

Modelação e Simulação de Comunicações Acústicas Intermitentes entre Veículos Marinhos Autónomos

Filipa Andreia Sequeira Mesquita

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientadores: Prof. Doutor João Pedro Castilho Pereira Santos Gomes

Prof. Doutor António Pedro Rodrigues de Aguiar

Júri

Presidente: Prof. Doutor Fernando Duarte Nunes

Orientador: Prof. Doutor João Pedro Castilho Pereira Santos Gomes

Vogais: Prof. Doutor António João Freitas Gomes da Silva

Prof. Doutor António Manuel dos Santos Pascoal

Outubro, 2014

Agradecimentos

O espaço limitado desta secção de agradecimentos, seguramente, não me permite agradecer, como devia, a todas as pessoas que, ao longo do meu Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores me ajudaram, direta ou indiretamente, a cumprir os meus objetivos e a realizar mais esta etapa da minha formação académica.

Desta forma, deixo apenas algumas palavras, poucas, mas um sentido e profundo sentimento de reconhecido agradecimento.

Ao Professor João Pedro Gomes, expresso o meu profundo agradecimento pela orientação e apoio que muito elevaram os meus conhecimentos científicos e, sem dúvida, muito estimularam o meu desejo de querer, sempre, saber mais e a vontade constante de querer fazer melhor. Agradeço também a oportunidade que me deu de me integrar no Instituto de Sistemas e Robótica e reconheço, com gratidão, não só a confiança que em mim depositou, desde o início, mas também, o sentido de responsabilidade que me inculuiu em todas as fases da dissertação.

Aos Meus Amigos, o meu profundo sentido de agradecimento ao Rui Costa pelo seu apoio e pela sua enorme disponibilidade em me ajudar sempre que necessitei, e à Cristina Fonseca os intermináveis desabafos ao telemóvel e pela partilha dos bons (e menos bons) momentos e pelos meus longos períodos de ausência dos últimos meses.

Ao meu namorado Ricardo Monteiro, que merece um agradecimento muito especial, pelo seu carinho e amizade, paciência e incondicional apoio que sempre demonstrou e pelas tantas horas de música que me deu a ouvir durante a escrita desta dissertação que me fizeram ultrapassar a culpa pelo tempo que a cada dia lhe subtraía ☺.

À Minha Família, em especial aos meus Pais um enorme obrigada por acreditarem sempre em mim e naquilo que faço e por todos os ensinamentos de vida. Espero que esta etapa, que agora termino, possa, de alguma forma, retribuir e compensar todo o carinho, apoio e dedicação que constantemente me oferecem. A eles, dedico todo este trabalho.

Resumo

Nesta dissertação propõe-se melhorar o realismo da comunicação entre veículos autônomos submarinos (AUV) de um pacote de *software* existente, que permite a simulação da execução de missões coordenadas envolvendo múltiplos AUV (NetMar_{sys} *Simulator*).

Atualmente, o modelo de comunicação implementado neste simulador é muito simplificado, não considerando características importantes do canal acústico submarino, tais como: perfil da velocidade do som; multipercurso existente no canal; perfil batimétrico.

Assim, o ponto de partida deste trabalho será a incorporação de código no NetMar_{sys} para a modelização da propagação acústica em ambiente submarino.

Numa primeira aproximação será considerado um modelo de canal determinista obtido com recurso a um simulador de propagação acústica baseado em *ray tracing* (Bellhop). Neste modelo determinista será imposto um modelo empírico obtido a partir de dados reais recolhidos no mar, que irá refletir o comportamento dinâmico do canal.

Por fim, partindo do modelo de propagação acústica do canal submarino, serão extrapoladas características importantes da ligação ponto-a-ponto entre múltiplos AUV, nomeadamente o ritmo máximo de transmissão suportado pelo canal acústico. Para obter o ritmo máximo de transmissão, serão utilizados métodos baseados em hipóteses realistas, em linha com o estado da arte, para o cálculo da capacidade de canal, que permitem incluir nas suas expressões o comportamento estocástico do canal. A partir dos valores de capacidade de canal obtidos irá também ser definido o critério de decisão que será utilizado para validar a entrega de mensagens de sincronização trocadas entre os AUV.

Palavras chave: Veículos autônomos submarinos, comunicações acústicas submarinas, propagação acústica submarina, modelo de canal, capacidade de canal.

Abstract

This thesis aims to improve the realism of communication between autonomous underwater vehicles (AUV) from an existing software package that allows the simulation of the execution of coordinated missions involving multiple AUV (NetMar_{sys} Simulator).

Currently, the communication model implemented in NetMar_{sys} is oversimplified, as important underwater acoustic channel characteristics are not considered, such as: the speed of sound profile; multipath channel; bathymetric profile.

Therefore, the starting point of this work will be embedding code on NetMar_{sys} to modulate the acoustic propagation in the underwater environment.

Firstly, a deterministic channel model obtained using an acoustic propagation simulator based on ray tracing (Bellhop) will be considered. Next, the deterministic model will be combined with an empirical model derived from real data collected at sea, which will reflect the channel's dynamic behavior.

Lastly, from the acoustic propagation model, important characteristics of the point-to-point link between multiple AUV will be extrapolated, namely the maximum transmission rate can be supported by the acoustic channel. In order to calculate the maximum transmission rate, methods based on realistic assumptions, that constitute the current state of the art, to calculate the channel capacity, which allow the inclusion of the stochastic channel behavior in their equations, will be employed. Thus, from these channel capacity values it will be also defined the criterion decision in the delivery of synchronization messages exchanged between AUV.

Keywords: Underwater autonomous vehicles, underwater acoustic communications, underwater acoustic propagation, channel modeling, channel capacity.

Conteúdo

| | |
|--|-----|
| Agradecimentos | ii |
| Resumo..... | iv |
| Abstract | vi |
| Lista de Figuras | x |
| Lista de Tabelas | xiv |
| Acrónimos | xvi |
| 1 Introdução..... | 1 |
| 1.1 Introdução ao estudo | 1 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 1.3 Organização da dissertação..... | 2 |
| 2 Canal Acústico Submarino | 3 |
| 2.1 A superfície e o fundo do mar | 3 |
| 2.2 Águas rasas e águas profundas | 3 |
| 2.3 Velocidade de propagação do som na água..... | 4 |
| 2.4 Multipercurso | 7 |
| 2.5 Perdas de propagação entre a fonte emissora e recetora..... | 9 |
| 2.6 Ruído do canal acústico..... | 10 |
| 2.7 <i>Signal-to-Noise Ratio</i> (SNR) | 12 |
| 2.8 Efeito de Doppler | 12 |
| 2.9 Largura de banda..... | 13 |
| 2.10 Bellhop..... | 14 |
| 3 Modelo de Canal | 17 |
| 3.1 Identificação de canal..... | 18 |
| 3.1.1 Descrição da experiência no mar | 18 |
| 3.1.2 Caraterização de canal | 20 |
| 3.1.3 Aplicação da EMD..... | 21 |
| 3.1.4 Caraterização estatística da componente lenta da resposta impulsiva..... | 23 |
| 3.2 Modelo de simulação para o canal | 26 |
| 3.2.1 Caraterização da resposta impulsiva determinística do canal | 27 |
| 3.2.2 Resposta impulsiva variante no tempo | 29 |
| 3.3 Modelo estatístico de canal - <i>scattering function</i> | 30 |
| 4 Capacidade de Canal | 35 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Estrutura do modelo de comunicações..... | 37 |
| 4.2 | Limites de capacidade | 41 |
| 4.2.1 | Capacidade coerente..... | 41 |
| 4.2.2 | Limite inferior da capacidade não coerente | 42 |
| 5 | Networked Marine Systems Simulator | 45 |
| 5.1 | <i>Overview</i> – Estrutura do NetMarSys..... | 45 |
| 5.2 | Bloco 1 – Definição do ambiente da missão | 46 |
| 5.3 | Bloco 3 - Veículos | 48 |
| 5.4 | Simulador realista..... | 50 |
| 5.4.1 | Definição do ambiente da missão – Novos blocos..... | 51 |
| 5.4.2 | Bloco <i>Communication</i> | 52 |
| 5.4.3 | Veículos – Novos blocos | 53 |
| 5.4.4 | <i>Underwater channel</i> | 54 |
| 5.4.5 | Critério de decisão da troca de mensagens de sincronização entre veículos..... | 56 |
| 6 | Resultados de Simulação..... | 57 |
| 6.1 | Variação da capacidade de canal em função da distância..... | 57 |
| 6.2 | Resultados do simulador NetMar _{sys} | 64 |
| 6.3 | Discussão de resultados obtidos na simulação do NetMar _{sys} | 74 |
| 7 | Conclusões e Trabalhos Futuros..... | 77 |
| | Bibliografia..... | 79 |
| | Anexo A – Bellhop | 83 |
| | Anexo B.1 – <i>Empirical Mode Decomposition</i> | 85 |
| | Anexo B.2 – <i>Intrinsic Mode Functions (IMFs)</i> | 90 |
| | Anexo C – Densidade Espectral de Potência de um Sinal na Presença do Deslocamento de Doppler .. | 93 |
| | Anexo D – NetMar _{sys} | 94 |
| | Anexo E - Estrutura do Modelo de Comunicações..... | 96 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2-1: Perfil típico da velocidade do som no oceano [6]. | 7 |
| Figura 2-2: Zona de sombra do canal submarino [9]. | 8 |
| Figura 2-3: Propagação multipercurso. Este exemplo representa 4 diferentes tipos de raios entre a fonte emissora e recetora. A – raio direto; B – raio com reflexão na superfície; C – raio com reflexão no fundo; D – raio com reflexão no fundo e na superfície. | 9 |
| Figura 2-4: Estrutura Bellhop [19]. | 15 |
| Figura 3-1: Área de trabalho da experiência CALCOM'10. | 18 |
| Figura 3-2: Respostas impulsivas do canal que chegam a cada um dos 16 hidrofones para um dado instante de tempo t . | 19 |
| Figura 3-3: Evolução ao longo do tempo das estimativas dos ganhos das respostas impulsivas que chegam ao hidrofone 8. | 20 |
| Figura 3-4: Separação da componente lenta da componente rápida da resposta impulsiva do canal. | 23 |
| Figura 3-5: Resultado do comando AIC aplicado ao percurso correspondente ao raio direto. | 25 |
| Figura 3-6: Diagrama de pólos e zeros no plano complexo Z obtidos através do modelo AR. | 26 |
| Figura 4-1: Modelo de comunicação puramente com ruído. | 40 |
| Figura 4-2: Equivalente discreto da forma dos impulsos do recetor em banda de base. | 40 |
| Figura 5-1: Interface principal do NetMar _{sys} . | 46 |
| Figura 5-2: Menus Current, Communications e Coordination que definem o ambiente da missão. | 48 |
| Figura 5-3: Estrutura interna dos veículos. | 49 |
| Figura 5-4: Estrutura interna do bloco Underwater Channel - Bloco Losses and Delays. | 50 |
| Figura 5-5: Critério de decisão utilizado atualmente na troca de mensagens de sincronização entre veículos autónomos submarinos [49]. | 50 |
| Figura 5-6: Blocos criados na nova versão do simulador que definem o ambiente da missão. | 52 |
| Figura 5-7: Nova versão do bloco Communications. | 53 |
| Figura 5-8: Parâmetros incluídos na estrutura dos modelos dos veículos na nova versão do simulador. | 54 |
| Figura 5-9: Nova versão do bloco Underwater channel. | 55 |
| Figura 5-10: Nova versão do bloco Losses and Delays. | 55 |
| Figura 6-1: Valores de referência de Capacidade de Canal em função da distância para valores de potência de sinal transmitido crescentes com o aumento da distância. | 58 |
| Figura 6-2: Potência de transmissão utilizada nas simulações. | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 6-3: Valores de referência de Capacidade de Canal em função da distância para valores constantes de potência de sinal transmitido. | 59 |
| Figura 6-4: Valores de Capacidade de Canal Coerente em função da distância para valores de potência de sinal transmitido crescentes. | 60 |
| Figura 6-5: Valores de Capacidade Coerente em função da distância para valores constantes de potência de sinal transmitido. | 60 |
| Figura 6-6: Valores de Capacidade Coerente em função da distância para valores de potência de sinal transmitido crescentes e valores da velocidade do som variáveis com a profundidade. | 61 |
| Figura 6-7: Valores de Capacidade Coerente em função da distância para a potência de sinal transmitido constante e valores da velocidade do som variáveis com a profundidade. | 61 |
| Figura 6-8: Perfil da velocidade do som utilizado na simulação com profundidade de 5000 metros. ... | 61 |
| Figura 6-9: Valores de Capacidade Coerente em função da distância para potência de sinal transmitido constante, perfil da velocidade do som constante (1500 ms^{-1}) e profundidade de 1200 metros. | 62 |
| Figura 6-10: Valores de Capacidade Coerente em função da distância para potência de sinal transmitido constante, perfil da velocidade do som variável e profundidade de 1200 metros. | 62 |
| Figura 6-11: Perfil da velocidade do som utilizado na simulação com profundidade de 1200 metros. | 63 |
| Figura 6-12: Percurso realizado pelos veículos na simulação. | 66 |
| Figura 6-13: Valores da capacidade coerente de canal (a azul) e do limite inferior da capacidade (a verde) em cada instante da simulação. | 66 |
| Figura 6-14: Distância entre os dois veículos autónomos submarinos em cada instante da simulação. | 67 |
| Figura 6-15: Mensagens enviadas pelos veículos em cada instante da simulação - 0 significa que a mensagem não foi enviada e 1 representa o sucesso no envio. A taxa de sucesso de envio obtida foi de 93.3609%. | 67 |
| Figura 6-16: Probabilidade de erro na receção da mensagem em cada instante da simulação quando $L_{peakDS} < C_{th}$ | 68 |
| Figura 6-17: Perfil batimétrico em cada instante da simulação. | 68 |
| Figura 6-18: Percurso realizado pelos veículos na simulação. | 69 |
| Figura 6-19: Valores da capacidade coerente de canal (a azul) e do limite inferior da capacidade (a verde) em cada instante da simulação. | 69 |
| Figura 6-20: Distância entre os dois veículos autónomos submarinos em cada instante da simulação. | 70 |
| Figura 6-21: Mensagens enviadas pelos veículos em cada instante da simulação - 0 significa que a mensagem não foi enviada e 1 representa o sucesso no envio. A taxa de sucesso de envio obtida foi de 99.6485%. | 70 |
| Figura 6-22: Probabilidade de erro na receção da mensagem em cada instante da simulação quando $L_{peakDS} < C_{th}$ | 71 |
| Figura 6-23: Perfil batimétrico em cada instante da simulação. | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 6-24: Valores da capacidade coerente de canal (a azul) e do limite inferior da capacidade (a verde) em cada instante da simulação..... | 72 |
| Figura 6-25: Distância entre os dois veículos autónomos submarinos em cada instante da simulação. | 72 |
| Figura 6-26: Probabilidade de erro na receção da mensagem em cada instante da simulação quando $L_{peakDS} < C_{th}$ | 73 |
| Figura 6-27: Mensagens enviadas pelos veículos em cada instante da simulação - 0 significa que a mensagem não foi enviada e 1 representa o sucesso no envio. A taxa de sucesso de envio obtida foi de 96.9390%. | 73 |
| | |
| Figura B.1-1: Sinal de teste. | 86 |
| Figura B.1-2: Localização dos extremos locais (máximos e mínimos) do sinal de teste..... | 86 |
| Figura B.1-3: Envolvente superior e inferior do sinal de teste. | 87 |
| Figura B.1-4: Sinal de teste, envolvente superior, envolvente inferior e média das envolventes..... | 87 |
| Figura B.1-5: Sinal de teste e o resíduo da 1ª iteração do algoritmo de peneira. | 88 |
| Figura B.1-6: Primeira IMF obtida ao fim de sete iterações. | 88 |
| Figura B.1-7: Resíduo obtido após extração da primeira IMF ao sinal de teste original. | 89 |
| Figura B.1-8: IMFs e resíduo resultantes da decomposição do sinal de teste. | 89 |
| | |
| Figura B.2-1: Intrinsic Mode Functions obtidas após a aplicação do algoritmo EMD ao raio direto da resposta impulsiva representado na Figura 3-3. | 92 |
| | |
| Figura D-1: Exemplo de matriz com definição de trajetória. | 94 |
| Figura D-2: Plot da missão definida na matriz da Figura B-1 (a vermelho) e trajetória dos veículos ao longo da simulação a azul. | 95 |
| | |
| Figura E-1: Estrutura do modelo de comunicações que utilizado nesta dissertação. | 96 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 2-1: Coeficientes da equação de Del Grosso. | 6 |
| Tabela 2-2: Largura de banda disponível baseada no alcance de comunicação..... | 13 |
| Tabela 3-1: Coeficientes do Modelo AR..... | 26 |
| Tabela 6-1: Características do sinal transmitido pelos veículos autónomos submarinos. | 64 |
| Tabela B-1: Descrição do ficheiro de entrada do Bellhop (environmental file)..... | 83 |
| Tabela B-2: Descrição do ficheiro que contém o perfil batimétrico (bathymetry file)..... | 84 |

Acrónimos

| | |
|--------------|--|
| AUV | <i>Autonomous Underwater Vehicles</i> |
| SOFAR | <i>Sound Fixing and Ranging</i> |
| WSSUS | <i>Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering</i> |
| EMD | <i>Empirical Mode Decomposition</i> |
| IMF | <i>Intrinsic Mode Function</i> |
| AR | Auto Regressivo |
| AIC | <i>Akaike's Information Criterion</i> |
| GEBCO | <i>General Bathymetric Chart of the Oceans</i> |
| SNR | <i>Signal to Noise Ratio</i> |
| PAM | <i>Pulse Amplitude Modulation</i> |
| UTM | Universal Transversal de Mercator |

1 Introdução

1.1 Introdução ao estudo

Cerca de dois terços da superfície da Terra é coberta por oceanos, onde grande parte está inexplorada, fazendo com que exista ainda uma grande quantidade de recursos naturais a serem descobertos. Existe também o facto de os oceanos serem responsáveis por um grande impacto no clima a nível global, para além de que em alguns casos, tal como em situações de guerra, os oceanos são um local natural tanto para ataque como para defesa.

Deste modo, o desenvolvimento de estratégias de controlo distribuído envolvendo múltiplos veículos marinhos autónomos, desperta atualmente muito interesse na comunidade científica, uma vez que estes veículos oferecem um potencial para ampliar as capacidades de intervenção para além do alcance atual, e contribuir significativamente ou até mesmo substituir, os seres humanos em atividades subaquáticas que envolvam alto risco.

Para executar este tipo de missões desafiadoras, técnicas avançadas de controlo de movimento cooperativo desempenham um papel fundamental. Embora já sejam conhecidos alguns resultados que permitem ter uma ideia do impacto das falhas de comunicação no desempenho global do sistema, os modelos subjacentes não estão bem adaptados às especificidades dos canais acústicos submarinos, tais como velocidade de propagação relativamente reduzida, forte distorção devido ao multipercurso, e reduzida largura de banda disponível.

Assim, nesta dissertação vão ser considerados cenários em que diversos veículos robóticos marinhos (de superfície e completamente submersos) cooperam e se coordenam para executar tarefas de monitorização ambiental no oceano, ou de mapeamento rápido de habitats marinhos. Nestes casos não é possível a transmissão com ondas eletromagnéticas devido à alta condutividade do meio de propagação, sendo a transmissão de informação por via acústica a única opção viável para distâncias superiores a algumas dezenas de metros.

Vai ser também realizado nesta dissertação, o estudo do efeito das falhas de comunicação no desempenho de missões coordenadas envolvendo veículos marinhos autónomos. Apesar de se tratar de um trabalho de simulação, pretende-se modelizar de forma relativamente fiável e em tempo útil, a propagação em ambiente submarino para que seja possível tirar conclusões sobre o impacto provável num sistema real.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste na incorporação de código (em ambiente Matlab e Simulink) num pacote de *software* existente, designado por *Networked Marine Systems Simulator* (NetMar_{sys}), desenvolvido no Instituto Superior Técnico (IST) / Instituto de Sistemas e Robótica (ISR) e doravante designado por simulador NetMar_{sys}.

Este simulador, que permite a simulação da execução de missões coordenadas envolvendo múltiplos veículos autónomos, atualmente entra apenas em linha de conta para transmissão de informação com o comprimento da mensagem, distância entre veículos e a posição dos veículos na área em que é realizada a simulação, não tendo este em consideração outras características importantes do canal acústico, tais como, o multipercurso, a variação do perfil da velocidade do som com a profundidade e o ritmo máximo de transmissão suportado pelo canal.

Assim, neste simulador vai ser incorporado código que irá permitir obter o modelo de propagação acústica em ambiente submarino, entre dois pontos no espaço, obtidas através de um simulador baseado em *ray tracing*, Bellhop. Ao modelo obtido a partir do Bellhop vai ser adicionado o comportamento dinâmico do canal obtido a partir de dados reais, o que vai permitir entrar em linha de conta com as variações ao longo do tempo do canal acústico submarino.

A partir do modelo de canal vão ser extrapoladas características importantes da ligação ponto-a-ponto entre múltiplos veículos autónomos, nomeadamente o ritmo máximo de transmissão do canal. Para obter o referido ritmo máximo de transmissão vão ser utilizados métodos baseados em hipóteses realistas, em linha com o estado da arte sobre este tema, que permitem entrar em linha de conta com o comportamento estocástico ao longo do tempo do canal.

1.3 Organização da dissertação

Este documento está dividido em sete capítulos.

No Capítulo 2 vão ser apresentadas as principais características do ambiente acústico submarino que vão permitir compreender os agentes responsáveis pela distorção dos sinais acústicos.

No Capítulo 3 irá ser proposto o modelo de canal acústico submarino que vai ser considerado nesta dissertação, que permitirá entrar em linha de conta com o comportamento dinâmico ao longo do tempo do canal obtido a partir de dados reais recolhidos em alto mar.

No Capítulo 4 vão ser apresentados os limites de capacidade de canal que vão definir a o ritmo máximo de transmissão suportado pelo canal acústico e que irão servir como critério de decisão na entrega de mensagens trocadas entre veículos.

Apresenta-se ainda o Capítulo 5, dedicado à descrição do simulador NetMar_{sys} e o modo como este foi adaptado para entrar em linha de conta com as características físicas do canal acústico submarino, e o Capítulo 6 com os principais resultados obtidos em simulação.

Por fim, o Capítulo 7, onde se mencionam as conclusões e futuro trabalho a desenvolver.

2 Canal Acústico Submarino

O canal acústico submarino é diferente em relação aos meios de transmissão terrestres em vários aspectos, apresentando estas características específicas no que diz respeito à velocidade de propagação do som na água, à atenuação, ao ruído, à interferência multipercurso, à largura de banda e à potência de transmissão [1].

Os simuladores e as análises realizadas em redes acústicas submarinas devem entrar em linha de conta com todas estas características do canal acústico submarino para que os resultados dos estudos apresentem boa fidelidade.

Neste capítulo vai ser feito um breve enquadramento teórico do ambiente submarino (que influencia a propagação das ondas acústicas) e do canal acústico, que vão sustentar todo o estudo realizado nesta dissertação. Irá também ser introduzido o modelo de propagação que vai ser utilizado nesta dissertação para a simulação do meio submarino.

2.1 A superfície e o fundo do mar

O oceano pode ser caracterizado como um guia de ondas acústico limitado pela superfície do mar e pelo fundo oceânico, possibilitando esta configuração que a energia acústica fique retida entre estas duas superfícies, o que permite a propagação do som a longas distâncias [2].

A superfície do mar caracteriza-se por ser refletora o que permite a reflexão da onda acústica. Contudo, a reflexão provoca tanto perdas, assim como, o espalhamento da onda acústica, que originam fenómenos de eco e reverberação, que serão mais pronunciados quanto maior for a altura das ondas, a turbulência provocada pelo vento na superfície do mar e a atenuação provocada pelas bolhas de água, que influenciam negativamente a propagação acústica. No caso em que as ondulações do mar são muito pequenas, a superfície é considerada plana e esta apresenta um comportamento semelhante a um refletor perfeito [3].

Com um comportamento semelhante ao da superfície, a interação da onda acústica no fundo do mar afeta a propagação devido à reverberação, perdas na reflexão e à atenuação devido à existência de porosidade dos sedimentos no fundo oceânico. Contudo, estes efeitos, apresentam uma maior dificuldade de serem calculados devido à composição diversa e estratificada do fundo, a qual varia desde rocha dura até lama macia, e que exibem diferentes características de reflexão [2]. Nestes efeitos, também estão incluídas as variações bruscas na densidade e na velocidade do som [4].

2.2 Águas rasas e águas profundas

A distinção entre águas rasas e águas profundas não é exata, mas tipicamente as águas profundas são caracterizadas por terem uma profundidade superior a 2000m [2].

De um modo geral, as águas rasas são as águas da plataforma continental, que têm uma profundidade de aproximadamente 200m. Por esta razão, as regiões de águas rasas são definidas como tendo profundidades inferiores a 200m.

Apesar de não existirem critérios rígidos que definam as regiões de águas rasas, os existentes para além de se basearem nas propriedades da propagação do som no meio, entram também em linha de conta com a frequência da fonte emissora e com as interações da onda com o fundo do mar, o que resulta em uma relação que associa o comprimento de onda com as dimensões características do guia de ondas acústico. De acordo com [5], uma região pode ser classificada como sendo de águas rasas se a relação abaixo for satisfeita:

$$r^2 \gg \frac{z^2}{\lambda} \quad (2.1)$$

Onde,

- r é a distância entre a fonte e o recetor;
- z a profundidade do canal;
- λ o comprimento de onda do sinal acústico.

Caso essa relação não seja satisfeita, considera-se que a região é definida como águas profundas.

2.3 Velocidade de propagação do som na água

Em 1826, o cientista suíço Jean-Daniel Colladon (1802-1893) e o matemático francês Jacques Charles Francois Sturm (1803-1855), mediram pela primeira vez a velocidade do som no lago de Genebra (Suíça), utilizando para tal um sistema em que é emitido um sinal luminoso associado ao tocar de um sino submerso em água. O intervalo de tempo entre a emissão da onda e a sua receção foi cronometrado, onde obtiveram um valor de 1435 m/s para uma temperatura da água de 8.1°C, estando já este valor muito próximo do que é medido atualmente (aproximadamente 1500m/s) [6].

Atualmente, as expressões empíricas para o cálculo da velocidade do som no meio aquático são obtidas através de três variáveis independentes: a temperatura (T) em graus centígrados, a salinidade (S) em partes por milhão (ppm) e a profundidade (z) em metros ou pressão (P) em Kg/cm², sendo que a influência da temperatura é a maior entre as três variáveis.

Assim, a velocidade do som no mar está relacionada com os parâmetros físicos do oceano e pode ser vista como uma função que aumenta com temperatura, profundidade/pressão e a salinidade. Até aos dias de hoje, não foi encontrada nenhuma outra propriedade física que afete a velocidade de som no oceano [6].

Abaixo encontram-se descritas as principais equações a partir das quais se obtém o perfil da velocidade do som.

- **Fórmula de Mackenzie**

Uma forma possível de representar a dependência da velocidade do som, c (medida em m/s), com a temperatura, profundidade e salinidade é através da fórmula de Mackenzie [6] dada pela expressão:

$$c = 1448.96 + 4.591T - 5.304 * 10^{-2}T^2 + 2.374 * 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 * 10^{-2}z + 1.675 * 10^{-7}z^2 - 1.025 * 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 * 10^{-13}Tz^3 \quad (2.2)$$

Nesta expressão excluem-se a presença de fatores externos tais como organismos biológicos e bolhas de ar.

Esta expressão é válida para os seguintes intervalos de temperatura, profundidade e salinidade [6]:

- $0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$;
- $0 \text{ m} \leq z \leq 8000 \text{ m}$;
- $30 \text{ ppt} \leq S \leq 40\text{ppt}$.

A expressão do cálculo da velocidade dada pela fórmula de Mackenzie (equação (2.2)) é tipicamente utilizada para computações rápidas em águas com uma profundidade até aos 8000m.

- **Equações de Del Grosso:**

Alternativamente existe a expressão do cálculo da velocidade do som obtido por V.A. Del Grosso [7], mais precisa que a equação de Mackenzie, que é tipicamente utilizada para águas com uma profundidade superior a 1000m e cuja expressão é dada por:

$$c(S, T, P) = C_{000} + \Delta C_T + \Delta C_S + \Delta C_P + \Delta C_{STP} \quad (2.3)$$

Onde,

$$\begin{aligned} \Delta C_T(T) &= C_{T1}T + C_{T2}T^2 + C_{T3}T^3 \\ \Delta C_S(S) &= C_{S1}S + C_{S2}S^2 \\ \Delta C_{STP} &= C_{TP}TP + C_{T3P}T^3P + C_{TP2}TP^2 + C_{T2P2}T^2P^2 + C_{TP3}TP^3 + C_{ST}ST \\ &\quad + C_{ST2}ST^2 + C_{STP}STP + C_{S2TP}S^2TP + C_{S2T2}S^2P^2 \end{aligned}$$

Os coeficientes presentes na equação (2.3) encontram-se indicados na Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Coeficientes da equação de Del Grosso.

| Coeficiente | Valor Numérico | Coeficiente | Valor Numérico |
|-------------|----------------|--------------|----------------|
| <i>C000</i> | 1402,392 | <i>CTP</i> | 0.6353509E-2 |
| <i>CT1</i> | 0.5012285E1 | <i>CT2P2</i> | 0.2656174E-7 |
| <i>CT2</i> | -0.551184E-1 | <i>CTP2</i> | -0.1593895E-5 |
| <i>CT3</i> | 0.221649E-3 | <i>CTP3</i> | 0.5222483E-9 |
| <i>CS1</i> | 0.1329530E1 | <i>CT3P</i> | -0.4383615E-6 |
| <i>CS2</i> | 0.1288598E-3 | <i>CS2P2</i> | -0.1616745E-8 |
| <i>CP1</i> | 0.1560592 | <i>CST2</i> | 0.9688441E-4 |
| <i>CP2</i> | 0.2449993E-4 | <i>CS2TP</i> | 0.4857614E-5 |
| <i>CP3</i> | -0.8833959E-8 | <i>CSTP</i> | -0.3406824E-3 |
| <i>CST</i> | -0.1275936E-1 | | |

É importante referir que a velocidade do som varia com a latitude, longitude, profundidade e estação do ano, sendo apenas possível considerar a velocidade válida para uma determinada localização e para uma determinada altura do ano.

Na Figura 2-1 está representado um perfil típico da velocidade do som no mar [6], verificando-se a existência de várias camadas hidrográficas, nomeadamente:

- **Camada de superfície** (*Surface Layer*): Caracterizada por ter uma velocidade do som que pode variar diariamente devido à alteração da temperatura da água, resultante da influência solar. Nesta camada, pode também existir pela ação do vento, uma mistura das águas superficiais com as mais profundas o que tende a manter a temperatura constante. Por outro lado, nos dias que são consecutivamente calmos e ensolarados, esta mistura de água dissipa-se, criando uma temperatura decrescente à medida que a profundidade vai aumentando.
- **Termalidade sazonal** (*Seasonal Thermocline*): Esta representa uma zona em que a temperatura varia com a profundidade, sendo caracterizada geralmente por uma inclinação negativa térmica ou por um gradiente da velocidade decrescente. Significa assim, que a temperatura e a velocidade do som diminuem à medida que a profundidade aumenta, estando esta diminuição diretamente relacionada com a altura do ano em que é medida.
- **Termalidade principal ou termoclina** (*Main Thermocline*): Região em que a temperatura apresenta uma grande variação ao longo das estações.
- **Camada isotérmica profunda** (*Deep Isothermal Layer*): Região que apresenta uma temperatura quase constante (aproximadamente 3^o-4^oC) em que a velocidade de som aumenta com a profundidade devido ao efeito do aumento da pressão.

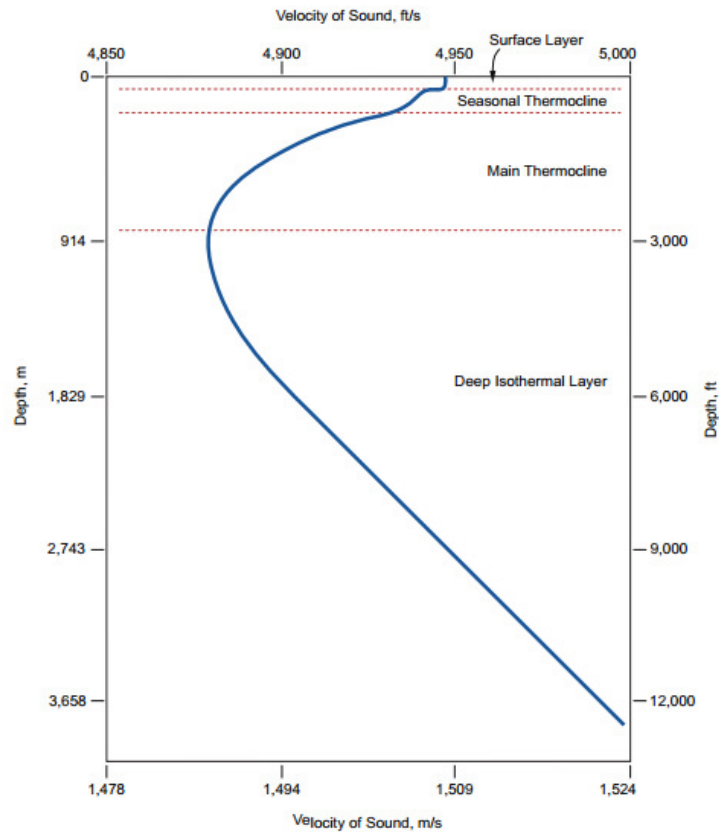


Figura 2-1: Perfil típico da velocidade do som no oceano [6].

Devido à variação da velocidade do som com a profundidade, uma onda sonora sofre efeitos de refração, isto é, sofre mudanças de direção. Como resultado geral da refração, podemos dizer que as ondas acústicas têm tendência a se guiarem para a zona onde a velocidade do som é menor. Consequentemente, a zona próxima dos 1000 m de profundidade (mínimo da velocidade do som) funciona como uma zona de “concentração” das ondas acústicas (tendo elas origem na camada acima ou abaixo desse nível). Para esta profundidade o meio comporta-se como um guia de ondas acústicas, designado por canal SOFAR – *Sound Fixing and Ranging* [2]. Este canal de som é muito eficiente na transmissão acústica, porque a energia sonora ao ser focalizada não sofre dispersão e pode ser transmitida a grandes distâncias. A título de exemplo, as ondas acústicas que entram no canal SOFAR, como sofrem pouca atenuação, podem ser registadas a grandes distâncias.

2.4 Multipercurso

O multipercurso é causado pela reflexão do sinal acústico no fundo, na superfície ou em algum objeto presente no oceano que faz com que o recetor receba mais do que um sinal, uma vez que a onda pode interferir com ela própria de forma construtiva ou destrutiva.

No caso construtivo, garante-se a propagação da onda a grandes distâncias e, no caso contrário, a propagação é atenuada e existirá uma perda de sinal [8]. O multipercurso é também causado pela refração da onda acústica na água devido à variação da velocidade do som na água. Este fenómeno

tem como consequência a deterioração da onda acústica, geralmente definido como, desvanecimento multipercurso.

Os diferentes caminhos de propagação do sinal acústico geram diferentes atrasos e diferentes ângulos de chegada do sinal ao recetor o que vai provocar também interferência intersímbolica (ISI) no sinal.

A onda acústica no mar tipicamente propaga-se em trajetórias curvilíneas uma vez que as ondas sonoras sofrem o efeito da refração em função da profundidade, provocando o encurvamento dos raios (ver Figura 2-2). Em alguns casos a onda pode não atingir determinadas regiões designadas por zonas de sombra, isto é, zonas onde o som não se propaga e também representada na Figura 2-2. O mesmo fenómeno é responsável pela formação de zonas de convergência, que se caracterizam por serem locais onde transmissões provenientes de trajetórias diferentes convergem em tempos diferentes (Seção 2.3 - canal SOFAR). Este fenómeno de convergência ocorre mais intensamente em águas profundas no sentido do meio com menor velocidade de propagação.

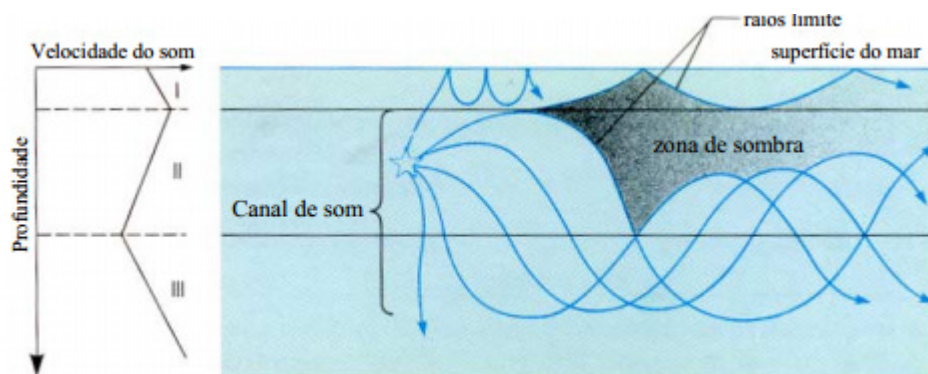


Figura 2-2: Zona de sombra do canal submarino [9].

Em águas rasas ocorre o fenómeno de reverberação causado por múltiplas reflexões do sinal transmitido no fundo e na superfície do oceano. A reverberação também provoca a interferência intersímbolica uma vez que os sinais oriundos da mesma fonte chegam ao recetor com trajetórias distintas e em diferentes intervalos de tempo.

Na Figura 2-3 é possível ver os percursos típicos do sinal, com origem na fonte emissora, que ocorrem no canal acústico [10].

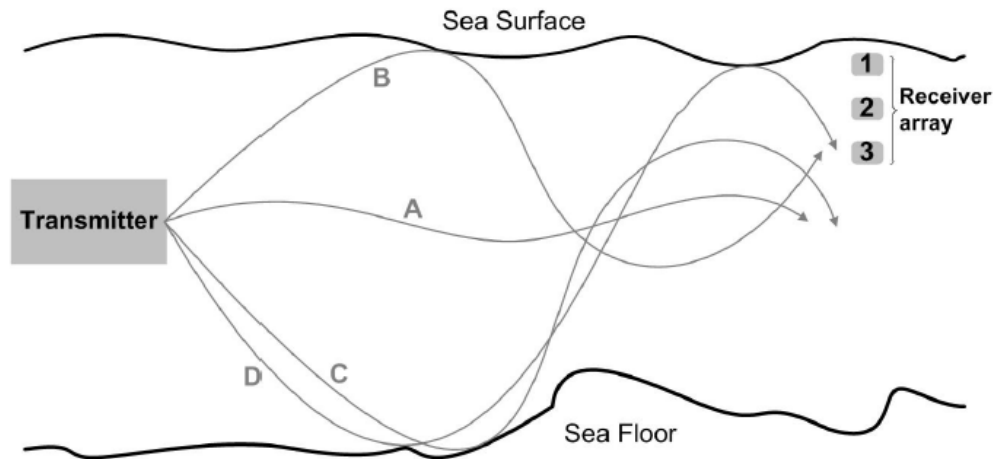


Figura 2-3: Propagação multipercursos. Este exemplo representa 4 diferentes tipos de raios entre a fonte emissora e recetora. A – raio direto; B – raio com reflexão na superfície; C – raio com reflexão no fundo; D – raio com reflexão no fundo e na superfície.

Devido à natureza refrativa do meio aquático, ocorre a possibilidade do raio direto propagar-se mais lentamente que um raio que percorreu uma distância mais elevada.

2.5 Perdas de propagação entre a fonte emissora e recetora

As perdas de propagação estão associadas à atenuação que existe no percurso efetuado pela onda no meio aquático. Estas perdas, que são fortemente influenciadas pelo aumento da frequência utilizada pela fonte emissora, estão associadas a [11]:

- Perdas por reflexão;
- Perdas devido ao espalhamento/*scattering* da onda;
- E perdas provocadas pela absorção do meio.

As perdas por reflexão da onda na superfície e no fundo do mar apresentam um carácter aleatório que se revela difícil de modelar, existindo na literatura apenas expressões aproximadas para o cálculo da mesma [12].

As segundas têm uma natureza geométrica dado que resultam do facto de a onda, ao afastar-se da fonte emissora, propagar-se por uma superfície que aumenta com o aumento da distância percorrida pela onda. Assim, as perdas devido ao espalhamento/*scattering* da onda provocam uma diminuição da potência que aumenta à medida que a onda se afasta da fonte. Estas perdas, expressas em dB, podem ser obtidas através de [11]:

$$A_d = 10 * m \log D \quad (2.4)$$

Onde,

- D representa a distância entre o emissor e o recetor em metros;
- m , cujo valor varia entre 1 (espalhamento cilíndrico) e 2 (espalhamento esférico), define a geometria da propagação e designa-se por fator de dispersão espacial.

As perdas de absorção existentes no meio correspondem à parte da energia acústica, transmitida pela fonte emissora, que se transforma em energia térmica. Este fenómeno ocorre devido à força de atrito provocada pela passagem da onda na água. Estas perdas podem ser obtidas utilizando a fórmula de Thorp dada por [13]:

$$10 \log a(f) = 0,11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f} + 2,75 * 10^{-4} f^2 + 0,003 \quad (2.5)$$

Onde,

- $a(f)$ representam as perdas por absorção;
- f é frequência em kHz utilizada na comunicação submarina.

De acordo com [14] é possível combinar numa única expressão as perdas de absorção com as perdas por espalhamento, sendo a **atenuação total** $A(l, f)$ em dB, em função da distância D e da frequência f , dada por:

$$10 \log A(l, f) = m * 10 \log D + D * 10 \log a(f) \quad (2.6)$$

2.6 Ruído do canal acústico

O ruído do canal acústico é considerado como uma das características mais importantes do oceano. Este ruído pode ser provocado por diversos fatores:

- O ruído presente no próprio recetor e que tem origem no local onde o mesmo está posicionado. Este pode estar relacionado com o funcionamento do próprio veículo submarino onde se encontra o recetor, devido, por exemplo, ao deslocamento do veículo e do sistema de propulsão instalado.
- O ruído ambiente que pode ser interpretado como um ruído de fundo presente no meio submarino com origem em fontes diversas, tais como, a ondulação provocada pelas ondas na superfície do mar que causa turbulência, pelo vento, pelo movimento irregular da massa de água provocado pelas correntes e embarcações e pelo ruído térmico. Este tipo de ruído é fortemente influenciado pela frequência utilizada, pelo local onde se encontra o recetor e pela profundidade a que este se encontra [14].
- Pela reverberação que consiste numa reflexão difusa do sinal emitido pela fonte emissora devido às diversas heterogeneidades presentes na massa de água dos oceanos. Estas

heterogeneidades são compostas por bolhas de ar, partículas, organismos biológicos, etc., que provocam uma descontinuidade das propriedades físicas do meio onde se dá a propagação. Este tipo de ruído está presente após a emissão do sinal.

O ruído ambiente total do canal submarino, também designado por ruído físico, que permite simular o ruído existente no oceano, $N(f)$, é dado pela soma de quatro componentes [14]:

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f) \quad (2.7)$$

Onde,

- N_t é a componente relativa à turbulência da água, designada em inglês por *turbulence noise*;
- N_s é a componente do ruído das embarcações (*shipping noise*);
- N_w é a componente do ruído gerado pelo vento (*wind noise*).
- N_{th} é a componente do ruído térmico (*termal noise*).

Cada uma destas fontes de ruído pode ser modelada através de uma distribuição gaussiana com densidade espectral de potência dada por:

$$10 \log N_t(f) = 17 - 30 \log f$$

$$10 \log N_s(f) = 40 + 20 \left(s - \frac{1}{2} \right) + 26 \log f - 60 \log(f + 0,03)$$

$$10 \log N_w(f) = 50 + 7,5w^{1/2} + 20 \log f - 40 \log(f + 0,4)$$

$$10 \log N_{th}(f) = -15 + 20 \log f$$

Em que,

- f é a frequência em kHz;
- s representa o fator de atividade marítima, cujo valor varia entre 0 e 1;
- w é a velocidade do vento em ms^{-1} .

Cada uma destas componentes influencia o ruído total de forma distinta e em diferentes frequências:

- N_t apenas terá influência em regiões de baixa frequência $f < 10\text{Hz}$;
- N_s influencia regiões cuja frequência se situe entre os 10Hz e os 100Hz;
- N_w é o fator que contribui mais para o ruído nas frequências compreendidas entre os 100Hz e os 100kHz;
- N_{th} componente de ruído predominante nas frequências superiores a 100kHz.

2.7 Signal-to-Noise Ratio (SNR)

A onda acústica que chega à fonte recetora é composta por duas partes:

- Uma parte que corresponde ao sinal enviado pela fonte emissora;
- Ruído com origem em fontes diversas.

Tendo em linha de conta as considerações referidas acima, num ambiente de águas rasas onde é conhecido o valor da frequência do sinal emitido pela fonte emissora bem como a distância percorrida pela onda acústica, a relação sinal-ruído (SNR) da fonte recetora pode ser definida através de [15]:

$$SNR = (SL - TL) - (NL - DI) \quad (2.8)$$

Onde,

- SL é a intensidade do sinal da fonte emissora;
- TL são as perdas de transmissão provocadas pelo meio submarino;
- NL representa o ruído com origens diversas, tais como, os efeitos de reverberação do recetor, do ruído ambiente e do ruído presente no próprio recetor;
- DI é a diretividade da fonte recetora.

A onda acústica gerada pela fonte emissora cuja intensidade (em dB) vale SL , propaga-se pelo meio aquático sofrendo perdas de energia que serão mais acentuadas com o aumento da frequência da fonte emissora.

As perdas de propagação TL são representadas por uma variedade de fenómenos que ocorrem durante o processo de propagação da onda acústica, representando este parâmetro o enfraquecimento sofrido pelo som ao longo do trajeto. Estas encontram-se caracterizadas na Seção 2.5.

Deste modo, a primeira parcela da equação (2.8), $SL - TL$ representa o nível de sinal da onda que chega à fonte recetora.

Contudo, a fonte recetora não recebe apenas a parte relativa ao sinal da onda mas também o ruído que existe no meio aquático. Na equação ((2.8) o parâmetro NL representa este ruído provocado por diversos fatores que se encontram descritos na Seção 2.6. Assim, o nível de ruído total na fonte recetora, que se supõe ser isotrópico, é atenuado pela diretividade DI do recetor que resulta deste não ter igual ganho em todas as direções. Deste modo, $NL - DI$ representa o nível de ruído que chega à fonte recetora.

2.8 Efeito de Doppler

O movimento relativo do recetor e/ou do emissor, o movimento do meio em que ambos se encontram e os diferentes atrasos de propagação da onda devido ao multipercurso, podem alterar a frequência

das ondas acústicas que se propagam através do canal. Esta mudança na frequência da portadora do sinal acústico é conhecida como o efeito Doppler.

A expressão para o deslocamento da frequência de Doppler quando existe movimento relativo tanto do emissor como do recetor é dada por [16]:

$$f' = f \left(\frac{v \pm v_r}{v \mp v_f} \right) \quad (2.9)$$

Em que:

- f é a frequência do emissor;
- f' é a frequência do recetor;
- v é a velocidade com que a onda emitida se propaga no meio;
- v_f é a velocidade do emissor;
- v_r é a velocidade do recetor.

2.9 Largura de banda

No canal acústico submarino a largura de banda é muito limitada e varia com a distância entre a fonte e o recetor e a frequência utilizada na transmissão do sinal acústico. A limitação da largura de banda ocorre fundamentalmente devido às perdas de transmissão existentes ao longo do canal causados pelo espalhamento/*scattering* da onda acústica e pela absorção do som na água.

Na Tabela 2-2 está representada a variação dos valores de largura de banda com a distância existente entre a fonte e o recetor [17].

Tabela 2-2: Largura de banda disponível baseada no alcance de comunicação.

| Sistema | Distância (km) | Largura de Banda (kHz) |
|-------------|----------------|------------------------|
| Muito longo | 1000 | <1 |
| Longo | 10-100 | 2-5 |
| Médio | 1-10 | ~10 |
| Curto | 0,1-1 | 20-50 |
| Muito Curto | <0,1 | >100 |

Tal como se pode verificar pela Tabela 2-2, o canal acústico submarino apresenta uma pequena largura de banda, estando limitada no máximo a algumas centenas de kHz, valor que se encontra limitado pela absorção característica do meio submarino que varia com a frequência e a distância utilizadas. Segundo [18] atualmente a maior parte dos sistemas acústicos operam abaixo de 30 kHz. Dado que a banda é estreita, a taxa máxima de transmissão de dados chega apenas a algumas dezenas de kbps.

2.10 Bellhop

O Bellhop, desenvolvido em 1987 e escrito em Fortran e Matlab por Michael Porter, é um modelo de *ray tracing* acústico em duas dimensões, e de alta eficiência, que foi desenvolvido para simular a propagação do sinal acústico no canal submarino, para uma dada geometria do meio, frequência de sinal, e perfil de velocidade do som na água [19].

O modelo do Bellhop foi desenvolvido a partir da teoria da reflexão dos raios, com base nas leis de Snell, válidas para águas rasas, pequenas distâncias e frequências de transmissão superiores a 1kHz. Em [19] encontra-se uma descrição exaustiva do modelo acústico submarino, bem como a descrição da teoria utilizada para a construção do programa de simulação.

De modo a poder descrever com precisão o ambiente pelo qual vão ser transmitidos os sinais acústicos, este programa pode receber sete diferentes ficheiros de entrada [20]:

- O *environmental file* é o ficheiro principal de entrada (com extensão *.env*), onde vai ser caracterizado o meio submarino em que a simulação irá ser realizada. Aqui é definida a profundidade a que se encontra a fonte emissora e recetora e a distância existente entre ambas. Neste ficheiro são também descritas outras variáveis importantes tais como, a frequência do sinal acústico e o perfil da velocidade do som. Devido ao papel relevante que este ficheiro de entrada vai ter nesta dissertação, no Anexo A encontra-se a sua descrição pormenorizada.
- O perfil com a batimetria do fundo oceânico é descrito no ficheiro com extensão *.bty* (e que pode ser invocado a partir de *env file*). O perfil batimétrico é composto por pares de valores distância-profundidade, em que à distância d_i a profundidade do fundo do mar é z_i . Note-se que na posição onde se encontra a fonte emissora considera-se $d = 0$. Este ficheiro também se encontra descrito no Anexo A.
- O ficheiro com os dados relativos à altimetria da superfície, com extensão *.ati*;
- Ficheiro com extensão *.trc* com os valores dos coeficientes de reflexão da superfície do mar;
- Ficheiro com extensão *.brc* com os valores dos coeficientes de reflexão do fundo do mar;
- O ficheiro com extensão *.sbp* onde é possível definir os ângulos de saída dos raios acústicos da fonte emissora;
- O ficheiro com extensão *.ssp* onde se encontram definidos os valores do perfil da velocidade do som na água.

De acordo com o que for definido no ficheiro principal de entrada (ficheiro *.env*), o Bellhop pode produzir três diferentes tipos de ficheiros de saída:

- Ficheiro com extensão *.ray* que é tipicamente utilizado para perceber o modo de propagação de energia ao longo do canal acústico, e onde está indicado, o percurso efetuado pelos raios e o número total de reflexões. Através do Bellhop é possível obter dois tipos de *ray files*:

- *Ray tracing* (Coordenadas de raios): ficheiro que contém um leque de raios com origem na fonte emissora;
- *Eigenray*: do leque de raios com origem na fonte emissora são incluídos apenas os raios que passam por uma localização específica, por exemplo, no local onde se encontra o recetor;
- Ficheiro com extensão *.arr* que contém toda a informação acerca dos raios que chegam ao recetor. Neste ficheiro, existem os valores das amplitudes, atrasos e ângulo de chegada dos raios à posição onde se encontra o recetor.
- Ficheiro com extensão *.shd*, que contém os valores da pressão acústica.

Na Figura 2-4 está representada a estrutura geral do Bellhop onde é possível ver as diferentes opções de ficheiros de entrada e de saída do programa.

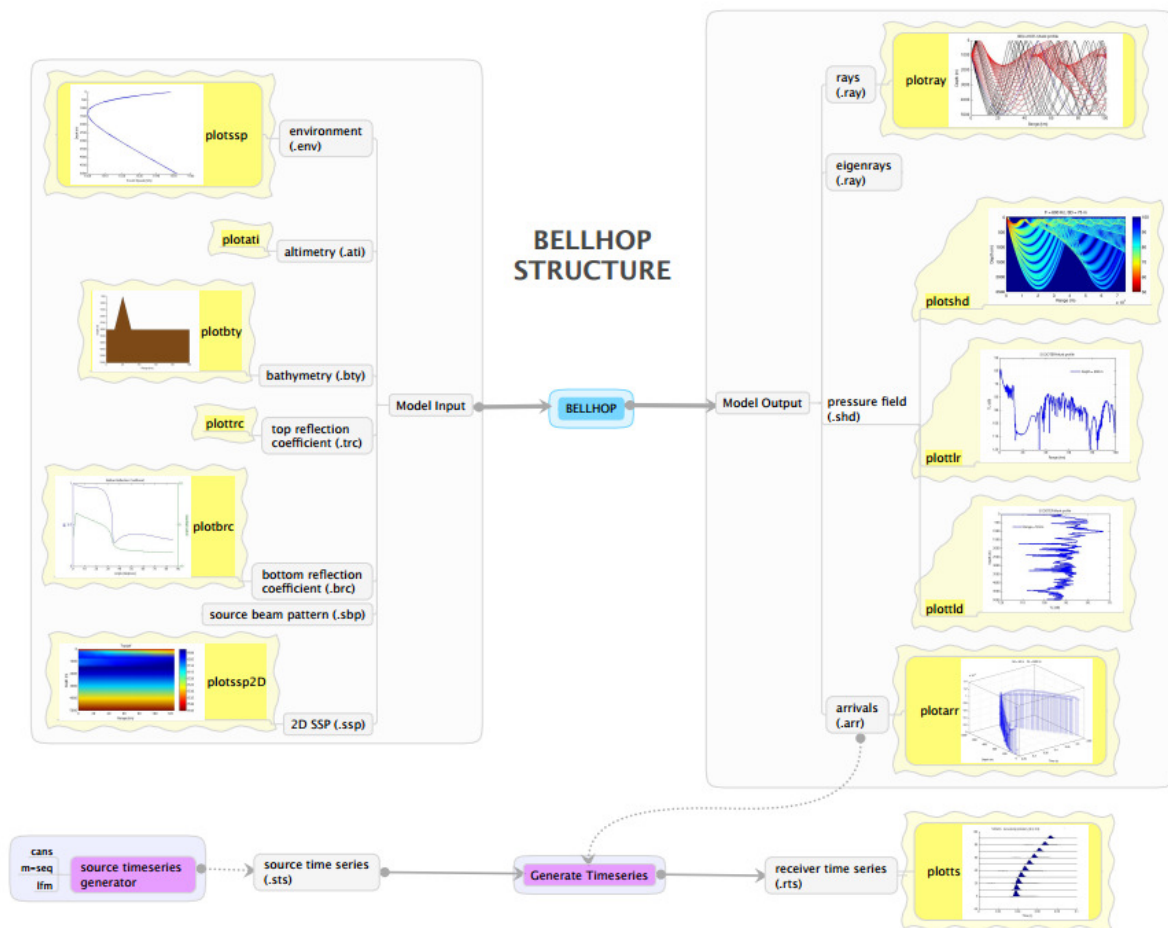


Figura 2-4: Estrutura Bellhop [19].

Nesta dissertação, para obter o modelo de propagação do canal acústico submarino (Capítulo 3), apenas vão ser considerados os seguintes ficheiros:

- Ficheiros de Entrada:

- O ficheiro principal de entrada, o *environmental file*;
 - O ficheiro com o perfil com a batimetria do fundo oceânico (*.bty file*).
- Ficheiros de saída:
 - Ficheiro com extensão *.arr* que contém os pares de valores amplitude-atraso.

3 Modelo de Canal

O canal acústico submarino é definido como sendo um sistema linear e variante no tempo caracterizado pela sua resposta impulsiva $h(\tau, t)$, cuja entrada $x(t)$ se relaciona com a saída $y(t)$ através da seguinte relação:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau, t)x(t - \tau)d\tau \quad (3.1)$$

Em que,

- τ representa o atraso introduzido pelo multipercurso existente no canal;
- t é a variável tempo absoluto.

Com o intuito de antecipar em laboratório a performance dos sistemas de comunicação em ambientes submarinos reais, os modelos do canal de propagação revelam-se essenciais.

Dependendo do grau de abrangência e precisão, estes modelos podem aumentar significativamente a probabilidade de sucesso dos testes realizados em ambiente submarino evitando assim um elevado custo nas experiências realizadas em alto mar. Para tal, é necessário que o modelo de canal inclua o máximo de características reais possíveis, tais como por exemplo, a velocidade de propagação do som na água, a atenuação da onda acústica e o multipercurso, que foram já previamente descritas no Capítulo 2.

Contudo, a modelação do canal é geralmente confrontada com um dilema recorrente: como capturar o máximo da dinâmica real dos processos oceânicos ao mesmo tempo que se limita o número de parâmetros de entrada devido ao custo do cálculo computacional. Por esta razão, na comunicação acústica submarina, as hipóteses heurísticas são muitas vezes fundamentais para ultrapassar a falta de conhecimento sobre as propriedades do canal.

Assim, neste capítulo vai ser obtido o modelo de canal acústico submarino que vai ser utilizado nesta dissertação. Numa primeira aproximação (Subsecção 3.2.1) vai ser considerado um modelo de canal determinístico obtido com recurso ao simulador de propagação acústica utilizada nesta dissertação (Bellhop). A este modelo determinístico pode ser imposto um modelo empírico obtido a partir da análise de dados reais recolhidos em alto mar (Seção 3.1), que permite refletir na resposta impulsiva o comportamento dinâmico do canal (Subsecção 3.2.2).

Por fim, vai ser realizada a caracterização estatística do comportamento estocástico do canal submarino (Seção 3.3), feita a partir da *Scattering Function* e entrando em linha de conta com a análise empírica dos dados reais recolhidos em alto mar.

De modo a simplificar a caracterização estatística e o modelo de propagação, nesta dissertação vai ser considerado que o canal acústico submarino é WSSUS - *Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering* - [21], isto é:

- Para uma pequena escala de observação e pequenos intervalos de tempo, onde não aconteçam alterações significativas no cenário de propagação, as flutuações existentes na resposta impulsiva são consideradas estacionárias (WSS);
- Contribuições para a resposta impulsiva associadas a atrasos distintos são incorrelacionadas (US).

3.1 Identificação de canal

Neste seção vai ser feita a caracterização estatística da resposta impulsiva do canal a partir de dados reais recolhidos em alto mar (experiência CALCOM descrita na subseção 3.1.1).

A caracterização do canal (subseção 3.1.2 e 3.1.3) vai ser feita recorrendo à *Empirical Mode Decomposition* para demonstrar, com boa aproximação, que a resposta impulsiva do canal acústico submarino pode ser definida pela soma de uma componente lenta com uma componente rápida. A partir deste estudo, e com recurso ao modelo auto-regressivo, vai ser possível obter o modelo paramétrico do comportamento dinâmico da resposta impulsiva do canal acústico submarino, que vai ser utilizado nesta dissertação (subseção 3.1.4).

3.1.1 Descrição da experiência no mar

As propriedades estatísticas do canal acústico submarino vão ser determinadas utilizando dados reais obtidos pela experiência realizada em alto mar CALCOM'10.

Estes dados foram recolhidos na costa sul de Portugal, a 12 milhas náuticas a sudeste de Vilamoura, entre os dias 22 e 24 de Junho de 2010. Na Figura 3-1 está representada a magenta a área onde foi executada a experiência [22].

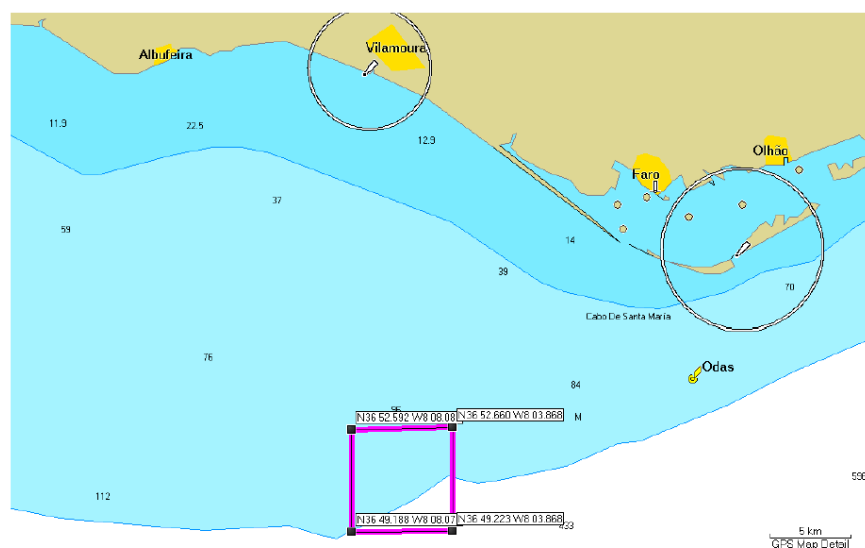


Figura 3-1: Área de trabalho da experiência CALCOM'10.

A área de trabalho foi escolhida de modo ser realizada num ambiente de águas pouco profundas e ter profundidade constante (aproximadamente 100m).

Os principais objetivos para a realização desta experiência foram:

- Recolher dados de calibração reais para serem utilizados em estudos tomográficos;
- Transmitir sinais de comunicação em diferentes faixas de frequência para analisar o desempenho dos sistemas de comunicações submarinos.

Os pacotes de dados utilizados nesta dissertação, emitidos por apenas uma única fonte emissora rebocada por um barco, têm uma duração de 2,5 segundos e são compostos por sinais com modulação PSK com frequência central de 5,5 KHz e largura de banda de 4,5 KHz. A descrição completa do conjunto de dados utilizado nesta experiência encontra-se em [23].

O sistema de aquisição utilizado para recolher os dados era composto por duas boias oceanográficas acústicas, uma das quais tinha 8 hidrofones e a outra 16, encontrando-se todos os hidrofones espaçados de 4 metros.

Na Figura 3-2 estão representadas as respostas impulsivas que chegam a cada um dos 16 hidrofones para um dado instante de tempo, t , e um pacote específico. Para efeitos de simulação desta dissertação foram utilizados os dados recolhidos no hidrofone número 8 do total de 16.

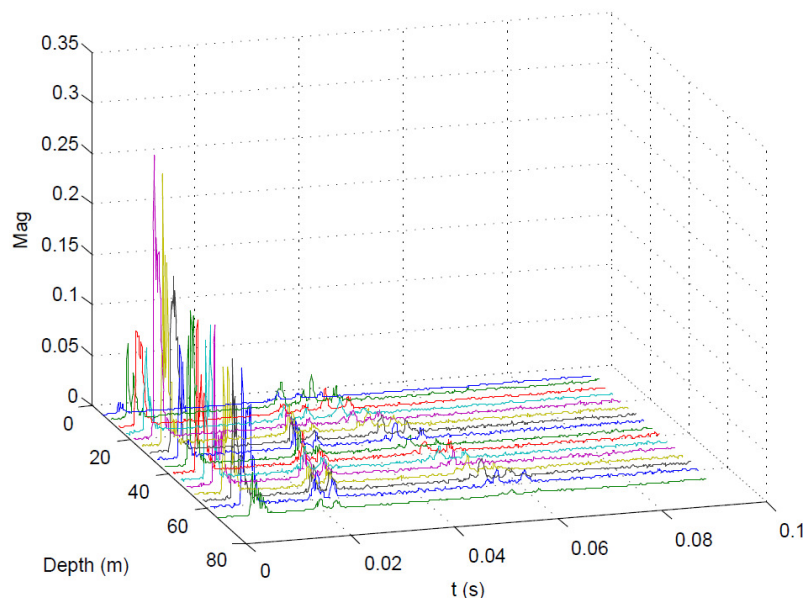


Figura 3-2: Respostas impulsivas do canal que chegam a cada um dos 16 hidrofones para um dado instante de tempo t .

Na Figura 3-3 encontra-se representada a evolução ao longo do tempo das estimativas dos ganhos das respostas impulsivas que chegam ao hidrofone 8, e que serão tomadas em linha de conta no

nosso estudo. Tendo em conta a estrutura espacial que se infere da Figura 3-2, é possível identificar na Figura 3-3 as respostas que chegam ao recetor com uma maior energia e que são os seguintes:

- O raio direto que geralmente é acompanhado por um raio com reflexão única na superfície, identificado na Figura por D+S, em que o raio direto se caracteriza por ser um caminho predominante com poucas variações ao longo do tempo, e que é característico em canais de curto alcance;
- Raio com reflexão única no fundo (identificado na Figura pela letra B de *bottom*);
- Raio com reflexão dupla, uma na superfície e uma reflexão no fundo, antes de chegar ao recetor (identificado por S→B, em que S é de *surface*);
- Raio com reflexão dupla, primeiro no fundo e depois na superfície (B → S);
- Raio com reflexão tripla antes de chegar ao recetor, com a seguinte ordem: superfície, fundo, superfície (S→B→S).

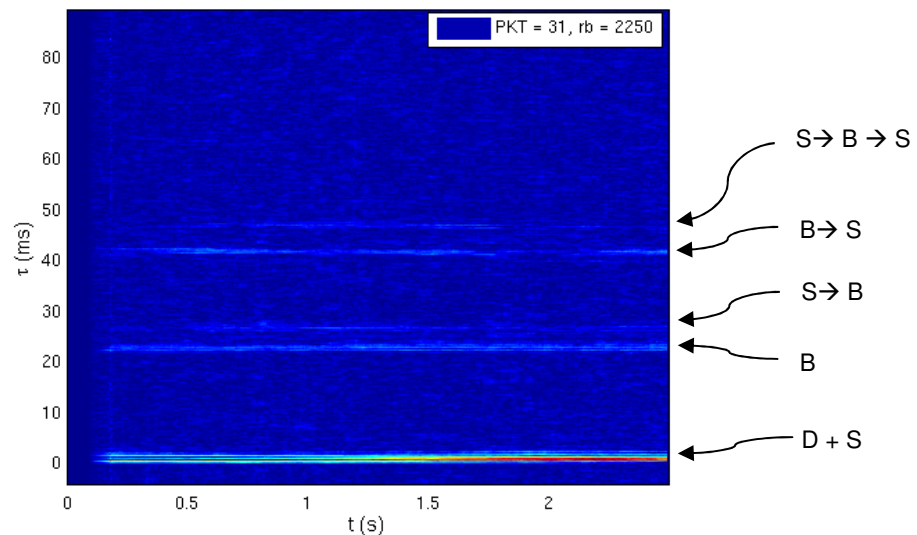


Figura 3-3: Evolução ao longo do tempo das estimativas dos ganhos das respostas impulsivas que chegam ao hidrofone 8.

3.1.2 Caraterização de canal

Nesta dissertação, e à semelhança da metodologia utilizada em [24], foi considerado um modelo empírico para a caraterização de canal, baseado em dados reais, que assenta na hipótese de que resposta impulsiva do canal para cada percurso do sinal acústico, $h_l(k)$, pode ser dada por:

$$h_l(t) = d_l(t) + w_l(t) \quad (3.2)$$

Onde,

- $d_l(k)$ representa a componente lenta da resposta impulsiva cujo comportamento segue a tendência do comportamento dinâmico da resposta do canal e que pode ser comparada ao desvanecimento lento que ocorre nos canais rádio, causado pelas zonas de sombra e perdas ao longo do percurso da onda acústica;
- $w_l(k)$ representa a componente rápida da resposta impulsiva associada ao comportamento aleatório do meio aquático e que pode ser comparada ao desvanecimento rápido dos canais rádio causado pelo movimento relativo do emissor e recetor, pelo multipercurso e pelo espalhamento do raio acústico.

Para validar esta hipótese para a caracterização de canal, a componente lenta da resposta impulsiva do canal vai ser isolada da componente rápida, para tal recorrendo à *Empirical Mode Decomposition* (EMD) (Subseção 3.1.3).

3.1.3 Aplicação da EMD

De modo a contornar a complexidade de análise da resposta impulsiva de um canal acústico submarino, são necessários métodos de estudo alternativos que se adaptem às variações do sinal e que permitam efetuar a sua decomposição em modos, cuja propriedade principal é o facto de possuírem apenas uma frequência instantânea em cada instante de tempo. Estes métodos de decomposição baseiam-se no princípio da sobreposição, que permite separar o sinal em componentes simples e processá-las de forma independente. Esta abordagem é extremamente poderosa, uma vez que divide um problema complexo em vários subproblemas de resolução mais simples.

Para validar a hipótese considerada para a caracterização de canal (Subseção 3.1.2), nesta dissertação vai ser utilizado o algoritmo EMD. Este algoritmo é relativamente simples e não requer o conhecimento prévio de nenhuma propriedade especial do sinal, como por exemplo a sua expressão analítica, podendo ser aplicado diretamente [25].

O EMD proposto por [26], é um algoritmo de decomposição de sinal, que tem por base a hipótese que todos os sinais são constituídos pela soma de várias componentes elementares chamadas de modos intrínsecos (IMF – *Intrinsic Mode Function* – em inglês). Cada IMF representa uma oscilação do sinal que possui o mesmo número de zeros e de extremos e que pode ter amplitudes e frequência variáveis ao longo do tempo. Além disso, em qualquer instante, o valor médio da envolvente definida pelos extremos locais máximos e a envolvente definida pelos extremos locais mínimos é zero.

Deste modo, com a utilização do EMD é possível representar cada percurso do canal acústico submarino a partir de

$$h_l(t) = \sum_{i=1}^n m_{l,i}(t) + r_l(t) \quad (3.3)$$

Em que,

- $m_{l,i}(t)$ representa cada uma das n IMFs em que a resposta $h_l(t)$ é decomposta;
- $r_l(t)$ é o resíduo final resultante da decomposição.

No Anexo B.1 encontra-se a descrição pormenorizada do método, assim como, um exemplo de aplicação.

O método estava inicialmente limitado a valores reais, mas para o caso do canal acústico submarino, onde as respostas impulsivas do canal apresentam valores complexos na representação em banda de base, vai ser utilizada uma extensão para valores complexos [27].

Para validar a hipótese que se assumiu na equação (3.2), o algoritmo EMD vai ser aplicado individualmente aos 5 percursos mais fortes descritos na Subseção 3.1.1. Para tal, foi utilizado o código disponibilizado por [24] em que também é separada a componente lenta da componente rápida da resposta impulsiva.

A componente lenta é discriminada da componente rápida através de,

$$h_l(t) = \underbrace{\sum_{i=1}^{S_l-1} m_{l,i}(t)}_{d_l(t)} + \underbrace{\sum_{i=S_l}^n m_{l,i}(t)}_{w_l(t)} + r_l(t) \quad (3.4)$$

Em que S_l é a ordem de decomposição que conduz à separação das duas componentes.

Após a aplicação do algoritmo EMD, a cada um dos percursos, obtiveram-se resultados similares estando na Figura 3-4 representado, a título de exemplo, o resultado da filtragem EMD aplicado ao raio direto representado na Figura 3-3 (Subseção 3.1.1). No Anexo B.2 estão representadas as 8 IMFs obtidas na referida filtragem, assim como, o respetivo resíduo.

A partir da Figura 3-4 é possível verificar que a componente $w_l(t)$ apresenta grandes variações em amplitude ao longo do tempo comparativamente à componente $d_l(t)$, concluindo-se que contrariamente a $d_l(t)$, as amostras de $w_l(t)$ são descorrelacionadas.

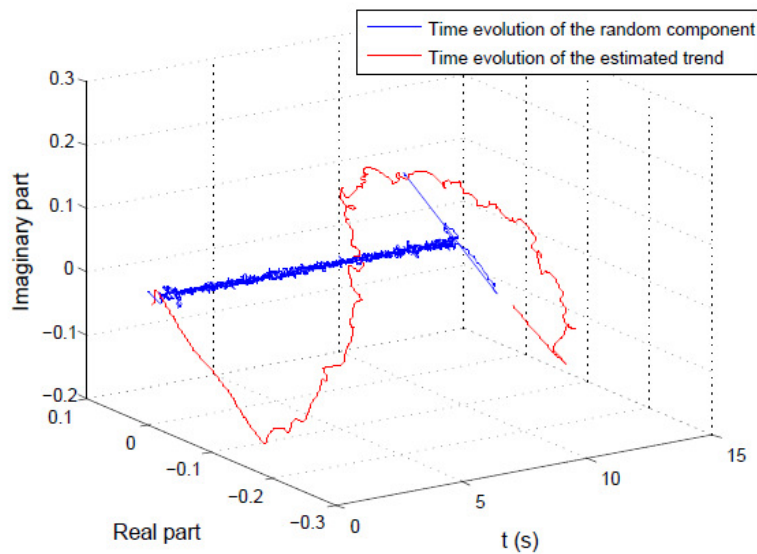


Figura 3-4: Separação da componente lenta da componente rápida da resposta impulsiva do canal.

De modo a corroborar os resultados da EMD com as conclusões obtidas em [24], analisou-se o espectro de potência das componentes $d_l(t)$ e $w_l(t)$, verificando-se que o espectro da componente rápida é muito mais largo que o espectro da componente lenta, o que sugere que $w_l(t)$ pode ser encarado como ruído branco gaussiano.

Deste modo, a caracterização do comportamento dinâmico do canal acústico submarino depende sobretudo da componente lenta do canal.

3.1.4 Caracterização estatística da componente lenta da resposta impulsiva

Nesta dissertação, vai ser utilizado um modelo paramétrico para modelar estatisticamente o comportamento dinâmico da resposta impulsiva ao longo do tempo, obtida a partir de dados reais recolhidos em alto mar.

Este comportamento dinâmico vai ser incluído no simulador NetMar_{sys}, tornando assim o simulador mais realista (Seção 3.2.2).

Tal como já foi previamente considerado na aplicação do EMD, vai ser obtido o modelo paramétrico dos 5 percursos mais fortes (descritos na Subseção 3.1.1) com recurso ao modelo auto-regressivo, uma vez que este apresenta uma boa capacidade para estimar o espectro do sinal a partir da análise de dados reais.

Dada a natureza aleatória e não estruturada no tempo da componente rápida $w_l(k)$ da resposta impulsiva, observada na seção anterior, apenas vai ser modelado o comportamento dinâmico da componente lenta da resposta impulsiva do canal $d_l(k)$.

3.1.4.1 Descrição do modelo AR

O modelo auto-regressivo de ordem p é utilizado quando existe correlação entre as observações, ou seja, quando o valor de uma variável no instante t depende do seu valor num instante anterior. A equação geral do modelo auto-regressivo de ordem p é dada por:

$$X_t = \sum_{i=1}^p \alpha_i X_{t-i} + \epsilon_t \quad (3.5)$$

Em que,

- α_i representam os coeficientes do modelo AR;
- ϵ_t é ruído branco gaussiano e representa o erro entre o valor medido X_t e os valores estimados X_{t-i} , cuja variância é dada por σ_ϵ^2 .

Os referidos parâmetros α_i e σ_ϵ^2 são estimados a partir de dados reais utilizando para tal as equações de Yule-Walker [28].

3.1.4.2 Ordem do modelo AR

A ordem p do modelo AR determina, no domínio da frequência, a quantidade de pólos que o modelo AR possui. Deste modo, é importante definir a ordem mais adequada sob o critério complexidade *versus* precisão, uma vez que quanto maior for a ordem escolhida, mais preciso será o modelo, mas em contrapartida, o número de pólos também será superior. Para definir a ordem mais adequada foi aplicado o critério de informação de Akaike (*Akaike's Information Criterion – AIC*) [29] com recurso ao comando *aic* do MATLAB, a cada um dos 5 percursos referidos na Subseção 3.1.1. Verificou-se que para cada um dos percursos obtiveram-se resultados semelhantes cujo andamento se encontra representado na Figura 3-5.

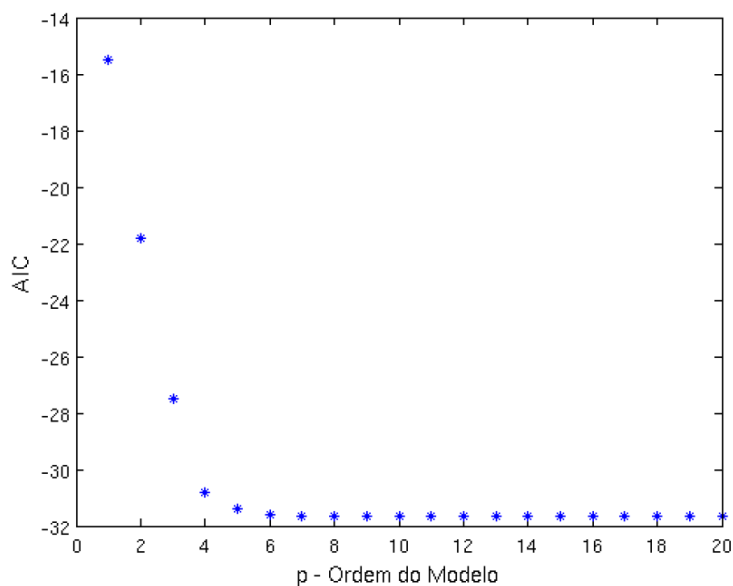


Figura 3-5: Resultado do comando AIC aplicado ao percurso correspondente ao raio direto.

Através da análise do gráfico do AIC foi possível verificar que a partir da ordem $p = 6$ não existe ganho em escolher uma ordem superior. Assim, esta vai ser a ordem adotada nesta dissertação.

3.1.4.3 Modelo paramétrico do canal

O modelo estatístico do comportamento dinâmico da componente lenta da resposta impulsiva vai ser obtido através de uma análise empírica dos dados.

Para tal, para os 5 percursos mais fortes, analisou-se a distribuição dos pólos, obtidos através do modelo AR, no plano complexo Z . Verificou-se que para cada um dos percursos a distribuição dos pólos é semelhante, aproximando-se o comportamento ao de um integrador (ver Figura 3-6). Assim, a função de transferência do canal, pode ser descrita através de um modelo AR, de ordem p , cujos parâmetros são representados pelos p pólos de $G(Z)$,

$$G(Z) = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^p \alpha_i Z^{-i}} \quad (3.6)$$

Com densidade espectral de potência dada por:

$$P_{AR}(f) = \frac{\sigma_\epsilon^2}{|1 - \sum_{n=1}^p \alpha_n e^{-j2\pi f n}|^2} \quad (3.7)$$

Em que σ_ϵ^2 é a variância do ruído branco de entrada do filtro AR.

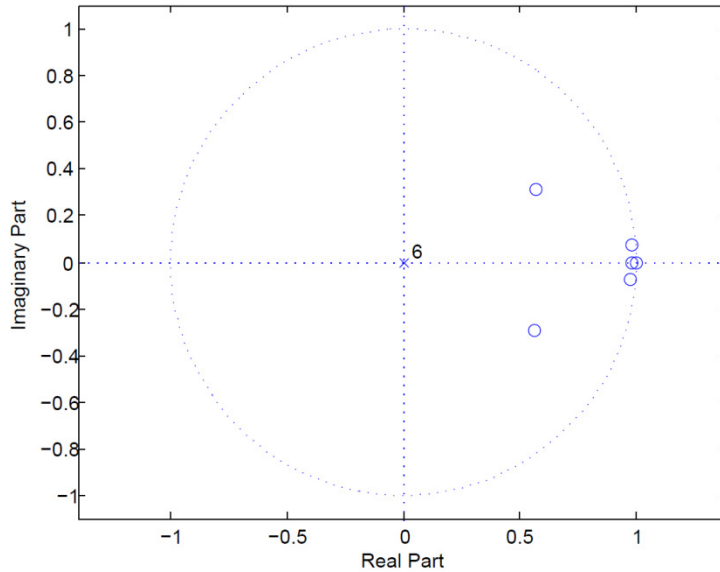


Figura 3-6: Diagrama de pólos e zeros no plano complexo Z obtidos através do modelo AR.

Dada a similaridade na distribuição dos pólos no plano complexo Z para os vários percursos analisados, e dado que estamos perante um canal WSSUS, de modo a simplificar a complexidade de análise iremos assumir o mesmo modelo estatístico para todos os percursos. Deste modo, para efeitos de modulação, nesta dissertação vai ser considerado que o comportamento dinâmico da componente lenta da resposta impulsiva é totalmente modelado por um processo AR de ordem 6, cujos coeficientes, representados na Tabela 3-1, foram obtidos a partir da análise do percurso correspondente ao raio direto, e cuja densidade espectral de potência é dada pela equação (3.7).

Tabela 3-1: Coeficientes do Modelo AR.

| Coeficientes obtidos no Modelo AR | |
|-----------------------------------|--|
| α_1 | $-5.071158588185471 + j0.016973097433677$ |
| α_2 | $10.693735019719073 - j0.074689354683145$ |
| α_3 | $-12.040752867912433 + j0.129322402817249$ |
| α_4 | $7.673440177130805 - j0.109479318436946$ |
| α_5 | $-2.643740857008920 + j0.044882161195978$ |
| α_6 | $0.388477123029349 - j0.007008989492548$ |

3.2 Modelo de simulação para o canal

Nesta seção vai ser descrito o modelo de canal submarino considerado para esta dissertação através da caracterização da resposta impulsiva de um canal com multipercurso. Numa primeira abordagem vai ser introduzida a resposta determinística do canal (Subseção 3.2.1) obtida com recurso ao

simulador de propagação acústica, Bellhop. A esta resposta determinística, e entrando em linha de conta com os resultados obtidos na identificação de canal feita na Seção 3.1, vai ser introduzida a caracterização estatística do comportamento dinâmico da resposta lenta do canal (Subseção 3.2.2), obtendo-se assim a resposta impulsiva total do canal acústico submarino.

3.2.1 Caracterização da resposta impulsiva determinística do canal

O canal acústico submarino caracteriza-se por ser um sistema linear variante no tempo e que é completamente caracterizado pela sua resposta impulsiva em banda de base:

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^L a_n e^{-jw_c \tau_n} \delta(t - \tau_n) \quad (3.8)$$

Onde,

- t é a variável tempo absoluto;
- τ representa o atraso com que uma determinada réplica chega ao recetor, relativamente ao instante de chegada da primeira componente.
- a_n são as amplitudes da resposta impulsiva;
- w_c é a frequência;
- L é o número total de percursos.

As leis determinísticas da física permitem obter o atraso relativo a cada um dos diferentes trajetos (multipercurso) do canal, em função da configuração da transmissão (localização do emissor e recetor, distância, frequência, o perfil da batimetria, etc.) assim como a potência média relativa dos diferentes trajetos.

De modo a tornar a resposta impulsiva mais realista, e uma vez que esta irá ser influenciada pela posição da fonte emissora e recetora, as amplitudes e os atrasos presentes na equação (3.8) vão ser obtidos com recurso aos parâmetros de saída do modelo de propagação acústica, Bellhop (descrito na Seção 2.10).

Para obter um modelo de canal com características de propagação acústica, entre a fonte emissora e recetora, que apresentem maior fidelidade, foi utilizado neste trabalho um *software* (invocável a partir do Matlab e desenvolvido no IST) que permite obter o perfil da velocidade do som, a morfologia do fundo oceânico e o perfil batimétrico a partir de vários bancos de dados públicos [30]. Os valores destes parâmetros ambientais vão ser posteriormente integrados no ficheiro principal de entrada do Bellhop, o *environmental file* (Anexo A).

As bases de dados criadas por este simulador foram obtidas do seguinte modo [30]:

- **Batimetria:**

Os parâmetros relativos à batimetria foram obtidos a partir da base de dados ETOPO1 que integra a topografia da superfície terrestre e a batimetria oceânica. Esta base de dados é formada a partir de informações com origem em diversas fontes distintas, sendo o caso particular da base de dados da batimetria do fundo oceânico a *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO).

- **Perfil da velocidade do som:**

Ao contrário das bases de dados da batimetria do fundo oceânico que se encontram disponíveis, o mesmo não acontece com as bases de dados relativas aos perfis da velocidade do som no mar.

Neste simulador foram assim criadas 17 bases de dados para os perfis da velocidade do som, obtidas com recurso às equações de Wilson Del Grosso (já descritas na Seção 2.3) e utilizando nas referidas equações os valores da salinidade e temperatura disponíveis na base de dados pública *World Ocean Atlas 2009*. Das 17 bases de dados com valores dos perfis da velocidade do som:

- 12 correspondem a perfis de médias mensais;
- 4 correspondem a perfis médios sazonais;
- 1 corresponde ao perfil médio anual.

- **Litologia:**

Este simulador permite também obter os dados relativos à morfologia do oceano através da base de dados pública *World Data Service for Geophysics - National Geophysical Data Center*, que contém a descrição dos sedimentos do fundo oceânico baseados em 36000 amostras recolhidas em redor de todo o mundo.

Contudo devido à elevada imprecisão ainda existente nos dados que constam nesta base de dados, e uma vez que o Bellhop não permite introduzir esta informação na sua simulação, optou-se por não incluir a litologia do fundo oceânico no nosso estudo.

Para a criação do *environmental file* utilizou-se nesta dissertação o código desenvolvido pelo SiPLAB¹, que irá permitir integrar o seu *output* com os dados relativos à batimetria e perfil de velocidade do som deste simulador na estrutura do ficheiro de entrada do Bellhop. A partir deste código vai também ser criado o ficheiro com o perfil batimétrico entre a fonte emissora e recetora (ficheiro *.bty* descrito no Anexo A).

¹ <http://www.siplab.fct.ualg.pt/>

Após a execução do Bellhop, este vai produzir o ficheiro de saída `.arr` de onde vão ser obtidos os pares de valores amplitude-atrasos dos raios que chegam à posição onde se encontra o recetor e que vão ser integrados na equação da resposta impulsiva determinística do canal.

À equação (3.8) pode ser incluída a frequência de Doppler, v_n em rad.s^{-1} , para tal utilizando a equação já previamente descrita no Capítulo 2 (equação (2.9)), que entra em linha de conta com o movimento relativo dos veículos submarinos, obtendo-se a seguinte resposta impulsiva do canal:

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^L a_n e^{-jw_c \tau_n} e^{jv_n(t-\tau_n)} \delta(t - \tau_n) \quad (3.9)$$

Note-se que para efeitos de simulação, no simulador NetMar_{SYS} vai ser utilizada a resposta impulsiva equivalente de $h(t, \tau)$ em tempo discreto.

3.2.2 Resposta impulsiva variante no tempo

Apesar do Bellhop permitir calcular as respostas impulsivas do canal, estas apresentam um comportamento determinístico e estático uma vez que, na simulação, as amplitudes e os atrasos obtidos, não entram em linha de conta com as variações que existem num canal real ao longo do tempo.

De modo a tornar esta resposta impulsiva determinística mais realista, é possível combinar esta com os resultados obtidos na caracterização estatística realizada na Subsecção 3.1.4 e impor comportamento dinâmico à resposta impulsiva na equação (3.8), obtendo-se uma resposta impulsiva do canal variante no tempo dada por:

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^L a'_n(t) e^{-jw_c \tau_n} \delta(t - \tau_n) \quad (3.10)$$

Em que,

$$a'_n(t) = \eta a_n + (1 - \eta)AR(t) \quad (3.11)$$

Onde,

- η , cujo valor se encontra compreendido entre 0 e 1, representa a distribuição da potência total pela componente dinâmica e pela componente determinística da resposta impulsiva associada a cada percurso L ;
- a_n são, para cada percurso, as amplitudes da resposta impulsiva determinística obtidas através do Bellhop;

- $AR(t)$ representa as flutuações ao longo do tempo da resposta impulsiva no canal submarino obtidas através da caracterização estatística da Subseção 3.1.4.

Nesta dissertação vai ser imposto que a potência total de cada percurso (P_{Total}) se mantém após a inclusão da componente dinâmica da resposta impulsiva, sendo esta dada por:

$$P_{Total} = P_f + P_d = |a_i|^2 \quad (3.12)$$

Em que,

- P_f é a potência relativa à componente dinâmica do canal;
- P_d é a potência relativa à componente determinística do canal;
- a_i são os ganhos determinísticos do canal obtidos pelo Bellhop.

À semelhança do que foi feito na Subseção 3.2.1, é possível incluir a frequência de Doppler v_n na equação (3.10), obtendo-se:

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^L a'_n(t) e^{-j\omega_c \tau_n} e^{jv_n(t-\tau_n)} \delta(t - \tau_n) \quad (3.13)$$

Cuja densidade espectral de potência para cada percurso (demonstrada no Anexo C) é dada por:

$$P_{AR}(f - f_n) = \frac{\sigma_n^2}{|A_n(f - f_n)|^2} \quad (3.14)$$

$$f_n = \frac{v_n}{2\pi} \quad (3.15)$$

3.3 Modelo estatístico de canal - *scattering function*

Tal como já foi referido na introdução desta dissertação, o canal acústico submarino é um sistema aleatoriamente variante no tempo, em que as suas respostas impulsivas são processos estocásticos, sendo assim necessário conhecer a descrição estatística conjunta para se poder caracterizar o canal acústico submarino.

Dada a hipótese considerada de o canal ser WSSUS, os percursos são descorrelacionados e a descrição estatística conjunta do comportamento estocástico do canal acústico submarino é caracterizada pela *Scattering Function*.

Por definição [21] a *Scattering Function* é a transformada de Fourier da função de autocorrelação, $R_h(\Delta t, \tau)$, de $h(t, \tau)$:

$$S_h(v, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_h(\Delta t, \tau) e^{-j2\pi v \Delta t} d\Delta t \quad (3.16)$$

Em que v é a frequência associada ao deslocamento de Doppler, e em que para canais WSSUS:

$$R_h(\Delta t, \tau) = \begin{cases} 0, & \text{se } \tau_i \neq \tau_j \\ E[h(t, \tau_1)h^*(t + \Delta t, \tau_1)], & \text{c. c.} \end{cases} \quad (3.17)$$

A equação da *Scattering Function* representa assim a dispersão de energia do canal na direção do atraso (*delay spread*) e da frequência (*Doppler spread*). Deste modo, a *Scattering Function* fornece-nos uma medida da potência de saída do canal em função do atraso dos percursos (devido ao multipercurso) e da frequência Doppler (devido ao deslocamento dos veículos submarinos e devido às variações do meio submarino ao longo do tempo, como por exemplo o efeito das ondas).

De acordo com [21] a partir da *Scattering Function* é possível obter:

- Espectro de potência de Doppler do canal, $S_v(v)$, (*Doppler power spectrum* - em inglês);
- Espectro de potência dos atrasos do canal, $S_\tau(\tau)$, (*Delay power spectrum* – em inglês).

Em que, ambos os espectros são obtidos através da integração da *Scattering Function* em ordem a τ e a v , respetivamente:

$$S_v(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_h(v, \tau) d\tau \quad (3.18)$$

$$S_\tau(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_h(v, \tau) dv \quad (3.19)$$

Assim, o espectro de potência de Doppler pode ser interpretado como a projeção da *Scattering Function* no eixo da frequência de Doppler, enquanto que, o espectro de potência dos atrasos é a projeção da *Scattering Function* no eixo dos atrasos.

Nas expressões da Capacidade de Canal que serão descritas no Capítulo 4, apenas se entra em linha de conta com o espectro de potência de Doppler do canal, $S_v(v)$, para descrever as variações ao longo do tempo do canal acústico submarino. Deste modo, o nosso estudo vai focar-se apenas no Espectro de Doppler do canal.

A expressão para o Espectro de potência de Doppler que irá ser considerada neste trabalho, vai ser obtida a partir dos resultados do modelo de canal considerado até ao momento, cujo resumo se encontra abaixo:

- Numa primeira abordagem considerou-se um canal determinístico com resposta impulsiva dada pela equação (3.8):

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^L a_n e^{-j\omega_c \tau_n} \delta(t - \tau_n)$$

A esta resposta foi introduzido o efeito de Doppler devido ao movimento relativo dos veículos submarinos (equação (3.9)):

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^L a_n e^{-j\omega_c \tau_n} e^{jv_n(t-\tau_n)} \delta(t - \tau_n)$$

- Posteriormente, e entrando em linha de conta com as conclusões feitas na Subseção 3.1.4, incluiu-se na resposta impulsiva (3.8) a caracterização estatística obtida pelo modelo AR do comportamento dinâmico ao longo do canal, obtendo-se a equação (3.10), dada por:

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^L a'_n(t) e^{-j\omega_c \tau_n} \delta(t - \tau_n)$$

Cuja densidade espectral de potência é dada por:

$$P_{AR}(f) = \frac{\sigma_n^2}{|A(f)|^2}$$

De modo a tornar a resposta impulsiva mais realista, à resposta anterior inclui-se o efeito de Doppler (equação (3.13)), resultando:

$$h(t, \tau) = \sum_{n=1}^L a'_n(t) e^{-j\omega_c \tau_n} e^{jv_n(t-\tau_n)} \delta(t - \tau_n)$$

Cuja densidade espectral de potência para um percurso é dada por:

$$P_{h_l h_l}(f - f_n) = \frac{\sigma_n^2}{|A_l(f - f_n)|^2}$$

Em que,

$$f_n = \frac{v_n}{2\pi}$$

Por definição, para cada valor de τ a *Scattering Function* de cada percurso é dada pelo espectro de potência dos respectivos ganhos do canal ao longo do eixo de Doppler. Assim, nesta dissertação vai ser considerado que o Espectro de potência de Doppler do canal, $S_v(\nu)$, é dado pela densidade espectral de potência do comportamento dinâmico ao longo do tempo do canal modelado por um processo AR, ou seja:

$$S_v(\nu) = \sum_{n=1}^L \frac{\sigma_n^2}{|A_l(f - \frac{\nu_n}{2\pi})|^2} \quad (3.20)$$

Em que σ_n^2 é a variância do ruído branco de entrada do modelo AR, calculada através de,

$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_{out}^2}{\int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \frac{1}{|A(f)|^2}} \quad (3.21)$$

Em que,

- σ_{out}^2 é a potência de saída do modelo AR;
- $1/A(f)$ é a resposta do Modelo AR.

Assim, a equação (3.20) é a que vai ser utilizada para descrever o comportamento estocástico do canal acústico submarino nas equações da capacidade de canal que serão descritas no Capítulo 4.

4 Capacidade de Canal

Um canal de comunicação é caracterizado pela existência de ruído, interferência e *fading*, que corrompe a informação transmitida. Assim, podem aparecer erros nos bits recebidos face aos bits transmitidos, sendo este número de erros fortemente dependente da quantidade de ruído e interferência no canal.

Em 1948 *Claude Shannon* publicou em [31] o teorema de Capacidade de Canal que afirma que em qualquer canal de comunicação limitado em potência existe uma taxa máxima de transmissão de informação livre de erros, que depende da largura de banda do canal B e da relação sinal-ruído SNR . A esta taxa máxima de transmissão que pode ser suportado por um canal, para uma determinada configuração entre a fonte emissora e recetora, dá-se o nome de Capacidade do Canal C , mede-se em bits/s e é dada pela equação (4.1). Se o sistema funcionar a um ritmo superior à Capacidade de Canal fica assim sujeito a uma probabilidade de erro não nula, independentemente do recetor ou da técnica de transmissão utilizada.

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (4.1)$$

No mesmo trabalho *Shannon* afirmou através do Teorema de Codificação de Canal que para qualquer ritmo de transmissão $R < C$ existe uma técnica de codificação que permite transmitir a informação da fonte com probabilidade de erro arbitrariamente pequena.

Estas técnicas de Codificação de Canal utilizam-se para proteger a informação digital, a transmitir no canal, do ruído e da interferência. O principal objetivo destas técnicas é, considerando um dado valor de taxa de erro requerido, reduzir o SNR necessário, aumentando a eficiência na utilização de potência. Ou seja, considerando um dado valor de SNR reduz-se a probabilidade de erro na receção, procedendo-se à melhoria da qualidade.

A grande vantagem da Codificação de Canal é melhorar o desempenho do sistema em relação a uma transmissão não codificada, permitindo aumentar a faixa de operação de um sistema de comunicação, reduzir a taxa de erros e diminuir a potência transmitida.

Sucintamente, a codificação de canal permite melhorar a eficiência de comunicação representando a Capacidade de Canal o limite máximo da referida eficiência.

Contudo, apesar de Shannon ter garantido que existe um código corretor, que permite que a informação possa ser transmitida através de um canal com uma taxa de erro arbitrariamente baixa, não especificou o modo como o mesmo se constrói [32]. Assim, desde o momento que *Shannon* apresentou os teoremas da Capacidade e Codificação de canal, a comunidade científica tem vindo intensivamente a procurar códigos corretores de erros de canais rádio que sejam fáceis de decodificar e que se aproximem tanto quanto possível do limite da Capacidade de Canal definida por Shannon. Em [33], [34], [35] e [36] foram propostos alguns dos referidos códigos corretores de erros.

Para implementar sistemas de comunicação acústicos submarinos sem fios, começou-se por reconverter as técnicas desenvolvidas para as comunicações via rádio para as quais já existem modelos bem conhecidos e amplamente estudados. Contudo devido às severas condições de propagação que existem no meio submarino, nomeadamente o multipercurso, as variações temporais do meio, os efeitos reflexão/refração da onda acústica que causam a dispersão temporal, e a fraca relação de sinal-ruído, faz com que estes sistemas tenham uma taxa efetiva de transmissão relativamente baixa.

O facto de o canal acústico submarino ser caracterizado por possuir uma reduzida largura de banda que provoca elevada distorção do sinal digital, e portanto uma elevada probabilidade de interpretação errada de bits, fez surgir a necessidade de implementar sistemas de comunicação de alto débito levando ao aparecimento de novas soluções.

No caso da comunicação entre veículos autónomos submarinos requerem-se comunicações sem fios em tempo real eficientes que garantam o envio e receção da informação em tempo útil e livre de erros. Apesar de atualmente ainda existirem limitações físicas nos decodificadores utilizados na receção, não permitindo estes um processamento ótimo que em tempo real permita entrar em linha de conta com as variações temporais do meio submarino, a obtenção de um modelo realista de propagação acústica submarina pode ser um fator determinante na conceção de sistemas de comunicações eficientes. Em [37] e [38] foi demonstrado que a capacidade de um canal aleatoriamente variante no tempo é condicionada pelo grau de conhecimento do canal entre o emissor e o recetor.

Nos últimos anos, têm sido propostas muitas técnicas para aumentar a taxa de transmissão dos sistemas de comunicação digital acústica submarina ([39], [40], [41] e [42]) cujos resultados que para além de derivarem das comunicações via rádio são baseados ainda em hipóteses pouco realistas, tais como:

- Os canais são considerados como sendo estáticos em que, para cada realização do canal, não se entra em linha de conta com a variação estocástica do mesmo ao longo do tempo;
- Não são impostas limitações no equipamento de transmissão assumindo-se que a potência de pico dos símbolos de entrada é ilimitada.

Nesta dissertação, o estudo apenas vai ser focado no ritmo máximo de transmissão que pode ser suportado pelo canal acústico submarino não se entrando em linha de conta com as arquiteturas do emissor e recetor nem com a codificação de canal.

A partir do ritmo máximo de transmissão irá ser definido o critério de decisão que será utilizado para validar a entrega de mensagens de sincronização trocadas entre os veículos submarinos. Para tal, para simular a comunicação entre os veículos autónomos submarinos no simulador NetMar_{SYS}, e os efeitos das falhas da mesma, e uma vez que a capacidade do canal exata com base em hipóteses

realistas ainda é desconhecida, vão ser considerados dois limites obtidos em [43]: limite coerente e limite pessimista da capacidade de canal. Estes limites, que indicam a faixa de valores em que se devem situar os ritmos máximos de informação que garantem a troca de informação (entre veículos) livre de erros, permitem que se entre em linha de conta com o comportamento estocástico ao longo do tempo do canal (*ao longo de um pacote de dados*) através da inclusão do Espectro de Doppler na fórmula do limite pessimista da Capacidade de Canal. Estes limites foram obtidos considerando hipóteses realistas em linha com o estado da arte dos canais rádio *wireless* WSSUS ([44] e [45]) sobre este tema, nomeadamente:

- O canal acústico submarino é duplamente dispersivo, isto é, exibe dispersão tanto no domínio do tempo (devido ao movimento relativo dos veículos que provoca o efeito de Doppler) como no domínio da frequência (que está relacionada com a dispersão do sinal devido aos efeitos do multipercurso existente no canal);
- A potência de pico dos símbolos de entrada e a potência média do canal é limitada;
- O canal é não-coerente, isto é, o emissor e o recetor apenas conhecem as propriedades estatísticas do canal não tendo o recetor qualquer conhecimento prévio da realização atual do canal.

À semelhança do que já foi previamente considerado no Capítulo 3, continua-se a assumir que o canal é WSSUS.

Assim, neste capítulo, na Seção 4.1 será descrita a arquitetura do modelo de comunicações que será utilizada nesta tese e a partir do qual será possível obter o equivalente discreto dos limites de capacidade de canal acústico submarino obtidos em [43] e que irão ser descritos em detalhe na Seção 4.2. Estes limites serão posteriormente utilizados no critério de decisão que definirá se mensagens de sincronização são ou não trocadas entre os veículos autónomos submarinos (ver Seção 5.4.5).

4.1 Estrutura do modelo de comunicações

Nesta seção vai ser descrita a estrutura do modelo de comunicações que vai ser considerado nesta dissertação, e a partir do qual vai ser possível obter o equivalente discreto que permitirá calcular a capacidade de canal a partir das equações obtidas em [43]. O referido modelo encontra-se representado na Figura E-1 do Anexo E.

Abaixo, e a partir da Figura E-1, vai ser descrita a sequência de passos que ocorrem durante uma transmissão digital e que permitem obter na receção o equivalente discreto do canal em banda de base. Assim, para uma sequência de símbolos a_k gerada por uma fonte digital aplicada ao sistema da Figura E-1:

- Os símbolos de entrada vão ser gerados com recurso à modulação discreta de pulsos modulados pelas amplitudes a_k (modulação PAM, do Inglês *Pulse Amplitude Modulation*) uma vez que este tipo de modulação é eficiente na utilização da potência de largura de banda em banda de base.
- Para gerar o sinal contínuo a ser transmitido em banda de base $x_c(t)$ utilizou-se um filtro de transmissão *square root raised cosine* no formatador de impulsos. O sinal $x_c(t)$ consiste assim numa sequência de versões atrasadas do sinal de impulso base $q_c(t)$ e é dado pela equação (4.2), e cujo espectro de potência $S_{x_c}(j\Omega)$ é dado pela equação (4.3) ([46]).

$$x_c(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k q_c(t - kT_b) \quad (4.2)$$

$$S_{x_c}(j\Omega) = \frac{1}{T_b} |Q_c(j\Omega)|^2 \sigma_a^2 \quad (4.3)$$

Onde,

- T_b é o intervalo de símbolo;
- $Q_c(j\Omega)$ é o espectro de potência do sinal de impulso base $q_c(t)$;
- σ_a^2 é a potência da sequência de símbolos transmitidos.

Note-se que foi escolhido o filtro de transmissão *square root raised cosine* uma vez que impulsos com esta forma satisfazem o critério de Nyquist após filtragem adaptada, e asseguram uma receção perfeita na ausência de ruído e do multipercurso no canal.

- Para passar o sinal para banda passante (definida pelo intervalo de frequências que sofrem menor atenuação e são preservadas pelo meio de transmissão) multiplica-se o sinal em banda de base $x_c(t)$ pela portadora complexa $\sqrt{2}e^{j\Omega_c t}$. A este sinal em banda passante complexo vai ser extraída a sua parte real, obtendo-se o sinal modulado $\tilde{x}_c(t)$, em torno da frequência de portadora Ω_c , e com espectro de potência $S_{\tilde{x}_c}$.
- De seguida o sinal modulado $\tilde{x}_c(t)$ é enviado através do canal de transmissão representado na Figura E-1 pela resposta na frequência $\tilde{G}_c(j\Omega)$, no qual é introduzido ruído branco Gaussiano com densidade espectral de potência, $S_{\tilde{\eta}_c}(j\Omega)$, constante e igual a $N_0/2$.
- Assim, o sinal recebido $\tilde{r}_c(t)$ é uma sequência de impulsos recebidos com ruído branco gaussiano. Ao sinal $\tilde{r}_c(t)$ é necessário aplicar operações inversas às aplicadas na transmissão de modo a recuperar o sinal original em banda de base.
- De modo a converter o sinal recebido em banda passante $\tilde{r}_c(t)$ para a banda de base, multiplica-se o sinal recebido $\tilde{r}_c(t)$ pela portadora complexa $\sqrt{2}e^{-j\Omega_c t}$ à saída do canal. De seguida é aplicado um filtro de receção passa-banda que visa eliminar a presença do ruído introduzido na cadeia de transmissão.

- De seguida, e antes de ser feita a amostragem dos impulsos recebidos (com intervalo de amostragem T_s), é aplicada uma filtragem adaptada à forma nominal dos impulsos transmitidos.

Para obter o equivalente discreto das equações que permitirão calcular a capacidade de canal, é necessário partir do conhecimento de que a equação da capacidade de canal em banda passante é dada pela equação (4.4) ([47]).

$$C = \int_0^{+\infty} \log \left(1 + \frac{S_{\tilde{x}_c}(j\Omega) |\tilde{G}_c(j\Omega)|^2}{S_{\tilde{\eta}_c}(j\Omega)} \right) d\Omega \quad (4.4)$$

Tal como já foi referido acima, para passar os sinais da banda passante para a banda de base multiplica-se o sinal recebido pela portadora complexa $\sqrt{2}e^{-j\Omega_c t}$. Deste modo, no domínio da frequência, esta operação consiste em fazer um deslocamento nos espetros $S_{\tilde{x}_c}(j\Omega)$, $\tilde{G}_c(j\Omega)$ e $S_{\tilde{\eta}_c}(j\Omega)$. Assim, o equivalente em base de base da equação (4.4) é então dado pela equação (4.5).

$$\begin{aligned} C &= \int_0^{+\infty} \log \left(1 + \frac{S_{\tilde{x}_c}(j\Omega) |\tilde{G}_c(j\Omega)|^2}{S_{\tilde{\eta}_c}(j\Omega)} \right) d\Omega = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \log \left(1 + \frac{S_{x_c}(j(\Omega + \Omega_c)) |\tilde{G}_c(j(\Omega + \Omega_c))|^2}{S_{\tilde{\eta}_c}(j(\Omega + \Omega_c))} \right) d\Omega \\ &= \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \log \left(1 + \frac{S_{x_c}(j\Omega) |G_c(j\Omega)|^2}{S_{\eta_c}(j\Omega)} \right) d\Omega \end{aligned} \quad (4.5)$$

Em que, S_{x_c} , G_c e S_{η_c} são, respetivamente, os equivalentes em banda de base de $S_{\tilde{x}_c}$, \tilde{G}_c e $S_{\tilde{\eta}_c}$, isto é:

- $S_{x_c}(j\Omega) = S_{\tilde{x}_c}(j(\Omega + \Omega_c))$
- $G_c(j\Omega) = \tilde{G}_c(j(\Omega + \Omega_c))$
- $S_{\eta_c}(j\Omega) = S_{\tilde{\eta}_c}(j(\Omega + \Omega_c))$

Se se considerar o modelo puramente com ruído representado na Figura 4-1, a equação equivalente da capacidade de canal em banda de base (equação (4.5)) pode ser obtida a partir da equação (4.6).

$$C = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \log \left(1 + \frac{S_{x_c}(j\Omega) |G_c(j\Omega)|^2 |Q_c(j\Omega)|^2}{S_{\eta_c}(j\Omega) |Q_c(j\Omega)|^2} \right) d\Omega = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \log \left(1 + \frac{S_{x_c}(j\Omega) |H_c(j\Omega)|^2}{N_0 |Q_c(j\Omega)|^2} \right) d\Omega \quad (4.6)$$

Onde $H_c(j\Omega)$ é por definição a forma dos impulsos no recetor.

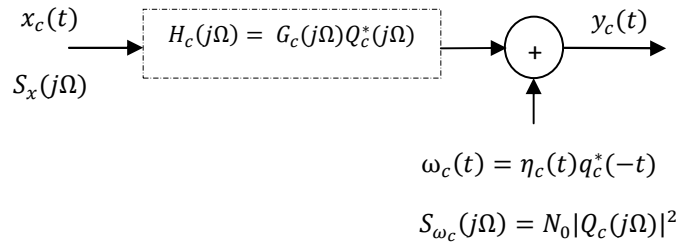


Figura 4-1: Modelo de comunicação puramente com ruído.

Assim, e considerando-se a equação (4.3), obtém-se a equação de capacidade de canal em banda de base dada por:

$$C = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \log \left(1 + \frac{\frac{1}{T_b} * |Q_c(j\Omega)|^2 \sigma_a^2 |H_c(j\Omega)|^2}{N_0 |Q_c(j\Omega)|^2} \right) d\Omega = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \log \left(1 + \frac{\sigma_a^2 |H_c(j\Omega)|^2}{N_0 T_b} \right) d\Omega \quad (4.7)$$

Na passagem para tempo discreto considera-se que $\Omega = \omega/T_s$ obtendo-se o equivalente discreto em banda de base representado na Figura 4-2.

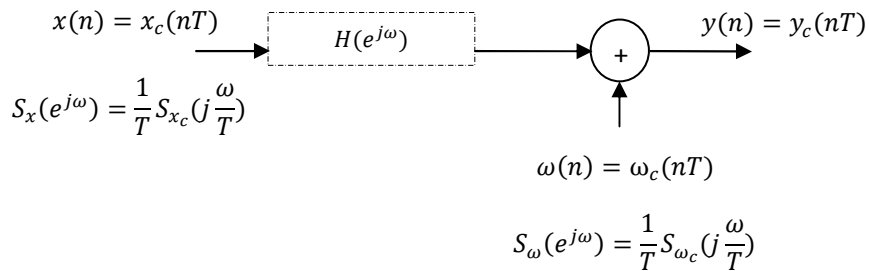


Figura 4-2: Equivalente discreto da forma dos impulsos do recetor em banda de base.

Assim a equação da capacidade de canal em banda de base e tempo discreto é dada pela equação (4.8) cuja unidade é bits por segundo (bps).

$$C_s = \frac{1}{T_s} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} \log \left(1 + \frac{\sigma_a^2 * |H(e^{j\omega})|^2}{N_0 * T_b} \right) d\Omega \quad (4.8)$$

4.2 Limites de capacidade

Em [43] foram propostos dois limites para a Capacidade de Canal:

4.2.1 Capacidade coerente

Este limite corresponde à hipótese ideal para a obtenção do valor da capacidade, isto é, assume-se que o canal não apresenta variações ao longo do tempo ou que é possível seguir as referidas variações do canal através da utilização de recetores adaptativos que conseguem estimar as características do canal. Assume-se também que o recetor conhece cada realização do canal e que existe limitação na potência dos símbolos de entrada x_n .

A expressão do limite superior da capacidade, designada por capacidade coerente, é então dada por:

$$C^{coh} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} E_H \left\{ \log \det \left(I_N + \frac{\Omega_x^2}{\beta \sigma_w^2} H H^T \right) \right\} \quad (4.9)$$

Em que,

- H de dimensão $N \times N$ é a matriz de convolução das respostas impulsivas h_k obtida a partir de

$$H = \begin{bmatrix} h_{0,0} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & h_{1,0} & & & & \vdots \\ h_{L-1,L-1} & \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & h_{L,L-1} & & h_{L,0} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & h_{N-1,L-1} & \dots & h_{N-1,0} \end{bmatrix}$$

- Ω_x^2/β é a potência média do sinal transmitido;
- σ_w^2 é a potência de ruído ambiente do canal acústico submarino, em que no equivalente discreto que será utilizado (equação (4.8)) irá ser assumido como Gaussiano e que pode ser descrito pela equação (2.7).

Note-se que o limite da capacidade de canal em tempo contínuo dado pela equação (4.9) tem como equivalente discreto a equação (4.8). Deste modo, para efeitos de simulação será considerada a equação (4.8) obtida na seção anterior.

4.2.2 Limite inferior da capacidade não coerente

De modo a caraterizar a expressão da capacidade coerente de um modo mais realista e utilizando os resultados obtidos em [44], [45] e [48], em [43] foi também proposto um limite inferior da Capacidade de Canal dado pela equação (4.10) que permite entrar em linha de conta com o comportamento dinâmico do canal acústico submarino através da inclusão do Espetro de potência de Doppler do Canal $S_H(v)$, e onde se considera que os símbolos de entrada são limitados em potência.

$$L_{peak}^{DS} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} E_H \left\{ \log \det \left(I_N + \lambda \frac{\Omega_x^2}{\beta \sigma_w^2} H H^T \right) \right\} - \int_{-1/2}^{1/2} \log \left(1 + \frac{\Omega_x^2 \Xi_H^2}{\beta \sigma_w^2} S_H(v) \right) dv \quad (4.10)$$

Onde na equação (4.10),

- λ é um fator de ponderação dado por:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{2\beta}{\pi e}, & 1 \leq \beta \leq 3 \\ \frac{e^{\gamma \Omega_x^2 / \beta}}{\pi e K^2 \Omega_x^2}, & \beta > 3 \end{cases} \quad (4.11)$$

Onde K e γ são as soluções do seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \int_{-\frac{\Omega_x^2}{2}}^{\frac{\Omega_x^2}{2}} K e^{-\gamma u^2} du &= 1 \\ \int_{-\frac{\Omega_x^2}{2}}^{\frac{\Omega_x^2}{2}} u^2 K e^{-\gamma u^2} du &= \frac{\Omega_x^2}{2\beta} \end{aligned} \quad (4.12)$$

E que podem ser resolvidos numericamente.

- Ξ_H^2 representa a soma das potências associadas a cada um dos percursos da onda acústica e é dado por:

$$\Xi_H^2 = \sum_{k=0}^{L-1} \sigma_h^2(k) \quad (4.13)$$

em que $\sigma_h^2(k)$ representa cada elemento da diagonal principal da matriz de covariância $R_H(k)$ das respostas impulsivas dos vários percursos realizados pela onda acústica .

Entrando em linha de conta com a hipótese considerada no Capítulo 3 – Subseção 3.1.2, a potência de cada percurso corresponde à soma da potência da componente lenta com a potência da componente rápida da resposta impulsiva. Contudo, devido ao facto de a

potência da componente rápida ser praticamente nula (ruído branco gaussiano) \mathcal{E}_H^2 é dado pela soma das potências da componente lenta das respostas impulsivas do canal acústico submarino.

- $S_v(v)$ é o espectro de potência de Doppler que vai ser obtido utilizando a equação (3.20), dada por:

$$S_v(v) = \sum_{l=1}^L \frac{\sigma_l^2}{|A_l(f - \frac{v_l}{2\pi})|^2} \quad (4.14)$$

Assim, este limite pode ser interpretado como uma hipótese pessimista do valor da capacidade e é obtido pela diferença de dois termos:

- O primeiro termo corresponde à capacidade coerente (equação (4.9)) ao qual é incluída uma perda/ fator de ponderação de SNR expressa pelo fator λ .
- O segundo termo pode ser interpretado como uma penalidade que exprime a perda de capacidade do canal provocada pela inclusão do espectro de potência de Doppler que descreve o comportamento estocástico do canal acústico submarino.

5 Networked Marine Systems Simulator

O *Networked Marine Systems Simulator* (NetMar_{SyS}) é um *software*, desenvolvido no IST/ISR com o objetivo de simular diferentes tipos de missões cooperativas envolvendo um número variável de veículos submarinos.

Neste simulador o elevado nível de detalhe com que o meio ambiente pode ser modelado permite entrar em linha de conta tanto com o efeito de correntes de água sobre a dinâmica do veículo, bem como, com os atrasos e ruído do meio que afetam as comunicações submarinas.

A estrutura modular em que foi desenvolvido permite futuros *upgrades* que visam incorporar modelos de comunicação acústica mais sofisticados assim como novos protocolos de comunicação.

Devido à importância que este simulador tem nesta dissertação, neste capítulo vai ser feita uma breve descrição da estrutura geral do simulador e das funcionalidades implementadas (Seção 5.1) e na Seção 5.4 vai ser descrito o modo como o referido simulador foi adaptado para entrar em linha de conta com os resultados obtidos no Capítulo 3 e Capítulo 4, nomeadamente:

- A inclusão no simulador de um modelo de canal realista adaptado às especificidades do canal acústico submarino (multipercurso, velocidade de propagação do som, etc.);
- As equações dos limites da Capacidade Canal, referidos no Capítulo 4 (Seção 4.2), que vão definir se as mensagens trocadas entre os veículos autónomos submarinos são ou não entregues.

Note-se que neste capítulo apenas vão ser descritas as partes relevantes para o desenvolvimento desta dissertação. Para mais informação deve ser lido o documento com a descrição geral do simulador [49].

5.1 Overview – Estrutura do NetMarSyS

A interface principal do NetMar_{SyS} está dividida em 4 áreas que se encontram representadas na Figura 5-1:

- No **Bloco 1** encontram-se os menus dedicados a definir o ambiente da missão:
 - *Water current*;
 - *Coordination*;
 - *Communications*.
- No **Bloco 2** são definidas as especificações da missão e é neste bloco onde são descritas as trajetórias que os veículos vão realizar ao longo da simulação. No Anexo D – NetMarSyS encontra-se descrito e exemplificado o modo como se constrói a trajetória a ser realizada pelos veículos autónomos ao longo da missão.

Apesar de o simulador permitir ao utilizador definir as suas próprias trajetórias, o *software* inclui uma biblioteca que permite escolher diferentes missões a utilizar na simulação e onde também é possível escolher diferentes blocos de veículos.

- No **bloco 3** o utilizador pode escolher o número e o tipo de veículos que quer utilizar na missão.
- No **bloco 4** existe um conjunto de interfaces que permitem ao utilizador visualizar os resultados finais da missão e criar vídeos a partir das simulações realizadas.

Na seção 5.2 e na Seção 5.3 serão descritos em maior detalhe os blocos 1 e 3 uma vez que estes são os blocos que vão ser adaptados para permitirem entrar em linha de conta com as considerações feitas nos Capítulos 3 e 4.

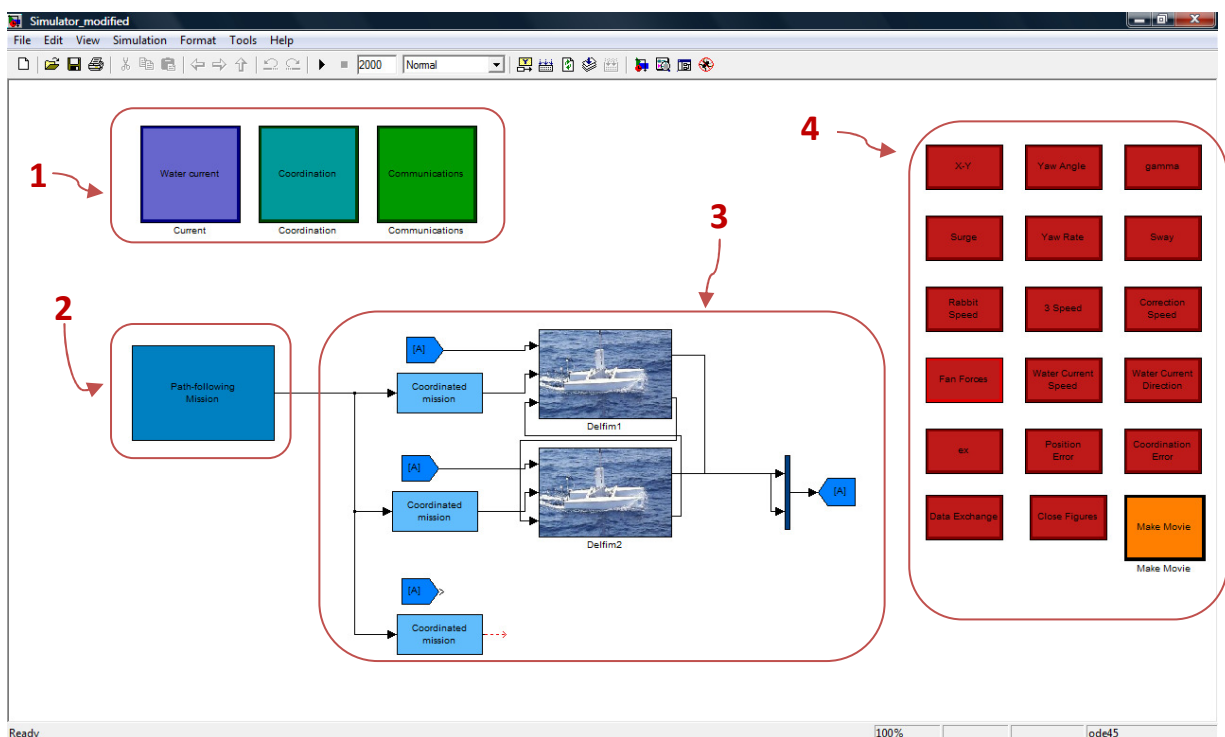


Figura 5-1: Interface principal do NetMarsys.

5.2 Bloco 1 – Definição do ambiente da missão

A definição do ambiente da missão (referido na Seção anterior) é feita através dos menus representados na Figura 5-2.

- Menu *Current*:
 - Menu em que são definidos os parâmetros que vão afetar o movimento dos veículos: a velocidade e a direção da corrente da água, *current speed* e *current direction*, respetivamente.

- Menu *Coordination*:
 - Este menu contém informação acerca da topologia de comunicação entre veículos. Esta topologia é descrita utilizando a teoria dos grafos em que cada veículo é definido como o nó de um grafo, e dois nós estão ligados por um arco se existir uma ligação de comunicação entre os veículos correspondentes. Esta formulação permite descrever toda a rede de veículos através de uma matriz de adjacência, em que o termo $i - j$ é não nulo se os veículos i e j estiverem ligados, e através de uma *degree matrix*, onde os elementos da diagonal representam o número total de ligações de comunicação do veículo correspondente. Este menu contém também outros parâmetros que regulam as estratégias de cooperação entre veículos.
- Menu *Communications*:
 - Este menu é utilizado para definir as propriedades de comunicação do canal, tais como:
 - A velocidade do som na água, que presentemente é considerada constante ao longo da simulação;
 - A distância máxima que permite a comunicação entre veículos;
 - Intervalo entre transmissões entre veículos;
 - Definição das zonas de sombra existentes no meio em que se realiza a comunicação entre veículos.

Note-se que no âmbito desta dissertação apenas vai ser adaptado o menu relativo às propriedades do canal (menu *Communications*), de modo a permitir entrar em linha de conta com as variações das características físicas do meio acústico submarino entre dois pontos no espaço (posição dos veículos) tornando assim o simulador mais realista.

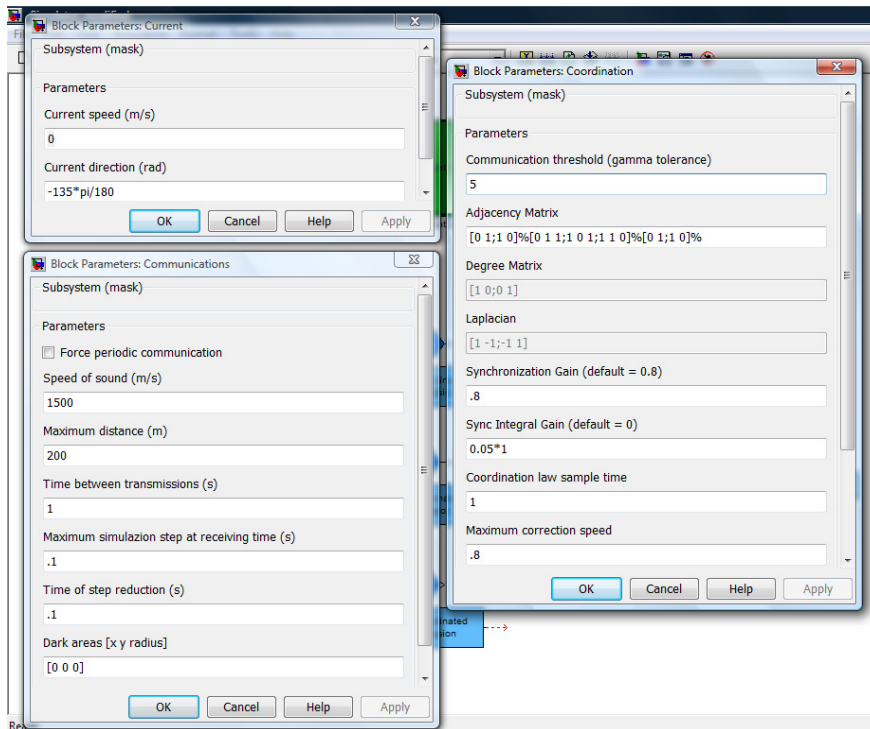


Figura 5-2: Menus Current, Communications e Coordination que definem o ambiente da missão.

5.3 Bloco 3 - Veículos

Neste simulador existem três modelos de veículos que permitem simular diferentes missões:

- **Syrene:** Veículo vaivém submarino com 4000kg, desenvolvido para estacionamento preciso de laboratórios bênticos (no fundo do mar) e cuja profundidade máxima de operação são 4000 metros de profundidade.
- **Delfim:** O DELFIM é um veículo autónomo de superfície que tem como objetivo executar missões de levantamento de mapas batimétricos costeiros.
- **Caravela:** É também um veículo autónomo de superfície com uma autonomia superior a mil milhas, sendo um verdadeiro pioneiro a nível mundial e um complemento importante dos navios oceanográficos em missões de “rotina” que não requerem a intervenção constante de seres humanos.

Apesar de existirem três diferentes veículos e de poderem ser testados diferentes tipos de missões, todos os referidos modelos de veículos partilham no seu interior a mesma estrutura que se encontra representada na Figura 5-3:

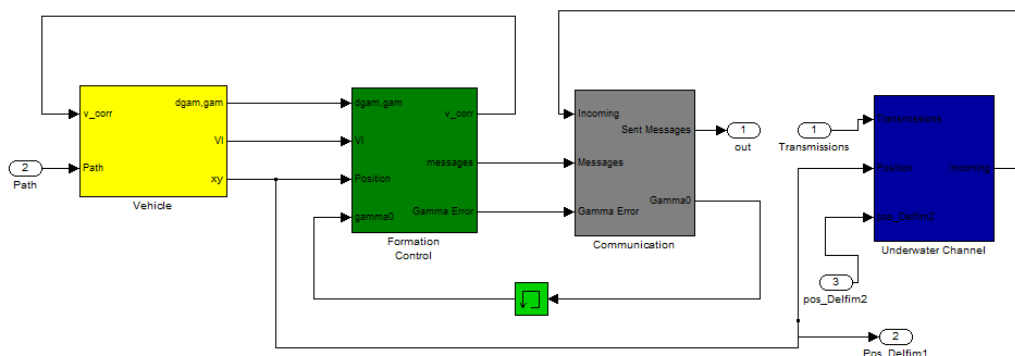


Figura 5-3: Estrutura interna dos veículos.

Em que, os blocos *Vehicle* e *Formation Control* definem a dinâmica do veículo e os blocos *Communication* e *Underwater Channel* regulam a troca de mensagens entre veículos, nomeadamente:

- **Vehicle:** Bloco onde é definida a dinâmica e a cinemática do veículo, juntamente com o controlador que comanda a trajetória dos veículos. No interior deste bloco podem ser criados modelos adicionais para descreverem novos veículos a serem incorporados no simulador. Para tal, basta criar um novo bloco com as dinâmicas desejadas e controlo de caminho a ser seguido pelo veículo. Toda a restante estrutura do simulador irá permanecer inalterada.
- **Formation Control:** Bloco que contém os algoritmos de coordenação que mantém os veículos em formação.
- **Communication:** Bloco que coordena as mensagens trocadas entre o conjunto de veículos autónomos submarinos considerados na simulação.
- **Underwater Channel:** Bloco responsável por avaliar a entrega, ou falha, de uma determinada mensagem enviada por um veículo emissor e recebida por um veículo recetor, e que simula o atraso existente na comunicação causado pelo movimento dos veículos e pela propagação do sinal submarino. Este atraso na transmissão depende da posição do veículo emissor no momento da transmissão e da posição do veículo recetor no momento da receção da mensagem.

Atualmente o modelo implementado neste simulador no bloco *Losses and Delays* (bloco que se encontra no interior do bloco *Underwater Channel* – Figura 5-4) é muito simplificado, onde se considera que uma mensagem é recebida se num determinado período de tempo a variável aleatória x com distribuição uniforme é maior ou igual que um valor *threshold* n (ver Figura 5-5). O valor de n é determinado em função do comprimento da mensagem, distância entre veículos e da posição dos veículos na área em que é realizada a simulação. Note-se que é possível definir no bloco *Communications* (Seção 5.2) áreas nas quais a comunicação é afetada por uma maior quantidade de ruído ou que se está perante uma zona de sombra.

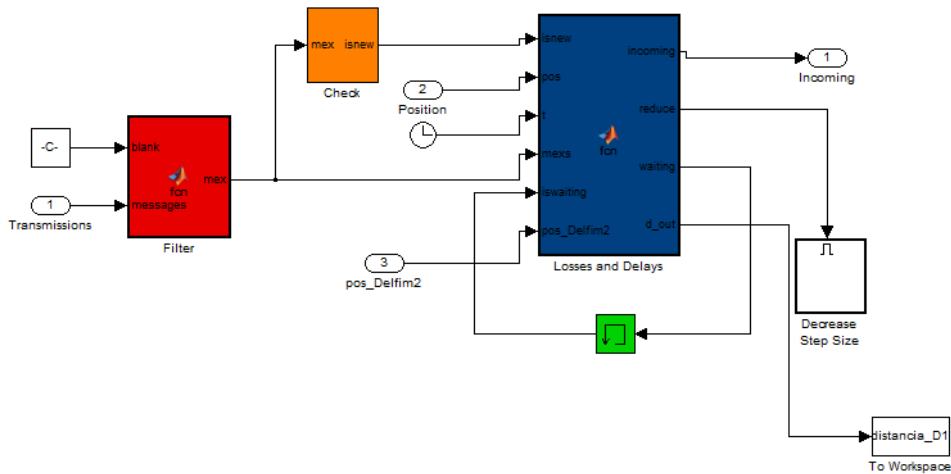
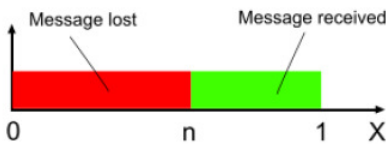


Figura 5-4: Estrutura interna do bloco Underwater Channel - Bloco Losses and Delays.

Threshold: $n = k \times f(d)$

k is a function of the message, of the vehicle position and of the channel characteristics

f is a function of the distance between the transmitter and the receiver



$$d > d_{\max} \quad f = 1$$

$$d < d_{\max} \quad f = 1 - \exp(-d/(d_{\max}))$$

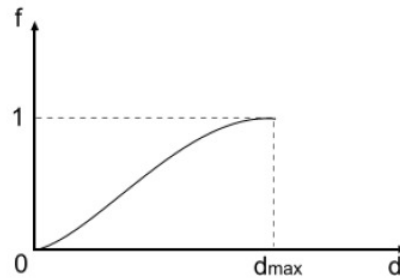


Figura 5-5: Critério de decisão utilizado atualmente na troca de mensagens de sincronização entre veículos autônomos submarinos [49].

Na nova versão do simulador, no modelo dos veículos apenas vão ser feitas alterações no interior do bloco *Underwater Channel* (e consequentemente, no bloco *Losses and Delays*), que serão descritas na Subseção 5.4.4, permanecendo todos os restantes blocos inalterados.

5.4 Simulador realista

Tal como já foi referido nos capítulos precedentes, o objetivo desta dissertação é tornar a transmissão das mensagens trocadas entre veículos submarinos autônomos mais realista, fazendo uso de métricas realistas que validam a entrega, ou respetiva falha, das mesmas. Para tal o estudo do efeito das falhas de comunicação no desempenho de missões coordenadas envolvendo veículos marinhos autônomos vai ser efetuado no bloco *Underwater Channel* (referido na Seção 5.3). É neste bloco que vão ser incluídos os resultados obtidos no Capítulo 3 e Capítulo 4, nomeadamente:

- Vai ser considerado um modelo de propagação realista onde se vão incluir as características físicas do canal acústico submarino, tais como o perfil da velocidade do som, multipercurso e perfil batimétrico, e onde também se irá considerar o desvio de Doppler provocado pelo movimento relativo dos veículos submarinos (Capítulo 3);
- Vão ser considerados os limites da capacidade de canal que vão ser utilizados como critério de decisão para definir se a troca de mensagens entre veículos é ou não entregue, e que permitem entrar em linha de conta com o comportamento dinâmico do canal através da inclusão do Espectro de potência de Doppler (Capítulo 4).

Para além das referidas modificações que vão ser feitas no bloco *Underwater Channel* (Subsecção 5.4.4), nas subsecções abaixo (5.4.1, 5.4.3 e 0) vão ser também descritas todas as restantes alterações feitas no simulador NetMar_{SYS} que vão permitir ao utilizador carregar todos os dados necessários para a execução da simulação.

Note-se que nesta nova versão do simulador apenas se está a considerar a comunicação entre dois veículos autónomos submarinos, deixando como trabalho futuro a inclusão de estratégias distribuídas que permitem a comunicação entre múltiplos veículos autónomos.

5.4.1 Definição do ambiente da missão – Novos blocos

Na nova versão do simulador foram criados os seguintes blocos que se encontram representados na Figura 5-6:

- **Impulse Response:** Bloco responsável por carregar as diretorias onde se encontra o código do Bellhop que vai permitir simular as respostas impulsivas do canal acústico submarino (Capítulo 3) e obter os atrasos existentes na comunicação entre veículos. Note-se que antes de correr o simulador do ISR pela primeira vez é necessário instalar o *software* do Bellhop que se encontra disponível em <http://oalib.hlsresearch.com/Modes/AcousticsToolbox/>.
- **OceanDB:** Carrega as bases de dados do *software* descrito no Capítulo 3 [30] que permite obter as bases de dados do perfil batimétrico do fundo oceânico e o perfil da velocidade do som que vão ser utilizados pelo Bellhop.

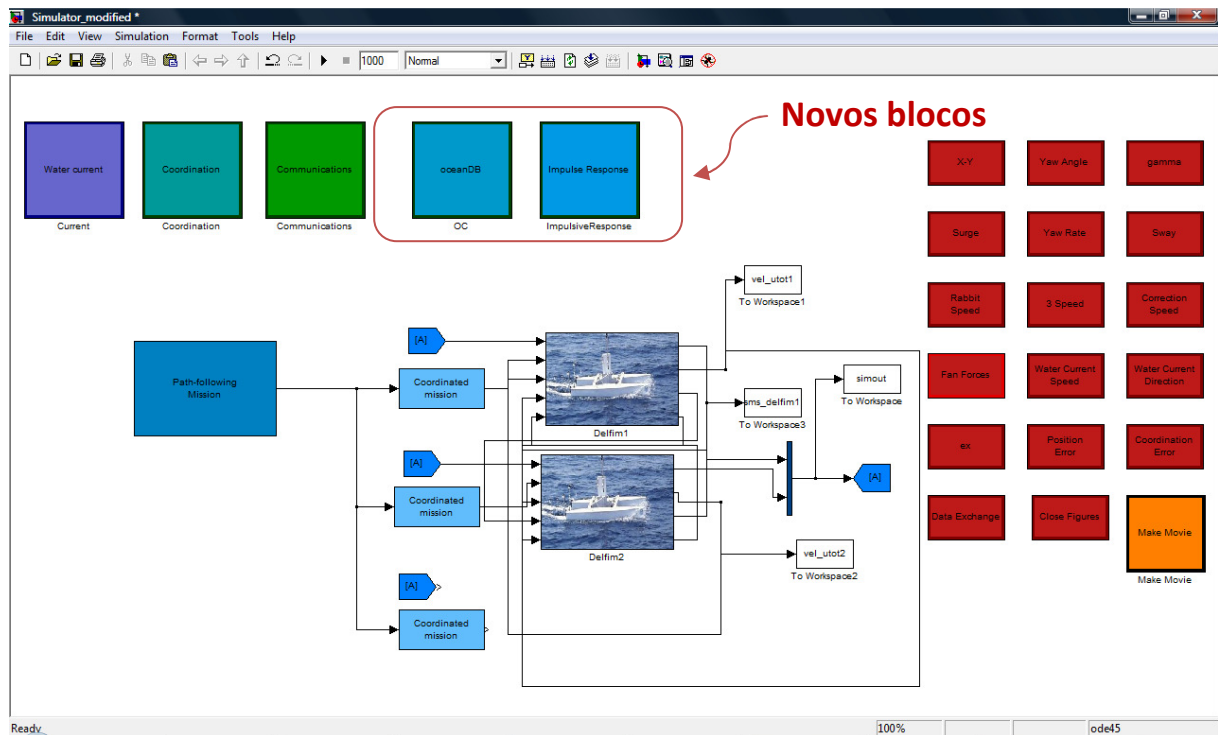


Figura 5-6: Blocos criados na nova versão do simulador que definem o ambiente da missão.

5.4.2 Bloco Communication

O bloco *Communication* foi alterado de modo a permitir ao utilizador definir a potência do sinal transmitido pelos veículos, assim como, a sua frequência central, largura de banda e o fator de *rolloff* que vão ser utilizados no cálculo da capacidade de canal (ver Figura 5-7). Relativamente à versão anterior deixaram de existir os parâmetros relativos à distância máxima que permitia a comunicação entre os veículos, a velocidade do som e a definição das zonas de sombra, uma vez que estas passarão a ser consideradas durante a execução do modelo de propagação acústica Bellhop e a partir da base de dados fornecida pelo *software* OceanDB.

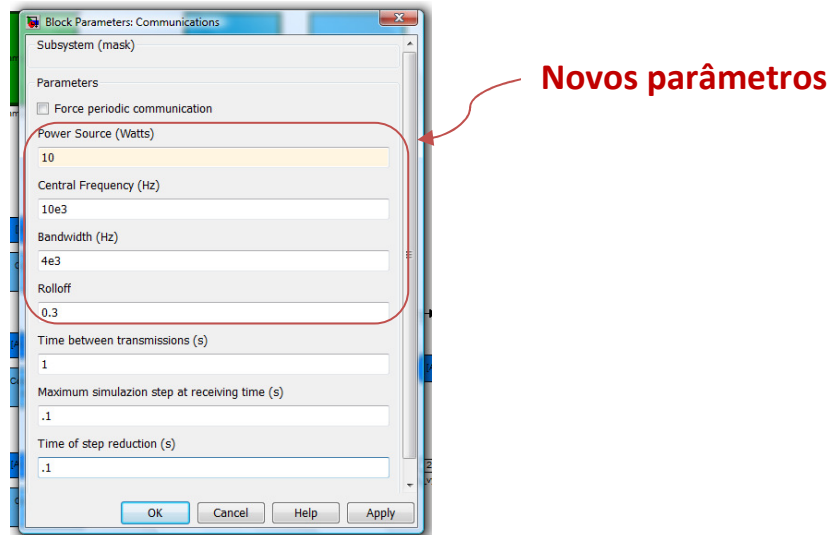


Figura 5-7: Nova versão do bloco Communications.

5.4.3 Veículos – Novos blocos

Na versão anterior do simulador, na estrutura dos modelos dos veículos (que se encontram na biblioteca do simulador) apenas eram definidos os parâmetros relativos à posição, direção e velocidade iniciais do veículo.

Na nova versão do simulador, a estrutura dos modelos de veículos foi adaptada de modo a poderem ser definidos pelo utilizador os seguintes parâmetros (ver Figura 5-8):

- No campo *Depth* pode ser definida a profundidade do veículo a ser considerada durante a simulação. Note-se que se considera a profundidade dos veículos constante ao longo da simulação.
- Uma vez que este simulador trabalha com coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*), no campo *UTM* é definida a localização (UTM) da superfície terrestre onde vai ser realizada a simulação da comunicação entre veículos autónomos. Neste campo deve ser escolhida uma das 60 zonas UTM da superfície terrestre de acordo com o que está exemplificado na Figura 5-8, onde foi escolhida a posição 29S.

Durante a simulação, este valor vai ser convertido de coordenadas UTM para coordenadas expressas em latitude e longitude, e que servirão como parâmetro de entrada do OceanDB (Seção 5.4.1), uma vez que este *software* precisa de conhecer a localização dos veículos neste tipo de coordenadas.

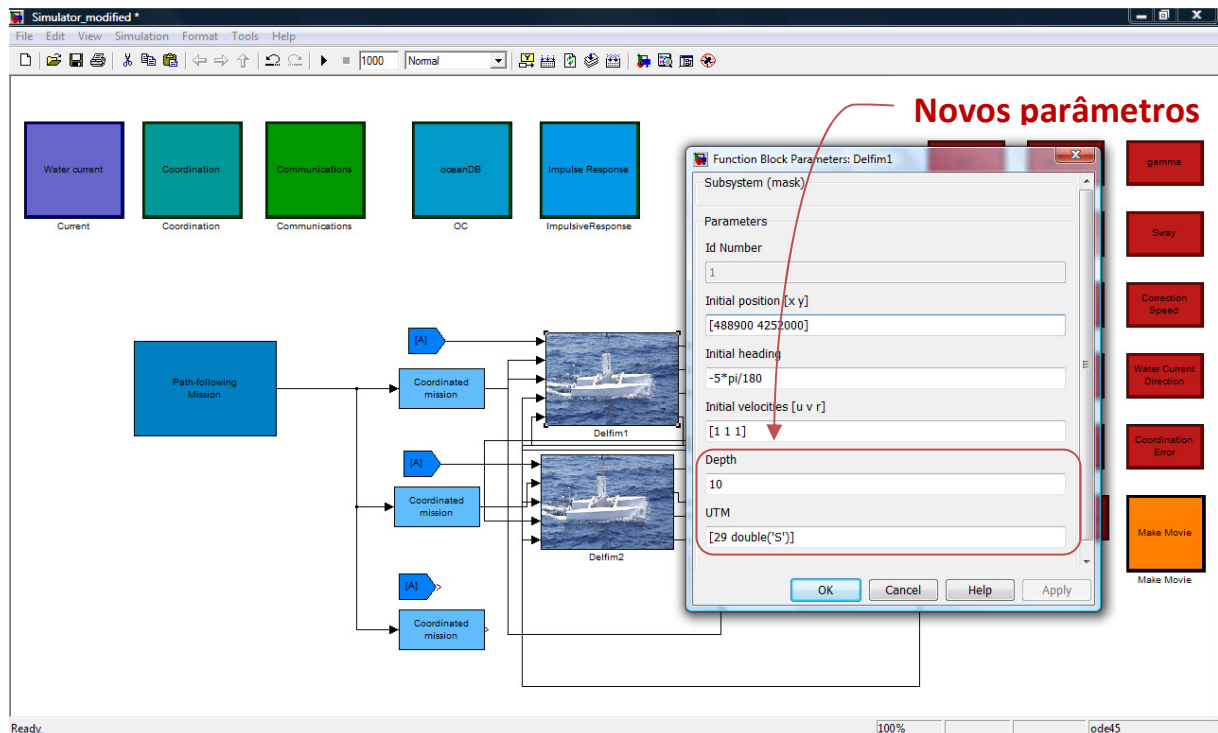


Figura 5-8: Parâmetros incluídos na estrutura dos modelos dos veículos na nova versão do simulador.

5.4.4 Underwater channel

Aqui vai ser descrito o modo como o bloco *Underwater Channel* e o bloco *Losses and Delays* foram modificados de modo a permitir entrar em linha de conta com os resultados referidos na introdução desta Seção.

Nesta nova versão do simulador NetMar_{sys} os referidos blocos foram adaptados de modo a poderem passar a receber como parâmetros de entrada as velocidades de cada um dos veículos que estão a ser considerados na simulação (Figura 5-9 e Figura 5-10). Estas são as velocidades que vão permitir calcular o desvio de Doppler provocado pelo movimento relativo de cada um dos veículos de acordo com a equação (2.9).

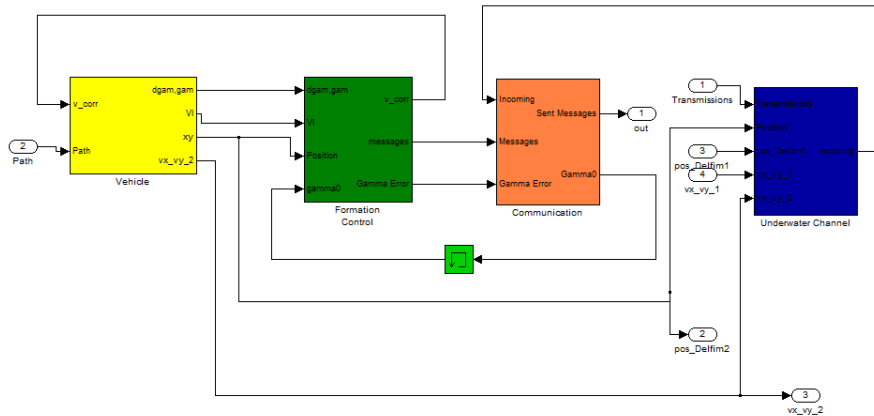


Figura 5-9: Nova versão do bloco Underwater channel.

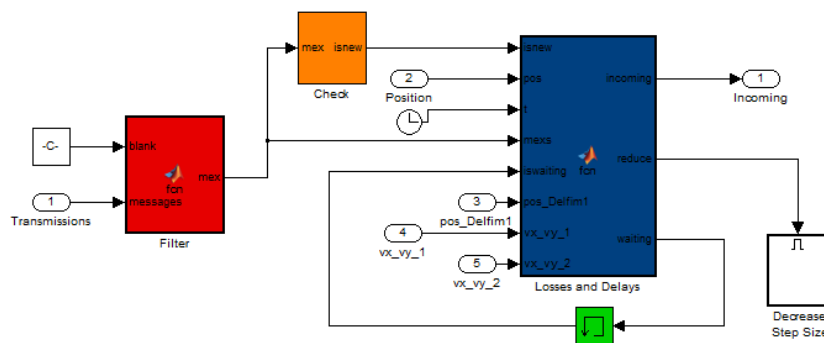


Figura 5-10: Nova versão do bloco Losses and Delays.

Entrando em linha de conta com a posição dos veículos ao longo do tempo durante a execução da simulação, o bloco *Losses and Delays* foi adaptado de modo a:

- Ser invocado o *software* OceanDB que vai permitir obter os perfis batimétricos e os perfis da velocidade do som entre os dois veículos para cada instante t da simulação.
- Ser criado o ficheiro principal de entrada do Bellhop (*environmental file*) que recebe como parâmetros de entrada:
 - z : perfil batimétrico obtido pelo OceanDB;
 - ssp : perfil da velocidade do som obtido pelo OceanDB;
 - $depths$: profundidades associadas ao ssp obtido pelo OceanDB;
 - $Depth$: profundidade a que se encontra o veículo submarino autónomo que foi definido na estrutura do veículo (Subsecção 5.4.3);
 - d : distância existente entre os veículos em cada instante da simulação.
- Ser invocado o Bellhop (após a criação do *env file*) que vai permitir calcular as amplitudes e os atrasos que vão ser integrados na equação resposta impulsiva descrita no capítulo 3 (equação (3.8)).

- Por fim vão ser calculados os limites da capacidade de canal descritos no Capítulo 4, que irão permitir definir a entrega, ou respetiva falha, das mensagens trocadas entre os veículos.

5.4.5 Critério de decisão da troca de mensagens de sincronização entre veículos

Ao invés do anterior critério de decisão para validar a entrega de mensagens trocadas entre veículos descrito na Seção 5.3, nesta nova versão o critério irá basear-se numa métrica heurística baseada na probabilidade de erro obtida a partir do valor pessimista da capacidade de canal (L_{peak}^{DS}) obtido em cada instante da simulação.

Assim, considerar-se-á que a mensagem é entregue com probabilidade de erro igual a zero sempre que o valor de L_{peak}^{DS} seja superior ou igual a um valor de capacidade *Threshold* C_{th} . Caso o valor de L_{peak}^{DS} seja inferior ao de C_{th} , apenas se considera que a mensagem é entregue, se num determinado instante da simulação, a variável aleatória x com distribuição uniforme (gerada com recurso ao comando *rand* do Matlab) é maior ou igual que a probabilidade de erro dada pela equação (5.1).

$$P_{erro} = \exp^{(L_{peak}^{DS}/(L_{peak}^{DS}-C_{th}))} \quad (5.1)$$

Assim,

$$\begin{cases} P_{erro} = 0, & L_{peak}^{DS} \geq C_{th} \\ P_{erro} = \exp^{(L_{peak}^{DS}/(L_{peak}^{DS}-C_{th}))}, & L_{peak}^{DS} < C_{th} \end{cases}$$

6 Resultados de Simulação

Nesta seção apresentam-se os principais resultados obtidos em simulação.

Começa-se por simulações simples (Seção 6.1) em que se apresentam os resultados numéricos da variação dos valores da capacidade de canal em função da distância existente entre o emissor e o recetor, onde se irá tomar como referência os valores de capacidade obtidos em [14]. De seguida na Seção 6.2, apresentam-se os resultados obtidos a partir da nova versão do simulador NetMar_{sys} onde foram integrados os vários elementos novos descritos nos capítulos precedentes. Por fim, na Seção 6.3 será efetuada a análise dos resultados obtidos na simulação e será realizada a comparação da taxa de sucesso no envio de mensagens dos veículos com os resultados da versão original do simulador.

6.1 Variação da capacidade de canal em função da distância

Nesta seção serão apresentados os valores de capacidade de canal obtidos com recurso à equação (4.9), em que considerar-se-á numa primeira aproximação que a velocidade do som é constante com o aumento da profundidade e posteriormente irá ser considerada uma velocidade do som variável com a profundidade. Irá ser também analisada a influência do perfil batimétrico considerado nas simulações nos valores de capacidade de canal. Esta análise permitirá observar de que modo é influenciado o valor do ritmo máximo de transmissão com a variação do cenário de simulação que se considera.

Para a análise que vai ser efetuada nesta seção apenas se vai entrar em linha de conta com a capacidade de canal coerente uma vez que a equação da capacidade de canal utilizada em [14] é equivalente à equação (4.9). O valor pessimista da capacidade de canal, dado pela equação (4.10), apenas vai ser utilizado na Seção 6.2 para definir o critério de decisão na troca de mensagens de sincronização entre veículos.

Os valores da capacidade coerente de canal, em cada uma das aproximações que serão realizadas, vão ser comparados com os valores obtidos a partir dos resultados apresentados em [14]. As comparações de resultados que serão feitos nesta seção permitirão validar os resultados obtidos a partir da equação da capacidade coerente de canal proposta em [43] e que será integrada no simulador NetMar_{sys}.

Assim, para a primeira simulação considerou-se uma distância máxima de 20 km entre veículos, uma profundidade do mar de 5000 metros e uma velocidade do som de 1500 m.s^{-1} para o caso em que esta é considerada constante com o aumento da profundidade.

Como referência vão ser utilizados os valores de capacidade representados na Figura 6-1 obtidos a partir dos resultados obtidos em [14] em que se considerou:

- Sinal transmitido com frequência central de 10 kHz;
- Largura de banda limitada de 4 kHz;
- Valores de potência do sinal transmitido crescentes com o aumento da distância entre veículos representados na Figura 6-2 e obtidos em [14], onde foi considerada uma relação sinal ruído de 20 dB no recetor;
- Potência de ruído, considerada Gaussiana e obtida a partir da equação (2.7), igual à média do valor das potências de ruído obtidas na banda considerada;
- A atenuação existente no meio acústico é obtida através da equação (2.6).

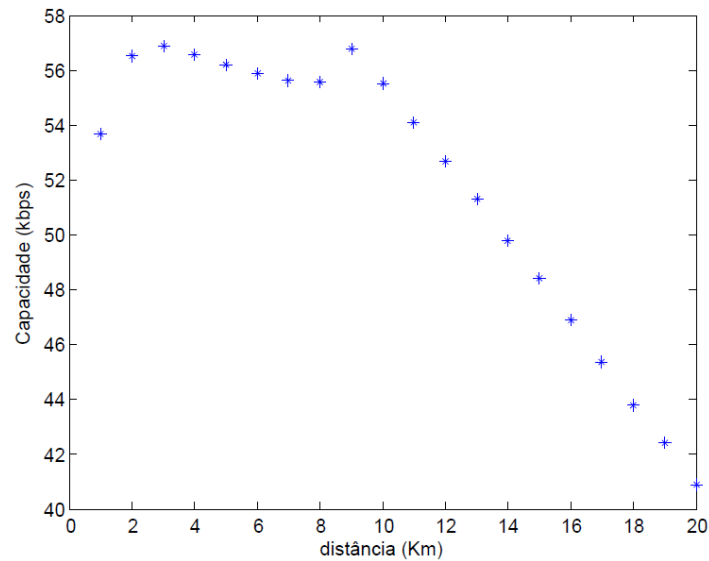


Figura 6-1: Valores de referência de Capacidade de Canal em função da distância para valores de potência de sinal transmitido crescentes com o aumento da distância.

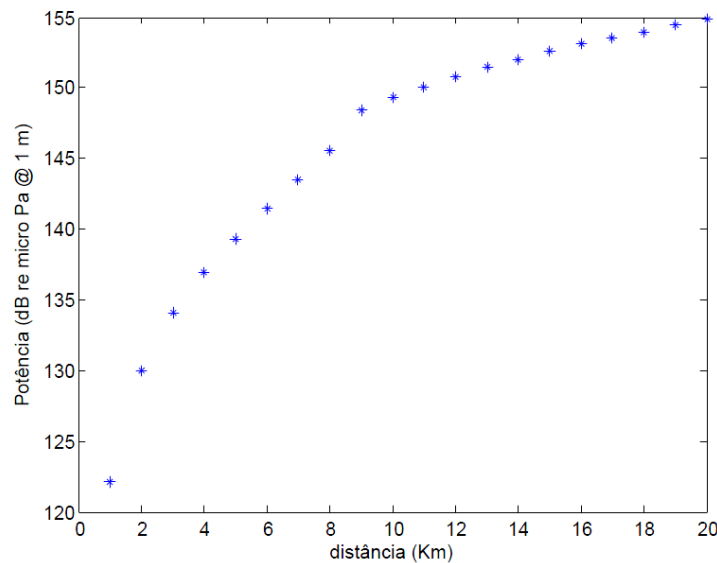


Figura 6-2: Potência de transmissão utilizada nas simulações.

Se se considerar uma potência constante com o aumento da distância entre veículos e igual à potência obtida a 1 Km (ver Figura 6-2), obtém-se um andamento da capacidade de canal em função da distância igual ao representado em Figura 6-3.

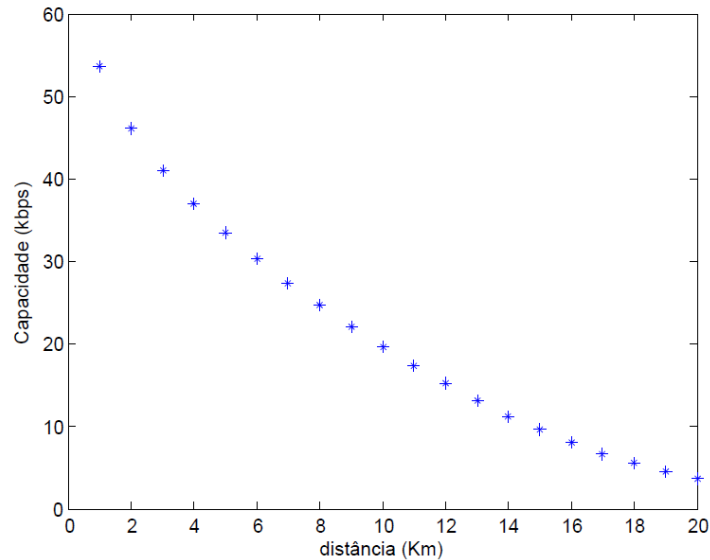


Figura 6-3: Valores de referência de Capacidade de Canal em função da distância para valores constantes de potência de sinal transmitido.

Utilizando-se agora a equação da capacidade coerente de canal referida no Capítulo 4 (equação (4.9)) obtiveram-se os valores de capacidade representados na Figura 6-4, onde foram considerados:

- Valores de potência de sinal transmitido crescentes com a distância e iguais aos utilizados no cálculo dos valores de capacidade da Figura 6-1;
- Potência de ruído calculada a partir da equação (2.7) para a frequência central de 10 kHz;
- Matriz de convolução das respostas impulsivas calculada a partir das amplitudes e atrasos obtidos através do simulador de propagação acústica Bellhop.

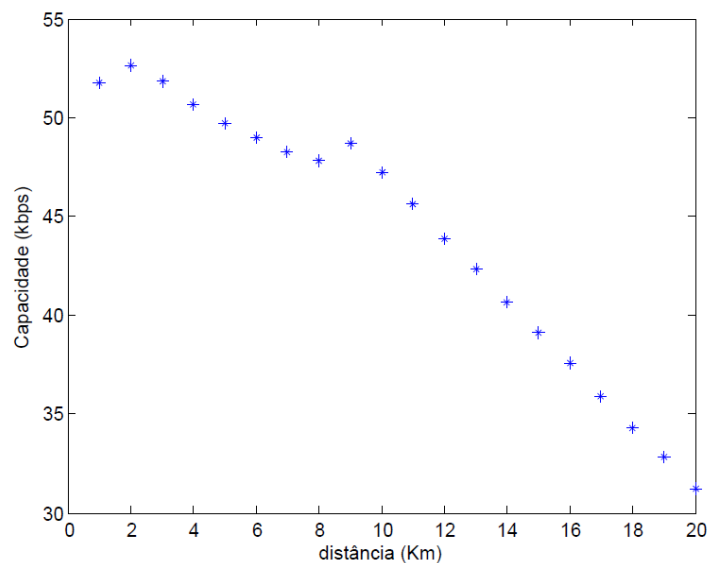


Figura 6-4: Valores de Capacidade de Canal Coerente em função da distância para valores de potência de sinal transmitido crescentes.

Na Figura 6-5 estão representados os valores de capacidade obtidos considerando-se a potência de transmissão constante e igual ao utilizado para 1 Km de distância entre os veículos.

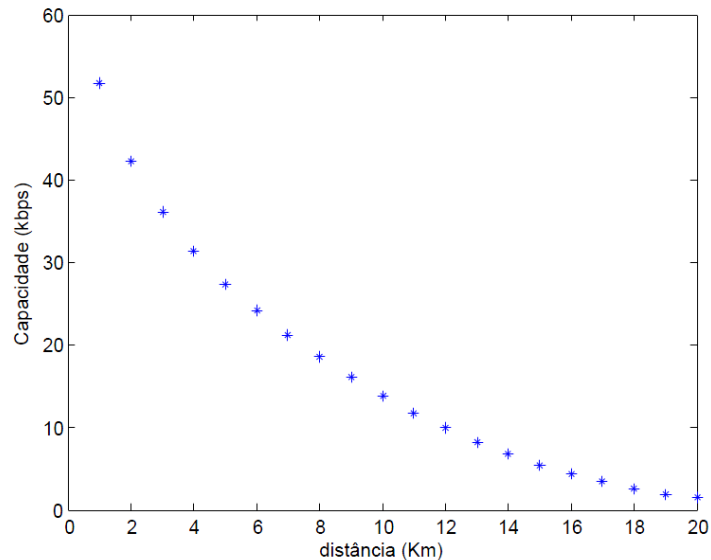


Figura 6-5: Valores de Capacidade Coerente em função da distância para valores constantes de potência de sinal transmitido.

Com o objetivo de ver a influência da variação da velocidade do som nos valores da capacidade de canal, nos resultados abaixo considerou-se a velocidade do som variável com o aumento da profundidade. Assim, na Figura 6-6 e Figura 6-7 estão representados os resultados da capacidade coerente de canal em que na primeira se considerou que a potência do sinal transmitido aumenta com a distância entre veículos e na segunda considerou-se a potência do sinal transmitido constante. Na Figura 6-8 está representado o perfil de velocidade do som considerado na simulação.

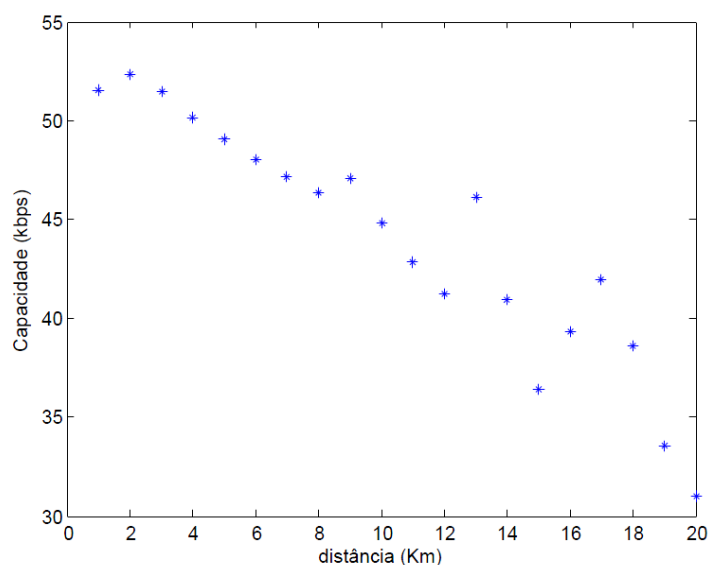


Figura 6-6: Valores de Capacidade Coerente em função da distância para valores de potência de sinal transmitido crescentes e valores da velocidade do som variáveis com a profundidade.

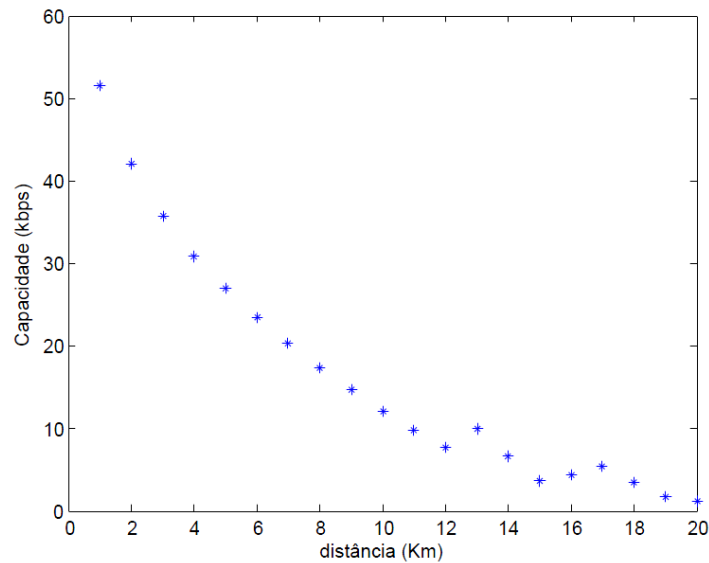


Figura 6-7: Valores de Capacidade Coerente em função da distância para a potência de sinal transmitido constante e valores da velocidade do som variáveis com a profundidade.

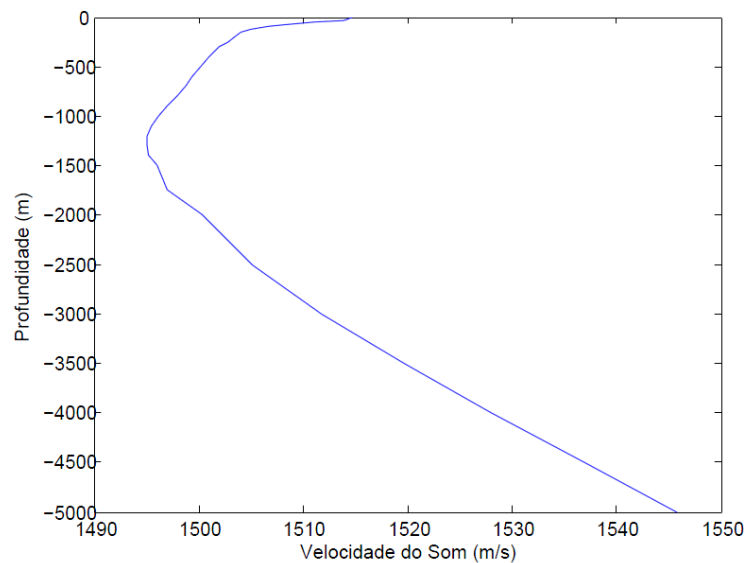


Figura 6-8: Perfil da velocidade do som utilizado na simulação com profundidade de 5000 metros.

Com o intuito de ver de que modo como o perfil batimétrico influencia os valores da capacidade de canal, nos resultados apresentados abaixo considerou-se uma profundidade do oceano de 1200 metros e potência de sinal transmitido constante. Na Figura 6-9 e Figura 6-10 estão representados, respectivamente, os valores da capacidade de canal obtidos para perfil de velocidade do som constante e variável para a profundidade de 1200 metros. Na Figura 6-11 está representado o perfil de velocidade do som considerado na simulação.

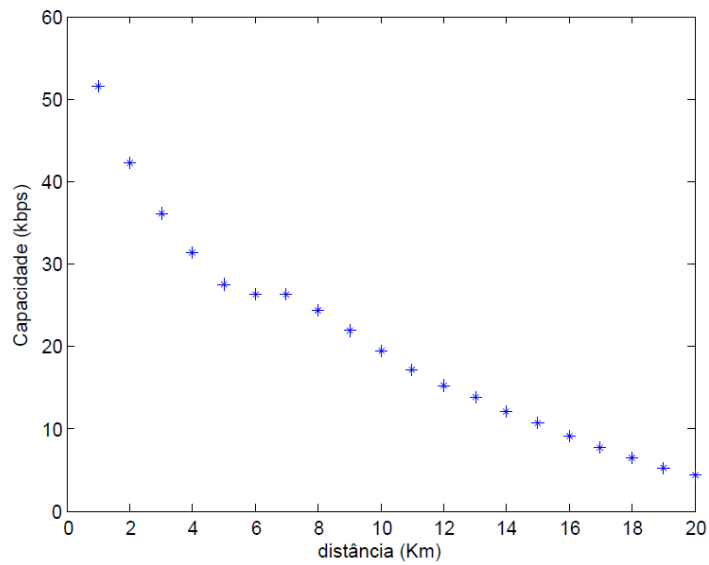


Figura 6-9: Valores de Capacidade Coerente em função da distância para potência de sinal transmitido constante, perfil da velocidade do som constante (1500 ms^{-1}) e profundidade de 1200 metros.

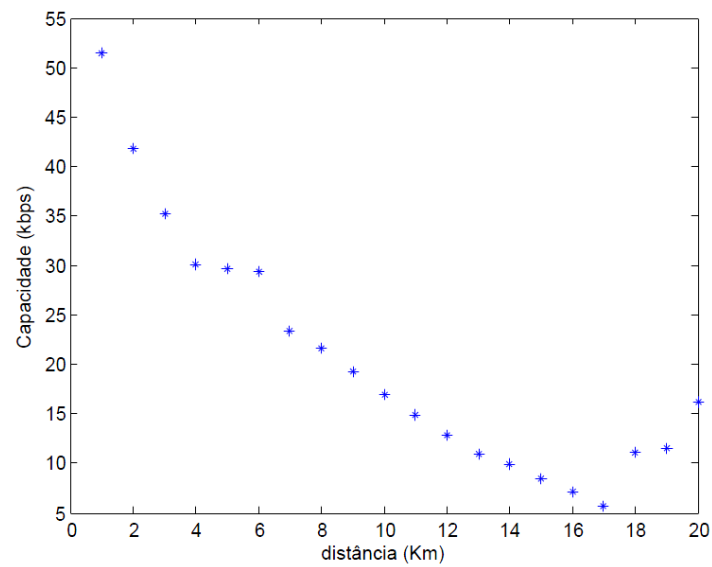


Figura 6-10: Valores de Capacidade Coerente em função da distância para potência de sinal transmitido constante, perfil da velocidade do som variável e profundidade de 1200 metros.

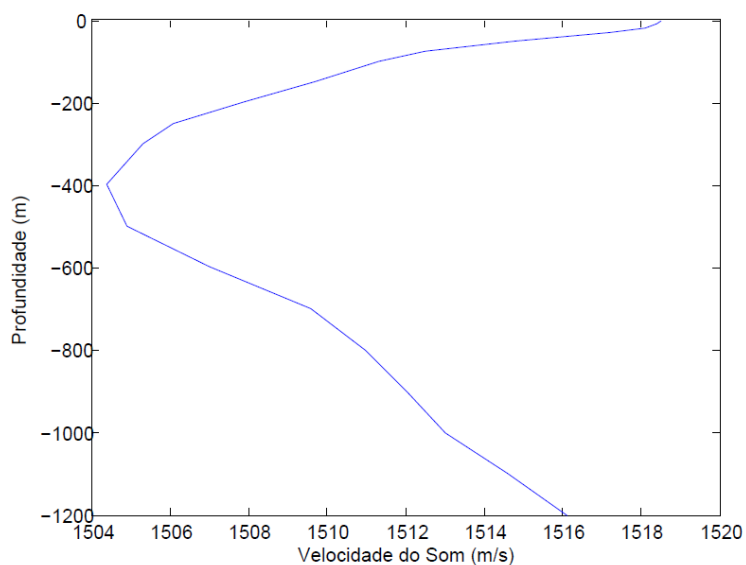


Figura 6-11: Perfil da velocidade do som utilizado na simulação com profundidade de 1200 metros.

Verifica-se assim que para todas as situações consideradas obtiveram-se valores de capacidade que estão de acordo com os resultados obtidos a partir de [14]. Através das Figuras acima apresentadas é também possível concluir que:

- Tipicamente o valor da capacidade de canal diminui com o aumento da distância;
- Ao se utilizarem valores de potência de transmissão mais elevadas, e variáveis de acordo com a distância entre veículos a que se está a trabalhar, obter-se-ão melhores valores de capacidade de canal a distâncias maiores.
- A velocidade do som influencia o valor da capacidade de canal verificando-se que a variação desta pode melhorar o valor de capacidade de canal comparativamente à hipótese de se considerar a velocidade do som constante nas simulações, permitindo a propagação da onda acústica a grandes distâncias (ver Figura 6-7 e Figura 6-10). Em contrapartida, e apesar de não estar aqui representado, a variação da velocidade do som pode também originar bloqueio na transmissão uma vez que as ondas acústicas têm tendência a se guiarem para a zona onde a velocidade do som é menor, fazendo com que nas zonas onde a velocidade é maior existam as designadas zonas de sombra.
- Ao se considerarem profundidades menores na simulação, para distâncias maiores obtêm-se melhores resultados do valor da capacidade de canal, tanto para perfil da velocidade do som constante como variável (ver Figura 6-9 e Figura 6-10). Este comportamento pode estar relacionado com o efeito do multipercurso existente no canal (mais pronunciado em águas com profundidades inferiores) quando a onda acústica está a interferir com ela própria construtivamente permitindo a sua propagação a longas distâncias.

Deste modo, estes serão os valores tomados como referência e que validam a expressão da capacidade coerente (equação (4.9)) que irá ser utilizada na nova versão do simulador NetMar_{sys}, e consequentemente irão validar a coerência dos resultados obtidos através do referido simulador.

6.2 Resultados do simulador NetMar_{sys}

Com o objetivo de analisar a variação dos valores de capacidade de canal em função da variação das características físicas do meio submarino (diferentes velocidades do som e perfis batimétricos) foram realizadas missões em duas zonas distintas:

- Costa de Sesimbra considerada uma região de águas rasas;
- Oceano Atlântico caracterizado por ser uma região de águas profundas.

Nas simulações realizadas utilizou-se o mesmo sinal de transmissão cujas características se encontram sumarizadas na Tabela 6-1.

Tabela 6-1: Características do sinal transmitido pelos veículos autônomos submarinos.

| | Valores inseridos no simulador |
|---|--------------------------------|
| Potência Transmissão (dB re 1 μ Pa @ 1 m) | 120 |
| Frequência Central (kHz) | 10 |
| Largura de Banda (kHz) | 4 |
| Fator de <i>Rolloff</i> | 0,3 |

Nas três simulações apresentadas abaixo a missão vai ser realizada utilizando o veículo vaivém submarino Syrene, em que:

- Nas duas primeiras simulações, realizadas na Costa de Sesimbra e Oceano Atlântico, considerou-se que ambos os veículos estão a 10 metros de profundidade;
- Na terceira simulação, cuja missão foi realizada no Oceano Atlântico, considerar-se-á que os veículos se encontram a 20 metros de profundidade.

Entrando em linha de conta com o perfil da velocidade do som no oceano, este aumento na profundidade a que os veículos realizam a missão irá permitir analisar se a variação da posição dos veículos no sentido decrescente da velocidade do som influenciará os valores obtidos para o ritmo máximo de transmissão.

De modo a validar os valores de capacidade de canal obtidos nas três simulações com os resultados referidos na Seção 6.1, a posição inicial dos veículos será escolhida de modo a que estes distem 1 km de distância.

Nos resultados das simulações serão apresentados os valores da capacidade coerente obtidos a partir da equação (4.9) e os valores do limite inferior da capacidade obtidos a partir da equação (4.10), em que:

- Os valores de capacidade coerente serão utilizados como valores de referência de modo a validar a coerência dos resultados obtidos de acordo com a análise feita na Seção 6.1;
- Os valores obtidos a partir do limite inferior da capacidade vão ser utilizados no novo critério de decisão na troca de mensagens de sincronização entre veículos de acordo com a métrica definida na Seção 5.4.5, uma vez que este limite permitir entrar em linha de conta com o comportamento dinâmico do canal acústico submarino através da inclusão do espectro de potência de Doppler, tornando o processo de decisão mais realista. Com a inclusão do espectro de potência de Doppler vai ser também possível verificar a perda existente no ritmo máximo de transmissão ao se considerar o comportamento estocástico do canal e o movimento relativo dos veículos submarinos.

Para as três simulações realizadas, o valor de capacidade de canal *Threshold* (C_{th} referido na Seção 5.4.5) escolhido foi de 70 *kbps*. Este valor de *Threshold* da capacidade foi utilizado apenas para exemplificar o processo de falha no envio das mensagens de sincronização entre veículos sempre que o valor da capacidade de canal obtido em cada iteração da simulação esteja abaixo do ritmo de transmissão que garante a troca de informação livre de erros através do canal acústico. Na prática, e de acordo com os resultados obtidos na seção anterior, no futuro durante a execução de missões, este valor deverá ser fixado pelo utilizador nos 50 *kbps* para simulações realizadas a 1 km de distância considerando uma potência de transmissão de 120 dB re 1 μ Pa @ 1 m.

De seguida vão ser apresentados os gráficos dos resultados obtidos em cada uma das zonas escolhidas para a simulação sendo a discussão dos mesmos feita na Seção 6.3.

- **Oceano Atlântico**
 - Coordenadas *gps*: latitude: 39,650222, longitude: -14.704959
 - UTM Zone: 28S
 - Profundidade dos veículos: 10 metros

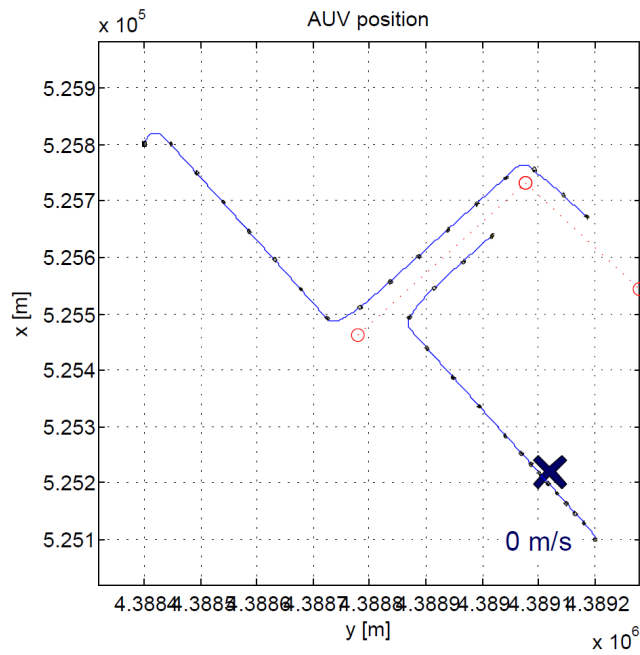


Figura 6-12: Percurso realizado pelos veículos na simulação.

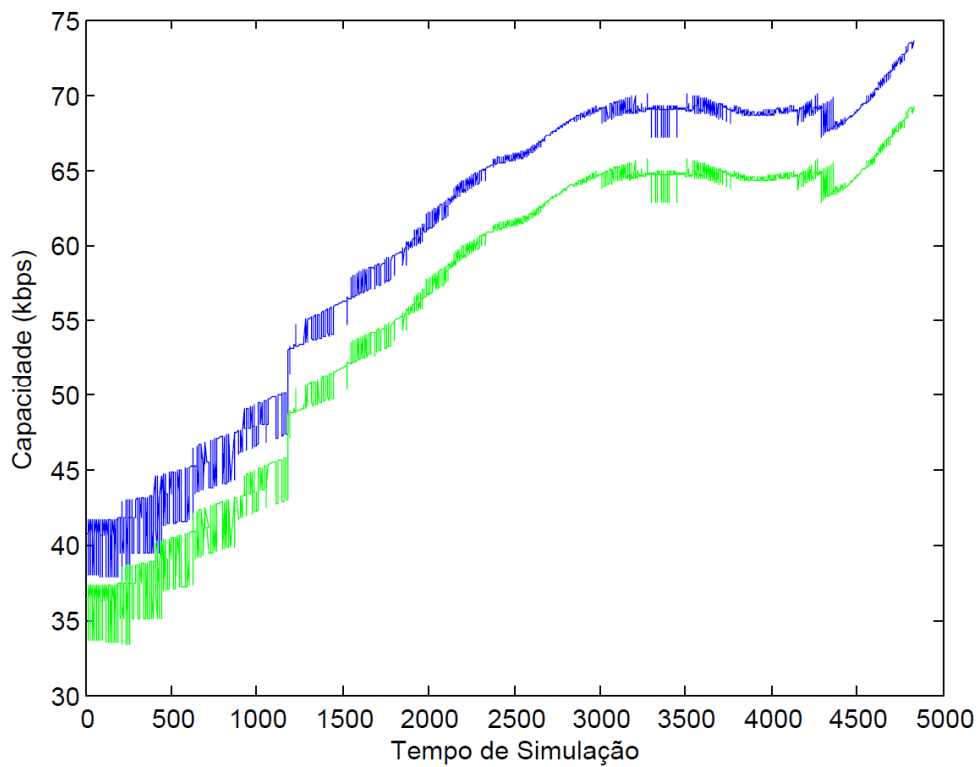


Figura 6-13: Valores da capacidade coerente de canal (a azul) e do limite inferior da capacidade (a verde) em cada instante da simulação.

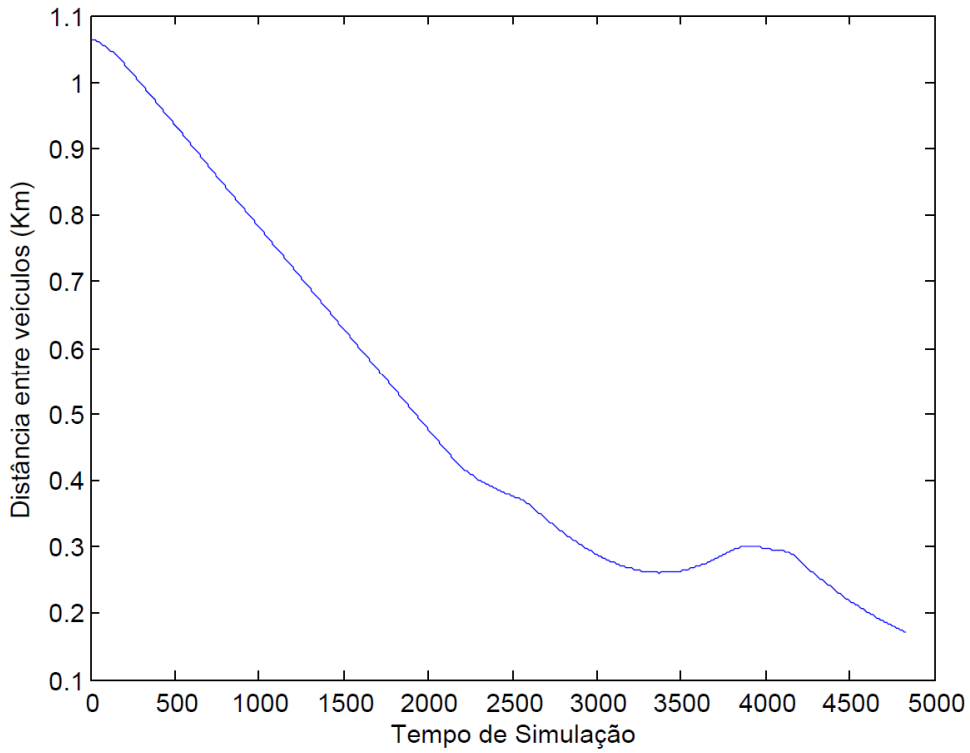


Figura 6-14: Distância entre os dois veículos autônomos submarinos em cada instante da simulação.

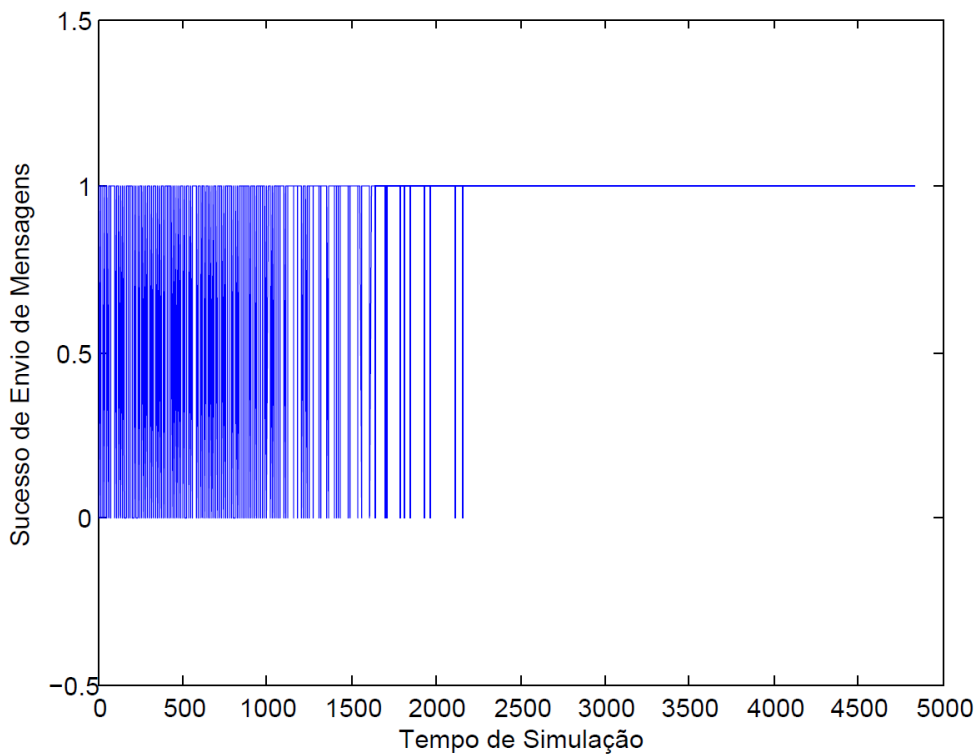


Figura 6-15: Mensagens enviadas pelos veículos em cada instante da simulação - 0 significa que a mensagem não foi enviada e 1 representa o sucesso no envio. A taxa de sucesso de envio obtida foi de 93.3609%.

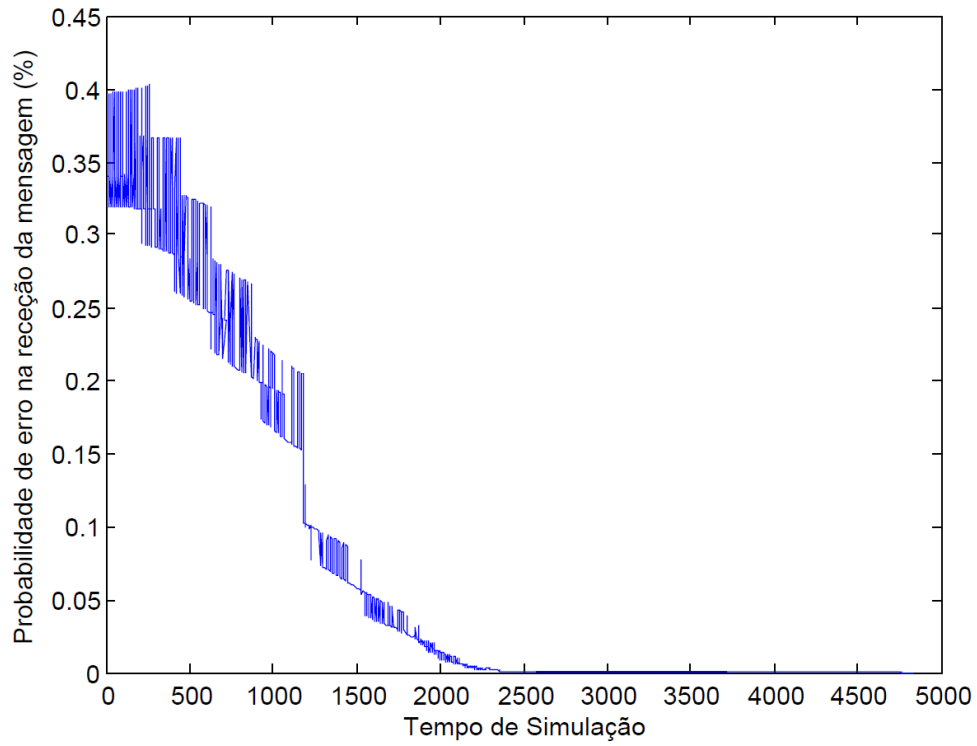


Figura 6-16: Probabilidade de erro na recepção da mensagem em cada instante da simulação quando $L_{peak}^{DS} < C_{th}$.

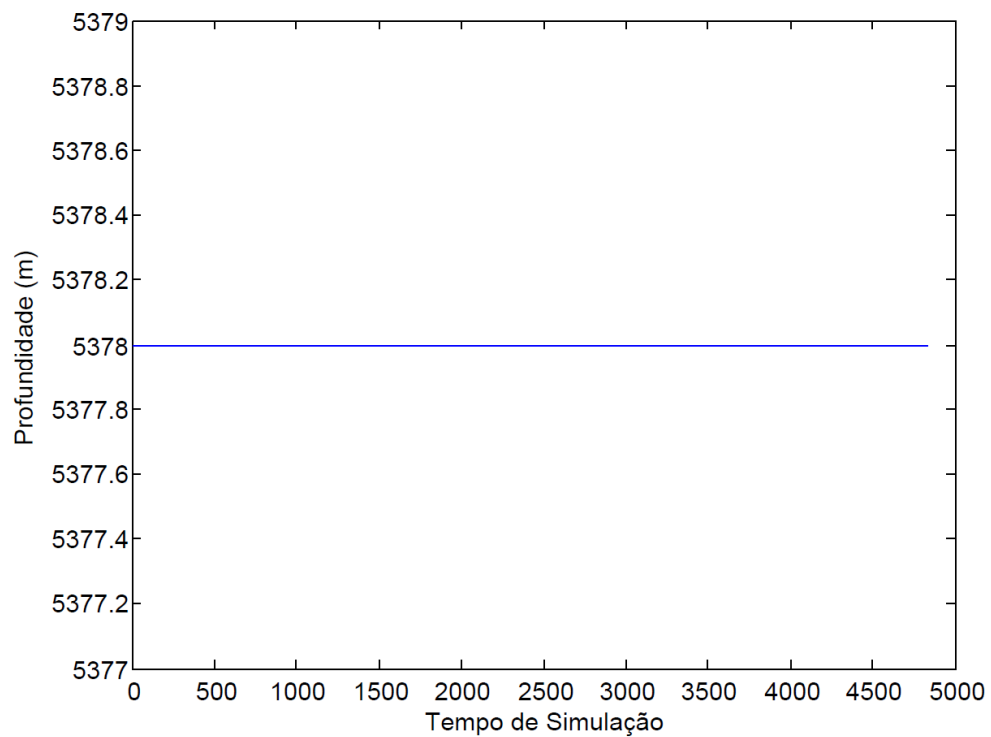


Figura 6-17: Perfil batimétrico em cada instante da simulação.

- **Costa de Sesimbra**

- Coordenadas *gps*: latitude: 38,415938, longitude: -9.124489
- UTM Zone: 29S
- Profundidade dos veículos: 10 metros

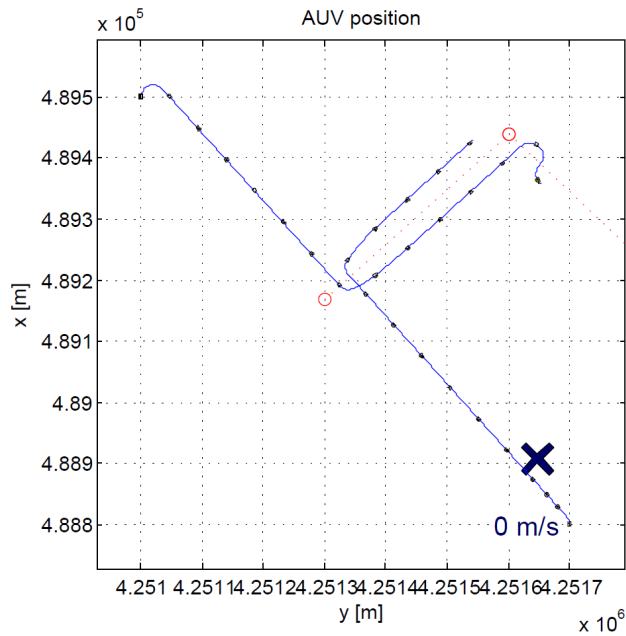


Figura 6-18: Percurso realizado pelos veículos na simulação.

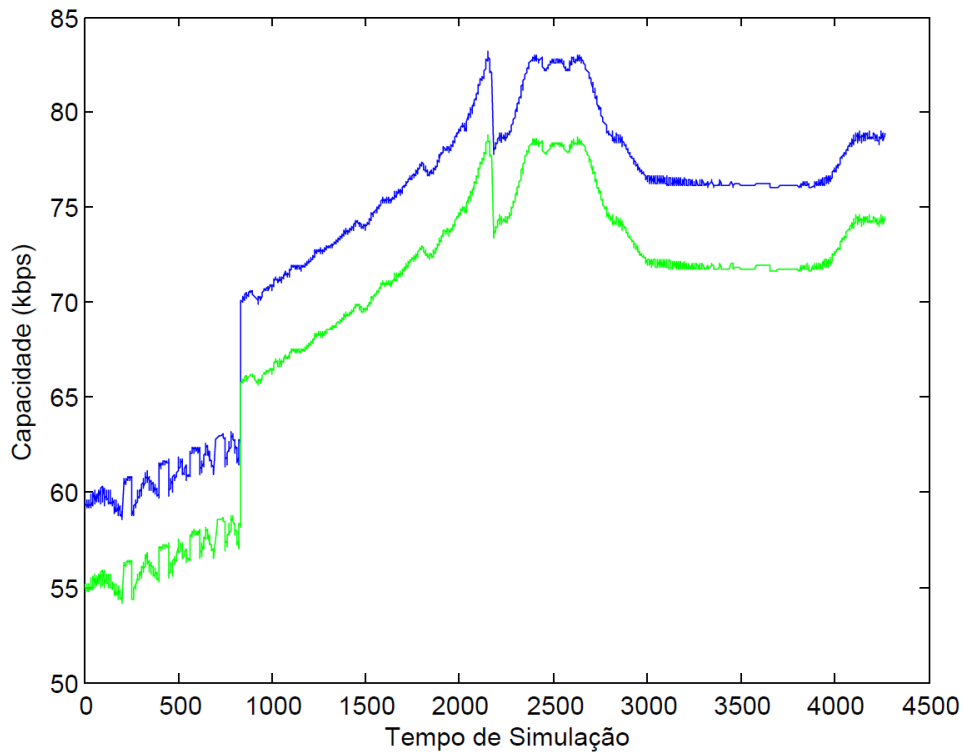


Figura 6-19: Valores da capacidade coerente de canal (a azul) e do limite inferior da capacidade (a verde) em cada instante da simulação.

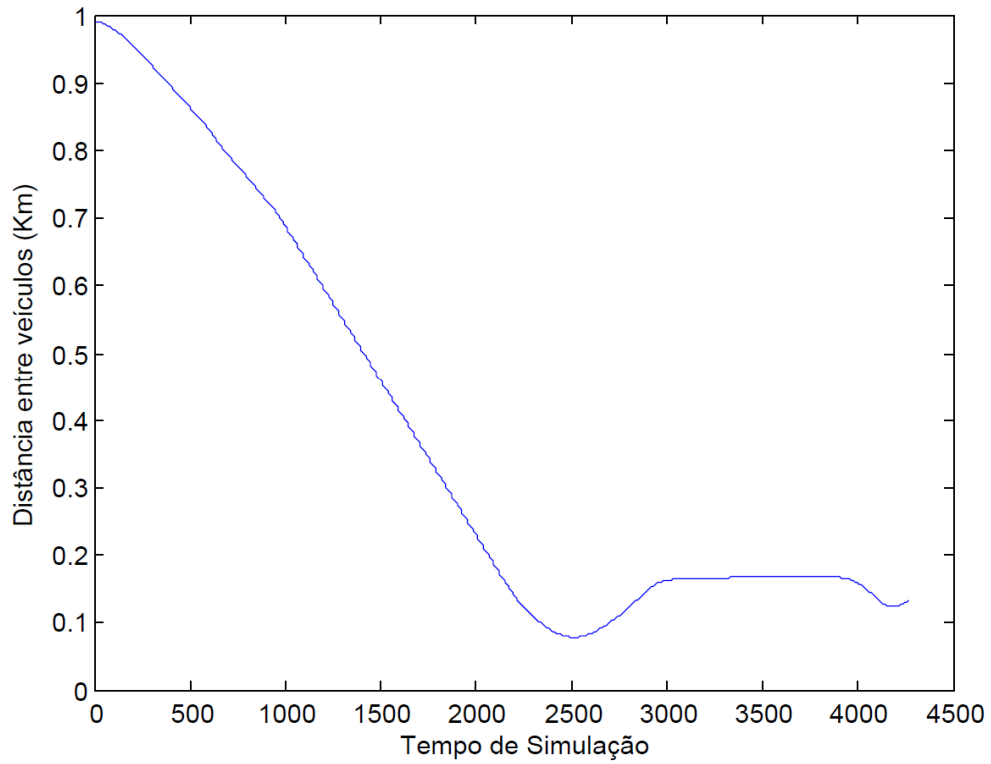


Figura 6-20: Distância entre os dois veículos autônomos submarinos em cada instante da simulação.

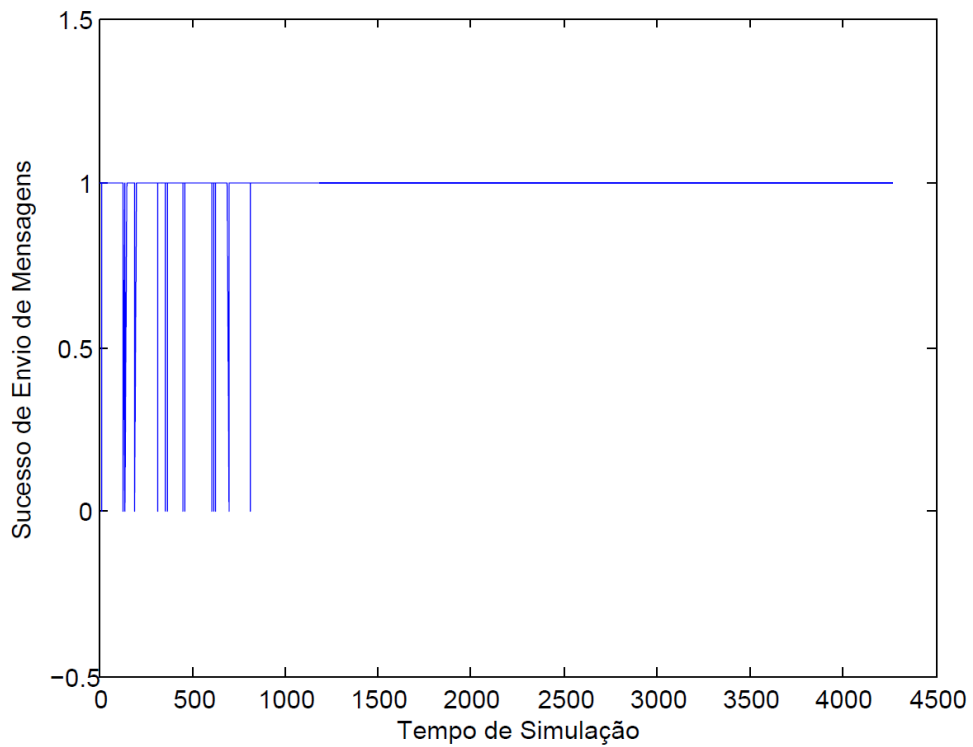


Figura 6-21: Mensagens enviadas pelos veículos em cada instante da simulação - 0 significa que a mensagem não foi enviada e 1 representa o sucesso no envio. A taxa de sucesso de envio obtida foi de 99.6485%.

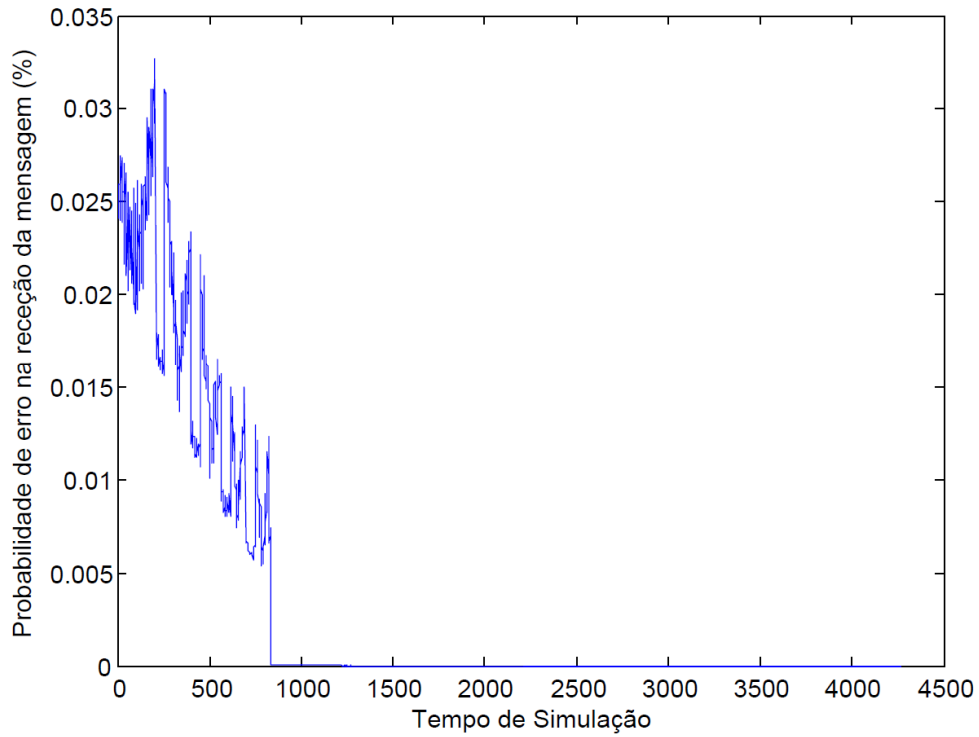


Figura 6-22: Probabilidade de erro na recepção da mensagem em cada instante da simulação quando $L_{peak}^{DS} < C_{th}$.

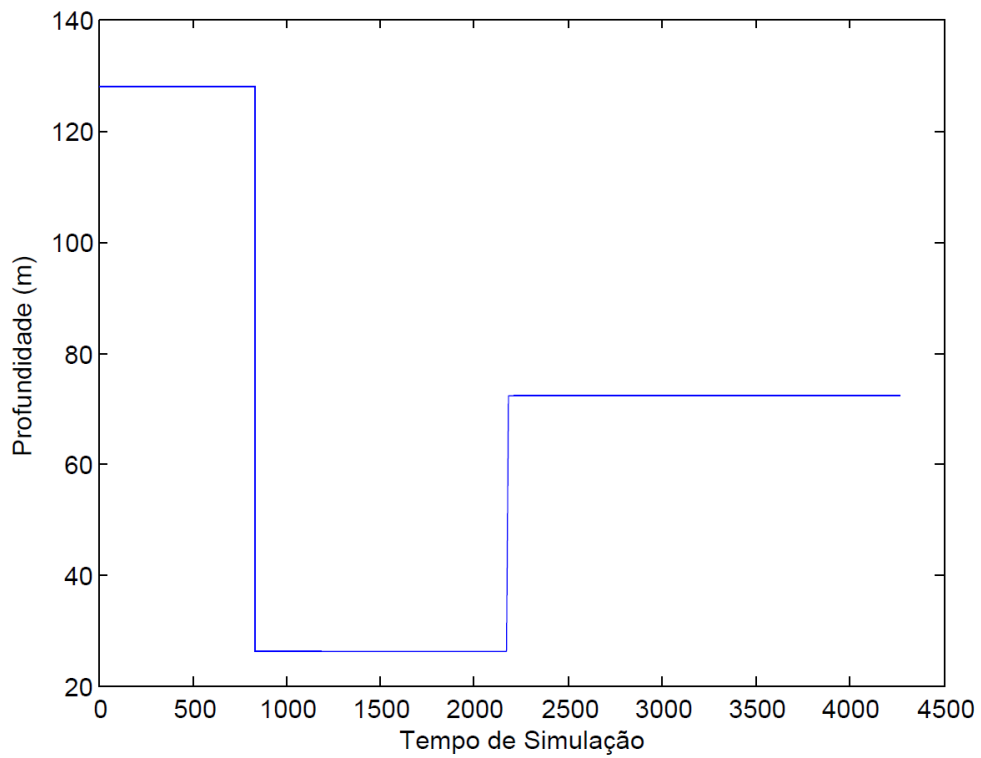


Figura 6-23: Perfil batimétrico em cada instante da simulação.

- **Oceano Atlântico**

- Coordenadas *gps*: latitude: 39,650222, longitude: -14.704959
- UTM Zone: 28S
- Profundidade dos veículos: 20 metros
- Profundidade do oceano: 5000 metros (ver Figura 6-17)
- Missão igual à realizada com profundidade dos veículos igual a 10 metros

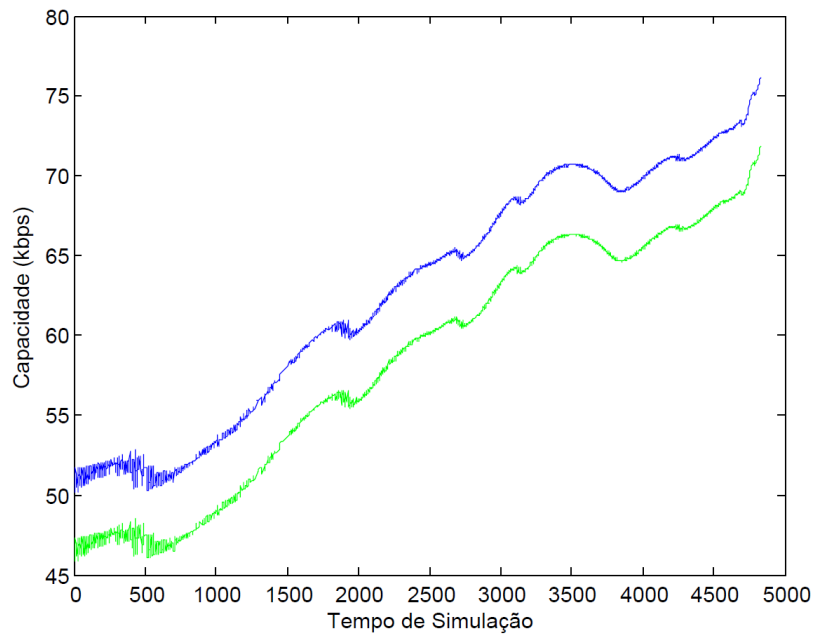


Figura 6-24: Valores da capacidade coerente de canal (a azul) e do limite inferior da capacidade (a verde) em cada instante da simulação.

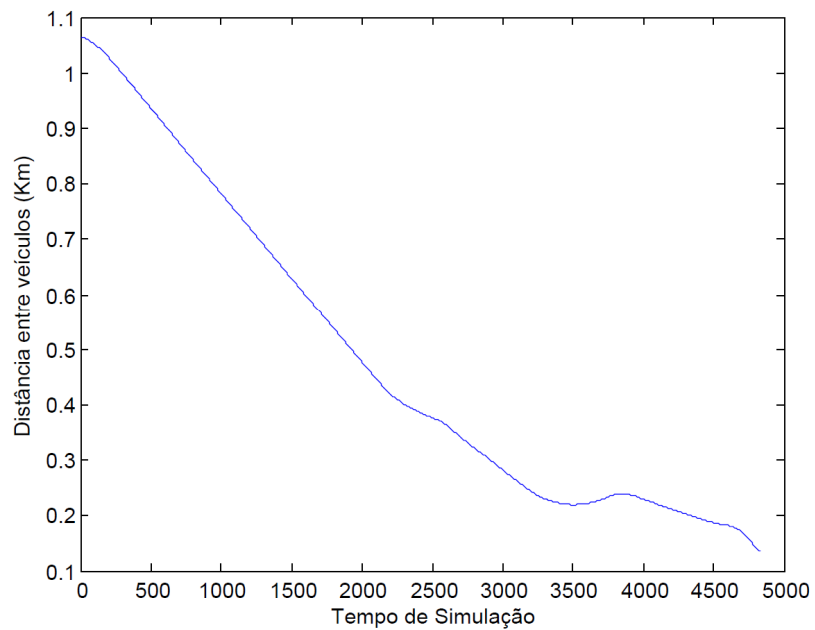


Figura 6-25: Distância entre os dois veículos autônomos submarinos em cada instante da simulação.

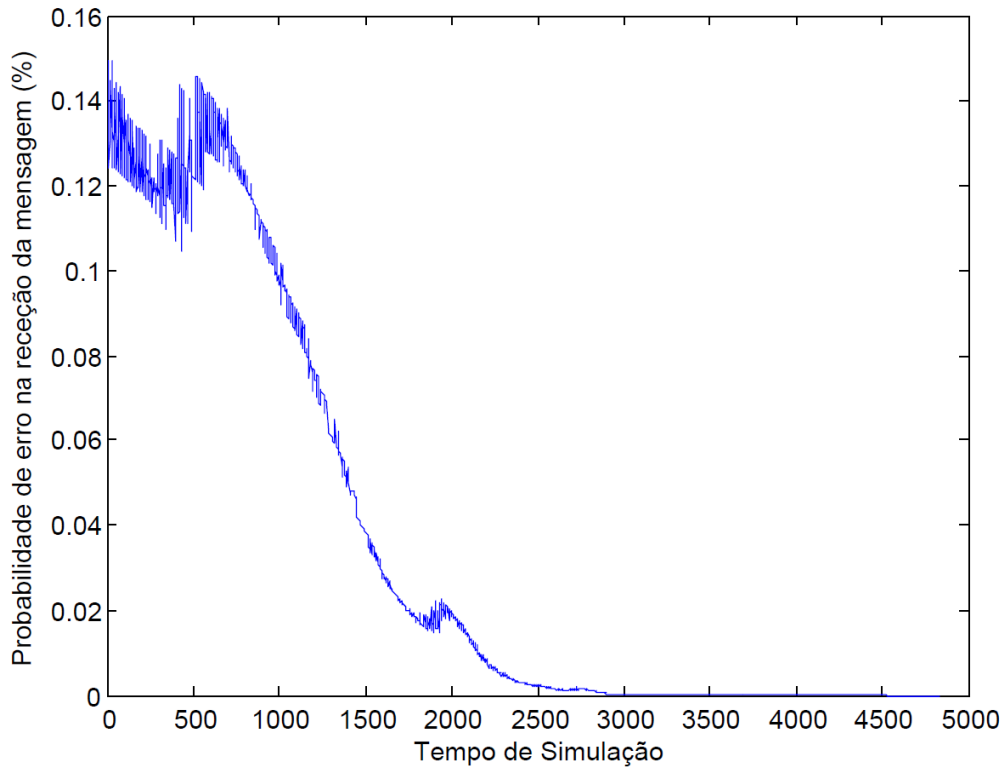


Figura 6-26: Probabilidade de erro na recepção da mensagem em cada instante da simulação quando $L_{peak}^{DS} < C_{th}$.

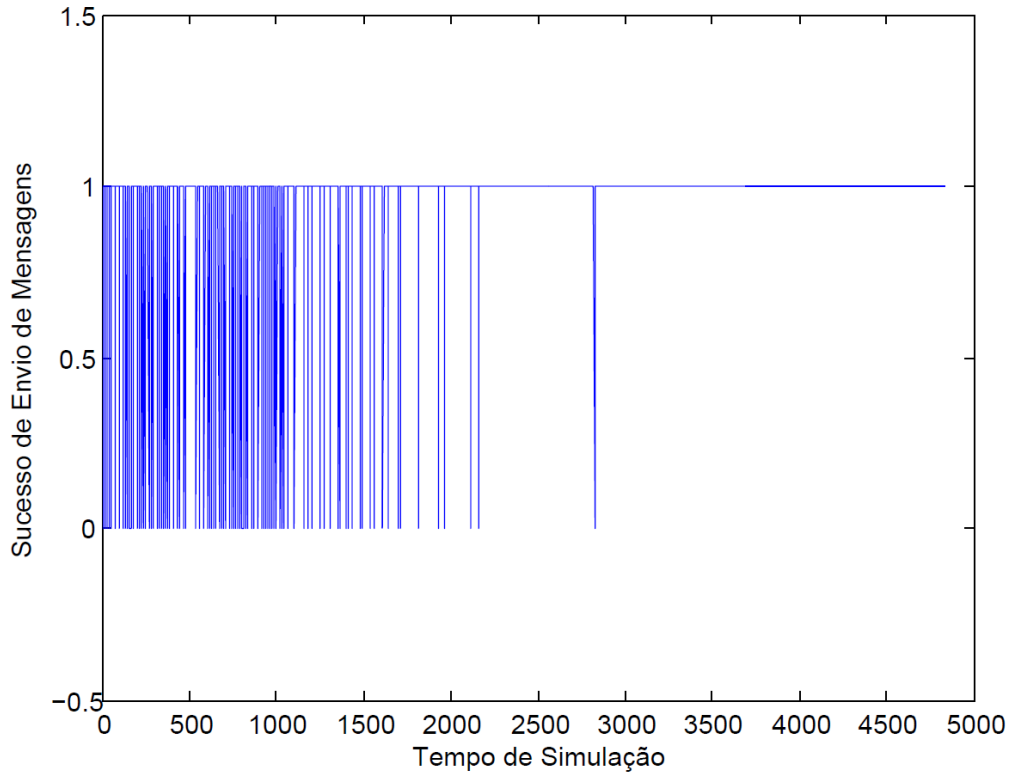


Figura 6-27: Mensagens enviadas pelos veículos em cada instante da simulação - 0 significa que a mensagem não foi enviada e 1 representa o sucesso no envio. A taxa de sucesso de envio obtida foi de 96.9390%.

6.3 Discussão de resultados obtidos na simulação do NetMar_{Sys}

A partir dos resultados obtidos nas três diferentes simulações realizadas é possível concluir que o valor da capacidade de canal é fortemente influenciado pela distância existente entre o veículo emissor e receptor e é também condicionada pelo grau de conhecimento do canal, nomeadamente, do perfil batimétrico e do perfil da velocidade do som da área escolhida para a simulação.

Ao mudar-se o cenário de simulação de uma zona de águas profundas (Oceano Atlântico – com profundidade de 5778 metros) para uma zona de águas rasas (Costa de Sesimbra com profundidade de 128 metros), a 1 km de distância entre os veículos, o valor pessimista da capacidade de canal aumentou de aproximadamente 35 kbps para 55 kbps, isto é, houve um aumento de 20 kbps no valor da capacidade de canal. Este efeito de melhoria nos valores do ritmo máximo de transmissão com a diminuição da profundidade reflete-se também na distância mínima atingida entre os veículos, notando-se que o maior valor obtido corresponde ao cenário onde foi considerada a menor profundidade (profundidade de 28 metros na Costa de Sesimbra - Figura 6-19 e Figura 6-23).

Através dos gráficos representados nas Figura 6-13, Figura 6-14, Figura 6-19, Figura 6-20, Figura 6-24 e Figura 6-25, verifica-se que a distância existente entre os veículos influencia o ritmo máximo de transmissão suportado pelo canal, exibindo a distância uma tendência inversamente proporcional ao ritmo máximo de transmissão. Assim, a potência de transmissão deve ser ajustada de acordo com a distância a que se queira realizar as missões e ser escolhida entrando em linha de conta com as características físicas existentes no meio onde vai ser realizada a simulação.

Comparando as Figuras onde se encontram apresentados os ritmos máximos de transmissão obtidos para os três cenários considerados (Figura 6-13, Figura 6-19 e Figura 6-24), em cada instante da simulação verifica-se que com o aumento da profundidade existe uma maior flutuação nos valores da capacidade com a variação da distância entre os veículos. Este facto deve-se à maior variação nas amplitudes e atrasos calculados pelo Bellhop (para cada distância entre os veículos) no Oceano Atlântico comparativamente às águas costeiras de Sesimbra consideradas nas simulações.

Verifica-se também que incluir o comportamento estocástico do canal permite obter valores de capacidade de canal mais realistas, que refletem a perda existente no ritmo máximo de transmissão ao se considerar a aleatoriedade do meio acústico submarino. Contudo, o facto de o simulador impor velocidades praticamente constantes entre os veículos ao longo da simulação, faz com que a curva pessimista da capacidade de canal seja paralela à curva da capacidade de canal coerente uma vez que a variação da frequência de Doppler é praticamente nula. Para obter resultados mais expressivos era necessário que existisse uma maior variação na velocidade dos veículos.

Nas três simulações realizadas verificou-se que a probabilidade de erro no envio das mensagens diminui com o aumento do valor do ritmo de transmissão (ver Figuras Figura 6-16, Figura 6-22 e Figura 6-26). Este comportamento está de acordo com a equação de probabilidade de erro definida

na Seção 5.4.5, uma vez que com a diminuição da distância entre os veículos em cada instante de simulação, o valor de capacidade de canal obtido aumenta e aproxima-se do valor escolhido de capacidade *Threshold*, fazendo com que a probabilidade de erro no envio das mensagens tenda para zero. Tal como já foi referido anteriormente, ao diminuir-se o valor de *Threshold* diminui-se também a probabilidade de erro no envio das mensagens de sincronização entre veículos. Na prática o valor *Threshold* deve ser fixado nos 50 kbps, o que indica que apenas existe probabilidade de erro sempre que o valor do ritmo máximo de transmissão desça abaixo deste valor.

Através das Figuras Figura 6-15, Figura 6-21 e Figura 6-27 calculou-se a taxa de sucesso no envio das mensagens trocadas entre veículos, tendo-se obtido nas três simulações os seguintes valores:

- Oceano Atlântico:
 - Profundidade dos veículos de 10 metros: $Taxa_{Sucesso} = 93,3609\%$
 - Profundidade dos veículos de 20 metros: $Taxa_{Sucesso} = 96,9390\%$
- Costa Sesimbra: $Taxa_{Sucesso} = 99.6485\%$

Sendo que na versão original do simulador NetMar_{sys} para os mesmos cenários de simulação foram obtidas as seguintes taxas de sucesso:

- Oceano Atlântico: $Taxa_{Sucesso} = 0,6268\%$
- Costa Sesimbra: $Taxa_{Sucesso} = 1,5775\%$

A partir dos valores das taxas de sucesso obtidas, confirma-se assim que as métricas simplistas utilizadas na versão original do simulador penalizavam o processo de decisão no envio de mensagens de sincronização entre os veículos.

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

O objetivo principal desta dissertação foi melhorar o realismo da comunicação entre veículos autônomos submarinos do simulador NetMar_{SYS}, uma vez que este não considerava características importantes do canal acústico, tais como: o perfil da velocidade do som, o multipercurso existente no canal e o perfil batimétrico.

Para tal, o ponto de partida deste trabalho foi obter o modelo de canal determinista com recurso ao simulador de propagação acústica Bellhop que permite que se entre em linha de conta com as características físicas do canal acústico submarino.

De modo a refletir o comportamento estocástico do canal acústico submarino, ao modelo de canal determinista, foi imposto um modelo paramétrico obtido a partir dados reais recolhidos no mar, e cujo comportamento é descrito através do espectro de potência de Doppler do canal, que permite entrar em consideração com a frequência de Doppler provocada pelo deslocamento dos veículos submarinos e com as variações do meio acústico que ocorrem ao longo do tempo.

Por fim, e a partir do modelo de propagação acústica submarina, foi obtido o ritmo máximo de transmissão do canal. Para tal, foram utilizadas equações baseadas em hipóteses realistas em linha com o estado da arte para o cálculo da capacidade de canal, que permitem incluir nas suas expressões o comportamento estocástico do canal e a limitação da potência dos símbolos de entrada.

A partir do valor obtido para o ritmo máximo de transmissão suportado pelo canal foi proposto um novo critério de decisão para validar a entrega de mensagens de sincronização trocadas entre os veículos no simulador NetMar_{SYS}.

Nas simulações realizadas após a implementação de todas as referidas considerações, verificou-se que o valor da capacidade de canal para além de ser fortemente influenciado pela distância existente entre o veículo emissor e recetor é também condicionado pelo grau de conhecimento do canal, nomeadamente, do perfil batimétrico e do perfil da velocidade do som da área escolhida para a simulação.

Através dos resultados obtidos verificou-se que a distância existente entre os veículos influencia o ritmo máximo de transmissão suportado pelo canal, exibindo a distância uma tendência inversamente proporcional ao ritmo máximo de transmissão. Assim, a potência de transmissão deve ser ajustada de acordo com a distância a que se queira realizar as missões e ser escolhida entrando em linha de conta com as características físicas existentes no meio onde vai ser realizada a simulação.

A partir dos resultados das simulações verificou-se também que com o aumento da profundidade existe uma maior flutuação nos valores da capacidade com a variação da distância entre os veículos. Este facto deve-se à maior variação nas amplitudes e atrasos calculados pelo Bellhop (para cada distância entre os veículos) em águas profundas comparativamente às águas costeiras consideradas nas simulações. Para além disso, o aumento da profundidade influencia negativamente os valores de ritmo máximo de transmissão, obtendo-se valores de capacidade de canal mais elevados em águas pouco profundas.

Entrar em linha de conta com o comportamento estocástico do canal permitiu obter valores de capacidade de canal mais realistas, que refletem a perda existente no ritmo máximo de transmissão ao se considerar a aleatoriedade do meio acústico submarino.

A partir das taxas de sucesso no envio de mensagens trocadas entre veículos verificou-se que o modelo simplificado anteriormente implementado, que entrava apenas em linha de conta com o comprimento da mensagem, a distância máxima entre veículos (considerada 200 metros) e a definição aleatória de zonas de sombra no espaço onde a simulação era realizada, penalizava o sucesso no processo de decisão, visto que através dos resultados obtidos na nova versão do NetMar_{Sys} é possível enviar com sucesso mensagens a 1 km de distância entre os veículos.

Assim, verifica-se que é extremamente útil antecipar em laboratório a performance dos sistemas de comunicação entrando em linha de conta com dados recolhidos no mar nos cálculos. Deste modo consegue-se aumentar significativamente a probabilidade de sucesso dos testes realizados em ambiente submarino e antecipar alguns dos resultados que serão obtidos nas experiências no mar, minimizando assim o elevado custo das experiências realizadas no mar.

Como trabalho futuro, sugere-se:

- Que seja integrado no simulador o cálculo do ritmo máximo de transmissão considerando uma rede de veículos autónomos;
- Que sejam atualizadas as bases de dados com o perfil da velocidade som e o perfil batimétrica do software OceanDB com uma resolução maior de dados, uma vez que ao longo das simulações notou-se que existe pouca variação das características físicas do canal;
- Melhorar o critério da probabilidade de erro implementado;
- Replicar as missões (cujos resultados foram apresentados nesta dissertação) no mar de modo a validar os resultados obtidos nas simulações assim como as conclusões dos mesmos.

Bibliografia

- [1] I. F. Akyildiz, D. Pompili and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," 2005.
- [2] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [3] H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press, 1998.
- [4] P. Etter, *Underwater Acoustics Modelling and Simulation*, Spon Press, 2002.
- [5] B. C. Xavier, *Modelos de Propagação acústica em Águas Rasas*, Msc Thesis. Universidade Federal do Rio Janeiro, 2005.
- [6] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., New York: McGraw-Hill, 1983.
- [7] V. A. Del Grosso, "New Equation for the Speed of Sound in Natural Waters (with comparisons to other equations)," *J. Acoust. Soc. Am.*, pp. 1084-1091, 1974.
- [8] J. R. M. d. Silva, "Detecção e Localização Acústica em Águas Rasas usando Transformada Wavelet Contínua e outras Técnicas Espectrais," PhD Thesis, Universidade Federal do Rio Janeiro, 2005.
- [9] P. Relvas, 2013. [Online]. Available: http://w3.ualg.pt/~prelvas/OceanogFisica/Prop_som.pdf.
- [10] A. F. P. Rocha, "Flight Recorder Localization Following at-Sea Plane Crashes," MSc Thesis. Instituto Superior Técnico, 2011.
- [11] F. X. Socheleau, "Communications acoustiques sous-marines sur canal fortement dispersif en temps et en fréquence: point de vue de la théorie de l'information," PhD Thesis, Département Signal et Communications, Université européenne de Bretagne, 2011.
- [12] L. M. Brekhovskikh and Y. P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, Springer-Verlag, 1991.
- [13] L. Berkovskikh and Y. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, Springer, 1982.
- [14] M. Stojanovic, "On the Relationship Between Capacity and Distance in an Underwater Acoustic Communication Channel," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R)*, p. 64-43, 2007.
- [15] R. Jurdak, C. V. Lopes and P. Baldi, "Battery Lifetime Estimation and Optimization for Underwater Sensor Networks," *IEEE Sensor Network Operations*, 2004.
- [16] A. Noronha, J. D. D. Deus, P. Brogueira, M. Pimenta and T. Peña, *Introdução à Física*, Mc Graw-Hill, 2000.

- [17] I. F. Akyildiz, D. Pompili and T. Melodia, "State-of-the-Art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks," 2006.
- [18] J. Kong, J.-h. Cui, D. Wu and M. Gerla, "BUILDING UNDERWATER AD-HOC NETWORKS AND SENSOR NETWORKS FOR LARGE SCALE REAL-TIME AQUATIC APPLICATIONS," in *Military Communications Conference*, Atlantic City, NJ, 2005.
- [19] M. B. Porter, "The Bellhop Manual and User's Guide: Preliminary Draft," January 31, 2011.
- [20] O. C. Rodríguez, "General description of the Bellhop ray tracing program, version 1.0," June 2008.
- [21] P. A. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels," in *Communications Systems, IEEE Transactions*, 11(4), 1963.
- [22] "CALCOM'10 Sea trial Field calibration data report," 2010. [Online]. Available: http://www.siplab.fct.ualg.pt/pubs/rep_0410.pdf.
- [23] J. Gomes, "Overview of ISR/IST communications signals in CALCOM'10," Institute for Systems and Robotics, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, 2011.
- [24] F. X. Socheleau, C. Laot and J. M. Passerieux, "Stochastic Replay of Non-WSSUS Underwater Acoustic Communication Channels Recorded at Sea," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 10, p. 4838–4849, 2011.
- [25] R. T. Rato, M. D. Ortigueira and A. G. Batista, "On the HHT, its problems, and some solutions," *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 1374-1394, 2007.
- [26] N. E. e. a. Huang, "The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," *Proceedings of the Royal Society of London*, pp. 903-995, 1998.
- [27] G. Rilling, P. Flandrin, P. Goncalves and J. M. Lilly, "Bivariate Empirical Mode Decomposition," *IEEE Signal Processing Letters*, pp. 936 - 939, 2007.
- [28] S. M. Kay, *Modern spectral estimation : theory and application*, Prentice Hall, 1988.
- [29] H. Akaike, "A new look at the statistical model identification," *IEEE Transactions on Automatic Control*, p. 716–723, 1974.
- [30] P. Ferrão, "Generation of environmental scenarios for simulation of underwater acoustic propagation," Instituto Superior Técnico.
- [31] C. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *The Bell System Technical Journal*, pp. 379–423, 623–656, 1948.

- [32] V. Barroso, "Teoria da Informação: Codificação de Fonte," [Online]. Available: <http://users.isr.ist.utl.pt/~vab/FTELE/cap1.pdf>.
- [33] A. Viterbi, "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 260-269, 1967.
- [34] C. Berrou, A. Glavieux and P. Thitimajshima, "Near-Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes," *IEEE Int. Conf. Communications*, pp. 1064 - 1070 vol.2, 1993.
- [35] D. Mackay, "Good error-correcting codes based on very sparse matrices," *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 399–431, Vol 45, 1999.
- [36] S. X. Ng, O. R. Alamri, Y. Li and L. Hanzo, "Near-capacity turbo trellis coded modulation design based on EXIT charts and union bounds," *IEEE Transactions on Communications*, p. 2030–2039, 2008.
- [37] E. Biglieri, J. G. Proakis and S. Shamai, "Fading channels : Information-theoretic and communication aspects," *IEEE Transactions Information Theory*, p. 2619–2692, 1998.
- [38] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.
- [39] C. Polprasert, J. Ritcey and M. Stojanovic, "Capacity of OFDM Systems Over Fading Underwater Acoustic Channels," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 514 - 524, 2011.
- [40] N. Ophir, J. Tabrikian and H. Messer, "Capacity Analysis of Ocean Channels," *Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing*, pp. 646 - 650, 2006.
- [41] H. Leinhos, "Capacity calculations for rapidly fading communications channels," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 137 - 142, 1996.
- [42] A. Radošević, J. Proakis and M. Stojanovic, "Statistical characterization and capacity of shallow water acoustic channels," *IEEE OCEANS 2009 Conference*, pp. 1-8, 2009.
- [43] J. M. Passerieux, X. F. Socheleau and C. Laot, "On the Capacity of the Underwater acoustic Communication Channel under Realistic Assumptions," *Proceedings of the IEEE European Wireless*, p. 1–6, April 2011.
- [44] S. Sethuraman, L. Wang, B. Hajek and A. Lapidoth, "Low-SNR Capacity of Noncoherent Fading Channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, p. 1555–1574, 2009.
- [45] G. Durisi, U. G. Schuster, H. Bölcskei and S. Sham, "Noncoherent capacity of ununderspread fading channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010b.
- [46] J. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 2007.
- [47] E. A. Lee and D. B. Messerschmitt, *Digital Communications*, Massachusetts: Kluwer Academic

Publishers, 1994.

- [48] V. Sethuraman and B. Hajek, "Capacity per unit energy of fading channels with a peak constraint," *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005.
- [49] F. Vanni, A. Aguiar and A. Pascoal, "NetMarSys - Networked Marine Systems Simulator," 2008.
- [50] X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics*, Springer, 2002.
- [51] L. C. d. C. V. Gonçalves, "Underwater Acoustic Communication System: Performance evaluation of digital modulation techniques," Msc Thesis. Universidade do Minho, 2012.
- [52] P. A. van Walree, T. Jenserud and M. Smedsrud, "A Discrete-Time channel Simulator Driven by Measured Scattering Functions," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 1628 - 1637, 2008.

Anexo A – Bellhop

Descrição do *Environmental file*:

Tal como já foi referido no Capítulo 2 – Seção 2.10, este é o ficheiro principal de entrada do Bellhop, escrito num simples editor de texto em que são especificados os detalhes do meio aquático onde a simulação irá ser realizada, assim como, as características da fonte emissora e recetora. Aqui é também definido o tipo de análise que se pretende fazer de acordo com o ficheiro de saída escolhido: *ray file*, *eigenray file* ou *arr file*. A descrição do meio aquático inclui:

- Caracterização do perfil da velocidade do som;
- A profundidade do canal;
- A composição do fundo do mar;
- Perfil batimétrico do fundo oceânico;
- E as *surface boundary conditions*.

A descrição do perfil batimétrico do oceano é feito através da leitura do ficheiro com extensão *.bty*, invocável a partir do *environmental file*, e cuja descrição se encontra na Tabela B-2.

As características da fonte emissora e recetora incluem a frequência de transmissão, as suas posições e a definição dos ângulos limite em que os raios são emitidos da fonte, assim como, o número de raios recebidos.

Na Tabela B-1 encontra-se descrita e representada, de modo detalhado, a estrutura do *environmental file*.

Tabela B-1: Descrição do ficheiro de entrada do Bellhop (*environmental file*).

| Parâmetro | Descrição |
|-----------|--|
| TITLE | Indica o título da simulação. |
| FREQUENCY | Frequência (em Hz) do sinal emitido. |
| NMEDIA | Parâmetro relativo ao número de camadas de água com diferentes propriedades e utilizado normalmente para permitir a compatibilidade com outros modelos da <i>Acoustic Toolbox</i> . O Bellhop impõe que este valor seja 1. |
| TOPOPT | Aqui é definido o tipo de interpolação que o Bellhop utiliza para calcular o perfil da velocidade do som. |
| SSP | Neste campo, composto por várias linhas, é definido o perfil da velocidade do som que vai ser utilizado para a simulação da propagação acústica. A primeira linha é composta por três valores, sendo que os dois primeiros não são utilizados pelo Bellhop. O terceiro valor indica a profundidade máxima do local do oceano escolhido para a simulação. |

| | |
|-----------------|--|
| | Nas restantes linhas encontram-se os valores dos pares profundidade-velocidade do som que vão definir o perfil da velocidade do som no oceano, sendo que o último valor corresponde à velocidade do som na profundidade máxima do oceano definida acima. |
| BTOPT | Neste campo é feita a descrição do fundo do mar. |
| NSD | Número de fontes emissoras consideradas na simulação. |
| SD(1:NSD) | Profundidade (em metros) a que se encontram as fontes emissoras. |
| NRD | Número de fontes recetoras. |
| RD(1:RD) | Profundidade (em metros) a que se encontram as fontes recetoras. |
| NR | Número total de <i>ranges</i> escolhidos para fontes recetoras. |
| R(1:NR) | Posição (em quilómetros) dos <i>ranges</i> escolhidos. |
| RTYPE | Aqui é definido o tipo de ficheiro de saída pretendido. 'A' é escolhido para gerar o ficheiro <i>.arr</i> com os pares de valores amplitude-atraso. |
| NBEAMS | Aqui é escolhido o número de raios que se pretende que saiam da fonte emissora. |
| ALPHA(1:NBEAMS) | São definidos os ângulos de saída dos raios. |

Tabela B-2: Descrição do ficheiro que contém o perfil batimétrico (*bathymetry file*).

| Parâmetro | Descrição |
|-------------|---|
| TYPE | Descreve o tipo de perfil batimétrico que vai ser considerado na simulação: <ul style="list-style-type: none"> • 'L' <i>piecewise linear</i>; • 'C' <i>curvilinear</i>; Tipicamente escolhe-se o 'L'. |
| NPOINTS | Número total de pontos escolhidos para definir a batimetria. |
| $d_i - z_i$ | $d_i - z_i$ (onde $0 < i < \text{NPOINTS}$) representa o par de valores distância-profundidade que definem o perfil batimétrico entre a fonte emissora e recetora: <ul style="list-style-type: none"> • A distância d_i (medida em Km) varia entre 0 (posição do emissor) e a posição final do emissor; • A profundidade z_i é medida em metros. |

Anexo B.1 – *Empirical Mode Decomposition*

Descrição do método EMD:

De acordo com a definição original, apresentada em [26], e tal como já foi referido no Capítulo 3 - Seção 3.1.3, uma IMF abstrata é definida como um sinal que obedece a duas condições:

- Em toda a extensão do sinal, o número de extremos relativos e o número de zeros deve ser igual ou, no máximo, diferir de uma unidade;
- Em qualquer instante, o valor médio da envolvente definida pelos extremos locais máximos e a envolvente definida pelos extremos locais mínimos é zero.

As IMFs são determinadas através de um processo iterativo denominado por algoritmo de peneira (*sifting algorithm* - em inglês), que será descrito de seguida.

Dado um sinal $x(t)$, o algoritmo de peneira é composto pelos seguintes passos [25]:

1. Identificar todos os máximos locais, M_i , e todos os mínimos locais, m_i , de $x(t)$;
2. Interpolar (utilizando por exemplo uma *spline* cúbica) os extremos obtidos no ponto anterior, obtendo-se desta forma as envolventes superior e inferior de $x(t)$;
3. Calcular a média das envolventes determinadas no ponto anterior: $m(t) = (M_i + m_i)/2$. Ao sinal obtido ($m(t)$) dá-se o nome de detalhe;
4. Extrair o detalhe do sinal inicial: $r(t) = x(t) - m(t)$. Ao sinal obtido ($r(t)$) dá-se o nome de resíduo;
5. Repetir os pontos de 1 a 4 para o sinal de resíduo, $r(t)$. Parar quando o sinal de resíduo permanecer praticamente inalterado em relação à iteração anterior. O sinal obtido, após o número de iterações necessárias, é uma IMF;
6. Extrair do sinal original a IMF encontrada no ponto anterior: $x(t) = x(t) - IMF$. Regressar novamente ao ponto 1, a não ser que se verifique pelo menos uma das seguintes condições:
 - a. A IMF é limitada por um valor pré definido;
 - b. O resíduo é limitado por um valor pré definido;
 - c. O resíduo é uma função monótona, da qual não se pode extrair mais nenhuma IMF.

Com o intuito de clarificar o algoritmo descrito acima, vai ser apresentado um exemplo prático da sua aplicação, utilizando para tal o sinal de teste apresentado na Figura B.1-1. O sinal de teste é composto pela soma de três sinusoides com amplitude unitária e frequências 2, 8 e 16 Hz, respetivamente.

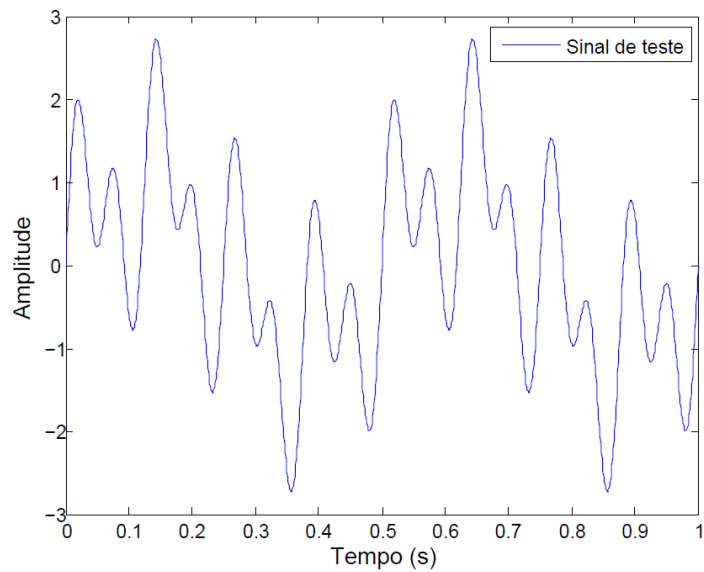


Figura B.1-1: Sinal de teste.

Ponto 1) O algoritmo de peneira começa por identificar todos os máximos e mínimos locais do sinal de teste que se encontram representados na Figura B.1-2.

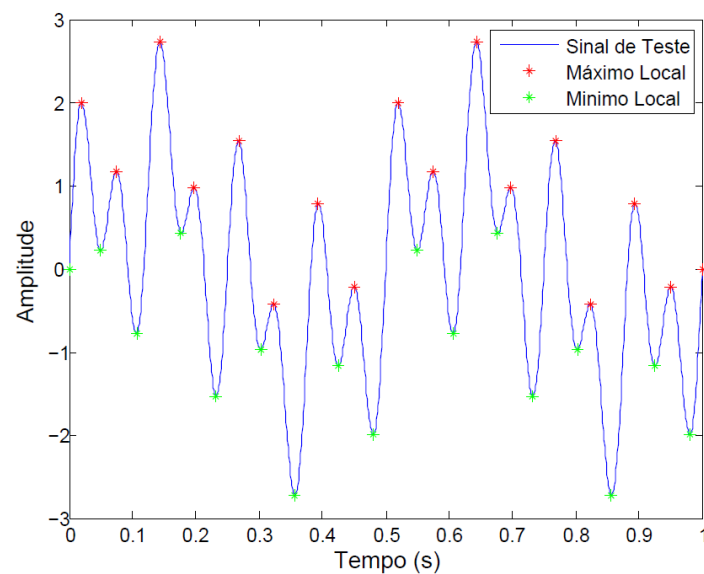


Figura B.1-2: Localização dos extremos locais (máximos e mínimos) do sinal de teste.

Ponto 2) De seguida é feita a interpolação dos extremos, recorrendo-se a uma *spline* cúbica, obtendo-se assim envolvente superior e inferior do sinal de teste (Figura B.1-3).

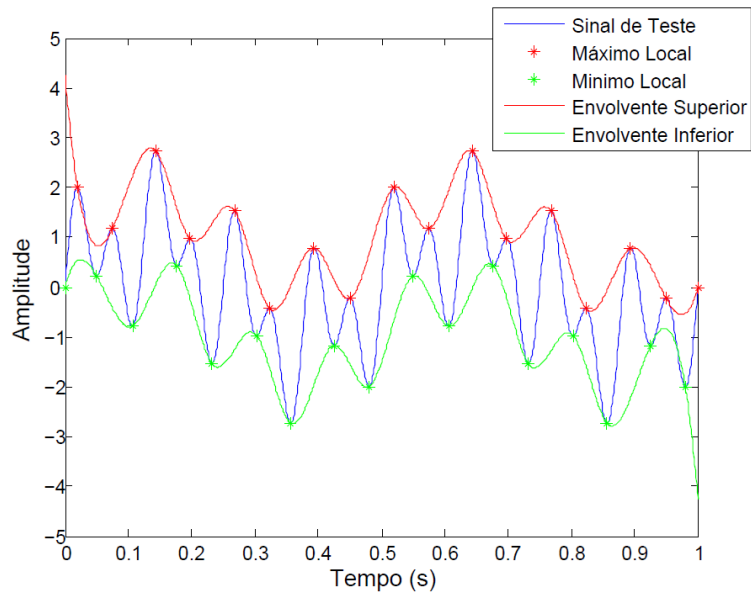


Figura B.1-3: Envolvente superior e inferior do sinal de teste.

Ponto 3) O passo seguinte consiste em calcular a média das envolventes (detalhe) que está representada na Figura B.1-4.

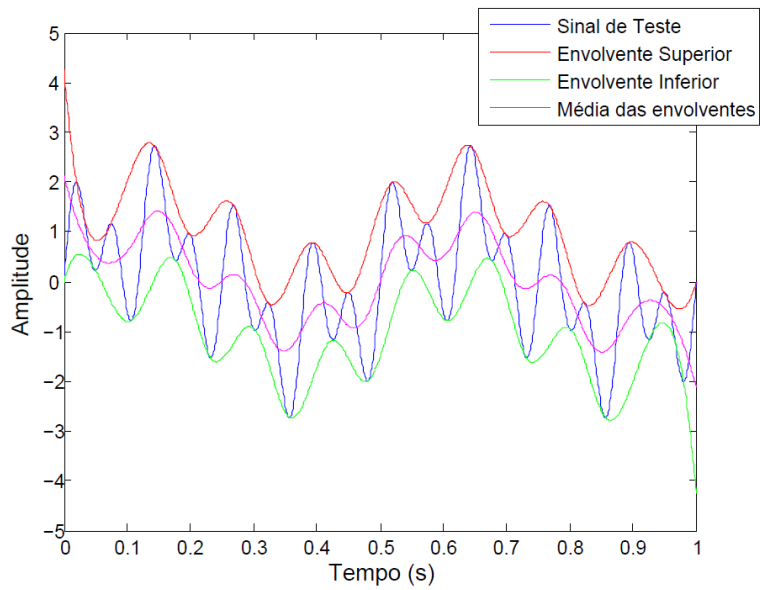


Figura B.1-4: Sinal de teste, envolvente superior, envolvente inferior e média das envolventes.

Ponto 4) Uma vez obtida a média das envolventes, calcula-se a diferença entre o sinal de teste e a referida média (Figura B.1-5).

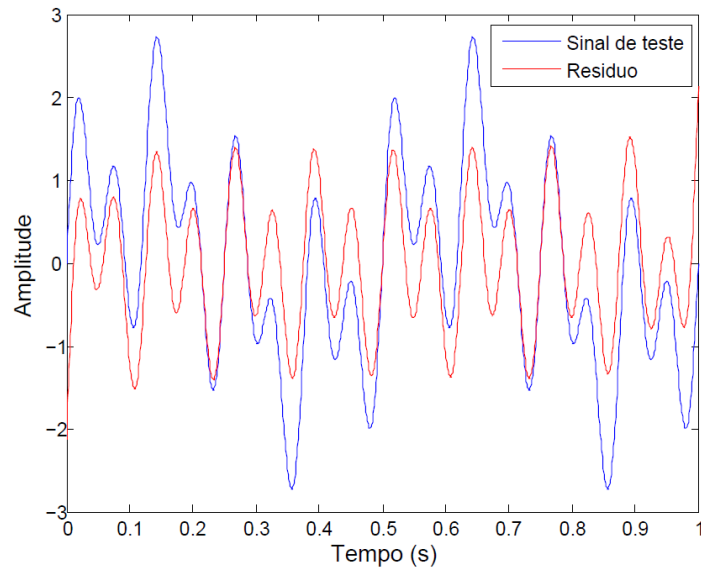


Figura B.1-5: Sinal de teste e o resíduo da 1ª iteração do algoritmo de peneira.

Ponto 5) Agora, repetem-se os passos anteriores, substituindo o sinal de teste inicial pelo sinal de resíduo, até que este permaneça praticamente inalterado e se encaixe na definição de IMF. Nesta altura o resíduo resultante será então considerado a primeira IMF. Na Figura B.1-6 mostra-se a primeira IMF, para o sinal de exemplo, obtida após sete iterações.

Neste exemplo, definiu-se que as IMFs são encontradas quando a diferença entre a amplitude do sinal de teste atual e do sinal de teste anterior é inferior a 0,05.

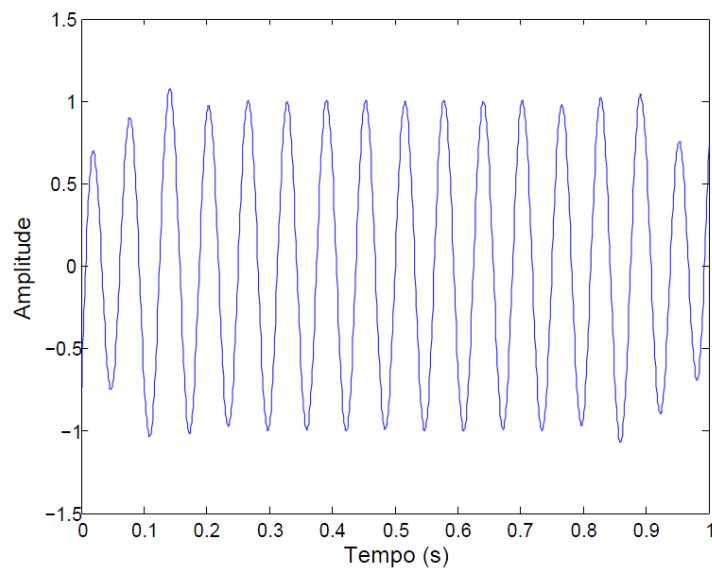


Figura B.1-6: Primeira IMF obtida ao fim de sete iterações.

Ponto 6) Uma vez obtida a primeira IMF, calcula-se então a diferença entre o sinal de teste original e a referida IMF (Figura B.1-7).

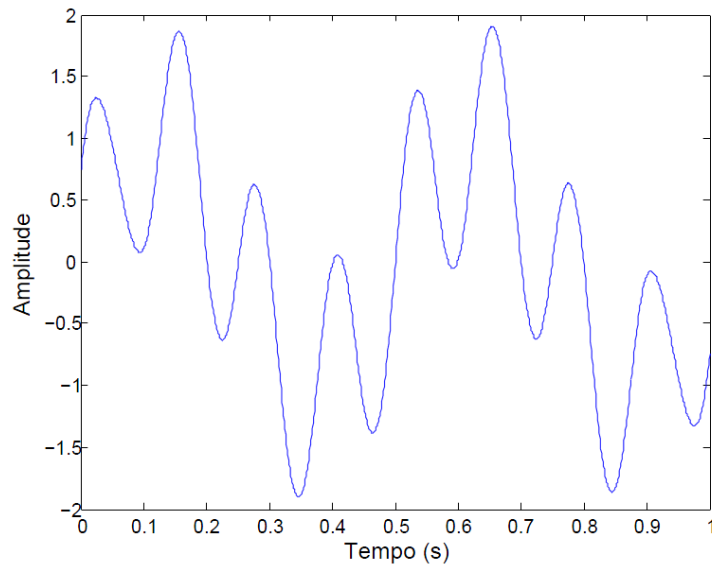


Figura B.1-7: Resíduo obtido após extração da primeira IMF ao sinal de teste original.

Uma vez que o resíduo, apresentado na Figura B.1-7, ainda possui vários extremos, este é tratado como um novo sinal, repetindo-se todo o processo até que pelo menos uma das condições de paragem, descritas no ponto 6, seja alcançada.

Por hipótese, o número de extremos deve decrescer à medida que as IMFs vão sendo encontradas, portanto a decomposição deverá terminar após se obter um número finito de IMFs. Desta forma o sinal é decomposto em n IMFs mais um resíduo final que exprime a tendência do sinal, caso esta exista [25].

Após o término do algoritmo de peneira, tal como era pretendido, obtiveram-se duas IMFs correspondentes às três componentes constituintes do sinal de teste, mais a componente residual. As IMFs resultantes, bem como o resíduo final, são apresentadas na Figura B.1-8.

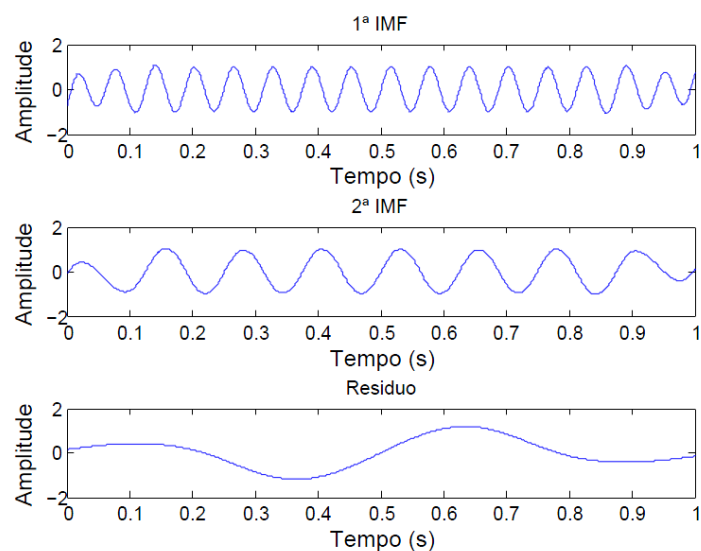
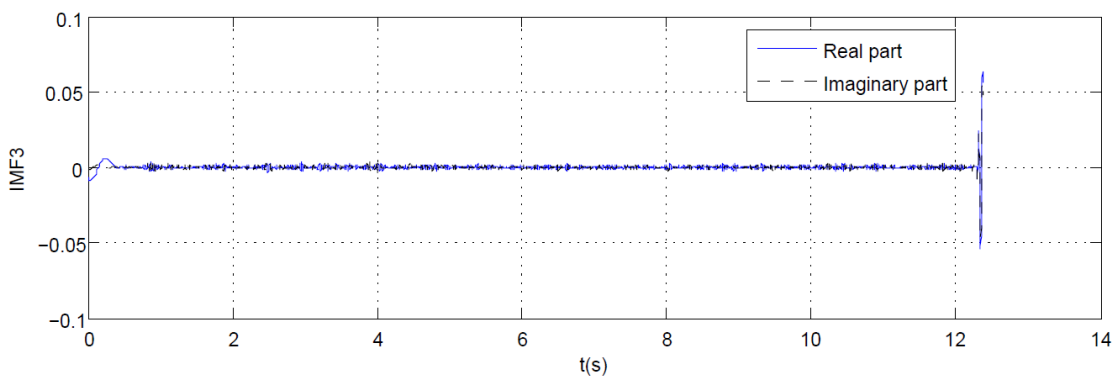
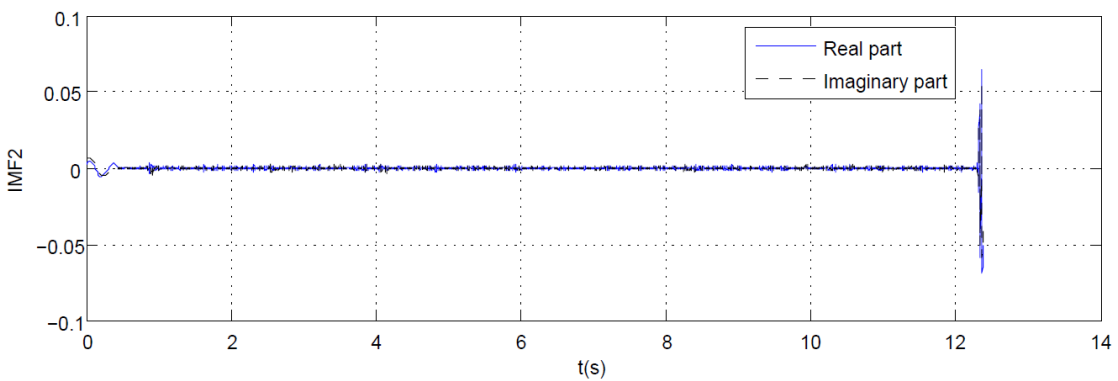
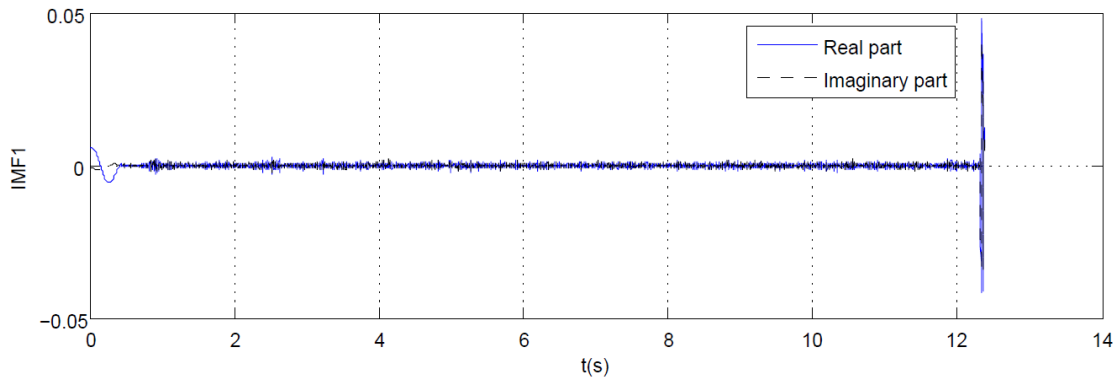
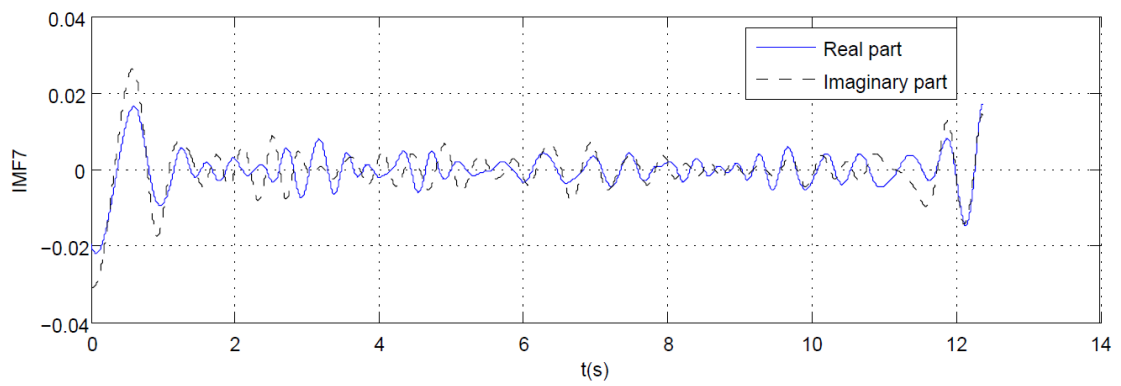
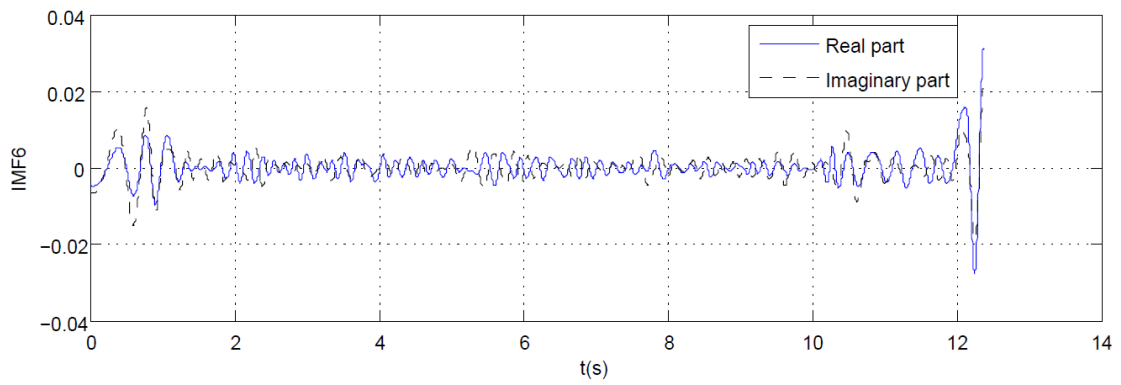
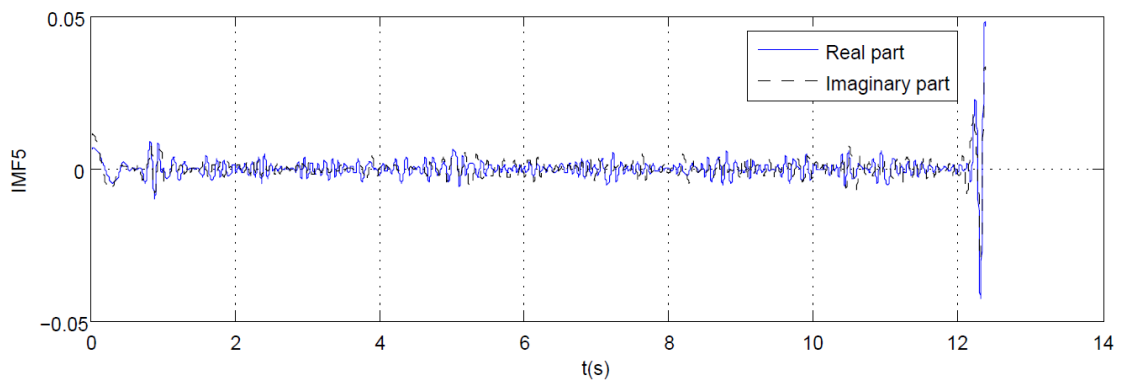
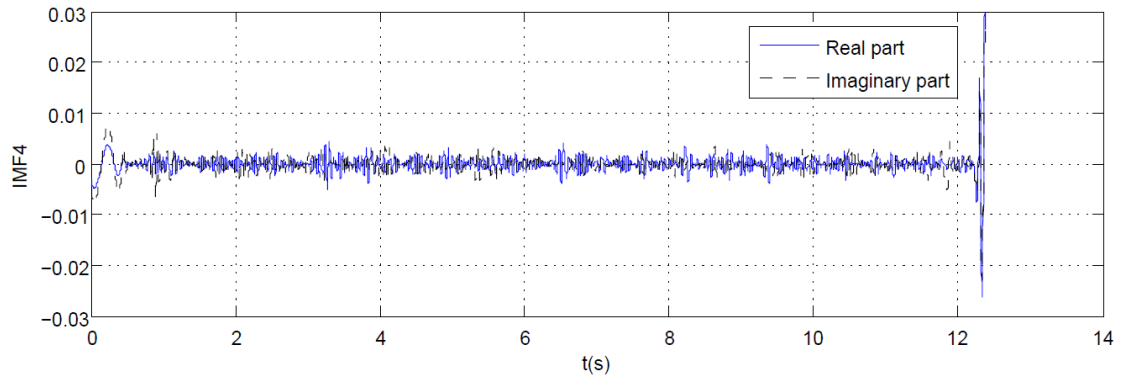


Figura B.1-8: IMFs e resíduo resultantes da decomposição do sinal de teste.

Anexo B.2 – *Intrinsic Mode Functions (IMFs)*

Nas Figuras abaixo encontram-se representadas as 8 IMFs, e o respetivo resíduo, obtidas após a aplicação do algoritmo EMD (ao raio direto da resposta impulsiva representado na Figura 3-3) cujo resultado da decomposição se encontra representado na Figura 3-4 da Subsecção 3.1.3.





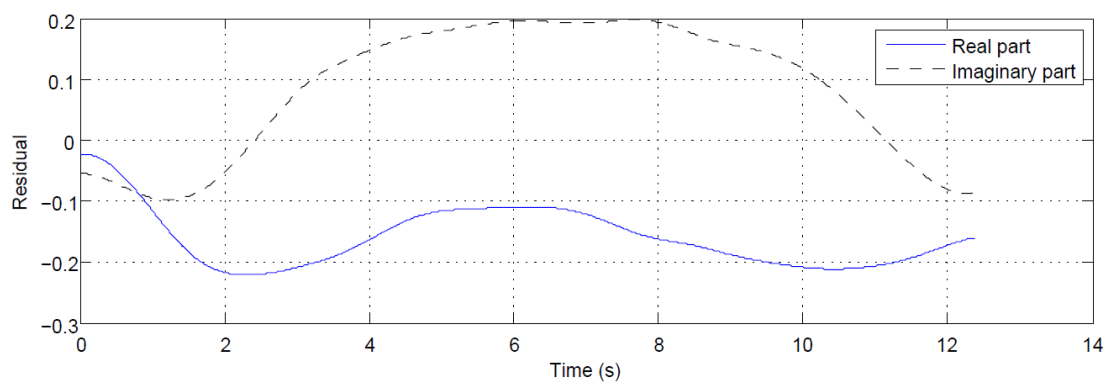
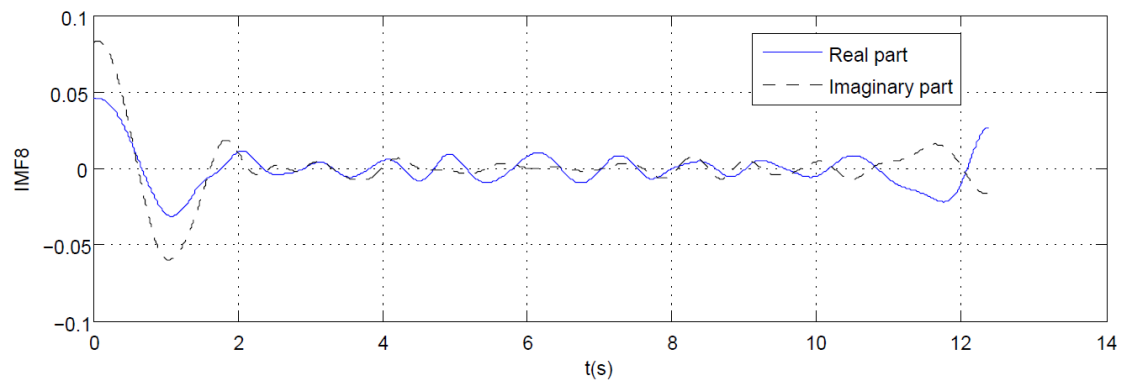


Figura B.2-1: Intrinsic Mode Functions obtidas após a aplicação do algoritmo EMD ao raio direto da resposta impulsiva representado na Figura 3-3.

Anexo C – Densidade Espectral de Potência de um Sinal na Presença do Deslocamento de Doppler

O teorema de Wiener-Khintchine [46] define que a densidade espectral de potência de um sinal $x(t)$ é a transformada de Fourier da sua função de autocorrelação, isto é,

$$S_x(f) = \mathcal{F}[r_{xx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{+\infty} r_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

Seja,

$$x_d(t) \triangleq x(t)e^{jw_d t}$$

Em que o sinal $x_d(t)$ representa o sinal $x(t)$ na presença do desvio de Doppler w_d , e cuja função de autocorrelação é dada por:

$$r_{x_d x_d}(\tau) = E\{x_d(t)x_d^*(t-\tau)\} = E\{x(t)x^*(t-\tau)e^{jw_d t}e^{-jw_d(t-\tau)}\} = e^{jw_d \tau} r_{xx}(\tau)$$

Sendo que no domínio da frequência, a densidade espectral de potência de $x(t)$, na presença do Desvio de Doppler, passa a ser dada por:

$$S_{x_d}(f) = S_x(f - f_d)$$

Onde,

$$f_d = \frac{w_d}{2\pi}$$

Ou seja, a presença do desvio de Doppler no domínio do tempo de um sinal $x(t)$ representa uma translação na frequência na sua função densidade espectral de potência.

Anexo D – NetMar_{Sys}

Mission.dat:

No bloco *Path-following Mission* (referido na Seção 5.1) a trajetória a ser realizada pelos veículos é feita no ficheiro de entrada *mission.dat* onde é definida (a partir de uma matriz) a trajetória 2D que os veículos vão fazer ao longo da simulação, em que cada linha da matriz representa um troço da missão onde:

- Nas colunas 1 e 2 é definido o início de cada troço da missão em que a coluna 1 representa o eixo dos xx e a coluna 2 representa o eixo dos yy ;
- Se a trajetória incluir arcos, nas colunas 3 e 4 é definido o centro do mesmo. Se a trajetória for definida por linhas retas, estas colunas são definidas pelo valor -1.
- As colunas 5 e 6 representam o fim do troço da missão;
- Na coluna 7 é colocada a velocidade desejada do veículo;
- Na coluna 8 é escolhida a direção do arco relativo ao troço em questão:
 - 1 quando é escolhido o arco no sentido horário;
 - 0 quando é escolhido o arco no sentido anti-horário.

Na Figura D-1 e na Figura D-2 estão representados, respetivamente:

- Um exemplo de uma matriz com a definição da trajetória a ser feita pelos veículos ao longo da simulação, em que cada linha representa um troço da missão;
- O *plot* da missão definida na matriz referida no *bullet* anterior.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---|
| 1 | 489020 | 4251500 | -1 | -1 | 489170 | 4251300 | 1.5000 | 0 |
| 2 | 489170 | 4251300 | -1 | -1 | 489440 | 4251600 | 1.5000 | 0 |
| 3 | 489440 | 4251600 | -1 | -1 | 489250 | 4251800 | 1.5000 | 0 |
| 4 | 489250 | 4251800 | 489390 | 4251900 | 489520 | 4252000 | 1.5000 | 1 |
| 5 | 489520 | 4252000 | -1 | -1 | 489900 | 4251700 | 1.5000 | 0 |

Figura D-1: Exemplo de matriz com definição de trajetória.

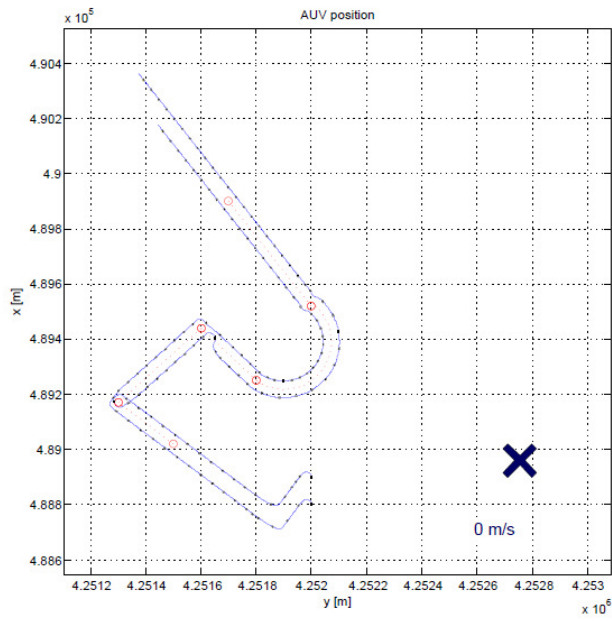


Figura D-2: Plot da missão definida na matriz da Figura B-1 (a vermelho) e trajetória dos veículos ao longo da simulação a azul.

Anexo E - Estrutura do Modelo de Comunicações

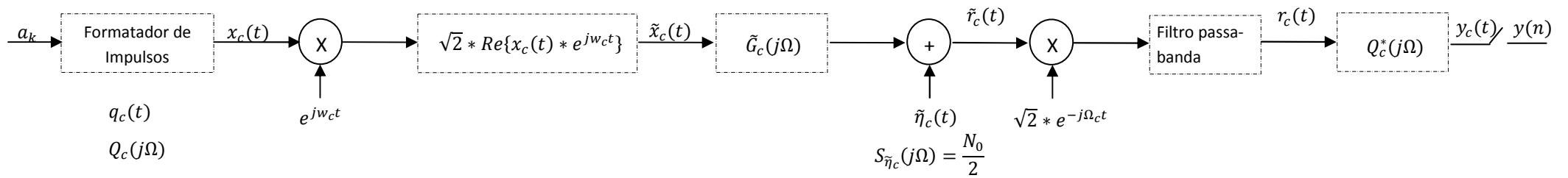


Figura E-1: Estrutura do modelo de comunicações que utilizado nesta dissertação.

