mesmos autores, e como já foi referido, a doença pode ser desencadeada também como resultado direto da exposição a um campo acústico potente, onde a condição de descompressão é provocada por sons que ativam diretamente microbolhas previamente estáveis, permitindo que aumentem de tamanho, por difusão estática dos tecidos supersaturados. Os mecanismos precisos pelos quais isto acontece são, ainda, pouco conhecidos e poderão ser foco de debate nos próximos tempos (WDCS, 2003).

3.4.1.3 Efeitos Indiretos

O ruído pode provocar, também, efeitos indiretos nos mamíferos marinhos, como resultado das alterações na distribuição das presas ou de outros aspetos do ecossistema (WDCS, 2003). Os

efeitos ecológicos surgem quando espécies relacionadas ecologicamente são afetadas pelo ruído de origem antropogénica, resultando numa alteração na natureza da sua relação ou na estrutura do ecossistema afetado (MMC, 2007). Já os efeitos populacionais provocados pelo som, segundo a mesma obra, são incertos visto o som não ter sido considerado um fator no declínio de algumas espécies, nas décadas passadas. Referem ainda que as dificuldades de monitorização de algumas espécies, como os cetáceos, permitem que metade da sua população possa desaparecer sem que seja detetada qualquer alteração.

3.4.1.4 Efeitos Cumulativos

Os efeitos cumulativos são consequências que individualmente não têm muito impacto na vida marinha, mas cuja sobreposição com outras fontes ou repetição poderá ter um impacto significativo na vida marinha. A deteção deste tipo de efeitos, a sua atribuição a um determinado fator de risco e a mitigação necessitam de mais e melhor investigação quantitativa e estratégias de gestão, visto que as limitações atuais ainda não permitem um bom enquadramento de estratégias para as ameaças aos animais, especialmente aos mamíferos marinhos (MMC, 2007). Supõe-se que os efeitos cumulativos possam afetar a viabilidade individual dos animais, a redução das taxas de natalidade e um aumento nas taxas de mortalidade (WDCS, 2003).

3.5 Monitorização

Tal como o microfone regista o som presente no meio aéreo, são necessárias tecnologias de modo a fazer a monitorização e registo do som no meio aquático.

Os hidrofones são os sensores básicos da acústica subaquática, tendo sido desenvolvidos para a deteção de sinais acústicos no oceano. A maioria destes equipamentos tem por base uma propriedade especial de certas cerâmicas, que produzem uma pequena corrente elétrica quando sujeitas a diferenças de pressão (NOAA, 2017). Esta propriedade é chamada piezoelectricidade.

Segundo a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), o hidrofone cerâmico, quando submergido e exposto a sons na água de qualquer direção, produz um sinal de pequena voltagem numa grande variedade de frequências. Assim, ao amplificar e gravar os sinais elétricos produzidos, o som no mar pode ser medido com grande precisão. Esta mesma organização afirma que, apesar dum microfone individual gravar os sons que chegam de todas as direções, diversos sensores dispostos numa determinada ordem permitem que os resultados sejam manipulados de modo a captar os sinais acústicos com maior sensibilidade, numa direção qualquer.

A NOAA enumera, ainda, as diferentes tecnologias relacionadas com o sistema de hidrofones. Os *Sonobuoys* são hidrofones de uso militar ou para exploração oceânica que podem ser colocados por aviões ou barcos de superfície. O sistema inclui um hidrofone e um transmissor

de rádio que envia automaticamente os dados gravados de volta ao transportador. Ao associar diversos *sonobuoys* em padrão, a localização do alvo pode ser determinada, mas é necessário ter em conta que estes sistemas não são adequados à monitorização de longo prazo devido ao curto tempo de vida do dispositivo, que é de apenas algumas horas.

Existem também os hidrofones por cabo. Esta é uma tecnologia muito mais cara que a anterior, mas é de carácter permanente para a exploração acústica. O sistema é composto por hidrofones conectados a um cabo de comunicação subaquático e, por essa razão, permite a monitorização em tempo real.

Podem ainda referir-se os hidrofones autónomos, sistemas portáteis que podem ser lançados em qualquer parte dos oceanos. Os dispositivos são compostos por um hidrofone cerâmico ligado a uma caixa de pressão à prova de água que contém baterias, computadores, relógios e outros dispositivos eletrónicos necessários ao funcionamento do sistema durante alguns anos. Além da portabilidade, uma outra vantagem é o facto destes instrumentos serem relativamente baratos quando comparados com os sistemas por cabos. Por outro lado, contrariamente ao sistema por cabos, a transferência de dados não é em tempo real, sendo necessário que um barco se dirija ao local da colocação do sistema, de modo a recuperar o instrumento e ter acesso aos dados recolhidos.

A monitorização e o reporte dos dados são essenciais para a determinação dos efeitos adversos das atividades antropogénicas no meio marinho, para avaliar a eficácia das medidas de mitigação implementadas num determinado local e para planear as atividades geradoras de ruído, de modo a conseguir obter um impacto mínimo na vida marinha.

Segundo a obra *Marine Mammals and Noise*, da MMC, a monitorização acústica para a deteção animal pode ser realizada através de duas abordagens diferentes.

A monitorização acústica passiva é um tipo de monitorização que utiliza hidrofones para detetar a presença de mamíferos com base nas suas vocalizações ou outros comportamentos produtores de som. Este tipo de monitorização não é muito afetado pelas condições atmosféricas e de avistamento, como a observação visual, mas quando utilizada de modo isolado, o seu uso é limitado dado que nem todos os mamíferos vocalizam, ou fazem-no de maneiras difíceis de detetar, e dos sons que são detetados podem ser difíceis de atribuir a estes animais marinhos. Apesar disto, a monitorização acústica passiva é uma das componentes de um sistema integrado de mitigação, monitorização e observação.

Outro tipo de monitorização acústica é denominado de ativa. Este consiste na emissão de pulsos de alta frequência e consequente deteção de ecos nos objetos de interesse. As maiores

desvantagens deste sistema incluem os preços elevados de utilização, a disponibilidade limitada e, ainda, a produção de falsos positivos.

Além das desvantagens enumeradas, como estes sistemas utilizam sonares ativos, acabam por introduzir uma outra fonte de ruído antropogénico que poderá provocar efeitos adversos na vida marinha.

Além dos sonares para a monitorização acústica ativa, têm sido utilizados radares, deteção infravermelha e uma técnica chamada *Light Detection and Ranging* (LIDAR). Estas técnicas são limitadas apenas aos animais à superfície ou perto dela e têm, possivelmente, uma baixa taxa de deteção para animais pequenos ou que passam grandes porções de tempo em profundidade.

O desenvolvimento de estratégias de monitorização animal eficazes depende de diversos fatores como a região em análise, a estação, as atividades geradoras de ruído, a presença e abundância de mamíferos e historial natural. Este último é relativo à migração e distribuição dos animais, estrutura social e comportamento de mergulho e, ainda, sensibilidade ao som antropogénico.

O regime de verificação do Tratado de não proliferação de armas nucleares inclui uma rede de onze estações de monitorização hidroacústica para analisar o oceano, para explosões nucleares. Destas onze estações, seis delas são estações de hidrofones que se encontram instaladas em ilhas nos maiores oceanos do planeta, Atlântico, Pacífico e Índico, e podem ser usadas para diferenciar sinais acústicos com diferentes origens, tanto naturais como antropogénicas.

O equipamento de medição das estações consiste em três conjuntos de hidrofones instalados em pontos diferentes da ilha, de modo a evitar zonas de sombra, e entre os 600 e 1200 metros de profundidade com o objetivo de captar os sons diretamente no canal SOFAR. Para ser possível atingir estas profundidades, os sensores encontram-se ligados a uma bóia à superfície e, ainda, presos a âncoras, no fundo do oceano.

As estações terrestres processam os sinais medidos pelos equipamentos de medição e enviados para a estação através de um cabo de ligação, e enviam também para a estação de tratamento internacional, em tempo real

3.6 Medidas de Mitigação

Atualmente, de modo a controlar e minimizar a emissão de ruído para os oceanos, as medidas encontram-se divididas em duas categorias principais, o controlo de ruído na fonte através de limitações e requisitos operacionais e, ainda, restrições espaço-temporais de atividades geradoras de ruído.

Dado que o nível de incerteza é, ainda, muito grande a respeito dos efeitos do ruído na vida marinha, é importante usar uma abordagem preventiva ao realizar uma atividade emissora de som, nos ambientes aquáticos (Convention on Biological Diversity, 2012).

O controlo de ruído na fonte, segundo o Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP), é uma maneira de regular as atividades ruidosas através da definição de critérios de exposição que não poderão ser excedidos. A redução do ruído pode ser feita através da redução da potência da maquinaria e através da duração e número de vezes que o sistema transmite esse som.

No caso de haver informação sobre as espécies de interesse local e sobre a sua sensibilidade auditiva é, ainda, possível operar as fontes em frequências para as quais a audição do animal é relativamente insensível (Convention on Biological Diversity, 2012). Num outro documento é, também, feita a sugestão de um aumento gradual do ruído na fonte, permitindo assim aos animais afastarem-se da área antes de os níveis atingirem valores que possam ser prejudiciais (MMC, 2007). Ainda segundo o mesmo documento, a falta de dados sobre a eficácia desse método torna-o inconclusivo.

As restrições espaço-temporais são outras das técnicas de controlo do ruído. Os níveis de ruído detetados pelos mamíferos marinhos, durante a intensa atividade sonora, podem ser controlados através da definição e estabelecimento de zonas de exclusão ou de segurança (Convention on Biological Diversity, 2012). Para isso, o uso de uma fonte sonora pode ser proibido ou limitado em zonas sensíveis, como por exemplo habitats críticos, zonas de acasalamento e reprodução, áreas marinhas protegidas, caminhos migratórios ou lugares onde a diversidade é particularmente grande (MMC, 2007). Segundo este último documento, estas medidas são de difícil aplicação quando a distribuição, o padrão de movimentos e a sensibilidade da fauna não é bem conhecida. Além disso, ainda não é claro se essas zonas são eficazes na proteção dos animais à exposição sonora excessiva.

Outras medidas de mitigação espaço-temporais, segundo o documento da convenção sobre a diversidade biológica (2012), seriam as restrições geográficas e sazonais, de modo a evitar a exposição de espécies e habitats sensíveis.

O documento *Marine Mammals and Noise*, da Comissão para os Mamíferos Marinhos (MMC, 2007), sugere ainda medidas como a eliminação ou modificação da fonte sonora e a atenuação do som. Relativamente à primeira medida, as fontes de som de alta intensidade, por exemplo, podem ser reduzidas com o aperfeiçoamento do processamento do sinal ou através do foco da fonte sonora. A modificação da fonte e a atenuação do som são feitos com recurso a novas e mais eficientes tecnologias, que já existem ou irão ser desenvolvidas.

3.7 Legislação, Gestão de Risco e Desafios Futuros

Apesar do ruído ser reconhecido como uma forma de poluição, as fontes de ruído em ambientes marinhos não estão regulamentadas atualmente, a nível internacional. Neste capítulo serão apresentados alguns instrumentos legais existentes, de relevância, na área da poluição, tanto a nível mundial como a nível regional.

A um nível global, a Lei do Mar das Nações Unidas (UNCLOS, 1997) estabelece os deveres das partes no que diz respeito à poluição no ambiente marinho vinda de qualquer fonte. Este é um dos tratados, a nível mundial, mais promissores, ao ter o potencial de regulamentar o ruído nos oceanos. Nesta lei, a definição de poluição inclui a poluição por energia, dado que tem a intenção de endereçar a poluição vinda de todas as fontes.

No primeiro artigo deste documento legal, a poluição do ambiente marinho é definida como a introdução, pelo homem, direta ou indiretamente, de substâncias ou energia, no ambiente marinho que resulta em efeitos prejudiciais aos recursos e à vida marinha, põe em perigo a saúde humana, prejudica as atividades marinhas, é prejudicial à qualidade da água do mar e provoca a redução no conforto e bem-estar.

Um outro tratado a nível mundial, a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL, 1978), criada em 1973 e alterada em 1978, é direcionado para a poluição introduzida nos mares pelos navios, como o próprio nome diz, de modo a minimizá-la. Contrariamente à UNCLOS, a MARPOL foca-se somente em substâncias e não em energia, mas oferece a possibilidade de ser estendida para incluir este tipo de poluição.

Mais recentemente, a Agenda para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (United Nations, 2015), definiu os dezassete objetivos de desenvolvimento sustentável para os próximos anos, estando em vigor até 2030. Apesar de existir um objetivo relacionado com os oceanos, a problemática do ruído antropogénico é transversal a diversos objetivos, visto ser de relevância crítica para a proteção dos ambientes marinhos e dos humanos.

O objetivo número um diz respeito à erradicação da pobreza. Para este objetivo, a pesca de pequena escala é de grande importância para as comunidades costeiras e permite a redução da pobreza nessas áreas. Como já foi referido, os campos acústicos anormais interferem nos padrões comportamentais dos peixes e podem ter efeitos negativos nos invertebrados influenciando, também, de um modo negativo, a atividade pesqueira.

O segundo objetivo é relativo ao fim da fome, à obtenção da segurança alimentar e de uma melhor nutrição e ainda, à promoção da agricultura sustentável. Neste objetivo, o ruído nos

oceanos pode causar impactos, novamente, ao nível da pesca que, com a população mundial a aumentar, é uma fonte alimentar importante.

Para o oitavo objetivo, relativo ao trabalho digno e crescimento económico, o peixe continua a ser um dos bens mais comercializados, com grande parte deste a surgir dos países em vias de desenvolvimento. Por essa razão, os efeitos do ruído terão que ser tidos em conta, ao prever as ameaças ao crescimento económico e sustentável. Este objetivo complementa, também, o ecoturismo, ao criar emprego e ao promover a cultura e produção locais. Um exemplo aplicado ao mar é a observação de cetáceos, um mercado crescente que depende dos ecossistemas saudáveis e padrões conhecidos.

O nono objetivo, relativo à indústria, inovação e infraestruturas, sugere que, de modo a manter o crescimento económico, será necessário recorrer à ciência e tecnologias, que é considerado parte da solução para o futuro. Neste sentido, devem ser desenvolvidas novas tecnologias alternativas às atuais de exploração do petróleo e gás, de exploração de energia renováveis com aplicação nos oceanos e, ainda, melhorar a *design* dos navios de modo a reduzir a cavitação e outras fontes de ruído.

Por fim, o objetivo para a proteção da vida marinha, com o número catorze, tem o objetivo de prevenir e reduzir significativamente todas as formas de poluição marinha, que incluem a introdução de ruído de origem antropogénica.

Relativamente à Comunidade Europeia, a legislação mais importante e abrangente, que se enquadra no nível regional, é a diretiva nos habitats e das espécies, diretiva 92/43/CEE de 21 de maio de 1992, e fornece duas formas de proteção dos cetáceos e outros animais marinhos. Estas incluem assegurar a biodiversidade através da conservação dos habitats naturais, da fauna e da flora em território dos estados membros e, ainda, a criação de uma rede de áreas de conservação. Esta diretiva foi transposta para a legislação nacional através do Decreto-Lei n.º 140/99 de 24 de abril, republicado pelo decreto-lei n.º 49/2005 de 24 de fevereiro.

Em 2008 foi publicada a Diretiva-Quadro da Estratégia Marinha (DQEM), diretiva 2008/56/CE, que define os descritores qualitativos para a definição de um bom estado ambiental. No anexo I, descritor 11, a “introdução de energia, incluindo ruído submarino, mantém-se a níveis que não afetam negativamente o meio marinho” relaciona-se com o ruído. Esta diretiva foi transposta para direito nacional pelo Decreto-Lei n.º 108/2010 de 13 de outubro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 201/2012 de 27 de agosto, e pelo Decreto-Lei n.º 136/2013 de 7 de outubro.

A Convenção para a Proteção do Meio Marinho do Atlântico Norte (OSPAR) é um mecanismo para proteger o ambiente marinho do Atlântico Norte, através da cooperação entre 15 entidades europeias, e onde Portugal se insere. A Convenção OSPAR foi retificada através do Decreto-Lei nº 59/97 de 31 de outubro.

A nível regional, a situação encontra-se mais regulamentada, através dos doze tratados com iniciativas para os oceanos. No documento *Oceans of Noise*, da WDCS, encontram-se enumerados estes tratados e sabe-se que onze dos doze tratados incluem a energia como fonte de poluição.

É necessário ter em conta que os impactos do ruído nos oceanos e a regulamentação de fontes sonoras são problemas emergentes e que necessitam de mais e melhor investigação. Apesar do reconhecimento, de algumas ações concretas e a implementação de guias de ação, há ainda falta de informação e conhecimento de como o ruído interfere na vida marinha.

A avaliação de riscos, que pode ser descrita como o processo pelo qual se identificam perigos ou situações que possam causar danos, fornece uma boa base de trabalho para identificar questões críticas que necessitam de mais investigação. O processo acaba por servir de base para a gestão de risco.

Relativamente aos impactos das fontes sonoras na vida marinha, num primeiro passo é necessário identificar os perigos e a sua caracterização de modo a identificar todas as fontes sonoras de origem antropogénica significativas e as suas características, como estas e os níveis sonoros se alteram ao longo do tempo, espaço e atributos do meio e, ainda, como esses sons interagem entre eles e com outros fatores de risco no ambiente marinho (MMC, 2007). Apesar de algum progresso relativamente à identificação e caracterização das fontes sonoras, é ainda uma área de investigação necessária.

Segundo a mesma obra, e como segundo passo, a determinação da exposição é feita através da sobreposição da distribuição dos mamíferos marinhos com a energia acústica. Os padrões de movimento e migração dos mamíferos, com exceção de algumas espécies, são ainda pouco conhecidos, sendo necessário mais e melhor informação de modo a melhorar as projeções de exposição às fontes antropogénicas. Já a distribuição da energia acústica, nos oceanos, é dada pela distribuição e padrão de movimento das fontes sonoras e a sua propagação, em função das características da fonte e do meio. Após a sobreposição, é feita a verificação das áreas chave.

Os autores de MMC (2007), identificam a terceira parte do processo como a avaliação das respostas sabendo que a sensibilidade ao som, dos mamíferos marinhos, é função da sua audição e a suscetibilidade aos efeitos físicos e fisiológicos não auditivos. Atualmente, as medições de

sensibilidade foram efetuadas em estudos que envolviam relativamente poucos indivíduos e, por essa razão, são necessários mais estudos para determinar se esses indivíduos testados são representativos da sua espécie e como a sua audição poderá variar em função de outros fatores, como a idade e o sexo. São necessários, também, mais testes para avaliar outros sistemas, como por exemplo o imunitário, antes e depois da exposição a fontes sonoras antropogénicas ou outros fatores de stress.

A caracterização do risco, o quarto passo segundo MMC (2007), é realizado em função de todas as considerações enumeradas acima. Esta caracterização tem em conta os efeitos cumulativos das múltiplas fontes sonoras e a interação dos efeitos sonoros com os efeitos de outros fatores de risco. Dada a falta de conhecimentos na área atualmente, a avaliação de risco para os cetáceos é, geralmente, baseada em suposições (WDCS, 2003).

Por fim, e relativamente à gestão de riscos, a pesquisa e monitorização são componentes importantes para desenvolver um guia claro. As medidas de mitigação e monitorização são importantes para a gestão de risco dado o seu propósito de validar as hipóteses assumidas na projeção dos possíveis efeitos e minimizar os efeitos. A pesquisa é necessária de modo a caracterizar a sensibilidade dos mamíferos marinhos ao som, sob certas condições, determinar o limiar dos níveis sonoros necessários para proteger os animais sob essas condições, caracterizar a eficácia das medidas de mitigação e monitorização, desenvolver melhores meios para realizar essas duas tarefas e fornecer uma certeza razoável de que os efeitos cumulativos não irão provocar mais do que efeitos insignificantes nas populações de mamíferos marinhos (MMC, 2007).

Deve salientar-se ainda que, para a maioria das espécies de mamíferos marinhos, há falta de conhecimento e de ferramentas de monitorização que permitam uma completa caracterização do risco. Para essa gestão de risco, a investigação, monitorização e mitigação são elementos importantes e necessários para o desenvolvimento de orientações claras. A investigação realizada até à data, realizada por agências federais e grupos industriais, tem ajudado a expandir os conhecimentos da física do som no meio marinho, o seu impacto na vida subaquática e desenvolver medidas de mitigação para tentar minimizar os impactos no ecossistema. Apesar disto, muito trabalho terá ainda que ser feito nesta área. Segundo a MMC (2007), alguns dos desafios dos próximos tempos, nesta área são: Caracterização mais completa das fontes de ruído antropogénicas; melhor identificação dos perigos que essas fontes introduzem no meio marinho; determinação da exposição através da sobreposição dos padrões e distribuição da vida marinha com a energia sonora; avaliação das respostas e sensibilidade dos mamíferos marinhos ao som relativamente à audição e à suscetibilidade a efeitos físicos e fisiológicos não auditivos; caracterização completa do risco imposto por fontes sonoras antropogénicas, que requer ter em

conta o efeito cumulativo de múltiplas fontes sonoras e as interações dos efeitos sonoros com os efeitos de outros fatores de risco.

4 MODELAÇÃO DE FENÓMENOS DE PROPAGAÇÃO

A modelação é uma componente importante do estudo da propagação do som. Os diferentes modelos são usados com o intuito de avaliar as interações dos campos de som, criados por fontes múltiplas, a propagação no tempo e espaço e, ainda, a interação com animais, especialmente em relação aos mamíferos marinhos (NRC, 2003). Estes modelos englobam uma variedade de ferramentas que incluem ajustes empíricos aos dados medidos, como as curvas de Wenz, modelos de simulação computacional e modelos numéricos, que podem ser de base física ou empírica.

Diversas técnicas numéricas têm sido desenvolvidas ao longo do tempo, para estimar o campo de som do oceano, mas, até ao momento, nenhuma é capaz de lidar completamente com todas as possíveis condições ambientais, frequências e alcances de transmissão com interesse para a comunidade técnica e científica (Buckingham, 1992).

De um modo geral, os modelos e códigos de propagação acústica são baseados na equação da onda (Duncan & Maggi, 2006). Segundo a mesma fonte, a maioria dos problemas de interesse prático envolvem domínios computacionais muito grandes e, por essa razão, há a necessidade de reduzir a sua dimensionalidade e introduzir suposições ou simplificações de modo a permitir o uso das técnicas numéricas de um modo mais eficiente.

Neste contexto, o ruído é dividido, geralmente, em duas categorias gerais. A primeira quando a fonte sonora é única e identificável, onde existe proximidade entre a fonte e o recetor e, uma segunda categoria, quando a fonte de ruído tem origens múltiplas, com diversas fontes indistinguíveis (NRC, 2003). É necessário salientar que, em muitos casos, os mecanismos dominantes de fontes naturais não foram, ainda, identificados de maneira conclusiva.

Nos próximos subcapítulos são apresentados sucintamente os modelos de propagação existentes, acompanhados por exemplos de códigos já desenvolvidos e algumas das suas características. Esta informação tem por base as obras de *Nacional Research Council* (2003) e de Micheal J. Buckingham (1992), e qualquer outro autor estará devidamente identificado.

4.1 Fontes Sonoras Pontuais

Para a caracterização de fontes sonoras individuais, são analisados diversos parâmetros como a frequência, o nível na fonte, o padrão da relação entre amplitude e tempo, a direccionalidade da radiação e a distância à fonte.

Segundo os autores, os modelos de propagação desenvolvidos para estas fontes utilizam, ainda, bases de dados batimétricas, informação geoacústica, parâmetros oceanográficos e modelos de rugosidade de interfaces sólidas, de modo a produzir estimativas do campo acústico no meio.

Existem quatro tipos de modelos, atualmente, utilizados na acústica marinha. A precisão de cada um está relacionada e é dependente das escolhas relativas à frequência do som a modelar e às características do ambiente.

Grande parte dos modelos desenvolvidos até aos dias de hoje são de duas dimensões, dando ao campo sonoro apenas alcance e profundidade. A modelação a duas dimensões apresenta algumas fraquezas; por exemplo na presença de frentes oceânicas, os modelos não têm em conta a convergência ou divergência do campo acústico na horizontal, nas águas pouco profundas, em lugares onde o comprimento da onda acústica é comparável com a profundidade, e na presença de declives, os raios incidentes oblíquos são refletidos para um plano vertical diferente, fenómeno conhecido como refração horizontal, sendo responsável por uma brusca sombra acústica.

A maioria dos modelos de propagação acústica no oceano assume que a fonte gera um sinal harmónico e contínuo. A superfície é tratada como uma superfície com pressão nula e considerada um limite plano, apesar das rugosidades serem importantes para as frequências altas.

Os modelos que vão ser apresentados são determinísticos, visto ignorarem os efeitos do campo de som ou as flutuações no perfil de velocidades, resultante da turbulência de pequena escala, ondas internas e outros fenómenos.

Relativamente aos modelos a três dimensões, estes são maioritariamente baseados na equação parabólica, que é uma aproximação à equação de onda e é incapaz de lidar com as zonas de sombra e interferências como a reflexão horizontal.

4.1.1 Modelo de Raios

A modelação através de raios sonoros é particularmente útil em problemas de águas profundas, onde apenas alguns raios são significativos. Estes são satisfatórios quando o comprimento de onda é muito inferior a qualquer outra escala de comprimento do problema, como a profundidade, a rugosidade da superfície e do fundo do mar, tamanho de regiões focais e, ainda, a distância à qual ocorrem mudanças significativas na velocidade do vento. A direção do fluxo de energia acústica na propagação da onda ocorre ao longo da trajetória dos raios.

Este tipo de modelo é rápido a calcular, fornecendo uma representação ilustrada, em forma de diagrama de raios, do campo de pressões no canal. No futuro, com a investigação nesta área, avanços como a direccionalidade da fonte e recetor, podem ser facilmente acomodados neste modelo através da introdução de fatores de ponderação dos ângulos de partida e chegada corretos.

Como desvantagens, este modelo apresenta dificuldades no número de raios a traçar e em manter o valor da fase nas reflexões no fundo. A nível dos cálculos, estes têm que ser realizados para todos os alcances e, relativamente aos efeitos da onda como a difração, o modelo não consegue lidar de um modo satisfatório com estes efeitos, resultando numa limitação da sua utilidade na investigação, relativamente às interações com o fundo e à propagação em baixas frequências.

Para ultrapassar algumas destas dificuldades, foi desenvolvido um conjunto de modificações que permite traçar raios para baixas frequências, tendo em conta, até certa extensão do problema os efeitos das ondas. Têm sido, também, desenvolvidas algumas variantes deste modelo.

Com este tipo de modelo de propagação a servir de ponto de partida, foram desenvolvidos códigos para simular a propagação do som com estas particularidades. Alguns desses códigos são *Germinating Ray-Acoustics Simulation System* (GRASS), *Ray Propagation Loss* (PLRAY), *Fast asymptotic coherent transmission* (FACT) e RAYMODE.

4.1.2 Modelo dos Modos Normais

Um modo normal de um sistema é um padrão de movimento em que os pontos do sistema oscilam na mesma frequência e em fase entre eles.

Neste tipo de modelo, é aplicado o conceito de vibração num modelo de oceano ideal, onde o meio é homogéneo, limitado superiormente por uma superfície livre e inferiormente por um disco liso perfeito. As reflexões são especulares, a velocidade do som é constante e as ondas sonoras são consideradas planas (Costa et al., 2010)

O campo sonoro, num oceano estratificado horizontalmente, é decomponível e resulta na possibilidade de ser expresso como uma soma infinita de modos normais separados por um ou mais integrais. A longas distâncias da fonte, essa componente integral é desprezável e o campo é dado pela soma dos modos normais com precisão. Caso o ambiente demonstre alguma variabilidade com a distância à fonte, seja pelo perfil de velocidade ou pelas condições de fronteira, o campo deixa de ser separável e a teoria do modo normal deixa de ser aplicável.

Para lidar com as situações de variabilidade com a distância à fonte, uma alteração ao modelo foi efetuada e, para o caso de a variação ser suficientemente lenta, a aproximação adiabática passa a ser válida, interrompendo assim a transferência de energia entre modos, ao longo da propagação do canal. Caso a variação seja muito rápida, a aproximação adiabática não é válida e será necessário calcular coeficientes de acoplamento, sendo este um procedimento demorado.

Como ponto facilitador deste modelo, os modos não têm de ser calculados para todos os alcances intermédios entre a fonte e o recetor.

Relativamente aos códigos que têm por base este modelo, o SNAP e SUPERSNAP utilizam a modelação oceânica assumindo um meio com três camadas: a coluna de água, a camada de sedimentos e a camada elástica homogénea do fundo. Existem, ainda, o KRAKEN e o COUPLED, sendo que este último foi desenvolvido para ambientes com dependência ao alcance muito rápida.

Neste modelo, o campo é expresso como a soma dos modos locais, representando tanto as ondas cilíndricas que se afastam, como também as que se aproximam. Relativamente aos integrais de acoplamento, estes são complexos e têm que ser avaliados para todos os modos e em todas as fronteiras dos segmentos, resultando assim em cálculos exigentes e demorados. Quando estes coeficientes são desprezáveis, o modelo reduz-se à aproximação adiabática.

4.1.3 Modelo da Função de Green

Dentro deste modelo, existe uma classe de códigos de propagação que determinam uma solução completa da onda para o campo sonoro, num meio horizontalmente estratificado, sendo conhecido como *Fast Field Program* (FFP). Inicialmente limitado pelos processos lentos e pela incapacidade de cálculos simultâneos de várias fontes e recetores, estes problemas foram ultrapassados com o desenvolvimento do código SAFARI. Este aplica-se a meios horizontalmente estratificados e viscoelásticos, fornecendo uma solução exata de função de Green da equação de Helmholtz.

4.1.4 Modelo dos Elementos Finitos

A estrutura geoacústica dos oceanos, de um modo geral, não é estratificada horizontalmente, demonstrando, em muitos dos ambientes, uma certa forma de dependência ao alcance. Essa dependência pode fazer-se sentir sob a forma de frentes e turbilhões na coluna de água, de declive no fundo, através de diferentes escalas de rugosidade e, ainda, a estrutura do meio viscoelástico consistir em camadas com variação de espessura e composição.

O modelo baseado no método dos elementos finitos, *Finite Element Method* (FEM), é, maioritariamente, aplicado a baixas frequências, inferiores a 100 Hz, de modo a manter as exigências computacionais dentro de limites aceitáveis. De modo a obter uma melhor eficiência computacional, deve ser adotada uma abordagem híbrida. Esta abordagem exige que o oceano seja separado em dois tipos de regiões, um com grande dependência ao alcance, que utiliza o código FEM, e outro estratificado horizontalmente e, consecutivamente, com baixos valores de variabilidade com a distância à fonte, onde se pode utilizar um modelo normal adiabático, como por exemplo o SUPERSNAP.

Apesar da literatura de técnicas de elementos finitos para resolver questões de propagação acústica nos oceanos ser relativamente extensa, o número de códigos FEM reduz-se a apenas dois. O primeiro, o *Finite-element Ocean Acoustic Model* (FOAM), trabalha apenas com fluidos e, por essa razão, a camada de sedimentos e o fundo são modelados como fluidos e não como sólidos viscoelásticos. Este código é similar ao COUPLE, apesar deste último ser melhor em termos de precisão, de dependência ao alcance e retrodifusão, mas o modelo FOAM apresenta melhores tempos de cálculo. O segundo é um código sem nome oficial além de *the FEM models*, mas por conveniência é apelidado de ISVRFEM. Na sua última versão, este código é bastante geral, tendo a capacidade de lidar com fluidos e camadas de sólidos viscoelásticos. Este é o modelo desenvolvido, até agora, com maior versatilidade, de todos os códigos “exatos” de propagação acústica nos oceanos.

4.1.5 Modelo da Equação Parabólica

Os modelos com base na equação parabólica (PE) surgiram como alternativa aos modelos numéricos “exatos” e respetivos códigos computacionalmente pesados.

A equação parabólica é válida para uma pequena abertura angular, geralmente segundo a direção horizontal. Dada a sua natureza aproximada, os modelos caracterizam-se pela falta de precisão, sendo que esta depende muito do problema em consideração.

Estes modelos ganharam popularidade entre a comunidade científica relacionada com a acústica oceânica, não só por serem amplamente disponíveis, mas também porque resolvem a coluna de água em toda a altura, sem esforços adicionais e, ainda, permitem modelar ambientes que apresentam variabilidade com a distância à fonte.

Por outro lado, o tempo de execução aumenta rapidamente com o aumento da frequência, o que o torna impraticável em ambientes e regimes de frequências altas. Por fim, este modelo é incapaz de lidar com a retrodifusão, permitindo a modelação da propagação das ondas apenas numa direção dominante.

De um modo geral, os modelos da equação parabólica dividem-se em dois tipos, que se relacionam com a abertura angular, podendo ser estreito ou largo. De modo a serem válidos, e relativamente ao código para uma abertura angular estreita, os ângulos têm que variar dentro do intervalo entre -20° e $+20^\circ$. Relativamente ao largo, os ângulos podem variar entre -40° e $+40^\circ$. Apesar disso, a base teórica indica valores de $\pm 10^\circ$ e $\pm 23^\circ$ para o estreito e largo, respetivamente.

Uma das desvantagens destes modelos é que, quando os ângulos são excedidos, os resultados continuam a parecer razoáveis e sem indicações óbvias de erro, contribuindo para o aumento da distorção no campo calculado.

Um dos códigos mais conhecidos que utilizam a equação parabólica é o PAREQ, um código de abertura angular estreita baseado num algoritmo *split-step*, sendo válido apenas para domínios fluidos. Outros dois códigos de diferenças finitas implícitas com capacidades de ângulo estreito e largo, são denominados IDF(N) e IDN(W), respetivamente. A letra N provém da palavra estreito em inglês, *narrow*, e o mesmo para o W, *wide*.

Existem, ainda, outros códigos desenvolvidos até ao momento. O FEPE resolve, com precisão, a propagação quase ortogonal e produz soluções essencialmente idênticas à solução COUPLE-MODE de saída e o seu algoritmo é eficiente. Este código foi combinado com um outro código PE para meios elásticos, de modo a obter um código capaz de lidar com a propagação no oceano com variabilidade com a distância à fonte, sobrepondo o fundo sólido viscoelástico. Existem também o *Parabolic Equation Solution GENERator* (PESOGEN), sendo este um código baseado na equação parabólica de ângulo largo e num algoritmo *split-step* e o *Range-dependent Acoustic Model* (RAM), que é um modelo que se encontra incorporado num *software* de modelação da propagação do som em meio marinho, disponível de um modo gratuito e que, por essa razão, foi o *software* utilizado neste trabalho. Por fim, refiram-se ainda os códigos INSIGHT, NAVY MODELS.

4.1.6 Modelos Tridimensionais

Apesar dos esforços para elaborar e utilizar modelos de propagação tridimensionais, as dificuldades computacionais são difíceis de ultrapassar e, por essa razão, não existem ainda códigos satisfatórios. Um dos principais obstáculos no desenvolvimento destes modelos é o tratamento de um raio cuja trajetória passa para fora do plano profundidade-alcance no qual foi lançado. Neste sentido, se a trajetória sair por refração dentro do meio, os modelos conseguem processar, mas se for resultado de reflexão de uma interação oblíqua com o solo em declive, as dificuldades numéricas são mais severas e nenhuma das técnicas 3D “não-raio” é capaz de lidar de forma eficaz com este problema.

Relativamente aos códigos existentes, o *Hamiltonian Ray-Tracing Program-Ocean* (HARPO) é o único código tridimensional prontamente disponível. Este modelo não consegue lidar com os efeitos da difração. Apesar disso, este código é uma ferramenta útil visto ser relativamente rápida e descomplicada, fornecendo uma vista ilustrada do campo num meio em três dimensões.

4.2 Fontes Sonoras Distribuídas

Relativamente às fontes sonoras distribuídas, os seus efeitos são analisados através de características como a frequência, direccionalidade e nível sonoro no recetor.

As curvas de Wenz são utilizadas para prever ou modelar o nível de ruído das fontes não identificáveis. Estas curvas fornecem o espectro do nível sonoro que um recetor ideal recebe e possui uma sensibilidade de receção omnidireccional.

Por outro lado, modelos como ANDES, CNOISE e RANDI fornecem as previsões com variação geográfica, sazonal, direccional e de frequência do ruído ambiente associado às fontes múltiplas não identificáveis. Estes modelos incorporam dados como estatísticas de densidade de tráfego marítimo, bases de dados do vento a partir de modelos meteorológicos, modelos de propagação e bases de dados oceanográficos.

Atualmente, os efeitos do ruído em mamíferos marinhos não são possíveis de prever utilizando um modelo, mas o capítulo seguinte abordará possíveis alternativas para este problema.

O modelo *Comprehensive Acoustic System Simulation/Gaussian Ray Bundles* ou CASS/GRAB, é um modelo de ruído omnidireccional que utiliza ajustes empíricos às medições de ruído ambiente. Este modelo tem em consideração a turbulência oceânica dominante na banda de frequências de 1 a 10 Hz, o ruído de tráfego entre 500 Hz e 100 kHz, o ruído térmico em frequências superiores a 100 kHz e a chuva de 550 Hz a 15.5 kHz.

Por fim, salienta-se o sistema de previsões dinâmicas de ruído ambiente (DAPS). Este sistema foi desenvolvido com o intuito de prever a dependência azimutal do ruído nos oceanos, para a banda de frequências de 25 a 5000 Hz, incluindo o tráfego marítimo e o ruído gerado pelo vento e tem como base três módulos, sendo eles um módulo histórico de navios, um módulo dinâmico de ruído ambiente e um módulo de navios reportados.

4.3 Modelação dos Efeitos do Ruído nos Mamíferos

Um modelo conceptual pode auxiliar na descrição das interações necessárias para avaliar o impacto do ruído nas populações de mamíferos e de outros animais marinhos, fornecendo os resultados em métricas que podem ser usadas nessa avaliação. As medidas podem ser de base

biológica como efeitos temporários ou permanentes, nos animais, ou de base comportamental, como por exemplo a interrupção dos sons de acasalamento.

Um modelo desenvolvido para previsão dos impactos dos sinais acústicos nos mamíferos marinhos deve incluir os seguintes seis passos:

- 1- Descrição da fonte em função do tempo ou espectro e nível sonoro na fonte, e um modelo de distribuição da fonte;
- 2- Bases de dados físicas oceanográficas e de geoacústica;
- 3- Modelos de distribuição de mamíferos marinhos em três dimensões, de modo a determinar a exposição;
- 4- Modelos de previsão do sinal sonoro do animal;
- 5- Bases de dados biológicas e modelos de audição e movimento dos mamíferos marinhos;
- 6- Modelos de base populacional para procurar efeitos nos níveis indicados.

Os modelos integradores são modelos que têm sido desenvolvidos e combinam a utilização de modelos auditivos com modelos acústicos. Estes modelos incluem uma biblioteca de fontes sonoras, características ambientais que possam afetar a propagação do som e alguns algoritmos para a modelação da propagação sonora.

O objetivo é prever o resultado para um determinado regime de exposição ao som e representar essa informação em imagens gráficas dinâmicas e funções probabilísticas. Um exemplo de modelo deste tipo, que está a ser desenvolvido, é o *Effects of Sound on the Marine Environment* (ESME), que identifica os elementos necessários para prever um modelo de avaliação de risco e desenvolve uma arquitetura de modo a unir todas as peças. Este e outros modelos do mesmo género integram modelos físicos complexos e multidimensionais do oceano, que correm em supercomputadores.

A componente biológica dos modelos implica a utilização de bases de dados de distribuição de animais, modelos e dados de comportamento animais, como migração, padrões de mergulho, respostas comportamentais ao som e outros, e modelos de respostas mecânicas e neuronais ao som, dos animais. A audição a nível individual é modelada a diversos níveis desde a atividade micromecânica do ouvido interno até à ressonância total da cabeça.

Atualmente, e segundo o NRC (2003), as bases de dados necessárias para estes modelos de previsão não se encontram completas e existem, ainda, falhas de compreensão. Não foi feita, também, qualquer tentativa de modelar os efeitos do ruído no habitat e ecossistemas de mamíferos marinhos e outros animais.

Um outro modelos integrador, o Modelo de Integração Acústica (AIM), é um modelo mais simples, que permite a uma grande variedade de utilizadores experimentar diferentes cenários acústicos no meio marinho, fornecendo funções educacionais, científicas e de gestão ambiental. Este modelo foi desenvolvido para modelar os movimentos e comportamentos de fontes e recetores acústicos, e permite simulações múltiplas de modelos do tipo Monte Carlo, de modo a estimar o impacto de vários cenários com características distintas.

Os modelos integradores, até ao momento, concentram-se na modelação dos efeitos de fontes e recetores individuais. Como já foi referido anteriormente, ainda não existem modelos capazes de prever os efeitos do ruído ambiente, ou seja, de fontes distribuídas, nos mamíferos marinhos.

4.4 Bases de Dados

Um dos desafios para o futuro, nesta área, é o desenvolvimento e investigação de bases de dados. Mas, apesar do muito trabalho pela frente, existem já algumas bases de dados que se encontram a ser desenvolvidas.

A *Sound, Oceanography and Living Marine Resources* (SOLMAR) inclui dados da inspeção visual da ocorrência de cetáceos e gravação das suas vocalizações no mar mediterrâneo, medições oceanográficas e geofísicas como conteúdo mineral e de clorofilas, perfis de condutividade, temperatura e velocidade segundo a batimetria e, ainda, medições de satélite como altimetria, cor do mar e temperatura de superfície. Esta base de dados trabalha e é aplicada a sistemas de informação geográfica.

Outra base de dados no mesmo contexto é designada por *Living Marine Resources Information System* (LMRIS) e contém informação sobre a distribuição global de espécies de animais marinhos, sem qualquer dado acústico. Esta base de dados foca-se apenas nas áreas costeiras.

Ainda sobre a distribuição animal no meio, a *Census of Marine Life* fornece dados a nível mundial sobre o número e tipo de organismos marinhos e a sua localização geográfica, incluindo profundidade.

Relativamente ao tráfego marítimo, a *Lloyds of London* é uma base de dados antiga que inclui as frotas mercantes do mundo, o número de navios por tipo e a sua tonelagem.

Para a indústria do petróleo, a sua monitorização pode ser consultada e visualizada ao subscrever qualquer um dos serviços de informação comercial, como por exemplo IHS Energy ou ODS Pretrodata, mas torna-se necessário manter um catálogo de ruído associado às diferentes técnicas nos diferentes ambientes.

Relativamente a outras indústrias offshore, ainda não existem informações úteis e completas.

Em modo de conclusão, de momento ainda não existe um esforço conjunto coordenado para organizar, apoiar e executar uma recolha de dados do ruído ambiente, de modo a complementar as bases empíricas desenvolvidas. Existem esforços individuais, mas incompletos ou dispersos que, em alguns casos, podem não estar disponíveis por questões de segurança dos países envolvidos.

5 EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A modelação e simulação da propagação do som é uma ferramenta útil para os investigadores, permitindo o estudo e análise das interações do campo sonoro, dada uma determinada fonte e características do ambiente. Com isto em mente e com recurso a um software disponível livremente para utilização, neste capítulo é estudada de que forma diferentes características do ambiente e fonte influenciam o panorama sonoro no meio marinho.

5.1 Método

A escolha do *software* de acústica subaquática incidiu no *Acoustic Toolbox User interface Post processor* (AcTUP), dado o seu acesso livre. Este *software* é escrito em Matlab, constituído por uma interface gráfica do utilizador (GUI) e distribuído pelo Centro para as Ciências e Tecnologia Marinha australiano. Permite a análise da propagação de sinais acústicos através do meio subaquático e, para tal, fornece uma *Acoustic Toolbox*, desenvolvida por Mike Porter da HLS Research, e diversas versões de modelos acústicos com dependência de alcance escritas por Mike Collins, do Laboratório de Investigação Naval dos Estados Unidos da América.

A metodologia de modelação utilizada para as simulações é intitulada *Range-dependent Acoustic Model*, ou RAM. Este modelo tem por base a equação parabólica, que permite a resolução de problemas com variabilidade com a distância à fonte, de um modo mais eficiente e preciso, mas permite, também, ultrapassar as principais limitações desse método (Duncan & Maggi, 2006; Maggi & Duncan, 2010). Esta metodologia RAM, para modelação acústica subaquática, tem sido extensamente indicada como marca de referência, reconhecida pelos investigadores para aplicações sonoras em ambiente marinho. Esta permite a computação da solução para a equação da onda que se afasta, sendo uma solução *one way*, isto é, de modelação apenas num sentido (Duncan & Maggi, 2006). A metodologia vem com diversas variantes, mas para este trabalho é utilizada apenas a RAMGeo, para fundos fluidos.

Para as simulações, foram seleccionadas duas profundidades diferentes para colocação das fontes sonoras no meio, uma a 5 metros, que permite a simulação do tráfego marítimo e outra a 100 metros, profundidade mais próxima do canal SOFAR. Para a coluna de água do meio consideram-se três situações diferentes com profundidades de 2000, 3500 e 5000 metros, e para o fundo duas alternativas de solo, sendo ambos fluidos. As suas características estão descritas no quadro seguinte, onde c_b representa a velocidade do som no fundo do oceano e ρ_b refere-se à densidade, também, do fundo, sendo que o a) é referente às condições do perfil de Munk, que será referido mais à frente, e o b) a um fundo mais denso.

Fundo a	$c_b=1600$ m/s	$\rho_b=1000$ kg/m ³
Fundo b	$c_b=2100$ m/s	$\rho_b=1200$ kg/m ³

Quadro 1 - Caracterização dos fundos escolhidos para as simulações

Relativamente à velocidade do som na água, a escolha recaiu sobre três diferentes perfis na vertical. Num primeiro grupo, foi efetuada a simulação com velocidade constante, sendo a escolhida a velocidade média do som na água, ou seja, 1500 m/s. Numa segunda alternativa, considerou-se um perfil linear de velocidades que teve como base os valores de Urlick para o meio ártico, como está representado na figura 16. E por fim, na figura 17 está o terceiro perfil utilizado, que é perfil de velocidades para águas temperadas ou perfil de Munk, dado pela expressão seguinte:

$$c(z) = 1500.0 \times [1.0 + \epsilon(\tilde{z} - 1 + e^{-\tilde{z}})] \quad (7)$$

$$\text{Onde } \epsilon = 0.00737 \text{ e } \tilde{z} = \frac{2(z-1300)}{1300} \quad (8)$$

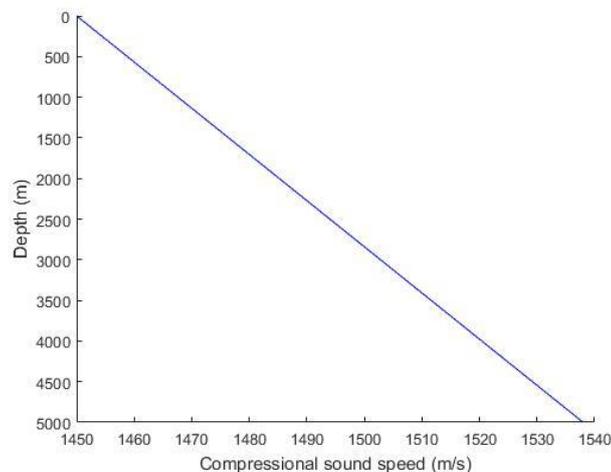


Figura 16 – Perfil de velocidade linear

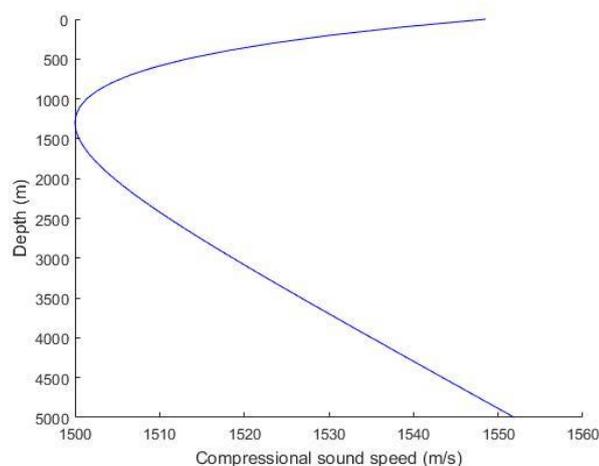


Figura 17 – Perfil de velocidades de Munk

Para todas as alternativas e diferentes simulações, o resultado final foi analisado para quatro diferentes frequências da banda, sendo elas 10, 20, 50 e 100 Hz. O interesse na gama das frequências baixas é devido, como já foi dito anteriormente, à menor perda energética quando comparada com as frequências altas e/ou muito baixas, dada a influência da caracterização do meio.

As características dos ambientes simulados, para cada fonte, encontram-se enumeradas num quadro no Anexo A e, dado o número elevado de resultados e a impossibilidade de os representar a todos no presente trabalho, foram selecionados grupos representativos de simulações realizadas, que permitem a comparação e interpretação da influência das diferentes características do meio e da fonte no campo sonoro.

Os resultados da modelação da propagação do som são apresentados em gráficos que relacionam a profundidade com a distância à fonte e onde a escala de cor representa a TL. Cada gráfico encontra-se identificado pelo número de simulação correspondente, de acordo com o Anexo A.

5.2 Resultados e Discussão

Num primeiro grupo de resultados, foi escolhida uma profundidade da fonte de 100 metro, num ambiente que possui um perfil de velocidades constante, com características do fundo a, já descritas acima e apenas a variar a altura da coluna de água. Para tal, foram selecionadas as simulações 1 e 5, nas frequências 20 e 100 Hz.

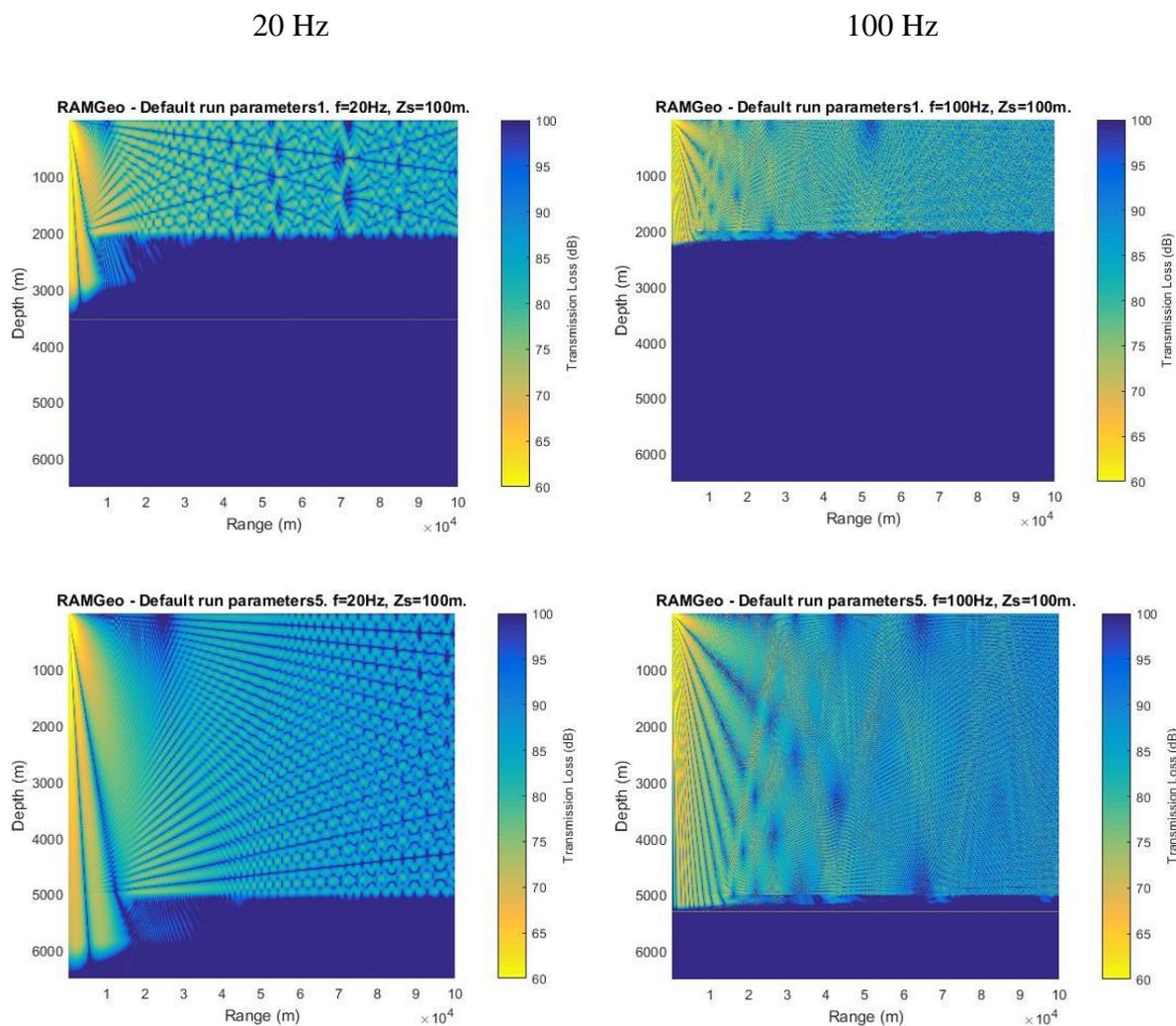


Figura 18 - Simulação de ambiente sonoro com variação da profundidade da coluna de água. Em cima a simulação identificada como número 1 e em baixo a número 5.

Este conjunto de simulações, ilustrado na figura 18, permite observar que quanto maior a frequência, maior é o número de interações no campo sonoro, tornando-o mais complexo. Por outro lado, quando os valores da frequência são mais baixos, uma maior quantidade de energia consegue penetrar no fundo do oceano.

Com o intuito de verificar a influência das características do fundo na forma como o som se propaga, foram testados os dois solos, com as características já descritas. A fonte foi, novamente, colocada a 100 metros de profundidade, assumiu-se o mesmo perfil de velocidades que o grupo anterior, a coluna de água com uma profundidade de 3500 metros e as frequências de 10 e 100 Hz. As simulações com estas características são as identificadas pelos números 3 e 4, no Anexo A.

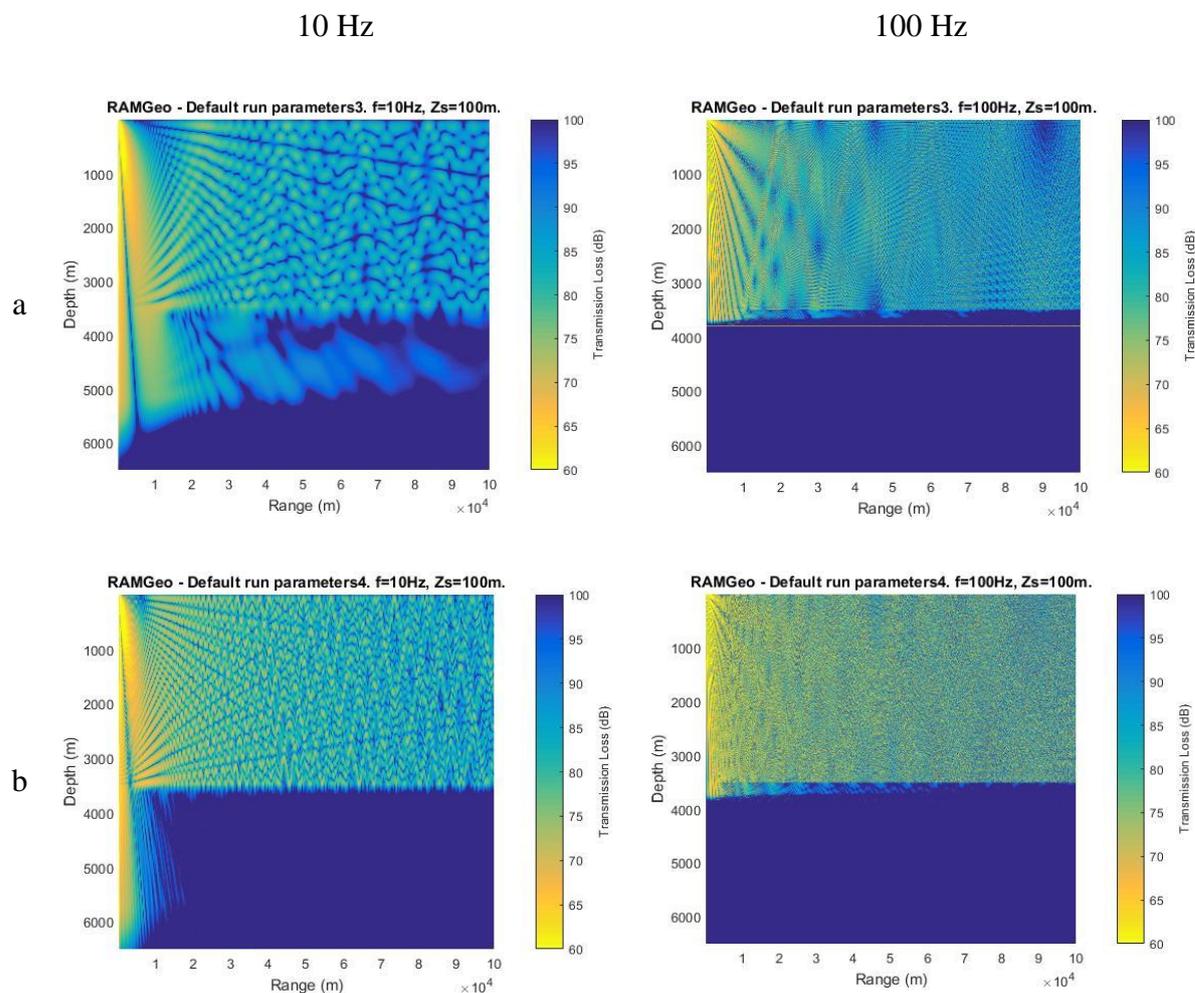


Figura 19 - Comparação entre o solo a e solo b num ambiente com 3500 metros de profundidade. Em cima a simulação identificada como número 3 e em baixo a número 4.

Pela figura 19, observa-se que o solo mais rígido resulta numa menor absorção e capacidade de penetração do som, resultante de valores mais elevados de reflexão das ondas nessa superfície. Este tipo de solo irá resultar, então, em campos sonoros com menores perdas por transmissão.

Esta análise foi repetida para uma profundidade da coluna de água de 5000 metros e perfil de velocidades de Munk, com obtenção dos resultados ilustrados na figura 20, onde foram utilizadas as simulações 5 e 6, confirmando-se as conclusões retiradas no grupo representativo anterior.

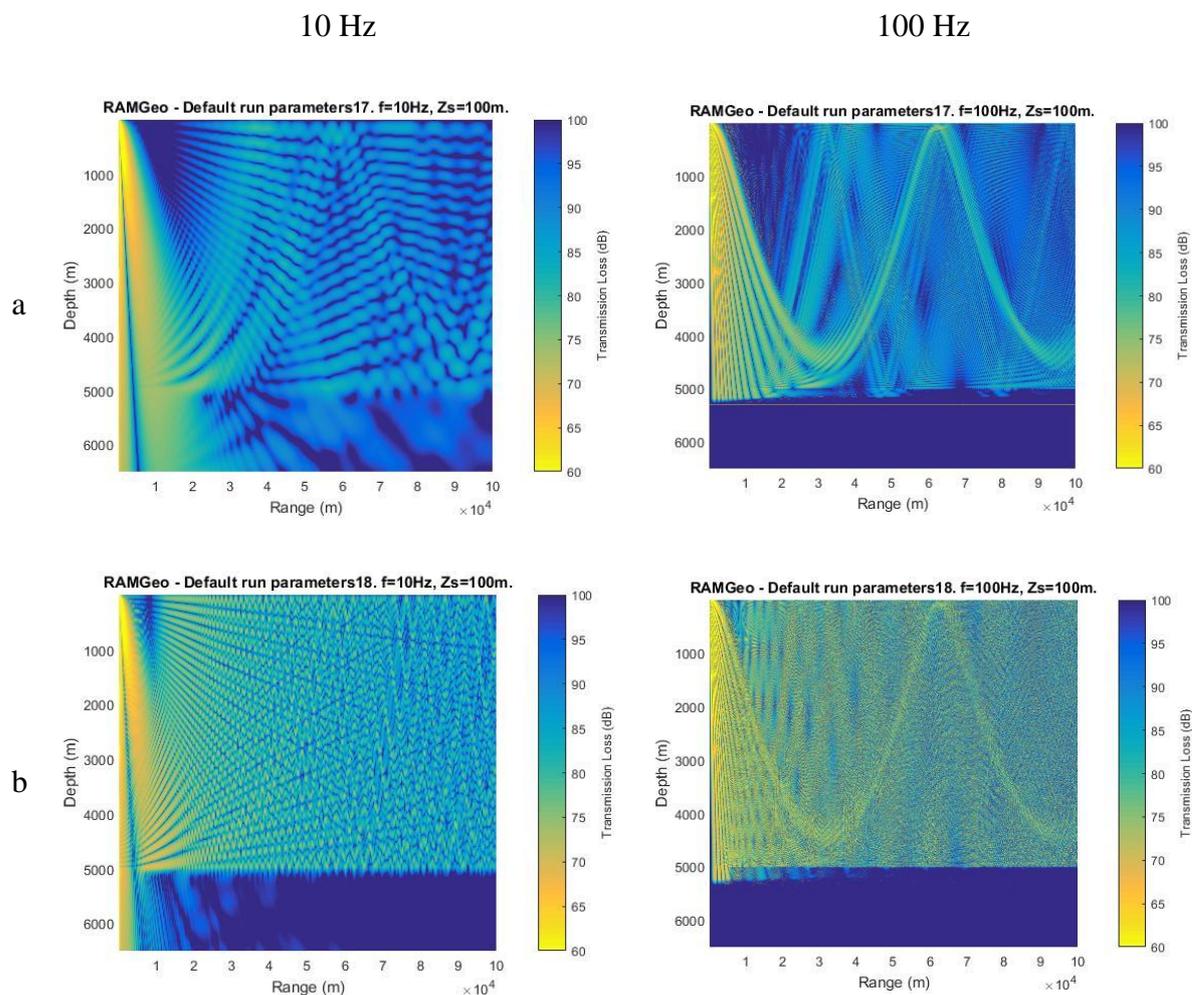


Figura 20 - Comparação entre o solo a e solo b num ambiente com 5000 metros de profundidade. Em cima a simulação identificada como número 5 e em baixo a número 6.

No conjunto de resultados apresentado na figura 20 é possível verificar a zona de convergência de energia acústica, representada pelos picos de energia máxima, ou de menor TL, que se encontram no mesmo local para todas as simulações, com exceção da simulação 6 para a frequência 10Hz, que não é perceptível.

Uma importante e essencial análise é a forma como o campo sonoro é influenciado pelos diferentes perfis de temperatura que o meio pode assumir. Assim, o grupo de resultados que se segue foi obtido com a utilização da fonte sonora a 100 metros, com a coluna de água a admitir uma profundidade de 5000 metros e com característica do fundo a. O primeiro conjunto de resultados diz respeito ao perfil constante de temperatura e à simulação 5, o segundo ao perfil linear e à simulação 11 e o terceiro ao perfil de Munk representada pela simulação 17.

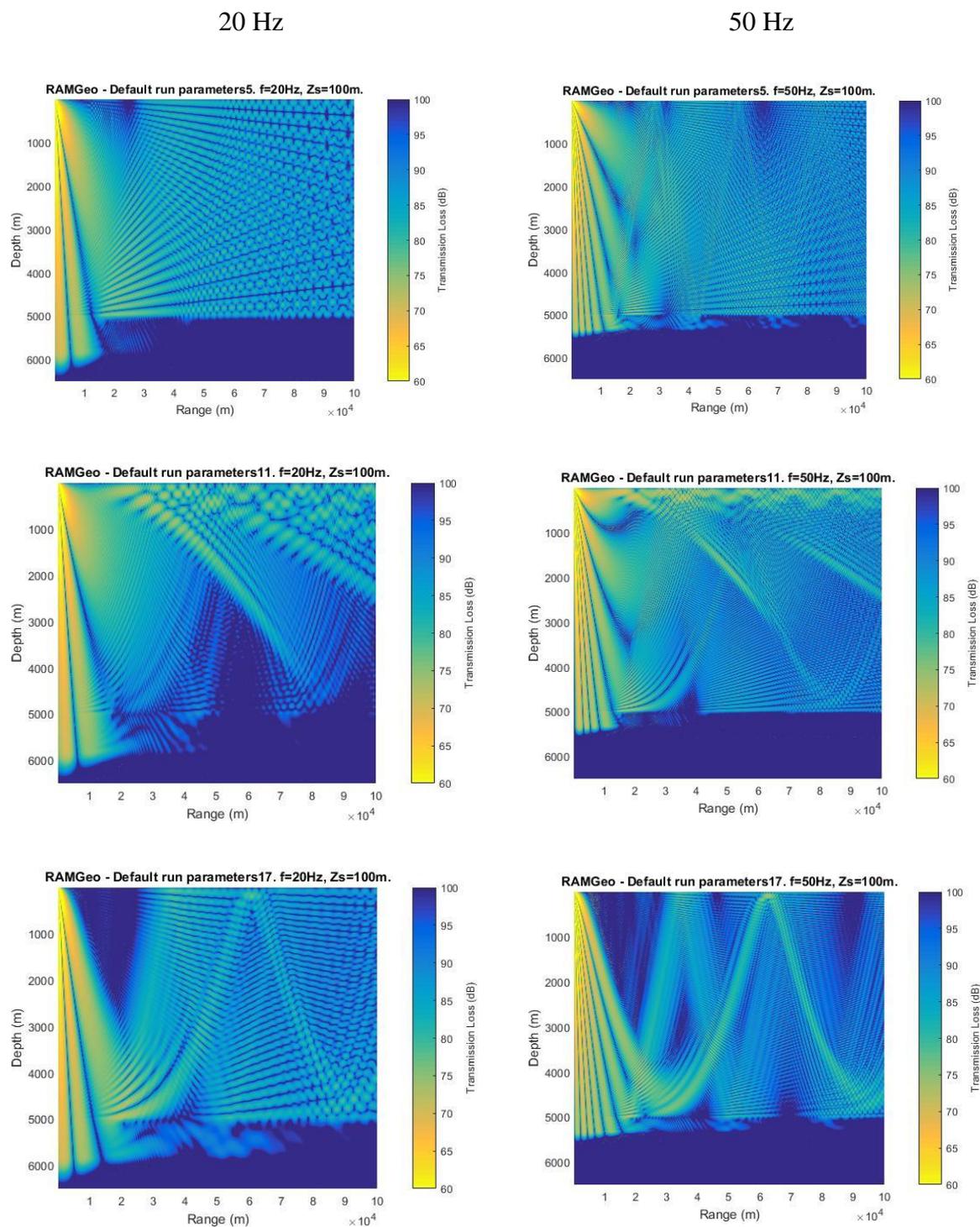


Figura 21 - Impacto dos diferentes perfis de velocidade no campo sonoro. Simulações 5, 11 e 17, respetivamente.

Relativamente ao perfil de velocidade constante de propagação do som, este é apenas um caso ilustrativo e permite uma melhor comparação da influência das variações de velocidade dos outros perfis.

Ao contrário do perfil de velocidades constante, a velocidade linear, atribuída a ambientes polares, assume uma propagação característica com constantes refrações em direção ao limite superior do meio. Este tipo de comportamento é atribuído ao resultado do aumento da velocidade com a profundidade sendo, como já foi referido nos capítulos anterior, as ondas desviadas na direção da menor velocidade.

É possível observar uma zona de menor TL junto à superfície com a criação de um canal de propagação proporcionado pela refração ascendente e pela reflexão no limite superior da coluna de água.

Por fim o perfil de velocidades das águas temperadas, ou perfil de Munk. De modo a relembrar, este perfil é caracterizado pelo seu mínimo de velocidade a profundidades aproximadas de 1000 metros. Isto resulta numa refração dos raios sonoros em direção ao hipotético eixo que representa esse mínimo, permitindo uma menor interação com os limites superiores da coluna de água, quando comparados com o perfil linear. Relativamente aos limites inferiores, a perda por absorção do solo é superior comparativamente ao perfil linear pois, para ângulos de origem elevados, a refração não é suficiente para evitar o contacto e penetração dessas ondas com o solo.

O quinto conjunto representativo de resultados ilustra, na figura 22, a variação na profundidade da fonte sonora. As características do ambiente de propagação referem-se à simulação 13 com 2000 metros de coluna de água, fundo com características do solo a e perfil de velocidades de Munk.

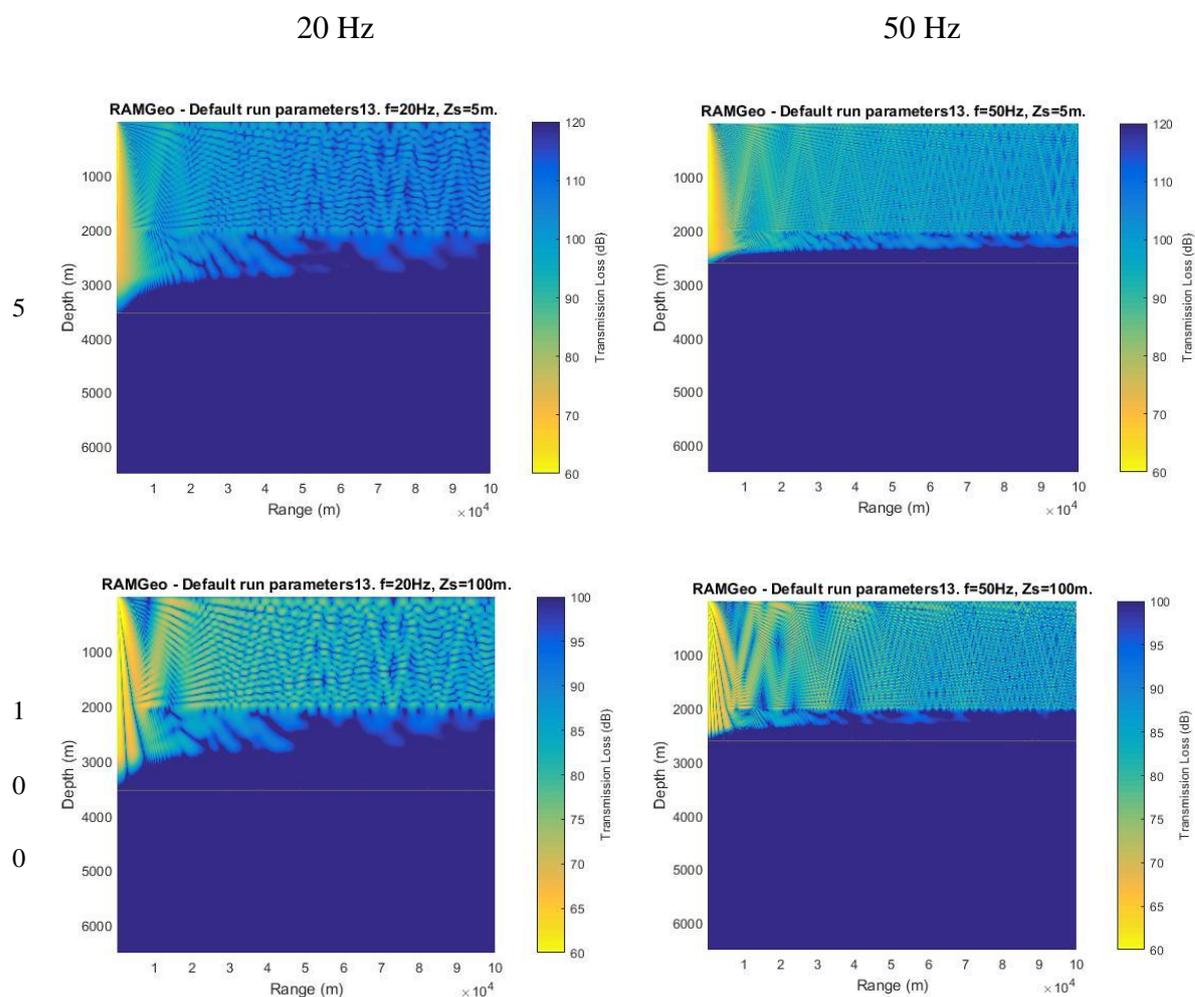


Figura 22 - Impacto da profundidade da fonte num ambiente com 2000 metros, com a fonte a 5 e 100 metros de profundidade, em cima e em baixo, respetivamente. Resultados relativos à simulação número 13.

É importante salientar que, neste conjunto de resultados, a escala de apresentação da perda por transmissão varia, para uma melhor visualização do campo. A figura 22 permite observar que a perda energética é mais dispersa quando a fonte é colocada a 5 metros da superfície, visto que resulta num maior número de interações com esse limite superior. A uma maior profundidade, mais energia é direcionada para o canal SOFAR, garantindo uma maior propagação desses raios sonoros e uma menor TL.

Quando a coluna de água admite valores a rondar os 5000 metros, as conclusões relativamente à profundidade da fonte mantêm-se. Para este caso, foi utilizada a simulação 17, também com as fontes a 5 e 100 metros abaixo do nível da superfície.

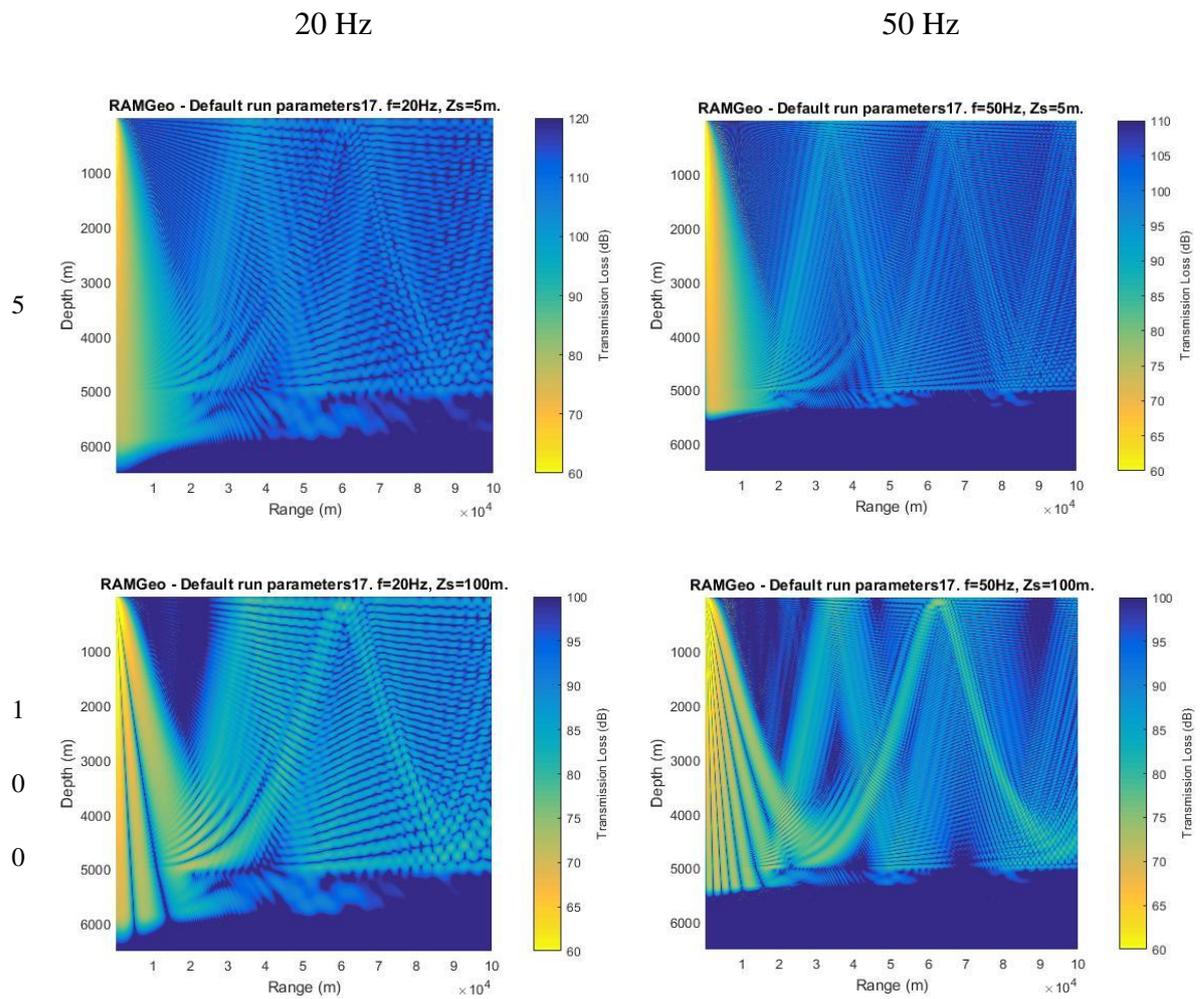


Figura 23 - Impacto da profundidade da fonte num ambiente com 5000 metros com a fonte a 5 e 100 metros de profundidade, em cima e em baixo, respetivamente. Resultados relativos à simulação número 17.

6 CONCLUSÕES

O constante aumento do ritmo a que os humanos e as suas atividades têm vindo a evoluir, desde o início da revolução industrial, tem introduzido pressões no ambiente e nos ecossistemas, incluindo nos oceanos.

Neste meio, uma das questões que tem ganho relevância com o passar do tempo é a introdução de energia extra por fontes antropogénicas, nomeadamente a energia sonora, e o modo como essa interage e influencia a vida marinha. A propagação do som é um ponto importante na determinação desse impacto humano no ambiente natural e varia de acordo com as características do meio e da fonte em análise.

Na primeira parte do trabalho (capítulos 2 a 4) procedeu-se a uma recolha bibliográfica com vista a fazer uma contextualização da temática da acústica no meio marinho, explorando a temática do som e como se propaga, do ambiente sonoro submarino e da modelação dos fenómenos de modelação. Na segunda parte realizou-se um estudo do modo como essas características influenciam o caminho das ondas sonoras, através da análise da perda energética por transmissão. Para tal, foram analisadas velocidades de propagação do som diferentes, tipos de solo e profundidades da fonte distintas, diversas frequências e a altura da coluna de água com diferentes configurações.

Foi possível verificar que as frequências mais baixas permitem uma maior penetração de energia no solo, resultando numa maior perda energética, e as mais altas tornam o campo mais complexo. O solo é uma componente importante neste tipo de análise já que, quanto mais denso, menor a sua capacidade de absorção da energia, permitindo que grande parte da energia regresse à coluna de água por reflexão.

A velocidade de propagação do som na água depende, maioritariamente, de três fatores, temperatura, pressão e salinidade. Estes fatores variam não só em profundidade como também em latitude ou área geográfica e, por esse razão, foram analisados três perfis diferentes. Destes, o perfil com velocidade constante, apenas ilustrativo, é o que admite menores distorções pelo meio. O aumento da velocidade de um modo linear com a profundidade, associado a zonas árticas, resulta na refração dos raios no sentido ascendente e interações com a superfície da coluna de água que permite a criação de um canal à superfície. Já o perfil de velocidades de Munk, associado a águas temperadas, provoca menos interações com a superfície, quando comparado com o perfil linear, mas, por outro lado, tem um maior contacto com o fundo. Neste perfil de velocidades é, ainda, possível ver e identificar as zonas de convergência com picos máximos de energia.

A localização da fonte é, também, um importante fator no modo como o som se propaga. Quanto mais perto do canal SOFAR, menores as perdas por transmissão da energia refratada para o canal, enquanto que, perto da superfície, resulta num número elevado de interações com esta interface superior.

A acústica no meio marinho é uma área de investigação ainda com muitos desafios, necessitando de um esforço comum e global para desenvolver modelos, completar e elaborar bases de dados acústicos, tanto a nível de fontes como também de sons e presenças animais. Este trabalho incidiu sobre o estudo de fontes pontuais e a sua propagação, mas em trabalhos futuros seria essencial analisar o modo como como essas fontes alteram comportamentos e provocam danos nos animais e ainda uma maior e melhor investigação na área da modelação, de modo a consolidar e aplicar técnicas existentes e a permitir novas técnicas de modelação de fontes múltiplas e previsão de ruído ambiente.

Por fim, é importante salientar a importância deste tema no contexto ambiental global, visto ter impacto direto na vida marinha, mas não só. Resultando em alterações de comportamento, como por exemplo padrões de mergulho e zonas de procriação, como também em mudanças na presença de animais, este é um problema que poderá ter graves implicações na qualidade de vida humana, indo ao encontro de diversos objetivos dos dezassete estabelecidos pela Organização das Nações Unidas, no âmbito da Agenda para o Desenvolvimento Sustentável 2030.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Buckingham, M. J. (1992). Ocean-acoustic Propagation Models. *Journal of Acoustique*.
- Cluster Maritime Français. (2014). Underwater noise : Economic and environmental challenges in the marine environment, (April).
- Convention on Biological Diversity. (2012). Scientific synthesis on the impacts of underwarer noise on marine and coastal biodiverisy and havitats (pp. 1–93).
- Costa, E. D. S., Medeiros, E. B., Federal, U., Gerais, D. M., Pampulha, C., Horizonte-mg, B., ... Simulation, N. (2010). Numerical Modeling and Simulation of Acoustic, *XXIX*, 15–18.
- Diachok, O. (1980). Arctic hydroacoustics. *Cold Regions Science and Technology*, 2(C), 186–201. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(80\)90074-9](https://doi.org/10.1016/0165-232X(80)90074-9)
- Discovery of Sound in the Sea. (2016). Science of Sound in the Sea. Retrieved from <http://www.dosits.org/>
- Duncan, A. J., & Maggi, A. L. (2006). A Consistent , User Friendly Interface for Running a Variety of Underwater Acoustic Propagation Codes. *Proceedings of Acoustics 2006*, (20–22 November, Christchurch, New Zealand), 471–477.
- European Commission. (2016). Good Environmental Status Descriptor 11: Energy Incl. Underwater Noise. Retrieved from http://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-11/index_en.htm
- Hatch, L. T., & Wright, A. J. (2007). A Brief Review of Anthropogenic Sound in the Oceans A Brief Review of Anthropogenic Sound in the Oceans. *International Journal of Comparative Psychology*, 20(2), 121–133. Retrieved from <http://escholarship.org/uc/item/5cj6s4r9>
- Hildebrand, J. (2004). Sources of Anthropogenic Sound in the Marine Environment. *Report to the Policy on Sound and Marine Mammals An International Workshop US Marine Mammal Commission and Joint Nature Conservation Committee UK London England*, 50(2), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.11.041>
- Hildebrand, J. A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 395, 5–20. <https://doi.org/10.3354/meps08353>
- Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., & Schmidt, H. (2011). Chapter 2: Wave propagation theory. In *Computational Ocean Acoustics* (Vol. 97, pp. 65–154). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8678-8>
- Maggi, A., & Duncan, A. (2010). Underwater Acoustic Propagation Modelling software –
-

-
- AcTUP V2.2L. Retrieved from <http://cmst.curtin.edu.au/products/actoolbox.cfm>
- MARPOL. (1978). Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (p. 75).
- Mellen, R. H., & Marsh, H. W. (1965). Underwater Sound in the Arctic Ocean, 3353(0).
- MMC. (2007). Marine Mammals and Noise, (March), 370.
- NOAA. (2017). National Oceanic and Atmospheric Administration. Retrieved May 10, 2017, from <http://www.noaa.gov/>
- NRC. (2003). *Ocean noise and marine mammals*. Washinton, D.C.: The National Academies Press. Retrieved from <http://www.nap.edu/catalog/10564.html>
- UNCLOS. (1997). United Nations Convention on the Law of the Sea Act 1996. *The International Journal of Marine and Coastal Law*, 12(3), 404–412. <https://doi.org/10.1163/15718089720491594>
- United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. *General Assembly 70 Session, 16301*(October), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Urick, R. (1975). *Principles of Underwater Sound*. New-York: McGraw-Hill.
- Urick, R. (1984). *Ambient Noise in the Sea*. *The Journal of the Acoustical Society of America*. <https://doi.org/10.1121/1.398683>
- WDCS. (2003). *Oceans of Noise: A WDCS Science Report*. Whale and Dolphin Conservation Society.
- Wenz, G. M. (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12), 1936. <https://doi.org/10.1121/1.1909155>
- Würsig, B., & Gailey, G. A. (2002). Marine mammals and aquaculture: conflicts and potential resolutions. *Responsible Marine Aquaculture*, 45–59. <https://doi.org/10.1079/9780851996042.0045>

ANEXO A – AMBIENTES SIMULADOS

Simulação	Perfil de Velocidades	Altura da Coluna de Água [m]	Tipologia do Fundo
1	Constante	2000	a
2	Constante	2000	b
3	Constante	3500	a
4	Constante	3500	b
5	Constante	5000	a
6	Constante	5000	b
7	Linear	2000	a
8	Linear	2000	b
9	Linear	3500	a
10	Linear	3500	b
11	Linear	5000	a
12	Linear	5000	b
13	Perfil de Munk	2000	a
14	Perfil de Munk	2000	b
15	Perfil de Munk	3500	a
16	Perfil de Munk	3500	b
17	Perfil de Munk	5000	a
18	Perfil de Munk	5000	b