



ESCOLA NAVAL

ta sante  bi faire



Luís Carlos Cézar Meneses

Oportunidades para a Utilização Dinâmica do Espetro na Banda de VHF do Serviço Móvel Marítimo

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Engenharia Naval – Ramo Armas e Eletrónica**



Alfeite 2015



ESCOLA NAVAL

ta sãntve  biê-faire



Luís Carlos César Meneses

***Oportunidades para a Utilização Dinâmica do Espectro na Banda de
VHF do Serviço Móvel Marítimo***

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Engenharia Naval – Ramo Armas e Eletrónica**

Orientação de: CFR EN-AEL Ludovico Bolas

Co-orientação de: Prof. Dr. Miguel Moreira

O Aluno Mestrando

O Orientador

César Meneses
ASPOF EN-AEL

Ludovico Bolas
CFR EN-AEL

**Alfeite
2015**

*Aos meus pais, Ernesto Meneses e
Filomena Meneses, e à minha família*

AGRADECIMENTOS

A lista de colaboradores com intervenção neste trabalho é bastante vasta, pelo que dedico este espaço para lhes agradecer.

Primeiramente, quero agradecer aos meus orientadores, o CFR EN-AEL Ludovico Bolas e o professor Dr. Miguel Moreira, que não pouparam esforços para me ajudar, dando-me todas as ferramentas que precisei para o presente trabalho fosse realizado. Neste seguimento, quero também agradecer ao 2TEN EN-AEL Gonçalves Capela por toda a ajuda disponibilizada, e por todas as explicações dadas acerca do desenvolvimento do seu projeto, o qual foi essencial para este trabalho.

Aos oficiais e sargentos do Departamento de Ciências e Tecnologias da Escola Naval, nomeadamente ao CFR EN-AEL Ribeiro Correia por todas as reuniões de avaliação da situação da tese de mestrado, e por todo o apoio prestado.

Ao ASPOF EN-AEL Ventura Viegas, com o qual passei grande parte do tempo a trabalhar, tendo a sua colaboração sido bastante importante para este trabalho. Quero também agradecer ao ASPOF EN-AEL Chadli Amir e ao ASPOF FZ Sousa Teles, por todas as suas contribuições no desenvolvimento desta dissertação, e por todo o tempo vivido durante este ano. Devo também agradecer, não só aos meus camaradas da classe EN-AEL, como também a todo o curso VALM Mendes Cabeçadas Júnior, por estes 5 anos de grandes vivências e experiências que passamos juntos.

Quero deixar aqui um agradecimento a toda a guarnição do NRP Vasco da Gama, no qual passei 3 meses de estágio, tendo contribuído para a minha formação e por todo o tempo que foi disponibilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer aos meus pais e toda a minha família por durante todos estes anos me terem incentivado e prestado apoio em todos os momentos.

A todos estes fica um sentido obrigado e votos de enorme sucesso pessoal e profissional.

Luís Carlos César Meneses

RESUMO

Atualmente, grande parte das comunicações marítimas junto à costa baseiam-se em sistemas de banda estreita VHF, devido à sua facilidade de utilização e baixo custo. No entanto, os serviços de dados (banda larga) são geralmente feitos através de comunicações satélite, as quais requerem elevados custos financeiros. Torna-se necessário uma alternativa a estas comunicações que mantenha as suas capacidades operacionais mas economicamente mais baratas. Todavia, o maior problema para este tipo de implementação reside na gestão e escassez do espetro, que atualmente segue uma política de alocação estática, impossibilitando a implementação de novos serviços. Como tal, tem sido proposta a utilização de rádios cognitivos que, para além de permitir um acesso dinâmico ao espetro, são também capazes de coexistir com sistemas não cognitivos. O presente trabalho tem como objetivo o estudo das oportunidades para utilização dinâmica do espetro na banda de VHF do serviço móvel marítimo. Assim, é realizada a monitorização destes canais em diferentes regiões do porto de Lisboa, avaliando as oportunidades de transmissão VHF. Com base nas regressões lineares, é elaborado um modelo matemático para estimar a percentagem de ocupação dos referidos canais, e avaliar o potencial uso do espetro em futuras aplicações de rádios cognitivos, nomeadamente para serviços de banda larga.

Palavras-chave: Rádios Cognitivos, Gestão do Espetro, Rádio Definido por Software, Regressão Linear Múltipla

ABSTRACT

Currently, much of maritime communications along the coast are based on narrow band VHF systems due to its ease of use and low cost. Note that, data services through satellite communications systems (broadband) require high cost. An alternative to these communications, within the VHF range, maintaining its operational capabilities and being less expensive would be very useful. However, the main problem for this type of implementation lies in the management and scarcity of spectrum, which currently follows a static allocation policy, preventing the implementation of new services. So, it was recently proposed the use of cognitive radios which can dynamically access to static spectra. The present work deals with the study of the maritime mobile service occupation for dynamic spectrum access. In first place it was performed a monitoring of these channels in different locations of the port of Lisbon, evaluating the VHF transmission opportunities. In second place, based on the obtained data, a simple mathematical model to estimate the occupancy of these channels was developed. The results obtained can be useful to evaluate the potential use of the VHF spectrum in future applications of cognitive radios as well as broadband services.

Keywords: Cognitive Radios, Spectrum Management, Software Defined Radio, Multiple Linear Regression

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT.....	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XVII
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XXI
CAPITULO I.....	1
Introdução	1
1.1 – Enquadramento	1
1.2 – Âmbito	4
1.3 – Organização da Tese.....	5
Enquadramento Teórico	7
2.1 - Introdução.....	7
2.2 - Estado Atual do Serviço Móvel Marítimo	8
2.3 - <i>E-Navigation</i>	10
2.4 - <i>Automatic Identification System</i>	11
2.4.1 - Funcionamento.....	12
2.5 – Rádios Cognitivos.....	14
2.5.1 - Capacidade Cognitiva	16
2.5.2 - Capacidade de Reconfiguração.....	17
2.6 - Identificação de oportunidades de transmissão	17
2.7 - Desafios para a implementação do <i>spectrum sensing</i>	18
2.7.1 - Requisitos de <i>hardware</i>	18
2.7.2 - Duração e frequência do <i>sensing</i>	18
2.7.3 - Utilizador primário oculto	20
2.8 - Técnicas de <i>Spectrum Sensing</i>	21
2.8.1 - <i>Sensing</i> cooperativo e não cooperativo.....	22
2.9 – <i>Software Defined Radios</i>	24
2.10 – Estudos Relacionados	25
2.11 – Conclusão	26
CAPÍTULO III.....	27

Arquitetura do SDR	27
3.1 – Introdução	27
3.2 – Arquitetura do Sistema	29
3.2.1 – Detetor de energia	29
3.2.2 – Detecção de transmissões	32
3.2.3 – Recetor AIS	34
3.3 – Conclusão	35
CAPITULO IV.....	37
Trabalho de campo e resultados.....	37
4.1 – Introdução	37
4.2 - Testes de calibração.....	38
4.2.1 – Comparação de potências recebidas.....	38
4.2.1.1 – Objetivos do teste	38
4.2.1.2 – Material e esquemático utilizado.....	39
4.2.1.2 - Descrição do teste efetuado.....	39
4.2.1.3 – Conclusões.....	40
4.2.2 – Testar a ocupação de um canal e comparar as potências recebidas	40
4.2.2.1 – Objetivo do teste.....	40
4.2.2.2 – Material e esquemático utilizado.....	40
4.2.2.3 – Descrição do teste efetuado	41
4.2.2.4 – Resultados obtidos.....	43
4.2.2.5 – Conclusões.....	46
4.2.3 – Avaliação da ocupação de um canal	46
4.2.3.1 – Objetivo do teste.....	46
4.2.3.2 – Material e esquemático utilizado.....	47
4.2.3.3 – Descrição do teste efetuado	48
4.2.3.4 – Resultados obtidos.....	51
4.2.3.5 - Conclusões	55
4.2.4 – Teste de recolha dados AIS.....	55
4.2.4.1 – Objetivo dos testes.....	55
4.2.4.2 – Material e esquemático utilizado.....	55
4.2.4.3 – Descrição do teste efetuado	56
4.2.4.4 – Resultados obtidos.....	57
4.2.4.5 - Conclusões	57

4.2.5 – Conclusões relativas aos testes de calibração	57
4.3 – Testes de recolha de dados	58
4.3.1 – Teste a bordo do NRP Zarco	58
4.3.1.1 – Análise de resultados obtidos	60
4.3.2 – Teste na SGT F12.....	61
4.3.2.1 – Análise de resultados obtidos	63
4.3.3 – Teste na Escola Naval	64
4.3.3.1 – Análise de resultados obtidos	65
4.3.4 – Teste na Capitania de Cascais	67
4.3.4.1 – Análise de resultados obtidos	68
4.4 – Conclusão	68
CAPITULO V	71
Modelo de Previsão para Ocupação do Espectro	71
5.1 – Introdução	71
5.2 – Modelo de Regressão Linear Múltipla	72
5.2.1 – Equações Normais.....	73
5.2.2 – Análise da variância	74
5.2.3 – Intervalos de confiança para Y	77
5.2.4 – Previsão de novas observações	78
5.2.4 – Análise de resíduos	78
5.3 – Modelo Estimador da Ocupação do MMS	79
5.3.1 – Canal VHF 16	79
5.3.2 – Aplicação do modelo para restantes canais do MMS	86
5.4 – Conclusão	88
CAPITULO VI.....	91
Conclusões e Recomendações	91
REFERÊNCIAS.....	95
APÊNDICE A.....	101
APÊNDICE B.....	103
APÊNDICE C.....	107
APÊNDICE D.....	111
APÊNDICE E.....	117
ANEXO A	125
ANEXO B	129

ANEXO C	137
ANEXO D	141
ANEXO E	145
ANEXO F	149
ANEXO G	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Panorama atual das comunicações marítimas: a) Comunicações de longo alcance (satélite) – navegação oceânica; b) Comunicações de médio e curto alcance (VHF) – navegação portuária e costeira	2
Figura 2 - Serviço Móvel Marítimo em Portugal	9
Figura 3 – Medidas da utilização do espectro em Berkeley.....	10
Figura 4 – Princípio de funcionamento do AIS	13
Figura 5 - Oportunidades de transmissão no espectro (white spaces).....	15
Figura 6 - Ciclo cognitivo.....	16
Figura 7 – Problema da incerteza do recetor	20
Figura 8 – Problema do sombreamento	23
Figura 9 – Três diferentes produtos USRP	24
Figura 10 - Diagramas de implementação do detetor de energia no domínio do tempo e da frequência, respetivamente	30
Figura 11 - Diagrama de fluxo do GNU Radio para monitorizar o espectro	31
Figura 12 - Possíveis situações em que não ocorre deteção de transmissões - a), b) e c) - e os requisitos para ser detetada a transmissão - d)	33
Figura 13 - Diagrama de fluxo do recetor AIS desenvolvido em GNU Radio	35
Figura 14 - Pontos de realização dos testes (Escola Naval – Departamento de Ciências e Tecnologias)	39
Figura 15 - Aparato experimental utilizado no teste da ocupação de um canal VHF	41
Figura 16 - Local da realização do teste (Escola de Tecnologias Navais: Ponto 1) DAE e 2) DOP)	42
Figura 17 - Potência recebida no USRP	44
Figura 18 - Taxa de ocupação do canal 24, correspondendo aproximadamente a 50% do tempo	45
Figura 19 - Número de transmissões registadas	45
Figura 20 - Esquemático do aparato experimental utilizado	47
Figura 21 - Esquemático do microcontrolador	48
Figura 22 - Localização do referido teste (Escola Naval)	49
Figura 23 - Montagem do aparato experimental: a) Sistema recetor e b) Microcontrolador e rádio VHF	49

Figura 24 - Percentagem da ocupação do canal 24 durante o teste 1	52
Figura 25 - Número de ocorrências do canal 24 durante o teste 2	52
Figura 26 - Taxa de ocupação do canal 24 durante o teste 2.....	53
Figura 27 - Potência recebida no USRP relativo ao teste 2.....	54
Figura 28 - Potência recebida no analisador de espectro, relativo ao teste 2	54
Figura 29 - Esquemático do teste à receção de dados AIS	56
Figura 30 - Imagem aérea do local escolhido para testar a receção de dados AIS.....	56
Figura 31 - Local da montagem da antena a bordo do NRP Zarco	59
Figura 32 - Trânsito BNL - Marina de Cascais, realizado pelo NRP Zarco	59
Figura 33 - Dados recolhidos a bordo do NRP Zarco, no período entre as 11:59h e 15:59h: a) Percentagem de ocupação do MMS, b) Número de transmissões.....	60
Figura 34 - Dados recolhidos a bordo do NRP Zarco, no período entre as 08:10h e 12:10h: a) Percentagem de ocupação do MMS, b) Número de transmissões.....	60
Figura 35 - Localização da SGT F12.....	62
Figura 36 - Local da montagem da antena CX4 VHF.....	62
Figura 37 - Ocupação dos canais do espectro: a) 3 primeiros dias, b) 4 últimos dias.....	63
Figura 38 - Ocupação de alguns canais do MMS: a) 3 primeiros dias, b) 4 últimos dias	63
Figura 39 - Localização da Escola Naval	64
Figura 40 - Local da montagem da antena	65
Figura 41 - Ocupação dos canais do espectro: a) 2 primeiros dias, b) 4 últimos dias.....	65
Figura 42 - Ocupação de alguns canais do MMS: a) 2 primeiros dias, b) 4 últimos dias	66
Figura 43 - Localização da Capitania de Cascais	67
Figura 44 - Taxa de ocupação do espectro VHF: a) visão geral, b) alguns dos canais do MMS.....	68
Figura 45 - Representação gráfica dos resíduos	78
Figura 46 - Representação gráfica do modelo de regressão linear	83
Figura 47 - Gráfico dos resíduos do modelo desenvolvido.....	86
Figura 48 - Comparação dos valores reais e estimados da ocupação, através do modelo proposto (7 navios).....	87
Figura 49 - Comparação dos valores reais e estimados da ocupação, através do modelo proposto (9 navios).....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalo entre mensagens para AIS classe A	12
Tabela 2 - Tabela de comparação entre técnicas de spectrum sensing.....	22
Tabela 3 - Definição do início e fim de cada transmissão (a verde o tempo de transmissão, e a laranja quando não há transmissão)	43
Tabela 4 - Configurações do teste e respetivos resultados	43
Tabela 5 - Ficheiro de texto enviado para cartão SD com informação da duração das cinco transmissões.....	50
Tabela 6 - Configurações e resultados dos dois testes realizados	51
Tabela 7 - Registo do número de navios em cada duas horas	57
Tabela 8 - Tabela ANOVA.....	76
Tabela 9 - Amostra de dados recolhidos	80
Tabela 10 - Tabela ANOVA com dados recolhidos.....	84
Tabela 11 – Valores de ocupação do canal 16 obtidos experimentalmente	85
Tabela 12 – Erros de estimação do modelo proposto com base nos dados experimentais na tabela 11	85
Tabela 13 - Resultados obtidos para os principais canais portuários do MMS.....	87

LISTA DE ABREVIATURAS

AIS	<i>Automatic Identification System</i>
ARPA	<i>Automatic Radar Plotting Aids</i>
ANACOM	Autoridade Nacional de Comunicações
BNL	Base Naval de Lisboa
CFR	Capitão-de-fragata
CINAV	Centro de Investigação Naval
CR	<i>Cognitive Radios</i>
SATCOM	Comunicações Satélite
DAE	Departamento de Armas e Eletrónica
DOP	Departamento de Operações
DSC	<i>Digital Selective Calling</i>
DSA	<i>Dinamic Spectrum Access</i>
ECDIS	<i>Electronic Chart Display and Information System</i>
EN-AEL	Engenheiros Navais – Armas e Eletrónica
SGT F12	Estação Ibéria NATO – <i>Satellite Ground Station</i>
GMDSS	<i>Global Maritime Distress and Safety System</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HDLC	<i>High-level Data Link Control</i>
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LRIT	<i>Long Range Identification and Tracking</i>
MMS	<i>Maritime Mobile Service</i>
NRP	Navio da República Portuguesa
NC-FDM	<i>Non Contiguous Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PIM	Projeto de Monitorização Integrada
PTT	<i>Push-to-talk</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
2TEN	Segundo Tenente
SOTDMA	<i>Self-Organizing Time Division Multiple Access</i>
SDR	<i>Software Defined Radios</i>
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
UP	Utilizadores Primários
US	Utilizadores Secundários
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VTs	<i>Vessel Traffic Service</i>

CAPITULO I

Introdução

1.1 – Enquadramento

A Europa compreende algumas das mais movimentadas rotas marítimas do mundo, tendo uma das maiores concentrações de navios. Por outro lado, é indiscutível a importância das atividades económicas marítimas, pois os oceanos cobrem cerca de 70% da superfície da terra, sendo que grande parte das mercadorias do mundo são transportados por frotas mercantes.

As rotas marítimas mundiais são suportadas, maioritariamente, pelo Serviço Móvel Marítimo (MMS – *Maritime Mobile Service*), compreendido na banda de VHF¹ (entre os 156 aos 174 MHz). Este inclui uma variedade de serviços de voz e de dados de baixa velocidade, como o Sistema Mundial de Socorro e Segurança Marítima (GMDSS – *Global Maritime Distress and Safety System*), Sistema de Identificação Automática (AIS – *Automatic Identification System*), entre outros. Em geral, estes sistemas são de banda estreita, apresentando baixos ritmos de transmissão e uma cobertura de mar muito limitada.

Por outro lado, a banda larga (alcance e ritmos de transmissão superiores) é exclusivamente suportada pelas comunicações satélite (SATCOM). Com uma cobertura quase global, estes sistemas são bastante eficazes, mas requerem elevados custos monetários. A Figura 1 ilustra o cenário atual das comunicações marítimas, no qual as navegações portuárias e costeiras são suportadas pela banda de VHF, utilizada para coordenar manobras e procedimentos de segurança com outros navios e para a coordenação de movimentos de porto. Para navegações oceânicas (tipicamente acima das 30 milhas de distância a costa), são necessárias as SATCOM para comunicar com estações costeiras ou navios.

¹ VHF é a sigla para o termo inglês *Very High Frequency* (Frequência Muito Alta) que designa a faixa da frequência das ondas de rádio entre os 30 a 300 MHz

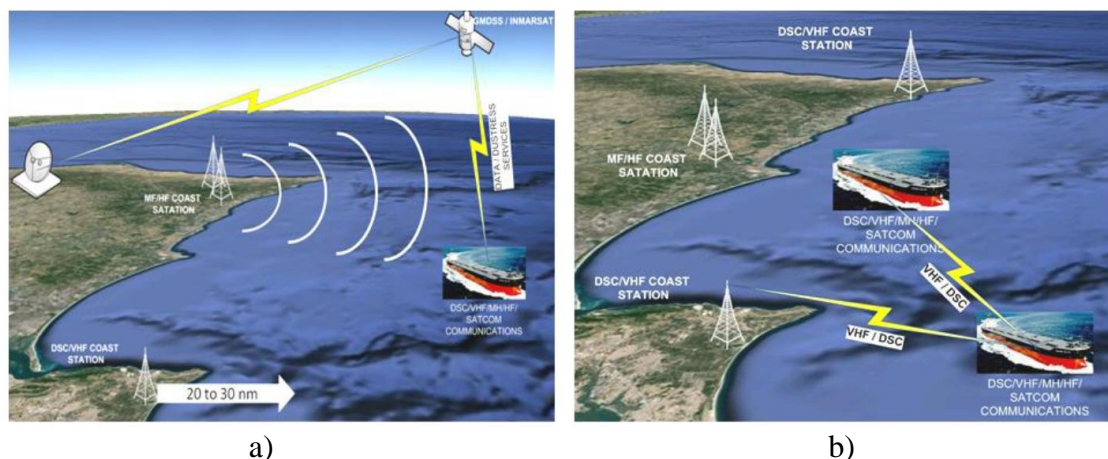


Figura 1 - Panorama atual das comunicações marítimas: a) Comunicações de longo alcance (satélite) – navegação oceânica; b) Comunicações de médio e curto alcance (VHF) – navegação portuária e costeira
 Fonte: [3]

Apesar do grande aumento da utilização de rádios VHF nas comunicações marítimas, quando são necessários serviços de dados, a escolha recai sobre as SATCOM, essencialmente devido ao seu elevado desempenho. Todavia, os seus elevados custos financeiros por parte dos utilizadores é algo a ter em consideração. Dentro do horizonte rádio, também não existem alternativas disponíveis para comunicações de alta velocidade, sendo algo preocupante.

Com a evolução das tecnologias, surgem conceitos relacionados com a segurança de navegação, nomeadamente o conceito de *e-Navigation*. Esta é uma ideia que pretende a convergência de diversos equipamentos de ajudas à navegação por forma a ser criada uma melhor organização dos dados em navios e em terra, sendo necessárias elevadas larguras de banda. Também o facto de grande parte dos navios navegarem com linha de vista para costa e de não tirarem o máximo proveito da banda de VHF devido à falta de serviço de dados de alta velocidade, contribui para uma ineficaz utilização do espectro. Desta forma, qualquer alternativa VHF para dados de alta velocidade (sistema de banda larga VHF), entre navios e estações costeiras, e que possa ter um custo inferior às SATCOM, mas desempenho semelhante, representaria uma melhoria significativa para as comunicações marítimas e para a gestão do espectro.

Um dos problemas associados à aplicação destes serviços centra-se no facto dos canais do MMS não possuírem largura de banda suficiente. Para tal, é possível agregar diversos canais do espectro, permitindo aumentar a largura de banda. No entanto, o espectro

VHF do MMS é contíguo, o que impossibilita esta junção. Assim, a modulação por Multiplexagem Ortogonal por Divisão em Frequência (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tem sido proposta como uma possível solução na agregação de bandas não contíguas [1] [2] [3].

Atualmente o espectro eletromagnético segue uma política de alocação estática. Este tipo de alocação divide o espectro em diferentes bandas, cada uma destinada a um serviço, e que permite a inexistência de interferências entre os utilizadores. Devido a esta gestão, tem-se vindo a verificar que o espectro apresenta uma escassez virtual, o que torna difícil o estabelecimento de novos serviços de comunicação. Tal facto é originado pela alocação estática que não permite a utilização dos canais para serviços diferentes dos estabelecidos, mesmo quando estes não se encontram ocupados. Com isto, inúmeros estudos têm vindo a mostrar que a utilização do espectro não ocorre de modo eficiente por parte dos seus utilizadores, verificando-se que tem uma taxa de ocupação bastante reduzida.

Posto isto, o maior desafio para a implementação de serviços de banda larga de VHF reside no facto do espectro ser contíguo, na sua gestão e disponibilidade, devido à diversidade de partes interessadas na sua utilização e na difícil coordenação que existe entre países vizinhos. Assim, com o intuito de melhorar a eficiência espectral, tendo também em vista a inclusão de novos serviços de comunicação que sejam suportados num espectro já devidamente segmentado, sem ocorrer a interferência com outros serviços, tem sido apontada a alocação dinâmica do espectro (DSA – *Dynamic Spectrum Access*) como a possível solução. Esta política sugere a utilização do espectro de forma oportunista, ou seja, o acesso a este será dado em função da sua utilização, sendo que as faixas do espectro não se encontram alocadas a um determinado serviço, não podendo afetar o canal 16 e 70, destinados a emergências.

Os rádios cognitivos (CR – *Cognitive Radios*) têm sido propostos como uma tecnologia capaz de aceder ao espectro de forma dinâmica. Estes rádios são dispositivos que, devido à sua capacidade cognitiva (perceção, inteligência, etc.) e de reconfiguração, são capazes de compreender o ambiente envolvente, alterando os seus parâmetros de transmissão, por forma a não ocorrerem interferências com outros utilizadores, determinando em que condições o pode utilizar com posterior acesso ao mesmo. Este conceito básico reside em tirar partido dos segmentos de espectro que se encontrem

inativos, ou seja, sempre que uma frequência do MMS não esteja a ser utilizada, os utilizadores de CR poderão fazer uso da mesma sem causar interferências a outras comunicações que possam surgir.

1.2 – Âmbito

O principal fator que contribui para a implementação dos CR deve-se à má gestão do espetro, pois existem vários canais que se encontram pouco utilizados. No seguimento deste problema, foram feitos alguns estudos, em diferentes frequências do espetro eletromagnético, e que demonstraram que alguns canais apresentavam uma taxa de ocupação bastante reduzida. No entanto, na banda do serviço móvel marítimo ainda não existem estudo que demonstrem a sua ocupação.

Como tal, o tema desta dissertação de mestrado surge numa sequência de estudos que têm vindo a ser desenvolvidos no âmbito do CINAV (Centro de Investigação Naval), da Escola Naval e da Marinha de Guerra Portuguesa, relacionados com as comunicações na Marinha Portuguesa, a gestão de espetro, e mais especificamente com o a utilização dos CR para comunicações VHF de banda larga, como é o caso do estudo [1] e [3]. De forma genérica, em [1] foi proposta a utilização destes rádios para suportarem serviços de banda larga no MMS, através da sua capacidade de acesso dinâmico ao espetro e de técnicas de múltiplas portadoras NC-OFDM (*Non-Contiguous-OFDM*), variante da OFDM. Posteriormente, foi desenvolvido em [3] uma implementação da técnica NC-OFDM, em GNU Radio. Este é um *software* que permite a implementação de blocos de processamento para o desenvolvimento de rádios definidos por *software* (SDR), o qual é analisado numa fase posterior na presente dissertação de mestrado.

No seguimento das propostas anteriores, esta dissertação, tem como objetivo a realização de um estudo relativo às oportunidades para utilização dinâmica do espetro na banda de VHF do MMS.

Neste contexto, é estudada a taxa de ocupação dos canais de voz VHF do MMS relacionando com dados AIS relativos à quantidade de navios que se encontram numa determinada área geográfica. Através desta relação de dados, será possível estimar a ocupação do MMS, de modo a avaliar o potencial uso do espetro radioelétrico em futuras aplicações de CR.

Em primeira instância, foi necessária a utilização de um recetor AIS e de um equipamento capaz de monitorizar o espetro.

Como o objetivo deste trabalho não consiste na elaboração do referido equipamento, foi utilizado o SDR desenvolvido Germano Capela em [3], ao qual foi adicionada uma rotina para detetar o início e fim das comunicações. Este tipo de deteção permite ter uma perceção do modo como são utilizados os canais VHF do MMS, realizando a contagem de transmissões e o fornecimento da informação da taxa de ocupação destes canais. Com a colaboração de Germano Capela, foi também adaptado para GNU Radio um recetor AIS, originalmente desenvolvido em [4]. As mensagens AIS enviadas pelos navios, são recebidas por este recetor, o qual é capaz de as descodificar e identificar o número de navios presentes numa área geográfica. Posteriormente, foram realizados testes de calibração, por forma a testar os algoritmos em diferentes ambientes e com diferentes configurações, fazendo o despiste de possíveis erros. Após a calibração dos equipamentos, foi realizada a monitorização do espetro do MMS a bordo do Navio da República Portuguesa (NRP) *Zarco* numa viagem desde a Escola Naval até à marina de Cascais (e regresso), na Fonte da Telha e no mar da Palha. Com base na teoria de regressão linear múltipla, foi elaborada uma rotina em MATLAB para estimar a ocupação dos canais do MMS no porto de Lisboa.

1.3 – Organização da Tese

A presente tese de mestrado encontra-se dividida em seis capítulos, com respetivos subcapítulos, por forma a ilustrar todo o trabalho que foi realizado acerca desta temática.

No capítulo II é introduzido o conceito de *e-Navigation* e a problemática da necessidade de comunicações de banda larga. No entanto, grande parte deste capítulo é dedicado aos CR, sendo abordada a história do seu surgimento, o funcionamento e as técnicas que permitem fazer a monitorização do espetro, proporcionando assim uma base teórica para compreender esta temática.

O capítulo III é dedicado ao estudo teórico da técnica de deteção de energia, que permite monitorizar o espetro. É apresentado o SDR desenvolvido em [3], e que foi

utilizado para as medições de campo. Neste capítulo também é explicado o funcionamento do recetor AIS.

No capítulo IV são abordados os testes de calibração efetuados para verificar o funcionamento dos sistemas anteriormente referidos. Em cada um dos testes são analisados os resultados obtidos, e retiradas as devidas conclusões. Este capítulo é também dedicado a medições de campo por forma a ser analisada a taxa de ocupação do espetro.

O capítulo V aborda a teoria da regressão linear múltipla, que é a base para desenvolver o modelo matemático para estimar a taxa de ocupação dos canais VHF. Por fim, no capítulo VI, é efetuada uma conclusão a todo o trabalho desenvolvido, indicando as limitações que encontradas e algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPITULO II

Enquadramento Teórico

2.1 - Introdução

Atualmente, o espectro eletromagnético segue uma política de alocação estática, e cada vez mais é crescente o número de aplicações e sistemas baseados em comunicações sem fio. No entanto, o espectro é um recurso natural, escasso e finito, sendo que grande parte dele se encontra subutilizado.

Por forma a contrariar este acontecimento, torna-se de grande importância a implementação da tecnologia de CR. O CR é um sistema inteligente que permite o uso do espectro de uma forma oportunista, adaptando os seus parâmetros de transmissão ao ambiente em que opera. Assim, por forma a encontrar estas oportunidades de transmissão, ou seja, utilizar o espectro que se encontra livre, o CR emprega uma técnica denominada de *spectrum sensing*.

Nos próximos subcapítulos é abordada a problemática das comunicações marítimas baseadas em banda larga e estreita. É feita uma revisão nos conceitos de *e-navigation* e AIS. Ainda neste capítulo, é apresentado o conceito de CR e das técnicas de *spectrum sensing*. Por fim, é introduzido o conceito de SDR, e uma respetiva revisão bibliográfica.

2.2 - Estado Atual do Serviço Móvel Marítimo

Desde o passado até aos dias de hoje, que a navegação marítima e o transporte ao longo do mundo através de embarcações do mais variado tamanho, são uma atividade imprescindível para o desenvolvimento das sociedades. Estas atividades são sustentadas principalmente pelo MMS, um serviço de rádio internacional destinado a fornecer segurança aos navegadores. A nível nacional, os planos de frequências para este serviço, foram estabelecidos pela Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM) [5], sendo que estas estão de acordo com a tabela de frequências internacional para VHF Marítimo [6]. Esta autoridade regula e supervisiona o setor das comunicações eletrónicas e postais em Portugal [7], como também é a responsável por assegurar a permanente monitorização e controlo/fiscalização do espetro através do Projeto de Monitorização Integrada (PIM) e de diversos equipamentos [8]. No âmbito internacional, a *International Telecommunication Union* (ITU) é uma agência das Nações Unidas especializada para as tecnologias de informação e comunicação que tem como objetivo atribuir o espetro de rádio global e órbitas de satélites mundiais, bem como desenvolver as normas relativas às técnicas que permitem interligar as redes e as tecnologias [9].

Como ilustrado na Figura 2 [1], o MMS inclui uma variedade de serviços dentro da faixa de frequências de 156,050 MHz a 165,725 MHz, com separação de canais de 50 KHz [5], entre os quais se encontram o serviço de voz e de baixa velocidade de dados, como o AIS, de suporte a sistemas, como o GMDSS ou o Sistema de Controlo de Tráfego Marítimo (VTS - *Vessel Traffic Service*), operando numa Frequência Média (MF - *Medium Frequency*) e VHF [1]. Além destes, existem outras faixas de frequências atribuídas para fins específicos, incluindo nove canais *full-duplex* (2, 3, 4, 5, 61, 62, 63, 64 e 65), que têm como finalidade a experimentação de novas tecnologias, sendo possível prever-se, no contexto atual, que a única forma para acomodar novas alocações para um sistema VHF marítimo de banda larga será, unicamente, para fins de experimentação [1] [5].

Infelizmente, no que toca aos serviços de banda larga, estes são exclusivamente suportados por SATCOM [10], não havendo uma alternativa para a comunicação a alta velocidade. Assim, surge a necessidade de serem desenvolvidas soluções na banda

marítima VHF para ligações de dados a alta velocidade entre embarcações e estações em terra, reduzindo o custo das SATCOM.

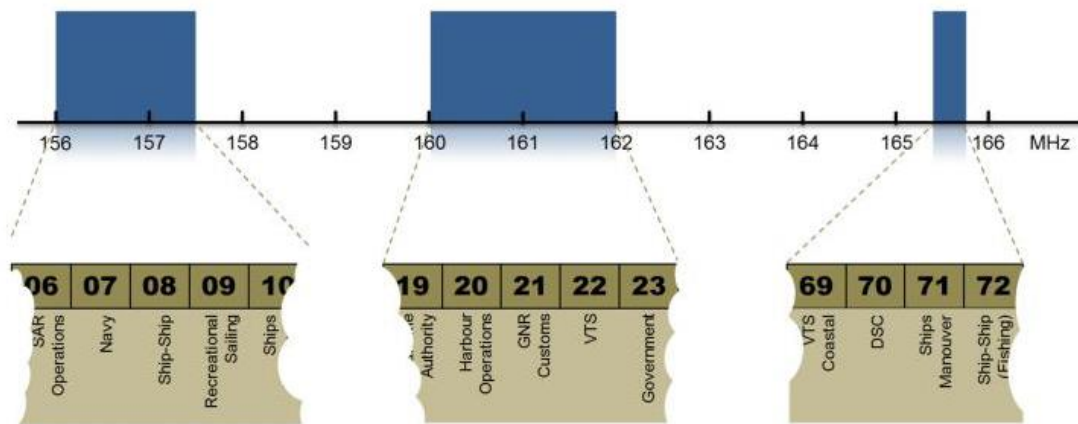


Figura 2 - Serviço Móvel Marítimo em Portugal
Fonte: [1]

Em [1], foi proposta esta abordagem, a qual inclui uma combinação de recentes avanços baseados em CR, técnicas de modulação multi-portadora NC-OFDM e antenas inteligentes que podem fornecer uma maneira de conceber um sistema que permita utilizar as oportunidades de espectro e usá-los de forma eficiente para implementar capacidades de banda larga [10].

No entanto, o grande desafio na implementação de serviços de banda larga VHF marítima é, sem dúvida, a disponibilidade e gestão do espectro, pois para além da sua escassez física, o acesso ao mesmo é também problemático. Esta gestão torna-se difícil devido à diversidade das partes interessadas (nomeadamente agências governamentais, militares e organizações internacionais) e à necessidade de haver uma coordenação entre os países vizinhos, dificultando a tarefa de encontrar e atribuir espectro para novos serviços, especialmente para implementar serviços de banda larga [10]. A subutilização do espectro também é outro problema que se encontra bem identificado, sendo que algumas faixas de frequência são escassamente ocupadas a maior parte do tempo. A Figura 3 é um exemplo bem claro desta situação, pois ilustra medidas feitas, num dado instante, numa cidade de Berkeley (EUA) revelando uma utilização do espectro de apenas 0,5% na gama de frequências entre os 3 e 4 GHz e de 0,3% entre os 4 e 5 GHz [11].

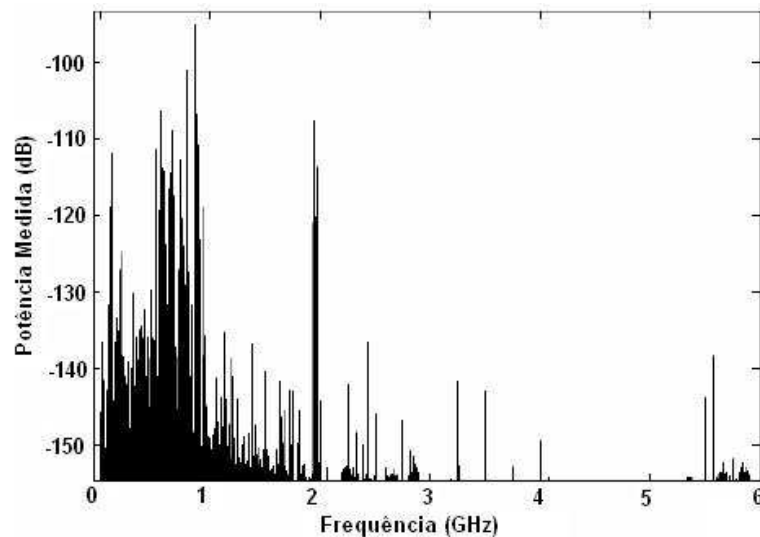


Figura 3 – Medidas da utilização do espectro em Berkeley.
 Fonte: [11]

Tendo estes aspetos em consideração, a solução que tem sido apontada para estes casos é a utilização da tecnologia de CR e do DSA, que permite diminuir a escassez deste, bem como, fazer a sua gestão através da seleção de bandas que maximizam a comunicação, sem nunca comprometer as vantagens estratégicas da alocação estática ou interferir com o funcionamento dos canais de emergência VHF, canal 16 (156,80 MHz) e 70 (156,525 MHz).

2.3 - *E-Navigation*

O futuro dos sistemas de apoio às operações marítimas será formado pelo conceito de *e-Navigation*. Esta é uma estratégia desenvolvida pela Organização Internacional Marítima (IMO – *International Maritime Organization*), agência especializada da ONU (Organização das Nações Unidas), para trazer maior segurança à navegação através de uma melhor organização dos dados em navios e em terra, e um melhor intercâmbio de dados e comunicação entre navio-navio e navio-terra. Resumidamente, a *e-Navigation* tem como objetivo a convergência e a fusão de todas as informações relevantes às ajudas de navegação, tais como: AIS, *Electronic Chart Display and Information System* (ECDIS), Sistemas Integrados da Ponte e Sistemas Integrados de Navegação (IBS / INS), *Automatic Radar Plotting Aids* (ARPA), sistemas de navegação por rádio e satélite, Sistema de Identificação e Seguimento de Navios a Longa Distância (LRIT - *Long Range Identification and Tracking*), VTS e GMDSS [12]. No entanto, este conceito exige

comunicações VHF banda larga, HF² (*High Frequency*) e satélite, sendo que, atualmente, o VHF e o HF não têm serviços de banda larga e os serviços de SATCOM ainda são consideravelmente caros. Os serviços de transmissão em VHF também são restritos a banda estreita tais como, ligação de dados AIS, DSC³ (*Digital Selective Calling*) e voz. No que diz respeito ao HF, os serviços disponíveis são ainda mais lentos, apesar de possuírem melhores características de cobertura [12].

2.4 - *Automatic Identification System*

Operando na banda marítima VHF, o sistema de identificação automática (AIS) permite a troca de dados sem fio entre navios, ou entre navios e estações costeiras para identificar automaticamente e localizar navios para evitar a colisão, aumentando a segurança da navegação [13]. Os seus serviços estão localizados em dois canais, centrados em 161.975 MHz e 162.025 MHz e permite lidar com cerca de 4500 mensagens por minuto e atualizando-se com uma frequência que pode ir até 2 segundos. Isto é conseguido através de um algoritmo de alocação de espaços de transmissão SOTDMA (*Self-Organizing Time Division Multiple Access*), que oferece um alto nível de coordenação entre os navios dentro da área de cobertura de cada um, evitando interferências e colisões e assegurando uma boa qualidade na receção de mensagens trocadas [13].

Segundo a IMO, é obrigatório todos os navios com um peso bruto superior a 300 toneladas que pratiquem viagens internacionais, cargueiros com peso bruto superior a 500 toneladas ou qualquer navio de passageiros, estarem equipados com AIS. Os *transponders* do AIS são divididos em duas classes: classe A, que engloba todas as estações que estão em conformidade com os requisitos da IMO, apresentando taxas de transmissão específicas (Tabela 1); e a classe B, que não estão em total conformidade com as regras da IMO [13] [14].

² *High Frequency*, em português Alta Frequência, é a banda do espectro radioelétrico entre 3 a 30 MHz, caracterizado por um comprimento de onda reduzido

³ Chamada Seletiva Digital é um padrão para envio de mensagens digitais pré-definidos através de sistemas de rádio MF, HF e VHF. É uma parte essencial do GMDSS

Condições de Navegação	Intervalo Nominal de Mensagens
Navio fundeado ou atracado e movendo-se a menos de 3 nós	3 minutos
Navio fundeado ou atracado e movendo-se a mais de 3 nós	10 segundos
Navio com velocidade 0 - 14 nós	10 segundos
Navio com velocidade 0 - 14 nós e a mudar de rumo	3,33 segundos
Navio com velocidade 14 - 23 nós	6 segundos
Navio com velocidade 14 - 23nós e a mudar de rumo	2 segundos
Navio com velocidade maior que 23 nós	2 segundos
Navio com velocidade maior que 23 nós e a mudar de rumo	2 segundos

Tabela 1 - Intervalo entre mensagens para AIS classe A
Fonte: [14]

2.4.1 - Funcionamento

Cada sistema de AIS é constituído por um transmissor de VHF, dois recetores TDMA VHF, um recetor DSC VHF, e ligações de comunicação eletrónica marítima para o display de bordo e os sensores do navio [14].

O *transponder* de AIS funciona de modo contínuo e autónomo, independentemente do tipo de navegação que seja praticada pelo navio, sendo que para transmissão usa a modulação 9,6kb GMSK⁴ (*Gaussian Minimum Shift Keying*) FM para canais de 25 kHz ou 12,5 kHz no protocolo de pacotes HDLC⁵ (*High-level Data Link Control*) [14]. Cada estação faz a transmissão e receção através de dois canais de rádio evitando ocorrência de interferências e a perda de comunicações com outros navios [14].

Na Figura 4, encontra-se representado um esquema relativo ao processo de funcionamento do AIS.

⁴ GMSK é um tipo de modulação utilizada numa variedade de sistemas de comunicação de rádios digitais. Esta modulação consiste na inserção de dados na fase da portadora, permitindo o uso de amplificadores mais simples, resultando num sinal constante [53]. Tem como vantagem ser imune a interferências.

⁵ HDLC é um protocolo de comunicação utilizado na camada 2, que tem como objetivo assegurar a fiabilidade dos dados transmitidos e recebidos pela camada 1.

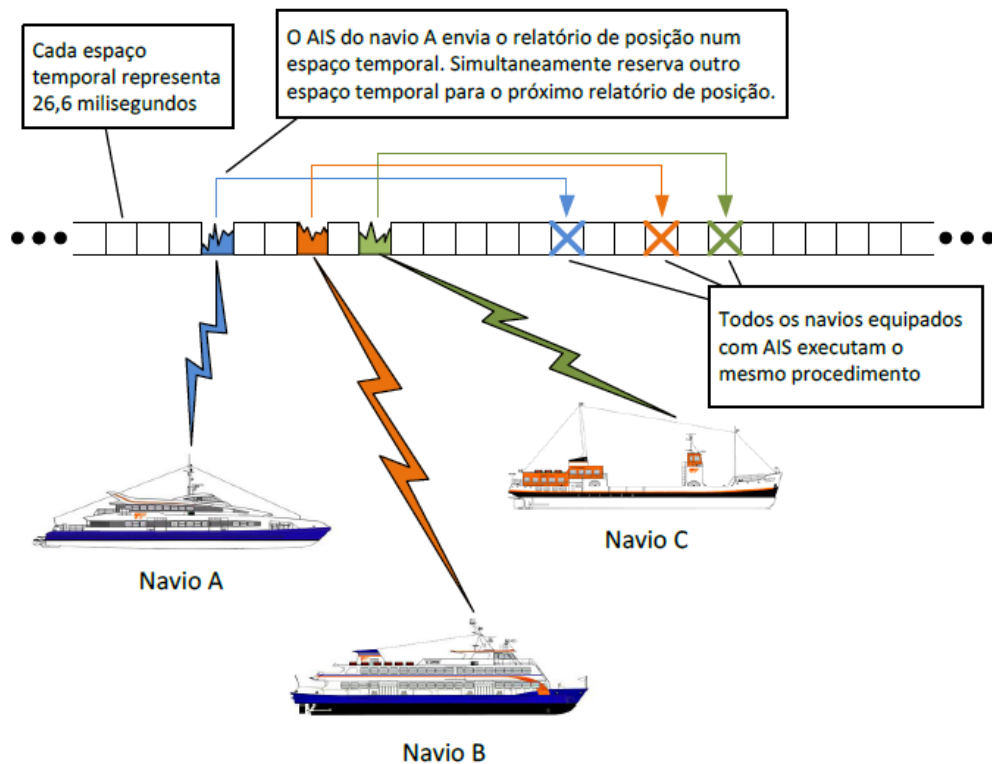


Figura 4 – Princípio de funcionamento do AIS
 Fonte: [14]

A partir da hora recebida pelo GPS, todas as estações se encontram em contínua sincronia umas com as outras, de modo a não ocorrer interferências. Assim, um relatório da posição de uma estação de AIS escolhe, por cada 60 segundos, um de entre os 2250 espaços de transmissão, sendo esta seleção aleatória e marcada com uma validade (*timeout*) [14]. Sempre que uma estação mudar de espaço de transmissão, avisa qual será a nova localização e respetivo *timeout*, possibilitando a receção de novas estações ou aquelas que entrem no alcance VHF [14].

No caso de ocorrer uma sobrelotação dos espaços temporais (*slots*), a estação de AIS despreza os navios que se encontram a maior distância pois são menos importantes para o navegador, dando preferência aos que se encontrem mais próximos [14]. No entanto, virtualmente, este sistema possui uma capacidade quase ilimitada, permitindo que muitos navios comuniquem ao mesmo tempo [14].

2.5 – Rádios Cognitivos

O uso oportunista do espectro é provavelmente o esforço mais importante para superar a sua escassez. Na verdade, a chave para o uso eficiente do espectro não reside unicamente na implementação de estratégias de gestão, mas também na qualidade e possibilidade de as implementar.

Os princípios do DSA estão associados à necessidade de aproveitar os segmentos do espectro inativos através do acesso oportunista às faixas de frequências de rádio que não estão a ser utilizadas. Como tal, em 1999, Joseph Mitola III introduziu o conceito de CR como sendo exatamente uma abordagem para aumentar a eficiência do espectro. Segundo Mitola, CR é um rádio capaz de mudar os seus parâmetros com base na interação com o ambiente em que opera [15]. Mais tarde, em 2005, Simon Haykin aprofundou esta definição [16]: “CR é um inteligente sistema de comunicação sem fios que está atento ao ambiente externo (...), possuindo a capacidade de se adaptar às variações estatísticas dos sinais de entrada, tendo em vista dois principais objetivos: comunicação altamente fiável (quando e onde for necessário), e a eficiente utilização do espectro de rádio”.

Por outras palavras, existem dois tipos de utilizadores: os primários (UP), ou licenciados, que possuem o direito exclusivo de utilizar as frequências que lhes são atribuídas; e os utilizadores secundários (US), ou não licenciados, que compartilham o espectro de maneira não exclusiva e oportunista, não possuindo os direitos de utilização de nenhuma faixa de frequência, sendo obrigados a não causar interferência aos UP aquando do acesso ao espectro licenciado, utilizando apenas as oportunidades de espectro que surjam (*white spaces*), como demonstrado na Figura 5 [17]. Assim, segundo a FCC⁶ [18], os US seriam implementados por CR visto que estes possuem a capacidade de fazer *spectrum sensing* por forma a detetar as oportunidades de espectro, utilizando-as para fazer comunicações sem causar interferências.

⁶ *Federal Communications Commission* é um órgão regulador da área de telecomunicações e radiodifusão dos Estados Unidos.

Esta tecnologia tem vindo a tornar-se bastante útil devido aos recentes avanços tais como os SDR e antenas inteligentes. Também, devido ao facto de permitir aceder ao espectro radioelétrico de forma dinâmica por forma a melhorar a eficiência da sua utilização, os CR são considerados como sendo a chave para resolver o problema de escassez do espectro.

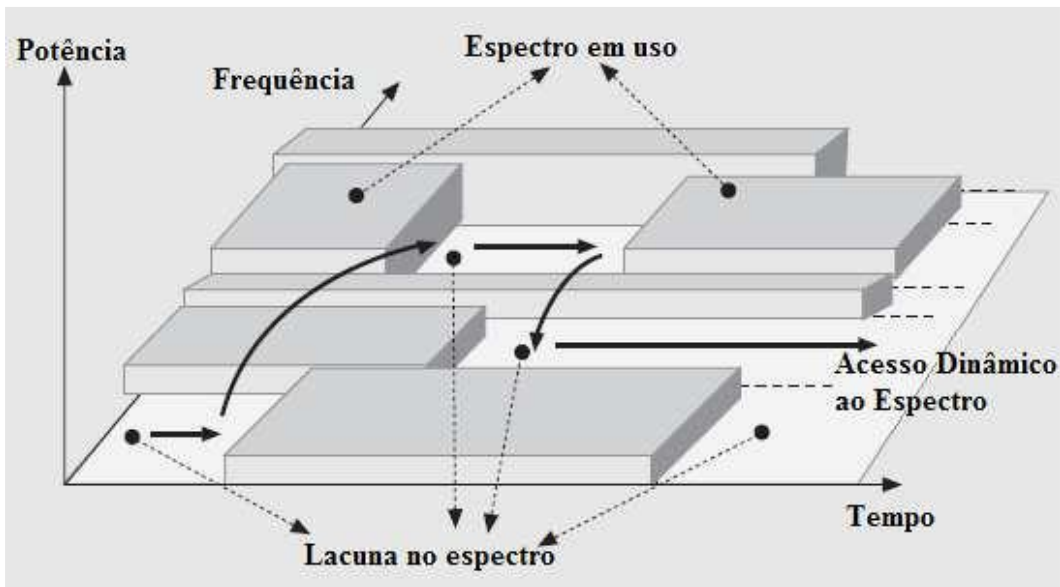


Figura 5 - Oportunidades de transmissão no espectro (*white spaces*)
Fonte: [20].

Partindo deste conceito, podem ser definidas as duas principais características dos CR:

- **Capacidade cognitiva:** engloba um conjunto de capacidades, tais como perceção, inteligência, aprendizagem, adaptabilidade, confiabilidade e eficiência, sendo que permite interagir, em tempo real, com o ambiente envolvente, permitindo determinar e alterar os parâmetros do rádio [10, 10];
- **Capacidade de reconfiguração:** é a capacidade do dispositivo adaptar dinamicamente os seus parâmetros de transmissão às novas condições do canal, podendo utilizar diferentes faixas de frequência ou esquemas de modulação para realizar a comunicação, além de possuir mais flexibilidade na deteção dos UP e de oportunidades de espectro [17] [19].

A capacidade de reconfiguração é em grande parte apoiada pela tecnologia de SDR, enquanto a capacidade cognitiva, que permite ao rádio interagir em tempo real com o ambiente, é implementada através de processamento de sinais e de técnicas de aprendizagem do próprio dispositivo [19].

2.5.1 - Capacidade Cognitiva

A capacidade cognitiva, tal como visto anteriormente, refere-se à capacidade do utilizador de CR de detetar e extrair informações do ambiente que o envolve. Esta capacidade, tipicamente, é representada por um ciclo cognitivo que é definido pelas principais ações envolvidas na operação de adaptação ao espetro. Como ilustra a figura 2 [19], este ciclo é constituído por três fases: *spectrum sensing*, análise espectral e decisão espectral.

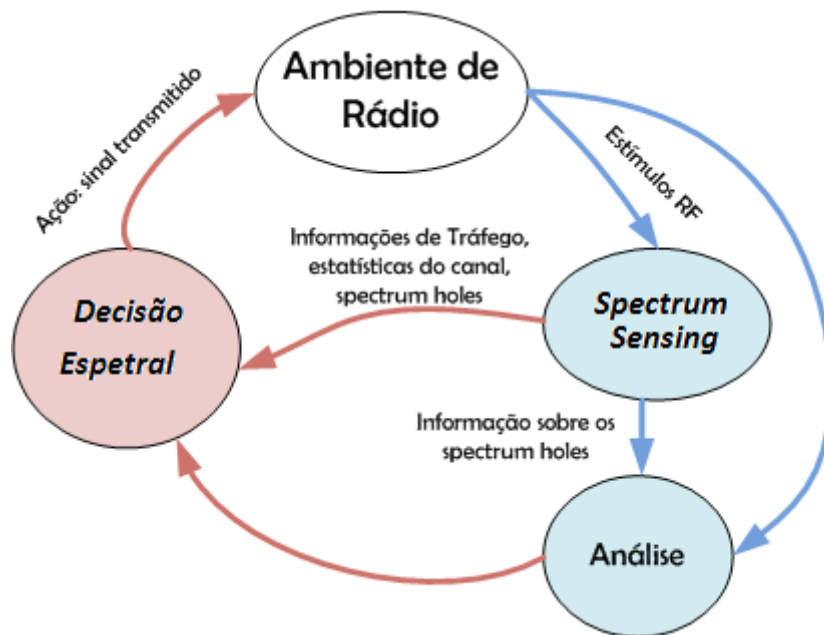


Figura 6 - Ciclo cognitivo
Fonte: [19].

Primeiramente, na fase de *spectrum sensing*, o CR monitoriza uma banda do espetro disponível, identificando as oportunidades de transmissão. Na fase de análise espectral, as informações obtidas, anteriormente, serão analisadas e as principais características dos canais identificadas. Por fim, as informações destas duas fases

anteriores serão combinadas com os requisitos de transmissão (modo, largura de banda e taxa de dados) [20], e na decisão espectral será selecionada a banda do espectro a utilizar.

2.5.2 - Capacidade de Reconfiguração

A capacidade de reconfiguração do CR é implementada através de *software* (SDR) e tem como função ajustar os seus parâmetros (frequência, potência, etc.) para a transmissão, permitindo a adaptação a qualquer ambiente em que opere. Estes parâmetros podem ser reconfigurados no início da transmissão como também durante esta, permitindo ao CR mudar para uma frequência diferente da ocupada.

2.6 - Identificação de oportunidades de transmissão

Segundo [21], por forma a determinar quais as bandas do espectro de frequência se encontram disponíveis para o US, existem três principais métodos:

- Registos em bancos de dados
- Sinais baliza (Geolocalização)
- *Spectrum sensing*

No método de registo em banco de dados os UP armazenam numa base de dados centralizada as informações acerca do seu estado (como por exemplo, posição, potência irradiada ou tempo total estimado de ligação), enquanto os US, através de uma ligação à Internet, acedem às tais informações por forma a determinar possíveis oportunidades de transmissão. No segundo método as informações relevantes dos UP, ao contrário do banco de dados, são transmitidas na interface aérea através de balizas, sendo que os US terão de monitorizar um canal de controlo padrão a fim de determinar quais porções do espectro eletromagnético podem ser utilizadas [21]. O grande problema destes dois métodos reside no facto de que os sistemas que já tinham sido implementados seguindo os moldes de alocação estática do espectro, não foram projetados para que houvesse a interação entre os dois tipos de utilizadores (primários e secundários), ocorrendo a necessidade de serem modificados para se estabelecer a compatibilidade [21]. Além disso, o custo de implementação é bastante caro decorrente da necessidade de serem equipados com dispositivos de posicionamento (como por exemplo. GPS, etc.).

No terceiro, e último, método, por forma a serem determinados os *white spaces*, os US fazem uma monitorização na banda de interesse (através de técnicas que serão descritas posteriormente), dispensando a necessidade da participação dos utilizadores de sistemas já implementados. Neste caso, o US monitoriza uma faixa de frequência licenciada, transmitindo oportunisticamente quando não detetar qualquer sinal primário. Graças ao custo da sua infraestrutura ser relativamente baixo e a compatibilidade com outros sistemas primários, o *spectrum sensing* tem recebido mais atenção do que outros candidatos [21] [22].

2.7 - Desafios para a implementação do *spectrum sensing*

De acordo com [23], para a implementação do *spectrum sensing*, existem uma série de fatores que o tornam uma tarefa complicada. Na próxima secção, irão ser abordados os principais desafios para esta implementação.

2.7.1 - Requisitos de *hardware*

Atualmente, os sistemas de comunicação existentes foram projetados por forma a operar dentro de uma determinada faixa de frequência. Como consequência, é possível desenvolver recetores ótimos de baixa complexidade. Porém, em sistemas que utilizam CR, quanto maior for a banda monitorizada e quanto mais rápido for o processamento das respetivas informações obtidas, mais oportunidades de transmissão podem ser encontradas. Para esta aplicação, é necessário fazer uso de dispositivos (tais como, antenas, amplificadores, etc.), com alta taxa de amostragem, grande alcance dinâmico e conversores analógico-digitais de alta resolução, acompanhados de processadores de sinais de alta velocidade [23]. Para tal, já existem plataformas de *hardware* e *software* disponíveis para a criação de SDR. A principal técnica de deteção utilizada nestas plataformas é o detetor de energia, pois requer um nível de processamento inferior e é mais simples de ser implementada, [23]. Estas plataformas e as técnicas de deteção irão ser abordadas e analisadas posteriormente.

2.7.2 - Duração e frequência do *sensing*

Como já foi visto, as técnicas de *spectrum sensing* devem ser capazes de identificar as transmissões dos UP dentro de um certo período de tempo. Neste processo,

existem dois parâmetros temporais que são importantes referir: tempo de detecção do canal e período de *sensing* [23].

O tempo de detecção do canal representa uma relação de compromisso entre a confiabilidade da identificação (canal ocupado ou livre) e o número de oportunidades identificadas. Quanto maior for o tempo disponível para *sensing*, mais certeza se obtém sobre o resultado da classificação relativo à ocupação de um determinado canal [24]. Caso esse tempo seja encurtado, por um lado a qualidade da classificação vai piorando, por outro lado sobra mais tempo para que seja feito o *sensing* noutras bandas.

O segundo parâmetro, periodicidade do *spectrum sensing*, diz respeito ao número de vezes em que é executado num determinado período de tempo, tendo impacto direto na interferência no UP. Uma vez encontrado um canal livre, o US inicia sua transmissão, efetuando frequentemente o *sensing* por forma a identificar uma possível atividade do UP [24]. Caso o intervalo de tempo entre um e outro *sensing* for demasiado, há o risco do UP começar a transmitir e não ser detetado pelo US, resultando numa transmissão simultânea dos dois utilizadores, o que origina um cenário de interferência.

Portanto, a escolha destes parâmetros representa um grande desafio no que se refere à implementação de técnicas de *spectrum sensing*.

Estes parâmetros também têm influência num outro fator: a eficiência de transmissão do rádio [24]. Na arquitetura padrão não é possível, para o US, transmitir e, simultaneamente, efetuar o *sensing* ao espetro, logo para realizar umas das tarefas terá que suspender a outra. Assim, quanto maior for o tempo gasto a realizar *sensing*, menor será o tempo para transmissão, o que origina uma menor eficiência e conseqüente redução no *throughput* do US.

De acordo com [24], a solução para este problema seria uma arquitetura com dois rádios, sendo que um rádio seria utilizado exclusivamente para fazer *sensing*, através de técnicas específicas (descritas no subcapítulo 2.8), e o outro ficaria dedicado à transmissão de dados. É de salientar que nesta implementação não há redução na eficiência de transmissão, mas é nitidamente observado um maior custo de implementação e um aumento do consumo de energia.

2.7.3 - Utilizador primário oculto

Nesta secção, irá ser considerada a Figura 7 [20] onde se encontra ilustrado um transmissor primário com o seu respetivo recetor e um CR, ambos a operar na mesma frequência. Os círculos a tracejado representam o alcance do transmissor primário e do CR.

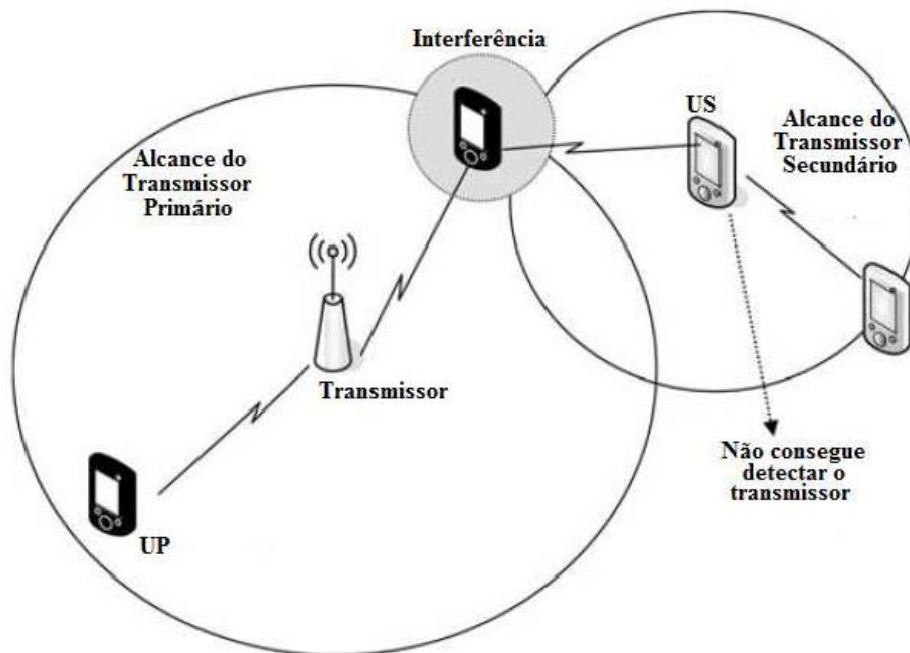


Figura 7 – Problema da incerteza do recetor
Fonte: [20]

Como visto anteriormente, o UP pode iniciar a sua transmissão a qualquer momento por ser licenciado, enquanto o CR só poderá transmitir nos instantes em que o UP não estiver a transmitir. Devido à localização dos dispositivos e a algum desvanecimento profundo causado por uma propagação por múltiplos percursos, o CR pode não conseguir detetar a transmissão do UP, considerando aquele instante como uma oportunidade para transmitir, o que origina interferências no recetor primário. Nesta situação diz-se que o UP se encontra oculto, pois a sua transmissão não pode ser percebida [23].

Para solucionar este problema, é proposto em [23] a utilização de *sensing* cooperativo, o que permite receber informações de pelo menos dois CR, ou seja, enquanto um utilizador deteta o canal como livre, os que não sofrem do desvanecimento identificam

como ocupado, tornando o *sensing* mais preciso. Mais à frente, e por forma a tornar esta ideia mais clara, é analisada mais ao detalhe esta abordagem.

2.8 - Técnicas de *Spectrum Sensing*

O CR surgiu como uma solução para o congestionamento espectral, permitindo usar ou compartilhar o espectro de forma oportunista [25]. Através de técnicas de acesso dinâmico ao espectro é possível, ao CR, operar no melhor canal disponível, ou seja, decidir se uma banda de frequência está ou não a ser utilizada e, portanto, disponível para o seu próprio uso. Tal como visto anteriormente, de modo a realizar este processo, sem a ocorrência de interferências, o *spectrum sensing* tem um papel bastante importante, pois permite identificar o espectro não utilizado, ou seja, o espectro livre (*white spaces*), adaptando-se ao ambiente do rádio.

De acordo com [23] [25] [26], foram estudadas várias técnicas de *spectrum sensing*, sendo umas mais complexas que outras:

- **Deteção de energia** – mais utilizado devido à sua simplicidade e baixo custo computacional [25] [23]. O sinal é detetado através da comparação da saída do detetor de energia com um limiar (*threshold*) que depende do ruído de fundo, assim, não necessita de reconhecer o sinal do utilizador primário [23].
- **Deteção baseada na forma de onda** - aplicável a sistemas com padrões de sinais conhecidos, sendo que quanto mais conhecimento houver acerca do sinal melhor será o desempenho deste método [23].
- **Deteção ciclo-estacionária** - é uma técnica de processamento de sinal para reconhecimento de sinais modulados na presença de ruído e interferências. Permite detetar as transmissões do utilizador primário, explorando as características ciclo-estacionárias (variam periodicamente com o tempo) [23], como tal, não pode ser aplicado a sinais desconhecidos. Por outro lado, não requer conhecimento sobre o ruído ou a definição de um limiar, não sendo limitado pela Relação Sinal-Ruído (SNR), como acontece no caso do detetor de energia [27].
- **Filtro adaptado (*Matched-filtering*)** – é considerada como sendo a técnica ótima para detetar o sinal do utilizador primário, quando o sinal transmitido é conhecido,

pois é um filtro linear projetado para fornecer a máxima SNR para o sinal detetado [23].

- **Multi-Resolution Sensing Technique (MRSS)** – é uma técnica muito promissora nos CR pois utiliza propriedades da transformada *wavelet*⁷ [19], bem como pelo facto de ter uma capacidade de deteção de sinais elevada, mesmo em ambientes com uma baixa SNR.

Independentemente da técnica utilizada, todas apresentam vantagens e desvantagens relativamente umas às outras. Como tal, a Tabela 2 [19] mostra uma resumida comparação entre as diferentes técnicas.

Detetor	Complexidade Computacional	Sensibilidade aos erros de sincronização	Robustez à incerteza do ruído
Detetor de Energia	Baixa	Baixa	Baixa
Detetor de Forma de Onda	Baixa	Muito Alta	Alta
Detetor Ciclo-estacionário	Alta	Muito Alta	Moderada
Filtro adaptado	Alta	Muito Alta	Alta
MRSS	Moderada	Baixa	Alta

Tabela 2 - Tabela de comparação entre técnicas de *spectrum sensing*
Fonte: [19]

Como é possível observar, de entre todas as técnicas, a deteção de energia é a que possui uma complexidade mais baixa e não requer o conhecimento do sinal do utilizador primário. Assim, esta tem sido a técnica mais citada e utilizada na literatura [19] [28], sendo considerada como a primeira etapa do *spectrum sensing*.

2.8.1 - *Sensing* cooperativo e não cooperativo

Na secção anterior, foram analisadas as técnicas de *sensing* não cooperativo, ou seja, todos os processos de deteção quanto à presença ou ausência de um sinal primário

⁷ Funções *wavelets* são ferramentas importantes no processamento de sinal, tendo como principais aplicações a deteção de descontinuidades, supressão de ruído e compactação de sinais [16].

na banda de frequência analisada, através de um único CR. No entanto, também é possível detetar a presença do sinal primário através de uma outra técnica: *sensing* cooperativo.

Como visto anteriormente, existe um problema relativo ao UP oculto que se deve à localização dos dispositivos e ao desvanecimento (Figura 7). Além deste, um outro problema que também pode ser considerado é o do sombreamento [23].

Considerando a Figura 8, um transmissor de um US, apesar de ter uma boa visão de um recetor, pode não ser capaz de detetar a transmissão primária devido a se encontrar numa zona de sombra [23].

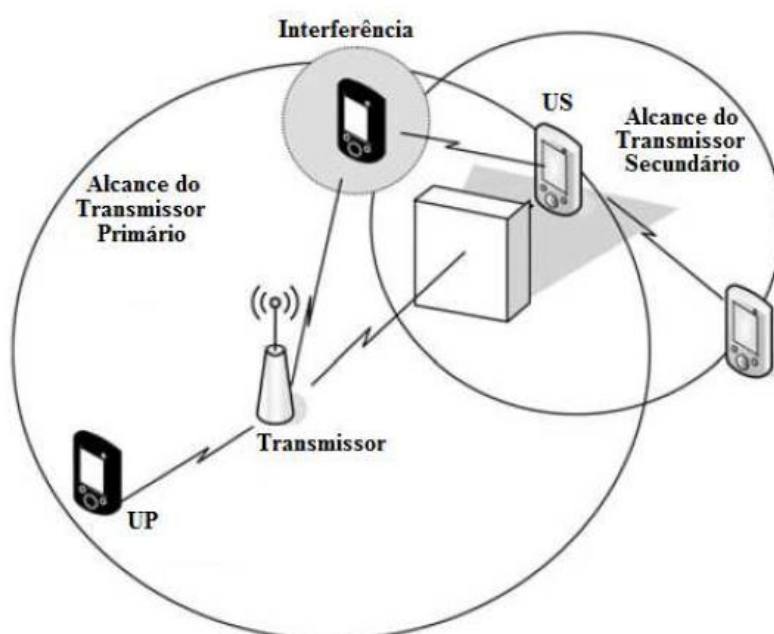


Figura 8 – Problema do sombreamento
Fonte: [20]

Por forma a resolver estes dois problemas, é benéfico utilizar o *sensing* cooperativo, ou seja, uma solução em que existe a partilha de informações acerca da monitorização realizada por vários US. Assim, assume-se que existe sinalização entre os US para serem compartilhadas as suas respetivas medições. Desta forma, a decisão de utilizar o espectro para transmissão é tomada tendo em conta as medições individuais em conjunto com as de outras estações secundárias, permitindo obter um processo de *sensing* mais eficaz [19] [23].

Embora a implementação do *sensing* não cooperativo seja mais simples quando comparada com o *sensing* cooperativo, observa-se que tal abordagem é mais suscetível ao problema do UP oculto e do sombreamento. No entanto, esta última possui um maior custo e uma maior complexidade de implementação devido ao processamento adicional necessário para compartilhar as informações de *sensing* entre os utilizadores que participam no processo de detecção [21].

2.9 – *Software Defined Radios*

SDR é um sistema de comunicação de rádio onde os componentes que normalmente são implementados em *hardware*, (como por exemplo, filtros, amplificadores, etc.) são usados, num computador pessoal, por meio de um *software*, o que torna este sistema adequado para a implementação de características cognitivas [29]. Um dos primeiros trabalhos sobre a aplicação do *spectrum sensing*, que envolveu o uso da plataforma SDR, foi o chamado *Berkeley Emulation Engine 2*, que utilizava as técnicas de detecção de energia e a ciclo-estacionária [30].

Mais tarde, em 2008, para realizar o acesso dinâmico ao espetro, foi implementado um SDR que era constituído por um *hardware* designado por *Universal Software Radio Peripheral*⁸ (USRP) e uma interface GNU Radio [30] [31].

O USRP, Figura 9, foi desenvolvido pela *Ettus Research*⁹, e é constituído por duas *daughterboards* recetoras, duas *daughterboards* transmissoras, quatro conversores analógico-digital e um *Field Programmable Gate Array* (FPGA) [28]. Este *hardware* é responsável por estabelecer a ligação entre o bloco de sinais banda base e o ambiente real [29].



Figura 9 – Três diferentes produtos USRP
Fonte: [42]

⁸ USRP é uma gama de rádios de custo acessível que permite utilizar um computador como uma plataforma de sistemas de comunicação sem fio, mais especificamente, num SDR. Atualmente, este hardware é bastante utilizado em investigações e por amadores de rádio.

⁹ *Ettus Research* é uma empresa que surgiu em 2010, sendo atualmente o principal fornecedor mundial de plataformas de SDR, incluindo a família de produtos USRP

O GNU Radio é uma ferramenta de *software* livre que fornece blocos de processamento de sinais para implementar SDR [32], e também disponibiliza um amplo conjunto de ferramentas para interagir com *hardware* e efetuar o processamento de sinais digitais. Utiliza duas linguagens de programação: C++, para funções de processamento de sinais e *Python*, para escrita de aplicações em GNU Radio.

2.10 – Estudos Relacionados

Uma das mais completas implementações de sistemas de CR é o padrão IEEE 802,22., projetado para operar no TVWS (*Television White Spaces*) [3]. Este sistema possui uma pilha de rede, onde os componentes cognitivos são separados dos planos de dados, de controlo e de gestão, sendo que o plano cognitivo consiste numa forma de aplicação de uma política para o espectro. No caso de uma estação de base, a segurança cognitiva significa que o local de deteção do espectro juntamente com a informação do banco de dados é utilizado para determinar a disponibilidade de espectro, definir a autorização e a alocação do espectro para utilizadores de CR [3].

No entanto, a maior parte da investigação tem como base a demonstração de soluções para as capacidades individuais, tais como implementações de *sensing* do espectro [24] [26] [28] [32], que têm por base as técnicas de deteção de energia e detetor ciclo estacionário.

Por outro lado, o conceito de aplicação dos CR para suportar serviços de banda larga no MMS, foi proposto por Eduardo Bolas em [1]. Este trabalho é focado nas técnicas de deteção e exploração de oportunidades espectrais (múltiplos canais 25 KHz) na banda do MMS, nomeadamente *full-duplex sensing*. Assim, é proposta a utilização de subportadoras NC-OFDM para ultrapassar o facto de o espectro ser contíguo. No âmbito do Centro de Investigação Naval (CINAV), foi desenvolvido por Germano Capela [3] um SDR e que pode ser utilizado no contexto de CR para fazer *spectrum sensing*. Em [3], Capela parte do conceito anteriormente proposto, implementando um SDR em GNU Radio, e propondo uma solução para implementação de NC-OFDM. Estes trabalhos utilizam os CR e a técnica NC-OFDM como solução para o facto de o espectro ser contíguo e para aceder de forma dinâmica a este. Todavia, esta temática encontra-se num estado “embrionário”, e que não é possível de implementar sem que ocorra a alteração das políticas de gestão do espectro.

2.11 – Conclusão

Neste capítulo foi feita uma análise ao estado atual do serviço móvel marítimo, que segue uma política de alocação estática. Esta política origina uma deficiente gestão do espectro, levando à sua conseqüente escassez para a introdução de novas tecnologias tais como, os CR. Por conseguinte, foi abordada a teoria por detrás desta tecnologia, com principal incidência para as suas capacidades de se adaptar ao meio envolvente, e as técnicas utilizadas para efetuar a monitorização do espectro. Foram apresentados os principais desafios para a sua implementação onde estão englobados os requisitos de *hardware*, a duração e frequência da monitorização, e o problema associado ao UP oculto. Neste capítulo foi também abordado o tema dos SDR, que permitem o desenvolvimento de CR por meio de *software*. Por fim, foi feita referência a alguns estudos desenvolvidos por outros autores, nomeadamente [1] e [3].

O capítulo seguinte aborda o SDR desenvolvido em [3], e que tem como base a técnica de deteção de energia. Também é estudado o recetor AIS adaptado de [4] para GNU Radio.

CAPÍTULO III

Arquitetura do SDR

3.1 – Introdução

Como apresentado no capítulo anterior, os CR são uma das soluções para ultrapassar a barreira da alocação estática do espectro, a qual origina uma deficiente gestão do mesmo. Para tal, estes rádios são capazes de detetar a presença de UP dos canais VHF, com posterior identificação de oportunidades de transmissão, que possam ser utilizadas por US. Todo este desempenho está condicionado pelo sucesso da etapa do ciclo cognitivo, responsável por fazer a monitorização do espectro. Para esta etapa de monitorização, é recomendável a utilização de uma técnica de baixo processamento e custo computacional, ou seja, o detetor de energia.

O objetivo do presente trabalho centra-se no estudo das oportunidades da utilização dinâmica do espectro na banda de VHF do MMS. Para tal, é necessário medir a ocupação do espectro, através de uma ferramenta de monitorização. Dado o tempo limitado para o desenvolvimento desta tese, foi solicitada a colaboração de Germano Capela, sem o qual não seria possível apresentar este trabalho. Assim, foi adaptado o SDR desenvolvido em [3], o qual se baseia num detetor de energia. Esta implementação foi feita em GNU Radio, sendo a parte de programação desenvolvida em linguagem *Python*, com o auxílio da ferramenta de interface gráfica GNU Radio Companion.

Para este trabalho não só é importante saber a percentagem de ocupação dos canais VHF do MMS, mas também é relevante o conhecimento de como é feita esta ocupação. Logo, foi elaborada uma rotina que detete o instante no qual é iniciada e terminada uma transmissão VHF, por forma a ser possível estudar de que modo são ocupados estes canais.

Para além do referido, foi adaptado de [4] um recetor AIS para deteção do número de navios existentes numa determinada área geográfica.

Neste contexto, o presente capítulo tem como objetivo o estudo teórico da técnica de deteção de energia, e respetiva apresentação do detetor desenvolvido em [3]. Também

é descrito o programa que foi projetado com o propósito de detetar o número de transmissões que ocorrem nos canais do MMS, durante a monitorização. Por fim, é analisado o recetor de AIS.

3.2 – Arquitetura do Sistema

Tal como referido anteriormente, devido ao limite de tempo para a realização desta dissertação de mestrado, foi utilizado um modelo de um CR desenvolvido em [3], baseado em tecnologia de SDR. Como descrito em [3], este SDR é capaz de monitorizar o espectro (através de um detetor de energia multicanal), transmitir e receber ondas rádio e fazer uma gestão cognitiva do acesso ao mesmo. Todavia, nesta dissertação a parte mais explorada desta implementação foi a capacidade de monitorização do espectro radioelétrico.

3.2.1 – Detetor de energia

A deteção de energia é o método mais genérico e que possui menor complexidade em termos de implementação e execução, pois não necessita de conhecimento *a priori* das características de um sinal para este poder ser detetado com sucesso, sendo por esse motivo uma técnica amplamente utilizada [19] [30] [25] [17] [23]. Este método compara a energia do sinal com uma métrica que depende do nível de ruído (limiar de decisão ou *threshold*) do canal, para determinar se este se encontra ocupado ou não [19] [30] [22] [3]. Por forma a ajustar este limiar, é necessário o conhecimento do nível de ruído da banda de interesse. O detetor de energia pode ser implementado no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

No domínio do tempo (Figura 10), é utilizado um pré-filtro para selecionar a banda de interesse, devendo estar centrado na frequência de interesse e deve ter a largura de banda igual à do canal pretendido. Após este filtro, o sinal passa por um conversor analógico-digital, sendo posteriormente elevado ao quadrado e obtida a métrica para a comparação com a energia do sinal [19]. Todavia, para se fazer *sensing* simultaneamente a vários canais numa ampla faixa de frequências, é necessário que o recetor esteja munido de um banco de filtros de banda estreita, o que pode aumentar significativamente a complexidade deste [3] [17].

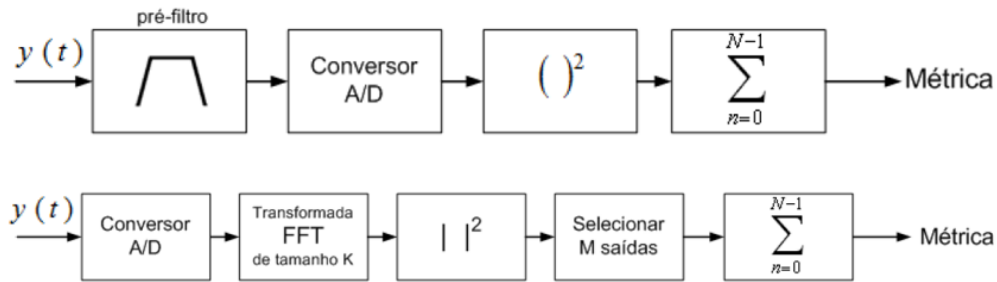


Figura 10 - Diagramas de implementação do detetor de energia no domínio do tempo e da frequência, respectivamente
Adaptado: [19]

Relativamente ao domínio da frequência, após o conversor analógico-digital, é necessário efetuar uma estimação espectral do sinal recebido. Neste contexto, foi utilizada a transformada rápida de Fourier do sinal (FFT – *Fast Fourier Transform*) que permite fazer a detecção de múltiplos sinais, sem ser necessário a utilização de um banco de filtros. Por esta razão, e devido ao caso em estudo abranger o MMS (entre 156 e 174 MHz), o qual é composto por múltiplos canais de banda estreita, foi utilizado o detetor de energia no domínio da frequência desenvolvido em [3] o qual tem por base a estima da PSD (Densidade Espectral de Potência) da banda de interesse através de FFT's, permitindo a detecção de todos os UP presentes nessa mesma banda.

Nesta implementação, foram utilizados os blocos de processamento de sinais do GNU Radio, representados na Figura 11 e no APÊNDICE A e APÊNDICE B, sendo os programas (*scripts*) elaborados em linguagem *Python*.

Para analisar a banda de frequências em estudo, são recolhidas amostras do espectro de interesse (neste caso, 10 amostras por segundo) através do *hardware* USRP, sendo processadas através de um *script* (*Spectrum Sensor (v1)*) que calcula a estimativa espectral, estimativa do nível de ruído e a ocupação do canal. O bloco da fonte USRP (*UHD: USRP Source*) é centrado na frequência pretendida (neste caso nos 159 MHz), sendo também definida a largura de banda operacional (8 MHz, sendo truncada a 7 MHz que permite eliminar o efeito de atenuação nas laterais do espectro, originado pelo filtro anti-aliasing¹⁰), contida na taxa de amostragem (*Samp Rate*). Após o calcular a estimativa espectral, o bloco *Spectrum Sensor (v1)* utiliza a taxa de amostragem (largura da banda

¹⁰ *Aliasing* é um termo de processamento de sinal que ocorre quando um sistema é medido a uma taxa de amostragem insuficiente. Ou seja, o sinal é amostrado a uma frequência semelhante ou inferior ao sinal a ser medido, sendo obtida uma frequência e/ou amplitude incorretas [45]. Para diminuir este efeito, é utilizado um filtro *anti-aliasing* antes do sinal de amostragem, permitindo restringir a respetiva largura de banda até satisfazer, de forma aproximada ou completa, o teorema da amostragem da banda de interesse.

total), o espaçamento entre canais e o comprimento da FFT para fazer a detecção da ocupação do canal.

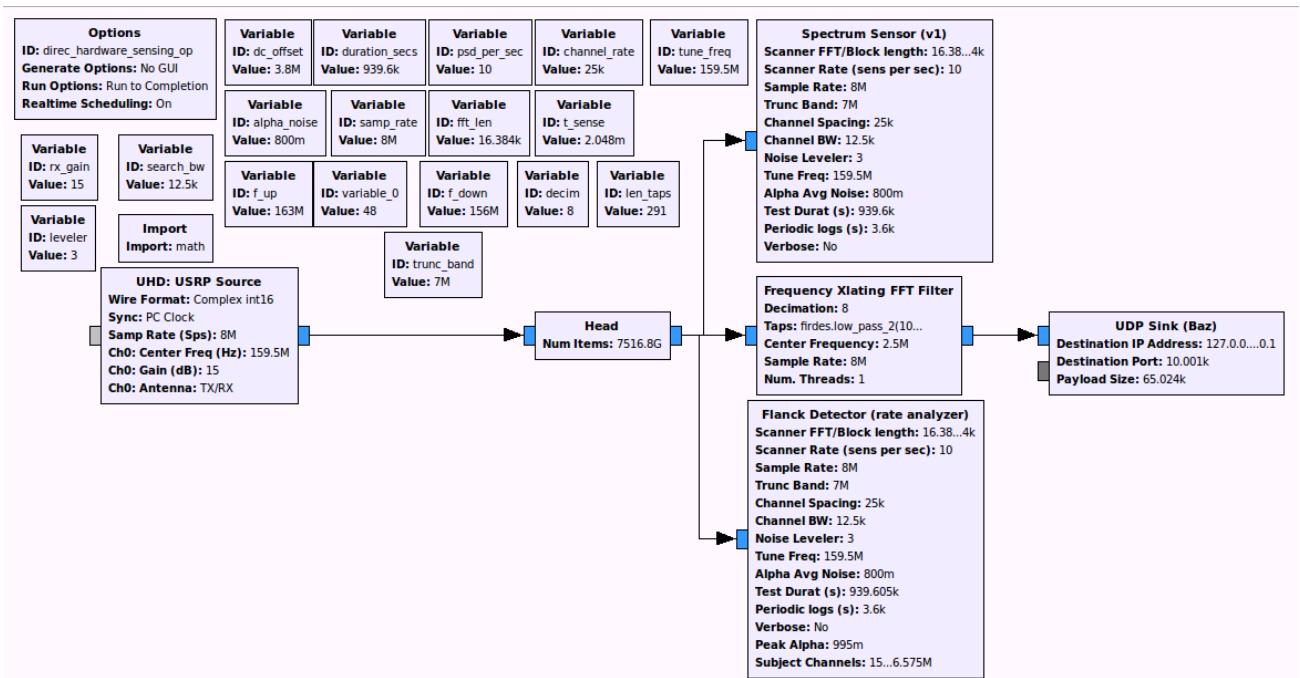


Figura 11 - Diagrama de fluxo do GNU Radio para monitorizar o espectro

No que diz respeito ao nível de *threshold*, este é calculado através da relação entre o nível de ruído e o nível de decisão para uma determinada probabilidade de falso alarme do detetor de energia. Esta relação é dada pela seguinte expressão:

$$Thr = \sigma_N^2 \left(1 + \frac{\sqrt{2}Q^{-1}(P_{fa})}{\sqrt{N_s}} \right) \quad (1)$$

onde, σ_N^2 corresponde à variância do ruído branco gaussiano aditivo, Q^{-1} é o inverso da probabilidade de uma distribuição normal, P_{fa} a probabilidade de falso alarme e N_s é o número de amostras.

Posto isto, é fundamental uma estimativa precisa da potência de ruído para ser obtida a taxa de detecção de falso alarme. Todavia, devido à incerteza na estima do nível de potência de ruído (depende da localização atual, a interferência, etc.), a estimativa dos níveis de ruído devem ser constantemente atualizados durante o processo de comunicação. Assim, e como a potência é calculada canal a canal, o nível de ruído é

definido como o menor nível de potência detetado, sendo o limiar de decisão calculado com base neste valor.

3.2.2 – Detecção de transmissões

De modo estudar a taxa de tempo de ocupação dos canais do MMS é necessário monitorizar esta banda de frequências e detetar o início e fim das transmissões VHF. Anteriormente foi descrito o detetor de energia implementado em [3] e que é utilizado nesta dissertação de mestrado. Este detetor tem como objetivo a monitorização do espectro radioelétrico. Para além da percentagem de tempo de ocupação dos canais do MMS, também é importante saber se essa utilização é feita, ou não, de forma contínua, e que irá ter implicações no acesso ao mesmo.

Desta forma, procedeu-se à elaboração de uma rotina que avalia as potências de duas diferentes amostras, ou seja, verifica se houve variação de flanco, e em caso afirmativo, é incrementado um contador (diferente para cada frequência) que representa o número de transmissões ocorridas. Para ser considerada uma transmissão, as amostras têm de ter um valor superior ao do valor definido para o *threshold*, sendo que para esta condição se verificar, também é necessário que o canal se encontre inicialmente desligado, ou seja, o valor do flanco tem de ser igual a zero ($F=0$).

Assim, foram definidas três condições necessárias para ser verificada a comunicação:

- O valor de uma amostra n tem de ser inferior ao valor da amostra seguinte $(n+1)$;
- Ambas as amostras têm de estar acima do valor de *threshold*;
- É necessário partir da condição de que o canal está desligado (flanco baixo).

Assim, estas três condições são verificadas por meio de um ciclo que termina quando as duas primeiras não são verificadas, sendo fornecida a informação que a transmissão terminou.

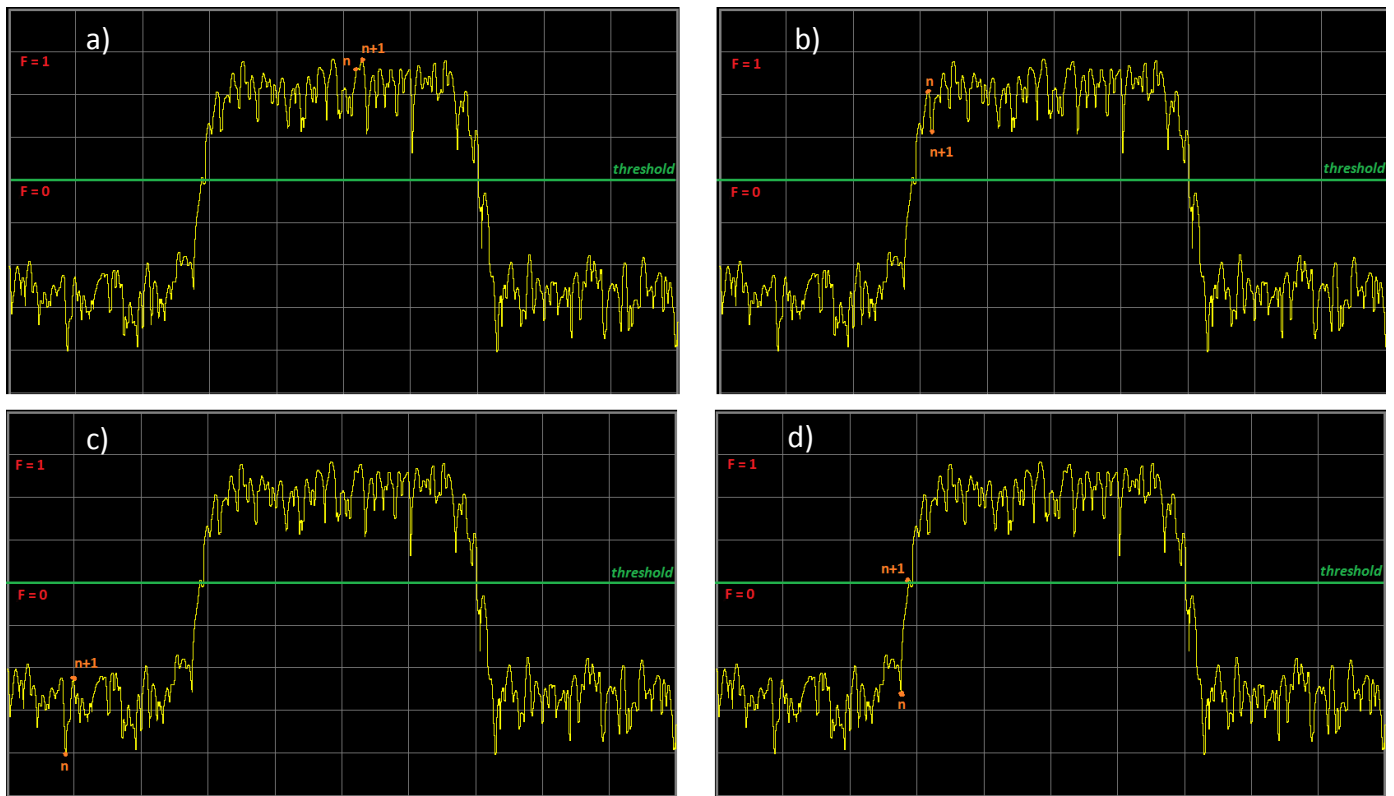


Figura 12 - Possíveis situações em que não ocorre detecção de transmissões - a), b) e c) - e os requisitos para ser detetada a transmissão - d)

Na Figura 12 estão presentes algumas dos possíveis casos que podem, ou não, ser considerados transmissões. Na situação a), é possível observar que as duas primeiras condições são verificadas, todavia não se parte da condição que o canal está livre, logo não é considerado uma transmissão. Na situação b) não se verifica a primeira e a terceira condição, pois a amostra $n+1$ é inferior à amostra n e o canal anteriormente não estava livre. Na situação c) só é verificada a terceira condição, visto que o canal está livre. Por fim, na quarta situação, todas as condições são verificadas, sendo considerada uma transmissão.

No entanto, podem ocorrer transmissões que tenham surgido na sequência indevida de uma pressão do botão de *Push-to-talk* (PTT), em vez de ter sido uma comunicação real. Para contrariar estas situações, ao invés de ser comparado o valor instantâneo de uma amostra com o do *threshold*, é necessário que ocorra uma transição de flancos mais lenta, fazendo uma média do valor da amostra anterior ($n-1$) com a amostra atual (n), resultando na seguinte equação matemática:

$$F = (1 - \alpha) * n + \alpha * (n - 1) \quad (2)$$

onde, F é o valor a comparar com o limite de detecção para verificar a existência de transmissões, n é a amostra inicial, $(n - 1)$ a amostra anterior e a incógnita α que pode compreender valores entre 0 e 0,999, sendo que quanto mais se aproximar do valor máximo, mais lenta será a transição inicial.

Consequentemente é feito o quociente entre o contador das transmissões e um outro, que inclui todas as amostras. Desta forma, é obtida a percentagem de tempo em que um canal esteve ocupado.

3.2.3 – Recetor AIS

Para além de dados relativos à ocupação do MMS, também são necessários dados sobre a presença e disposição geográfica dos utilizadores deste serviço, os quais podem ser obtidos através do sistema AIS. Assim, para esta recolha de dados, foi utilizado um recetor AIS desenvolvido em [4], sendo composto por um algoritmo responsável pela desmodulação e outro pela descodificação das mensagens AIS enviadas pelos navios. Este recetor foi adaptado para funcionar na plataforma do GNU Radio.

A Figura 13 ilustra os diagramas de bloco referentes ao recetor AIS. Após a passagem por um filtro passa-banda (bloco *Frequency Xlating FIR Filter*), o sinal é desmodulado em quadratura, o qual utiliza um parâmetro de ganho para expressar a porção de amostras por símbolo. Após isto, o sinal é convertido para valores inteiros de 16 bits, e posteriormente, a saída dos dois canais é intercalada, por forma a serem recebidas as mensagens dos dois canais de AIS. Estas mensagens são do tipo NMEA¹¹ e formatadas como *!AIVDM*¹².

¹¹ NMEA 0183, ou simplesmente NMEA, é um conjunto de especificações elétricas e de dados para comunicação entre dispositivos eletrónicos de navegação [47].

¹² !AIVDM é um tipo de mensagem NMEA. Neste caso, é referente às mensagens AIS recebidas de outros navios [48]

Para além disto, foi criada uma rotina em *Python* que define o tempo do teste, a periodicidade de registo das mensagens recebidas, descodificando-as e identificando a posição do navio que as emitiu. Desta forma, pode ser ilustrado graficamente ou através de uma interface mais simples (e que exige menos processamento computacional) o número de navios numa área e a uma determinada hora.

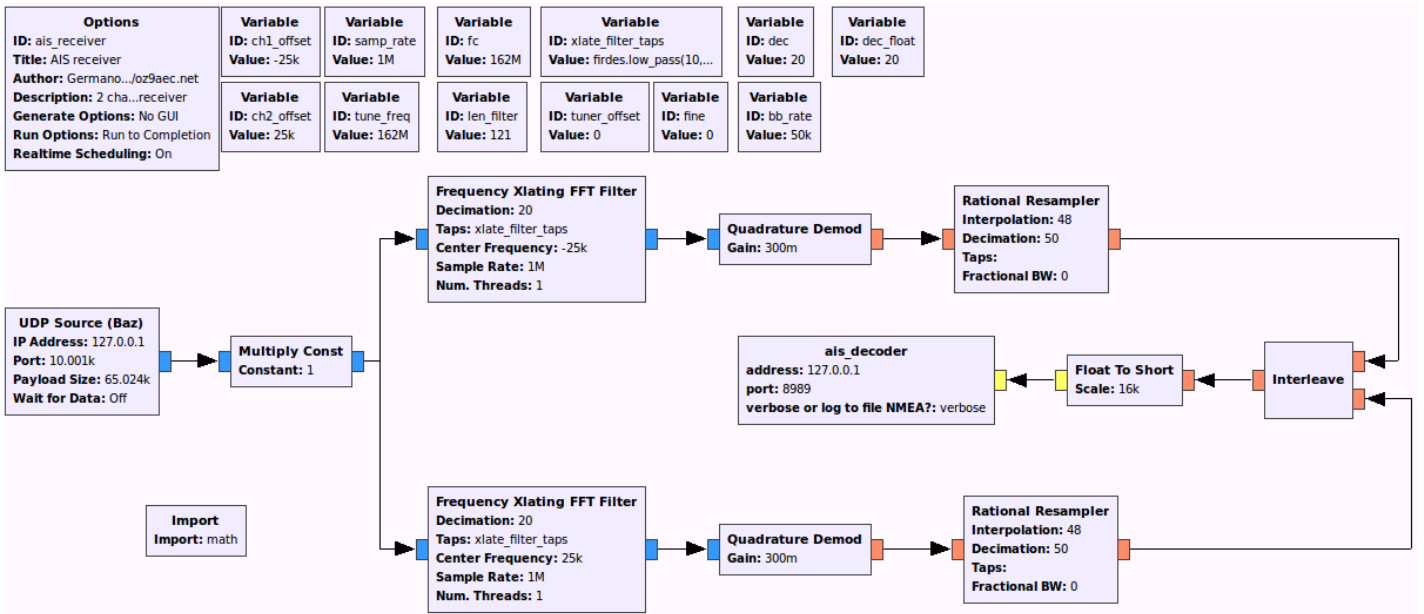


Figura 13 - Diagrama de fluxo do recetor AIS desenvolvido em GNU Radio

3.3 – Conclusão

Este capítulo apresentou os fundamentos teóricos da técnica de deteção de energia, com especial incidência para o detetor desenvolvido em [3]. Este sistema foi adaptado para o presente trabalho de modo a ser possível monitorizar o espectro e a ser analisado a forma como este é utilizado. Para tal, foi elaborado um bloco de processamento de sinais responsável por detetar o início e fim de cada transmissão. Foi ainda analisado, um recetor AIS que identifica e descodifica este tipo de mensagens, possibilitando avaliar o número de navios numa área geográfica.

No próximo capítulo são descritos os testes de calibração efetuados para ajustar as definições do SDR. Posteriormente são realizadas medições de campo, através da monitorização do espectro em diversas regiões do porto de Lisboa.

CAPITULO IV

Trabalho de campo e resultados

4.1 – Introdução

Este capítulo descreve os testes efetuados em diversos cenários e com objetivos concretos. Assim, podem ser separados em dois diferentes tipos: testes de calibração e testes finais. Os testes de calibração, tal como o próprio nome indica, têm como objetivo preparar todo o equipamento para os testes finais. Para tal, estão englobados:

- Testes efetuados para verificar se o SDR deteta toda as variações de flanco, ou seja, sempre que é premido o PTT – transmissões;
- Avaliação da percentagem de tempo de ocupação dos canais VHF;
- Testes ao nível de potência recebida pelo SDR, em comparação com o analisador de espetro FSH3 da *Rohde & Schwarz*;
- Testar os dados AIS recebidos pelo SDR.

Depois de terminados os testes anteriores, é efetuada a monitorização do espetro em diferentes zonas do porto de Lisboa: torre de navegação da Escola Naval (Mar da Palha), a bordo do veleiro NRP *Zarco*, na Estação Ibéria NATO – *Satellite Ground Station* (SGT F12) na Fonte da Telha e na capitania de Cascais. As zonas mencionadas são ideais para a recolha de dados pois encontram-se localizadas em áreas junto a costa e em zonas portuárias de elevado tráfico marítimo. Por forma a compatibilizar o desenvolvimento deste trabalho com os períodos letivos e com o estágio de embarque, as medidas de campo foram efetuados em colaboração com o ASPOF EN-AEL Ventura Viegas, pois são processos morosos e logisticamente complexos. Como tal, os dados aqui apresentados serão os mesmos em ambas as dissertações.

Durante este capítulo é feita uma descrição de todos os testes efetuados, os quais serão acompanhados pelo esquema do aparato experimental utilizado. Em cada subcapítulo distinto é efetuada uma análise e respetiva conclusão dos resultados obtidos. Por fim, é elaborada uma conclusão final do estudo de monitorização efetuado ao longo do capítulo.

4.2 - Testes de calibração

Na sequência do desenvolvimento deste projeto, torna-se necessário proceder à realização de testes preliminares, ou testes de calibração, os quais têm como objetivo a preparação de todo o equipamento e material que será utilizado em para posterior recolha de dados.

Desta forma, serão recolhidos dados de voz (VHF) e referentes às posições de navios, através da descodificação de mensagens AIS. Assim, será possível avaliar qual o número total de navios existentes numa determinada área.

Para além do que foi referido, os testes de calibração irão permitir fazer uma primeira análise relativa à ocupação dos canais marítimos VHF, ou seja, analisar as oportunidades de espectro (*spectrum holes*) que surgem a partir do espectro VHF marítimo em uso, mais especificamente entre 156 MHz e 174 MHz, que no futuro poderão vir a ser usados para estabelecer comunicações de banda larga VHF (B-VHF).

Por fim, outro dos objetivos será comparar os resultados obtidos através do analisador de espectro portátil FSH3 da *ROHDE & SCHWARZ* com os valores do SDR, que tem por base um programa elaborado na ferramenta *GNU Radio* e um *hardware* USRP, sendo assim possível testar o funcionamento deste último.

4.2.1 – Comparação de potências recebidas

4.2.1.1 – Objetivos do teste

Sendo este o primeiro teste a ser realizado, teve como objetivo fazer uma comparação inicial entre a potência recebida no USRP e a do analisador de espectro. Desta forma, foram medidas as potências recebidas em três diferentes locais, representados na Figura 14.

4.2.1.2 – Material e esquemático utilizado

Para a realização deste teste, e como ilustrado na Figura 14, foi utilizado o seguinte material:

- Analisador de espectro portátil FSH3 da *Rohde & Schwarz*;
- Antena ativa HE 500;
- Computador portátil;
- *Software* GNU Radio;
- *Hardware* USRP;
- Antena VERT 400;
- Rádio VHF Icom M424;
- Resistências como elemento radiante

4.2.1.2 - Descrição do teste efetuado

O primeiro teste de calibração foi realizado na Escola Naval, mais especificamente no Departamento de Ciências e Tecnologias. Para tal, e como ilustra a Figura 14, foram efetuados 3 testes em diferentes locais, sendo que no local 1) se encontrava o analisador de espectro e o SDR, para fazerem a receção do sinal emitido pelo rádio VHF.



Figura 14 - Pontos de realização dos testes (Escola Naval – Departamento de Ciências e Tecnologias)

Fonte: [43]

4.2.1.3 – Conclusões

Este foi um teste bastante simples e que permitiu comprovar que, mesmo a poucos metros de distância entre o emissor e o recetor, os valores registados no SDR e no analisador de espectro eram diferentes, aumentando essa diferença com o progressivo aumento de distância entre os do emissor. Essas diferenças devem-se ao facto de o rádio não se encontrar ligado a uma antena de VHF, mas sim a um conjunto de resistências que para onde é feita a emissão.

4.2.2 – Testar a ocupação de um canal e comparar as potências recebidas

4.2.2.1 – Objetivo do teste

Os objetivos deste teste centram-se, essencialmente, numa primeira avaliação da capacidade que o algoritmo desenvolvido no GNU Radio tem em detetar o início e fim de cada transmissão VHF, através de um plano elaborado, previamente, com o início, duração e fim de cada uma destas. É de salientar que, nesta experimentação, as transmissões serão efetuadas manualmente no rádio *Icom M424*. Para além do objetivo principal descrito, também é necessário fazer uma análise e comparação às potências recebidas no analisador de espectro e no USRP, bem como, verificar que, teoricamente, existe uma melhoria significativa na potência transmitida pelo rádio, pois irá ser ligado a uma antena específica de VHF.

4.2.2.2 – Material e esquemático utilizado

Na realização deste teste, o material utilizado foi o seguinte:

- Analisador de espectro portátil FSH3 da *Rohde & Schwarz*;
- Antena ativa HE 500;
- Computador portátil;
- *Software* GNU Radio;
- *Hardware* USRP B100;
- Antena *VERT 400*;
- Rádio VHF *Icom M424*;

- Antena CX4 VHF.

A montagem do aparato experimental tem como base o esquemático representado na Figura 15.

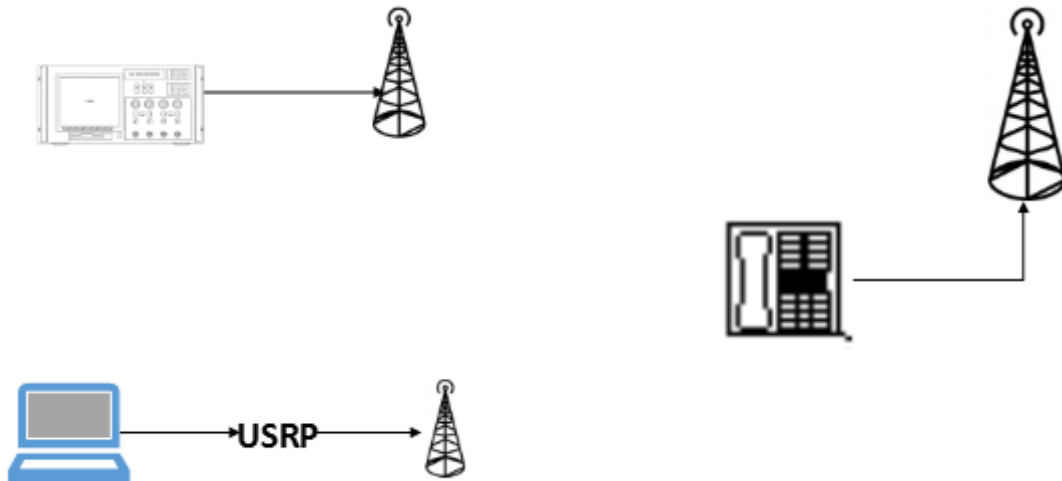


Figura 15 - Aparato experimental utilizado no teste da ocupação de um canal VHF

4.2.2.3 – Descrição do teste efetuado

O local escolhido para a realização deste teste foi a Escola de Tecnologias Navais, mais especificamente no Departamento de Armas e Eletrónica (DAE) e no Departamento de Operações (DOP). Desta forma, e aproveitando o estágio dos Aspirantes da classe de Engenheiros Navais – Armas e Eletrónica (EN-AEL), que decorriam no respetivo local, foi utilizada a antena de VHF presente no DOP.



Figura 16 - Local da realização do teste (Escola de Tecnologias Navais: Ponto 1) DAE e 2) DOP)
Fonte: [44]

O teste efetuado baseou-se na interligação do computador portátil com o USRP e a antena VERT 400, o analisador de espectro ligado à antena HE 500 e o rádio *Sailor* à antena de VHF. Os dois primeiros conjuntos foram colocados no DAE, representado pelo ponto 1 na Figura 16, sendo que o último conjunto se encontrava no edifício do DOP, ponto 2 da mesma figura, distanciados de cerca de 100m. À semelhança do outro teste, o canal escolhido para esta experimentação foi o 24 (157,2MHz).

Tal como referido anteriormente, as transmissões foram feitas manualmente seguindo o plano previamente elaborado, e que se encontra exposto na Tabela 3.

		Transmissões (segundos)												Total (s)	
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55		60
Duração (minutos)	1														30
	2														35
	3														30
	4														20
	5														30
	6														40
	7														30
	8														30
	9														30
	10														25

Tabela 3 - Definição do início e fim de cada transmissão (a verde o tempo de transmissão, e a laranja quando não há transmissão)

Com a elaboração do plano de transmissões da tabela anterior, pretende-se que este seja repetido três vezes seguidas, sem interrupções, por forma a ter uma duração de 30 minutos, sendo que o canal encontre ocupado durante 300 segundos (5 minutos), o que perfaz um total de 50% da ocupação.

Os resultados decorrentes desta experimentação serão analisados no próximo subcapítulo.

4.2.2.4 – Resultados obtidos

Este teste foi efetuado seguindo o aparato experimental da Figura 15, sendo os seus parâmetros e resultados representados na tabela seguinte:

Aparato experimental utilizado	Figura 15
Canal VHF	24 (157,2 MHz)
Duração	30 Minutos
Periodicidade de registo	5 Minutos
Total de transmissões	51
Transmissões detetadas	51
Percentagem ocupação	49,2%
Potência recebida (USRP)	-30 dB
Potência recebida (FSH3)	-40 dB

Tabela 4 - Configurações do teste e respetivos resultados

Através da análise à tabela anterior, é possível constatar que as potências recebidas nos dois recetores se encontram próximas, sendo eliminada a discrepância encontrada no teste anterior. Tal valor deve-se ao facto do rádio *Sailor* se encontrar ligado a uma antena de VHF, ao invés de ter ligado quatro resistências como elementos radiantes.

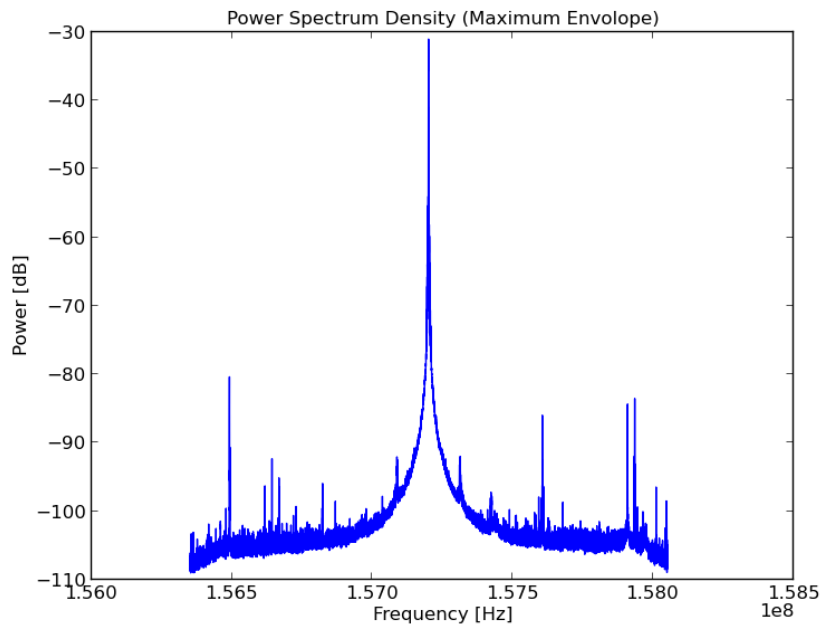


Figura 17 - Potência recebida no USRP

Observando a imagem anterior, em que o canal centrado é o 24, é notório o surgimento de frequências em torno da frequência central, as quais são originadas por um erro denominado de *leakage*. Este fenómeno tende a espalhar energia contida numa determinada frequência em linhas de frequências adjacentes no espectro, distorcendo-o, e fazendo com que a amplitude seja subestimada [33]. Este fenómeno, é derivado da antena de receção do SDR ser do tipo *tri-band*, ou seja, não é uma antena específica só para VHF, operando num total de três bandas de frequência.

Em relação à ocupação do canal, que se encontra também ilustrado na figura 19, é possível verificar que foram detetadas todas as 51 transmissões, correspondendo a uma percentagem de ocupação de 49,2% (Figura 18). O previsto, e que se classificaria como sendo o cenário ideal, seria ter uma ocupação de 50%, o que não se refletiu na totalidade, pois as transmissões foram feitas de forma manual o que pode ter diminuído ligeiramente o tempo de transmissão.

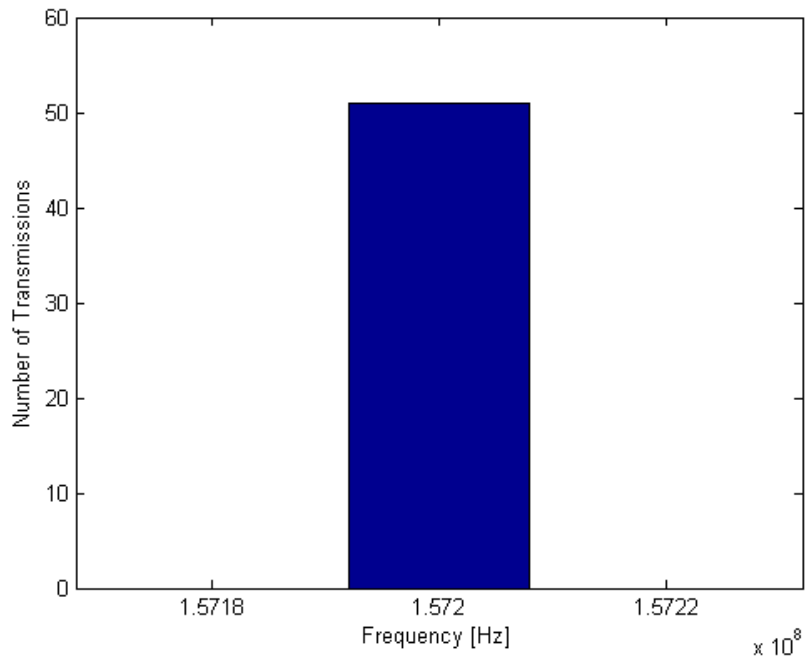


Figura 19 - Número de transmissões registadas

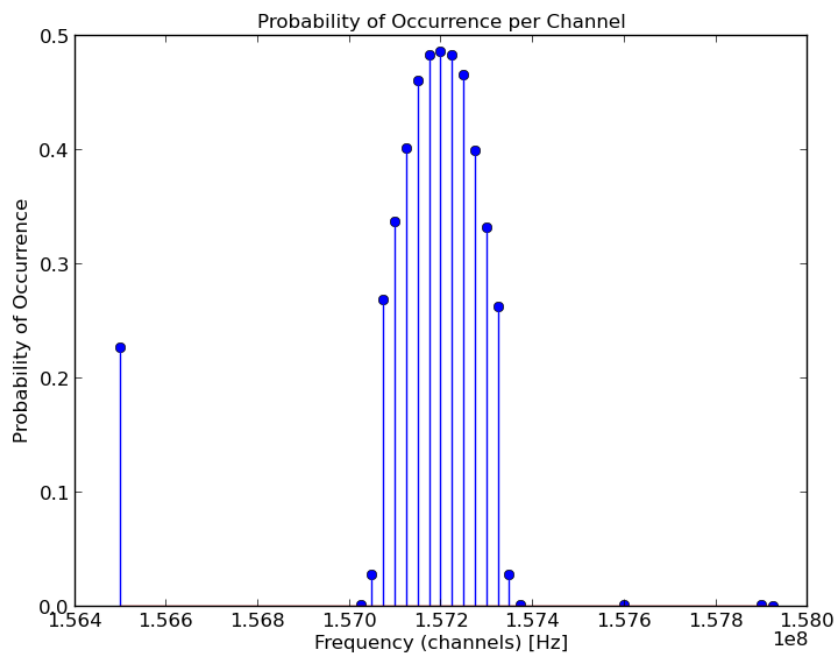


Figura 18 - Taxa de ocupação do canal 24, correspondendo aproximadamente a 50% do tempo

Através da imagem a cima, também se verifica a presença de um feixe centrado na frequência dos 156,5MHz. Este canal é destinado à manobra de navios, e como tal, esta percentagem de ocupação deriva de uma possível movimentação de navios que tenha ocorrido junto da Base Naval de Lisboa (BNL). Relativamente ao canal 24, seria ideal haver apenas um feixe com a probabilidade de ocorrência, o que não se verificou, pois,

tal como analisado anteriormente, ocorreu um erro de *leakage* devido à antena ligada ao USRP.

4.2.2.5 – Conclusões

O teste realizado e descrito no subcapítulo anterior demonstra que são necessárias melhorias e alterações nos próximos testes. Primeiramente, é de elevada importância a utilização de um rádio VHF ligado a uma antena específica para este propósito, e por sua vez, também é necessário a ligação do USRP a uma antena semelhante. Tudo isto irá permitir uma melhor potência de recepção, e eliminar alguns efeitos indesejados, tal como o surgimento de frequências em torno da frequência central.

Quanto à avaliação do tempo da ocupação do canal, as expectativas foram excedidas visto que foi obtida uma percentagem muito próxima da ideal. Por forma a contrariar este último ponto, é aconselhado fazer as transmissões de uma forma automática, o que, em princípio, irá diminuir o ligeiro erro obtido.

Desta forma, e em jeito de conclusão, os resultados deste teste foram promissores, pois houve melhorias significativas em relação ao teste anterior, o que permitiu compreender quais os próximos passos a seguir para melhorar o que ocorreu de menos bom, e que se centram na aquisição de antenas específicas de VHF e na utilização de um microcontrolador para simular quando o botão de PTT é pressionado.

4.2.3 – Avaliação da ocupação de um canal

4.2.3.1 – Objetivo do teste

Para se estudar a ocupação dos canais de VHF do serviço móvel marítimo, é necessário que o USRP detete todas as transmissões, bem como a duração de cada uma destas.

No teste anterior, houve uma ligeira desfasagem da percentagem da ocupação do canal e, como tal, foi necessário elaborar novos testes mas, desta vez, as transmissões foram feitas de uma forma automática, utilizando uma placa de circuito impresso que o manípulo do PTT. Também foi estudado qual a melhor quantidade de amostras por segundo, que se deve utilizar.

4.2.3.2 – Material e esquemático utilizado

Estes testes foram efetuados recorrendo ao seguinte material:

- Analisador de espectro portátil FSH3 da *Rohde & Schwarz*;
- Antena ativa HE500;
- Dois computadores portáteis;
- *Software GNU Radio*;
- *Hardware USRP*;
- Antena VERT400;
- 2 Antenas de CX4 VHF;
- Rádio VHF *Sailor*;
- Microcontrolador.

O esquemático utilizado para a preparação do aparato utilizado durante os testes, baseou-se na seguinte figura:

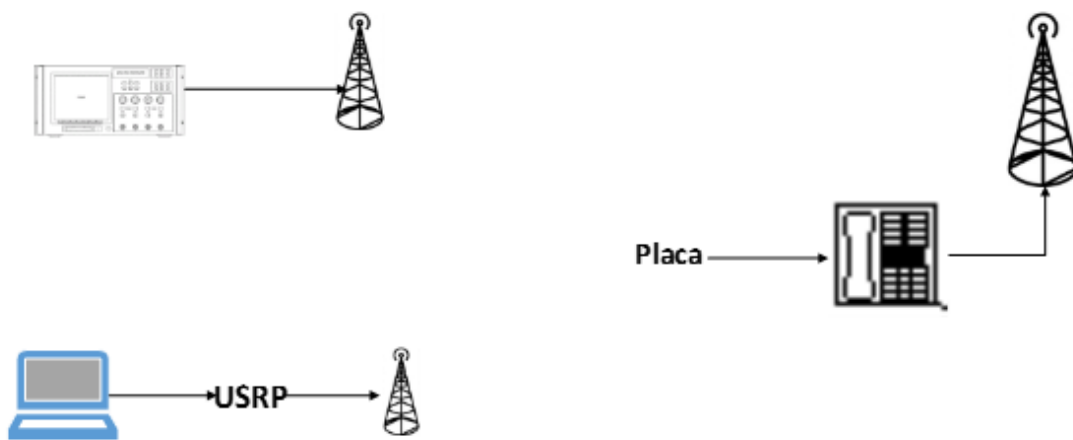


Figura 20 - Esquemático do aparato experimental utilizado

Através do aparato experimental representado na figura anterior, foi possível testar o algoritmo que deteta a ocorrência de transmissões VHF.

4.2.3.3 – Descrição do teste efetuado

Tal como referido anteriormente, o objetivo destes testes foi estudar a ocupação dos canais VHF. Para isso, foi utilizado um microcontrolador feito numa placa de circuito impresso (Figura 21), por Messias Pessoa e STEN STAEL Pessoa Baptista, e que tem por objetivo, a simulação de uma transmissão VHF. Esta placa, que substitui o tradicional manípulo de PTT, é ligada ao rádio VHF *Sailor*, através de uma ficha DB9. É introduzido um cartão de memória SD com um ficheiro do tipo “.txt” com duas colunas: início da transmissão e respetiva duração.

Para definir o início e fim de cada transmissão, foi elaborado um código no *software* MATLAB (APÊNDICE C) no qual são definidos a duração do teste (em milissegundos), o número de transmissões e a percentagem de tempo que um canal, selecionado posteriormente no rádio *Sailor*, irá estar ocupado. Após esta atribuição de valores, o programa gera, aleatoriamente, o instante em que se inicia e termina cada uma das transmissões.

Com isto, é possível avaliar se o SDR é capaz de detetar todas as transmissões no canal definido, bem como avaliar se a percentagem de tempo que este vai estar ocupado corresponde à pré-definida.

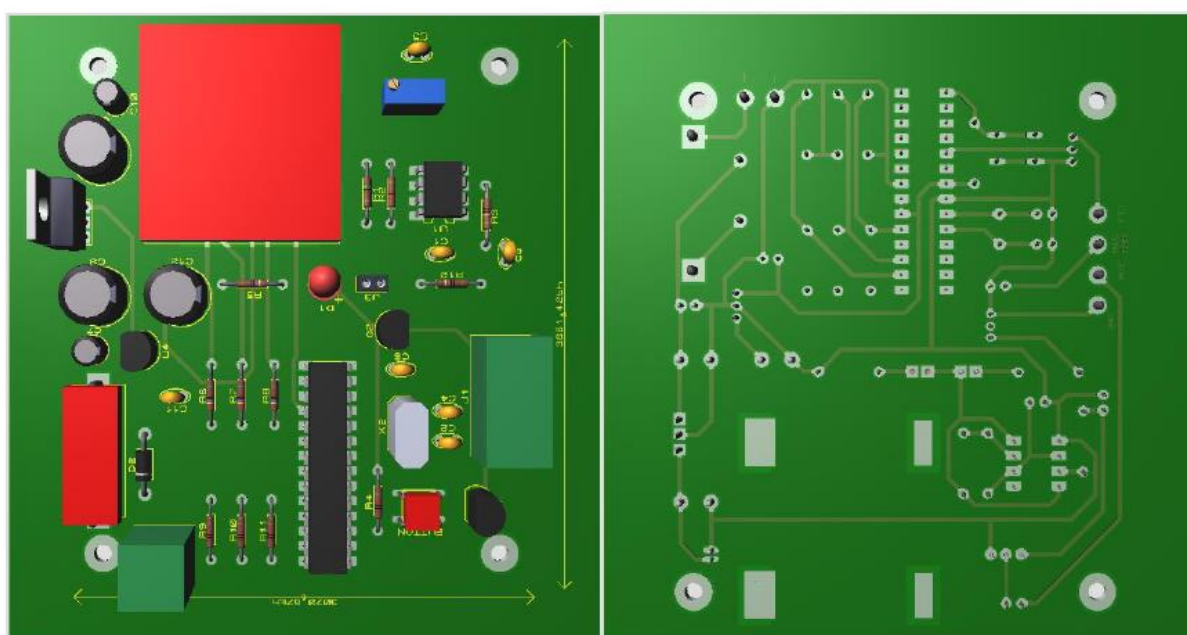


Figura 21 - Esquemático do microcontrolador



Figura 22 - Localização do referido teste (Escola Naval)
Fonte: [43]

Assim, para esta experimentação, foi colocado no ponto 1 da Figura 22, o analisador de espectro ligado à antena HE500 e o computador portátil ligado ao USRP (Figura 23). A utilização do analisador de espectro deve-se ao facto de ser um aparelho de medida certificado, garantindo resultados de confiança. No ponto 2, foi ligada a placa do microcontrolador ao rádio VHF com antena CX4 VHF (Figura 23).

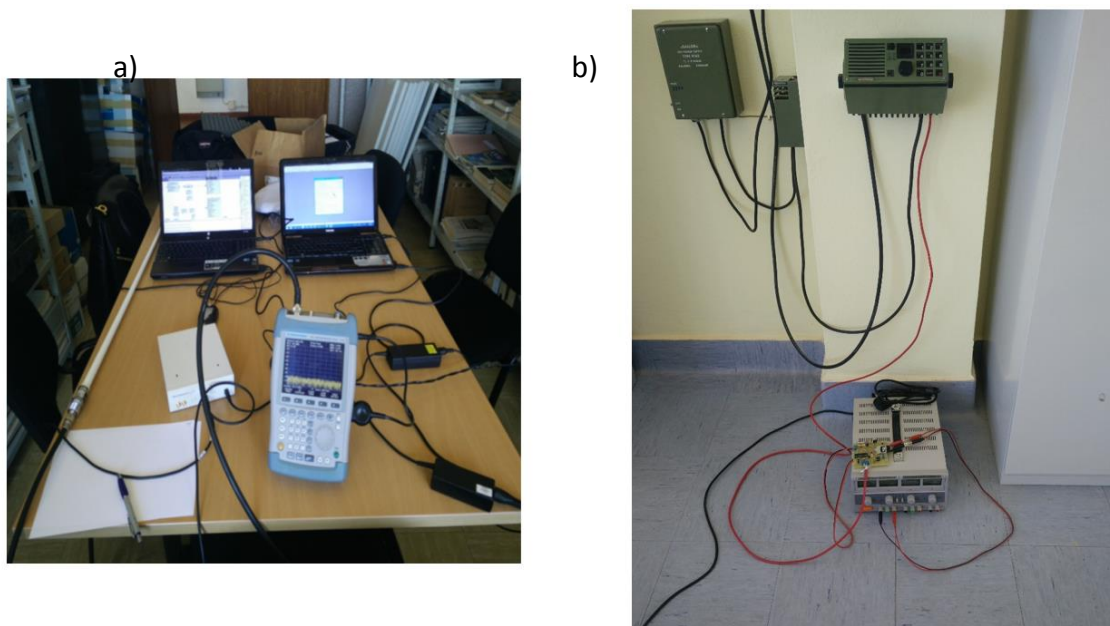


Figura 23 - Montagem do aparato experimental: a) Sistema recetor e b) Microcontrolador e rádio VHF

Como os dois locais se encontravam distanciados de 150m, a potência espetável para ser recebida é calculada de acordo com a seguinte relação de equações:

$$P_r = \frac{P_e \cdot G_e \cdot G_r}{A_{el}} \quad (3)$$

$$A_{el} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (4)$$

onde P_r é a potência no recetor, P_e é a potência no emissor, G_r o ganho no recetor, G_e o ganho no emissor, A_{el} a atenuação em espaço livre, d a distância e λ o comprimento de onda do sinal. Sabendo que a potência de transmissão é 1 W, a frequência do canal é 157,2 MHz que corresponde a $\lambda = 1,9$ m, e que os equipamentos não têm ganho, a potência teórica recebida é de -59 dB.

Relativamente ao canal, tal como referido, foi utilizado o 24, sendo os parâmetros de entrada pré-definidos da seguinte forma: tempo do teste de 10 minutos, com 5 transmissões, perfazendo uma ocupação do canal de 30% do tempo, ou seja, 3 minutos de utilização. Desta forma, foi gerada a seguinte tabela:

Início Transmissão (ms)	Duração (ms)
97570	8100
165620	113350
393060	14170
407820	15130
452810	29070

Tabela 5 - Ficheiro de texto enviado para cartão SD com informação da duração das cinco transmissões

Cada teste teve a duração de 10 minutos, fazendo registos com periodicidade de 1 min, e sendo cada um configurado de forma diferente, de maneira a testar os melhores valores de configuração.

4.2.3.4 – Resultados obtidos

Foram realizados dois testes, onde a principal diferença na configuração foi o número de amostras por segundo. No primeiro teste foi somente utilizada 1 amostra por segundo, enquanto no seguinte teste foram usadas 10 amostras por segundo.

Na Tabela 6, é indicada a configuração do aparato experimental utilizado, representado num subcapítulo anterior, bem como os resultados ao nível da potência recebida e da ocupação do canal 24, para cada uma das situações.

Aparato experimental utilizado	Figura 20
Canal VHF	24 (157,2 MHz)
Duração	10 Minutos
Periodicidade de registo	1 Minuto
Total de transmissões	5
Teste 1	
Transmissões detetadas	4
Percentagem ocupação	27,1%
Potência recebida	-59.3 dB
Teste 2	
Transmissões detetadas	5
Percentagem ocupação	29,5%
Potência recebida	-59.4 dB

Tabela 6 - Configurações e resultados dos dois testes realizados

Os testes descritos pela tabela anterior representam a recolha de dados durante 10 minutos provenientes de um rádio VHF, situado a uma distância de aproximadamente 140m.

Fazendo uma análise da tabela anterior, e partindo do primeiro teste, é possível verificar que com apenas 1 amostra por segundo, o SDR não é capaz de detetar todas as transmissões VHF, sendo, neste caso, detetadas apenas 4 destas. Isto significa que existiu pouca resolução temporal, ou seja, é necessário ter mais amostras por segundo, o que irá permitir aumentar esta resolução.

O facto de as transmissões não serem todas detetadas, é extremamente prejudicial para o desenvolvimento deste estudo, o que foi possível verificar na análise da percentagem do tempo que o canal 24 esteve ocupado, o qual teve um decréscimo significativo, caindo até aos 27,7%.

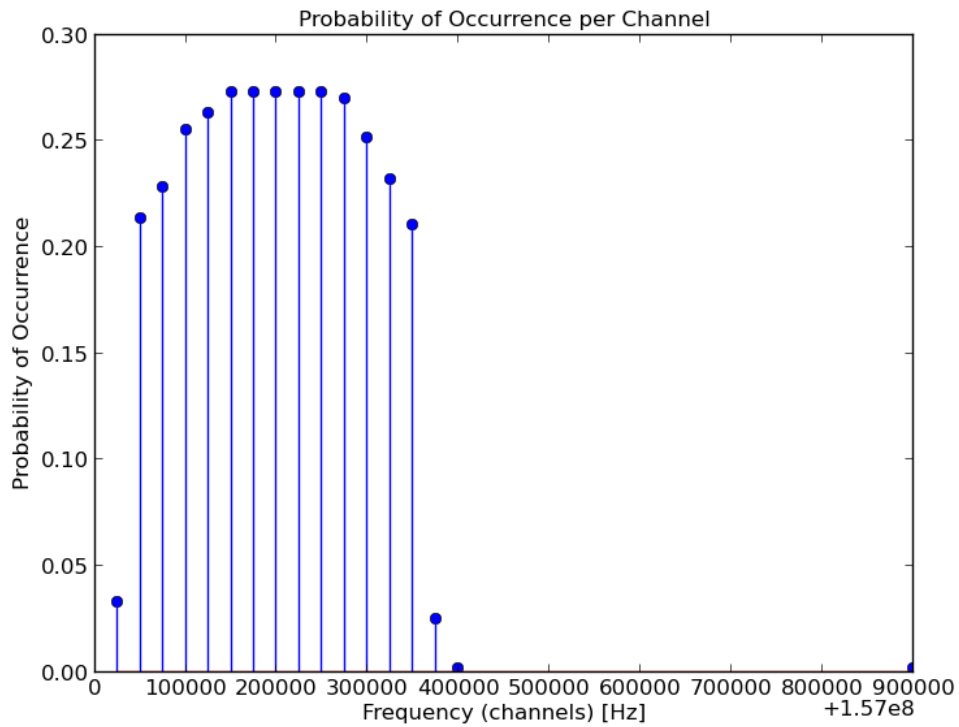


Figura 24 - Percentagem da ocupação do canal 24 durante o teste 1

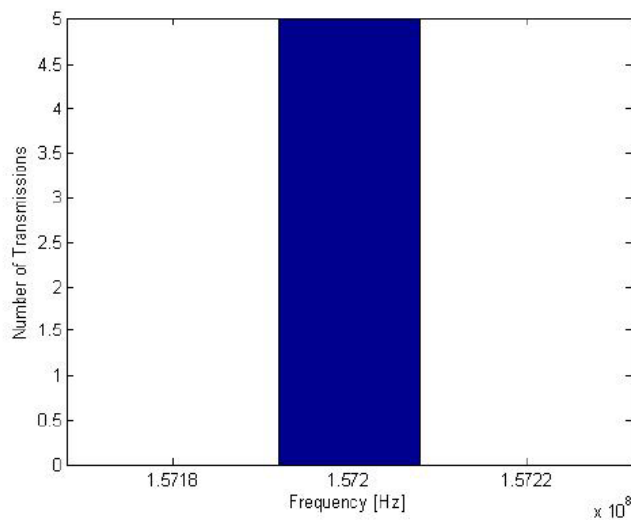


Figura 25 - Número de ocorrências do canal 24 durante o teste 2

Como é possível observar na Figura 24, a percentagem de tempo ocupado encontra-se muito abaixo dos 30%. No segundo teste, o número de amostras foi aumentado para 10, o que permitiu aumentar também a resolução temporal e, por sua vez, que todas as transmissões efetuadas fossem detetadas (Figura 25). A nível de ocupação, o valor encontra-se dentro do esperado já que o resultado foi uma percentagem 29,6% do tempo em que o canal esteve ocupado. Este facto é possível ser visualizado na Figura 26.

Relativamente à potência recebida, é possível constatar pela Figura 27 e Figura 28 que, tanto a potência recebida no USRP como a do analisador de espectro se encontram aproximadamente de acordo com o valor teórico calculado.

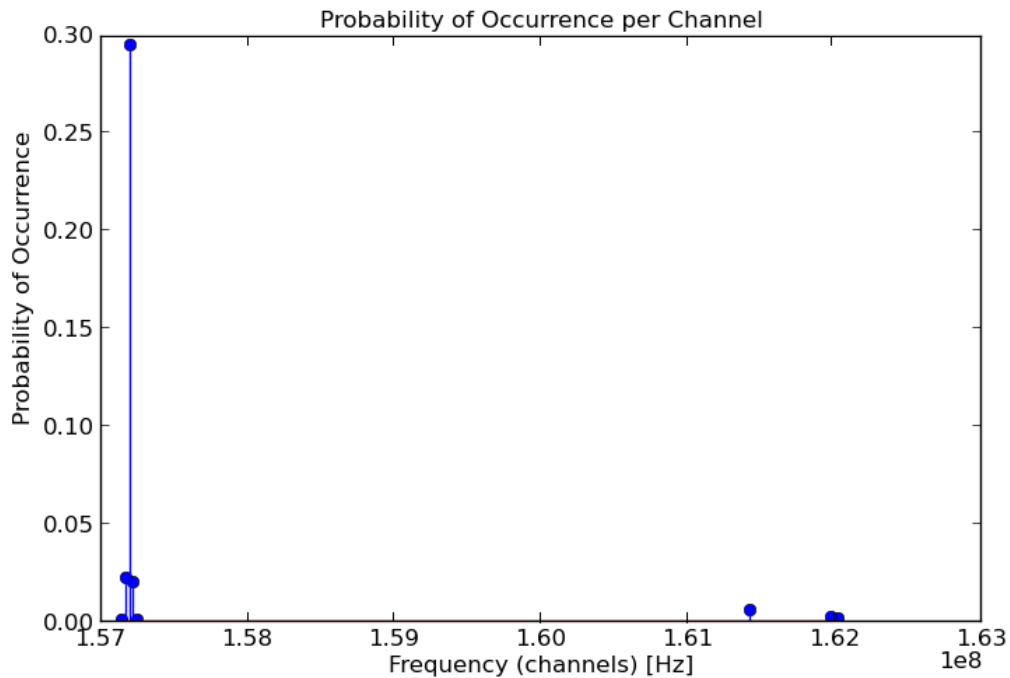


Figura 26 - Taxa de ocupação do canal 24 durante o teste 2

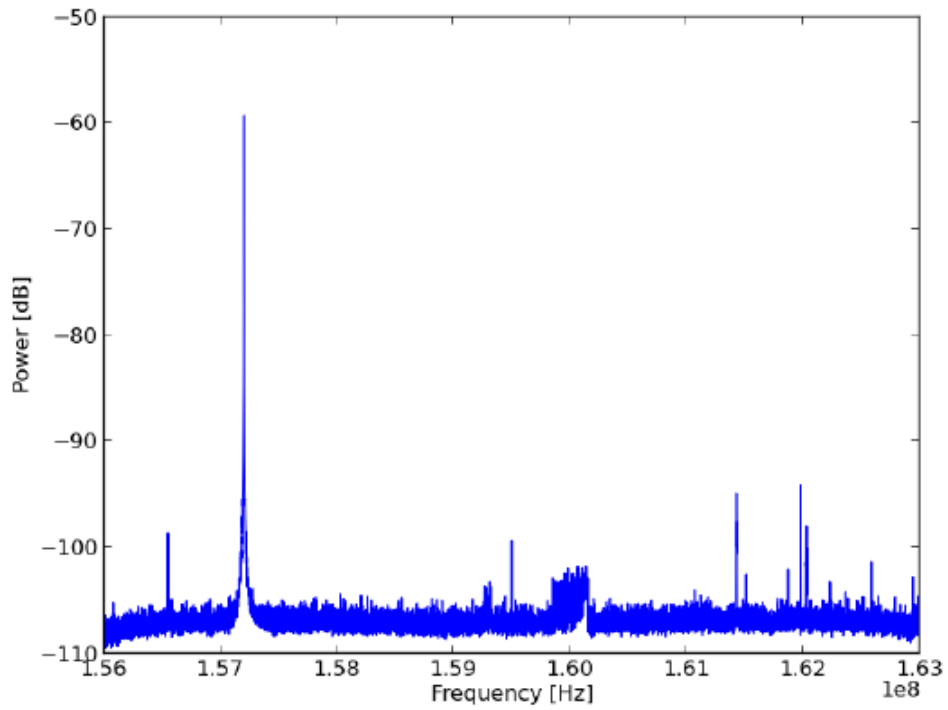


Figura 27 - Potência recebida no USRP relativo ao teste 2

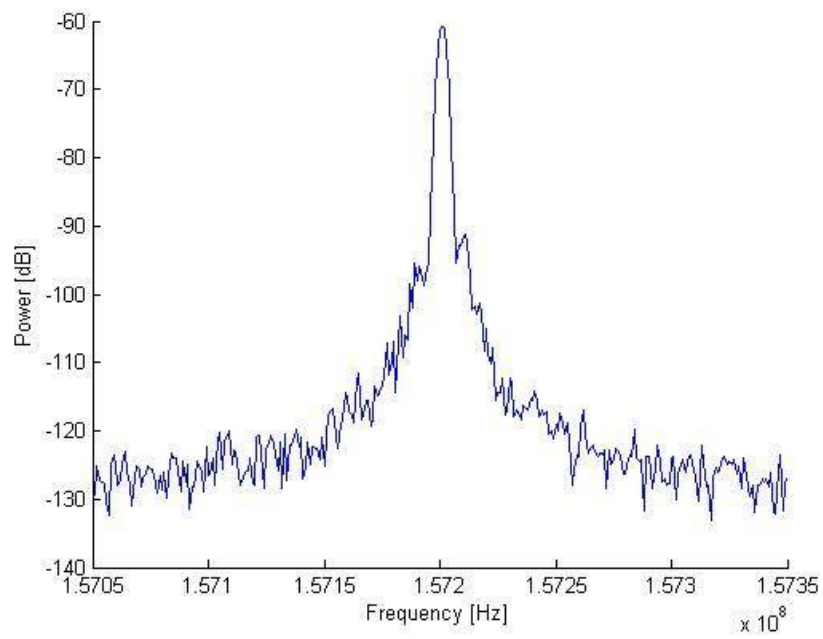


Figura 28 - Potência recebida no analisador de espectro, relativo ao teste 2

4.2.3.5 - Conclusões

A realização destes dois testes foi bastante importante, e permitiram retirar algumas conclusões de elevado interesse.

A primeira diz respeito ao número de amostras por segundo que se deve utilizar. Quanto menor for o número de amostras, maior é a probabilidade de alguma transmissão não ser detetada. Isto tem implicações diretas na percentagem de tempo de que um canal é utilizado, e como consequência originaria elevados erros na análise dos dados e por consequente, no desenvolvimento deste trabalho. Também o facto de ser ter feito as transmissões com auxílio de um placa de circuito impresso, permitiu melhorar os valores em relação ao teste anterior, aproximando assim do valor teórico que seria expectável.

Outra das conclusões importantes a retirar é a nível da potência. Juntamente com o rádio *sailor*, foi utilizado uma antena C4X VHF, diferente do teste anterior, e apesar do aumento da distância, os resultados foram semelhantes. No que diz respeito às antenas utilizadas no USRP, está provado que a *VERT 400* não é a mais indicada para este estudo, sendo obtidos melhores resultados com uma antena específica de VHF.

4.2.4 – Teste de recolha dados AIS

4.2.4.1 – Objetivo dos testes

Com todos os outros testes já realizados, falta apenas testar o algoritmo do GNU Radio responsável pela recolha dos dados AIS. Assim, tornou-se necessário correr o algoritmo um determinado período de tempo, por forma a avaliar os dados recolhidos.

4.2.4.2 – Material e esquemático utilizado

Para esta experimentação foi utilizado o seguinte material:

- Computador portátil;
- *Software* GNU Radio;
- *Hardware* USRP;
- *Antenas de VHF*.

O aparato experimental tem como base o seguinte esquema:



Figura 29 - Esquemático do teste à recepção de dados AIS

4.2.4.3 – Descrição do teste efetuado

A realização deste teste, teve lugar na Escola Naval, mais especificamente no local assinalado na Figura 30. Teve a duração de 24h, com registos a cada duas horas.

Desta forma, foi ligado um computador portátil ao USRP e à antena VERT 400. O algoritmo, explicado no capítulo anterior, recebe as mensagens AIS, descodifica-as, obtendo a identidade do navio que a enviou. Assim, é possível determinar a quantidade de navios que se encontram presentes numa determinada área, bem como a hora da sua presença.



Figura 30 - Imagem aérea do local escolhido para testar a recepção de dados AIS
Fonte: [43]

4.2.4.4 – Resultados obtidos

Os resultados obtidos com esta experimentação, podem ser visualizados na Tabela 7, onde se encontra registado as horas e o número de navios detetados.

Horas	Número de navios
11:13	34
13:13	27
15:13	23
17:13	29
19:13	30
21:13	27
23:13	20
01:13	20
03:13	19
05:13	16
07:13	27
09:13	30
11:13	20

Tabela 7 - Registo do número de navios em cada duas horas

4.2.4.5 - Conclusões

De todos os testes de calibração, este era o último que faltava realizar, o que permitiu verificar que o algoritmo desenvolvido para fazer a recolha de dados AIS se encontra a funcionar perfeitamente.

4.2.5 – Conclusões relativas aos testes de calibração

Os testes efetuados e descritos nos subcapítulos anteriores permitiram testar a arquitetura proposta em diversos cenários, com distintas configurações e com diferente material de apoio.

Inicialmente, os dados obtidos encontravam-se longe do esperado pois o rádio VHF não possuía uma antena específica para o propósito. Perante isto, os valores obtidos eram bastante influenciados devido a erros de *leakage* e, como tal, foi necessária a aquisição de antenas próprias para a banda de VHF. Com esta ligação da antena ao rádio, foi possível a eliminação das tais interferências mas, no entanto, foi essencial estudar o

melhor ajuste para o nível de *threshold*, já que era importante não ter transmissões em excesso nem em falta.

Outro aspeto também bastante focado foi a percentagem de ocupação de um canal. Primeiramente, foi realizado um teste em que as transmissões foram feitas manualmente, e como tal houve um ligeiro erro, mas que foi rapidamente reduzido a partir do instante em que as transmissões foram realizadas de forma automática, com o auxílio de um microcontrolador.

Por fim, foi testado o algoritmo que recebe as informações AIS e que determina o número de navios em cada instante definido. Assim, é possível afirmar que cada teste foi alvo de uma rigorosa análise, o que permitiu que os obstáculos encontrados fossem ultrapassados com mais, ou, menos, dificuldade.

4.3 – Testes de recolha de dados

Após o término dos testes de calibração, e estando todos os equipamentos configurados da devida forma, foi procedida a monitorização do espectro do MMS e consequente recolha de dados. Foram realizados testes em três locais diferentes: nos trânsitos, a bordo do veleiro da Escola Naval NRP *Zarco*, entre a BNL e a marina de Cascais (e no sentido inverso), na SGT F12 e na zona abrangente do Mar da Palha.

4.3.1 – Teste a bordo do NRP *Zarco*

A realização deste teste decorreu durante, sensivelmente, oito horas, sendo que metade destas foram no trânsito BNL – Marina de Cascais (no período entre as 11:59h e as 15:59h), e as restantes no percurso inverso (entre as 08:10h e as 12:10h). Para esta recolha, e como ilustrado na Figura 31, foi montada uma antena CX4 VHF no topo do mastro a ré do veleiro, a uma altitude de cerca de 17 metros. Foi também utilizado um computador portátil e o USRP.

4.3.1.1 – Análise de resultados obtidos

A Figura 33 e a Figura 34 representam os resultados obtidos nos dois trânsitos, sendo possível observar a percentagem de tempo que os canais do MMS estiveram ocupados e o número de transmissões efetuadas no canal 16 e em dois canais privados da Marinha.

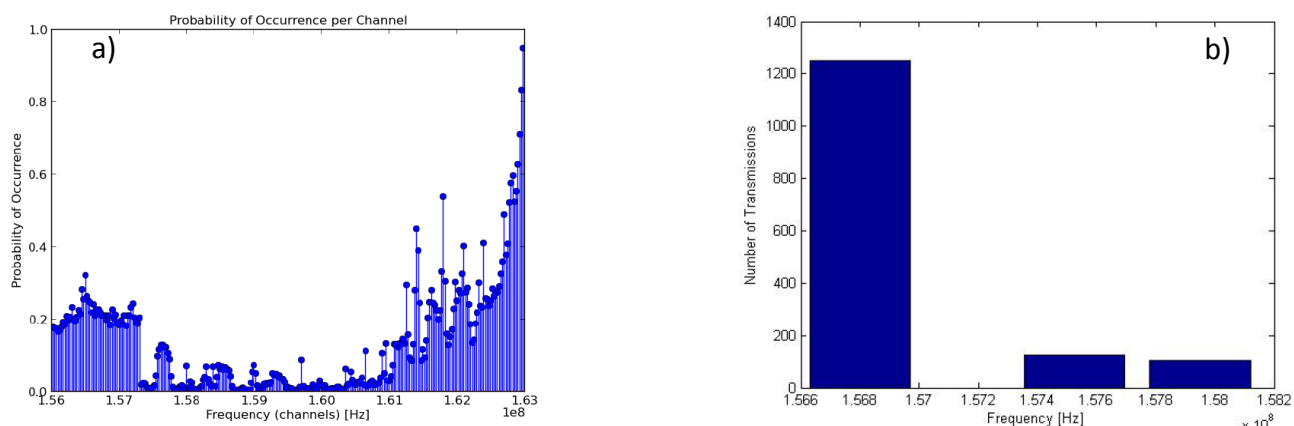


Figura 33 - Dados recolhidos a bordo do NRP Zarco, no período entre as 11:59h e 15:59h: a) Percentagem de ocupação do MMS, b) Número de transmissões

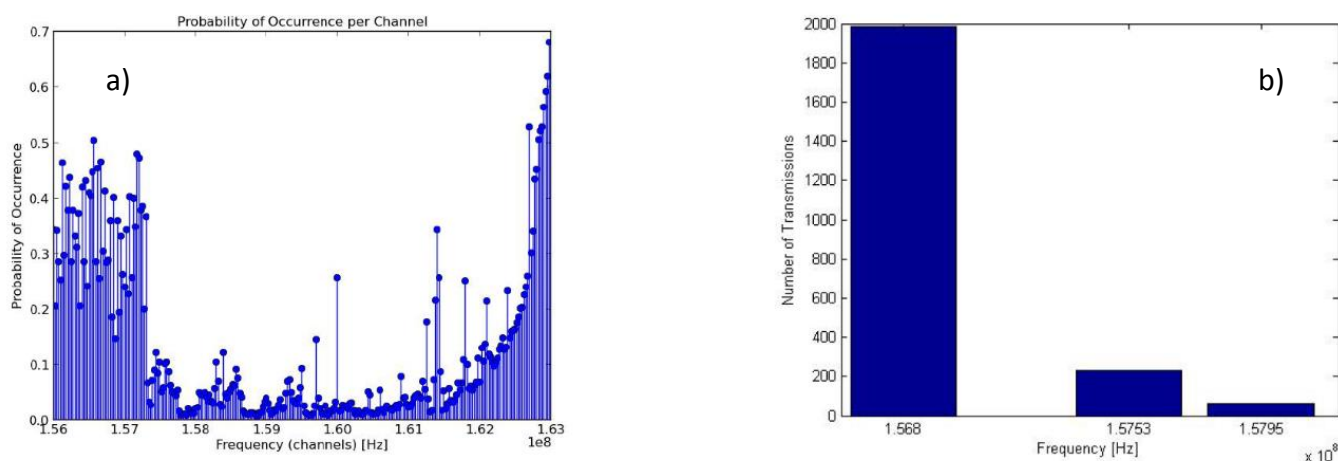


Figura 34 - Dados recolhidos a bordo do NRP Zarco, no período entre as 08:10h e 12:10h: a) Percentagem de ocupação do MMS, b) Número de transmissões

Através do ANEXO A é possível perceber que as frequências entre os 158,050 MHz - 160,600 MHz e os 162,650 MHz - 169,400 MHz são destinadas ao serviço móvel terrestre, o qual não é abordado na presente dissertação de mestrado. Nas frequências abrangidas pelo MMS, e recorrendo às figuras anteriores, constata-se que grande parte

destes canais têm uma taxa de ocupação entre 30% do tempo de monitorização, no primeiro trânsito, e 50% no segundo. Significa isto que estes canais estiveram ocupados entre uma a duas horas, em cada trânsito. Analisando estes resultados, é possível constatar que o MMS teve uma grande percentagem do tempo ocupado. No entanto, esta não é uma conclusão totalmente correta, pois para ser obtida uma visão mais geral da ocupação do MMS devem ser realizados longos períodos de monitorização abrangendo os períodos noturnos (tipicamente onde ocorre uma menor ocupação), períodos diurnos onde ocorra menos tráfego marítimo, bem como nos períodos de maior tráfego. Relativamente ao número de transmissões, é possível afirmar a sua importância para melhorar os períodos de *sensing* dos CR visto providenciarem informação da forma como são utilizados os canais. Tomando como exemplo o canal 16, no primeiro trajeto, observa-se que ocorreram um total de 1240 transmissões, originando um valor médio de duração das comunicações cerca de 3,48 segundos. No segundo trajeto, a esta duração foi de 3,6 segundos. Aparentemente este é um valor bastante reduzido para cada transmissão, mas não pode ser esquecido que se trata de uma média e que este canal serve maioritariamente para os navios combinarem um canal de comunicação, permitindo que este fique livre para o caso de ocorrerem pedidos de socorro ou outras urgências.

4.3.2 – Teste na SGT F12

Para a realização deste segundo teste, foi escolhido a SGT F12 (Figura 35) por se encontrar junto a costa, numa zona de elevada altitude e pelo facto de não apresentar nenhum obstáculo que pudesse interferir com a recolha de dados. Em relação ao material, e à semelhança do teste anterior, foi utilizado o mesmo aparato experimental, no entanto a montagem da antena está de acordo com a Figura 36.

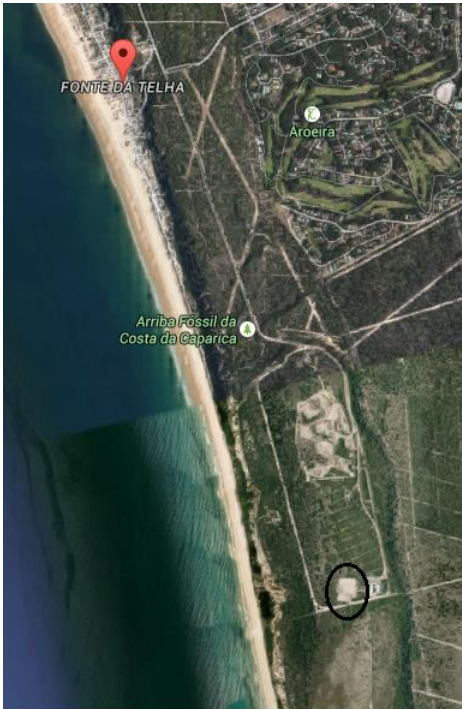


Figura 35 - Localização da SGT F12
Fonte: [51]



Figura 36 - Local da montagem da antena CX4 VHF

4.3.2.1 – Análise de resultados obtidos

Devido às excelentes condições de localização desta estação, foi feita uma monitorização com a duração de uma semana (3 + 4 dias, para efeitos de controlo).

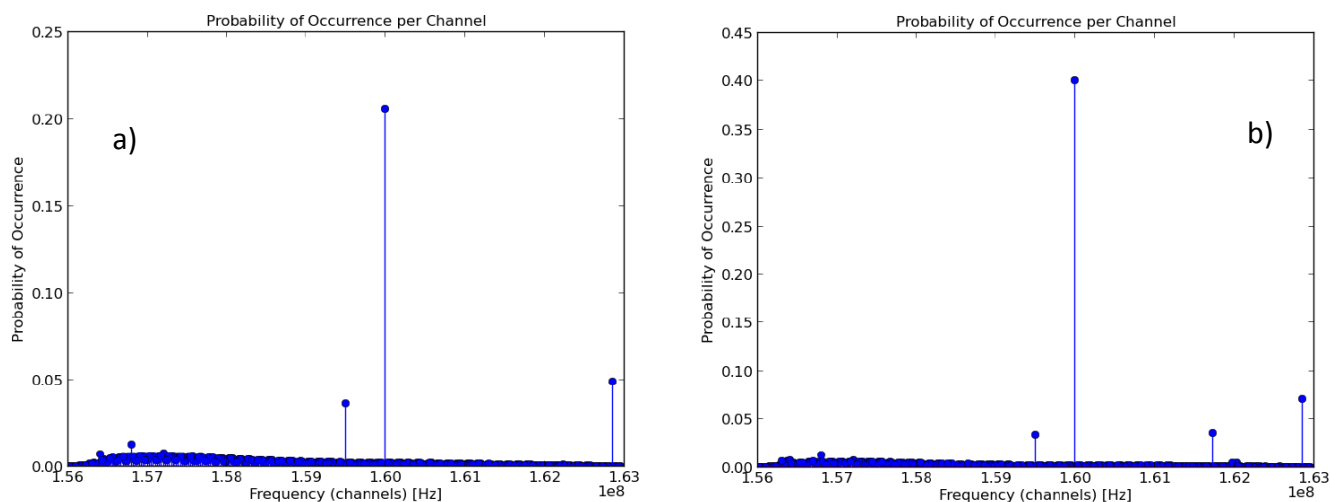


Figura 37 - Ocupação dos canais do espetro: a) 3 primeiros dias, b) 4 últimos dias

Analisando os resultados obtidos (Figura 37), constata-se que o canal centrado na frequência dos 160 MHz teve uma elevada ocupação, mas como este pertence ao serviço móvel terrestre, não é estudada nesta dissertação.

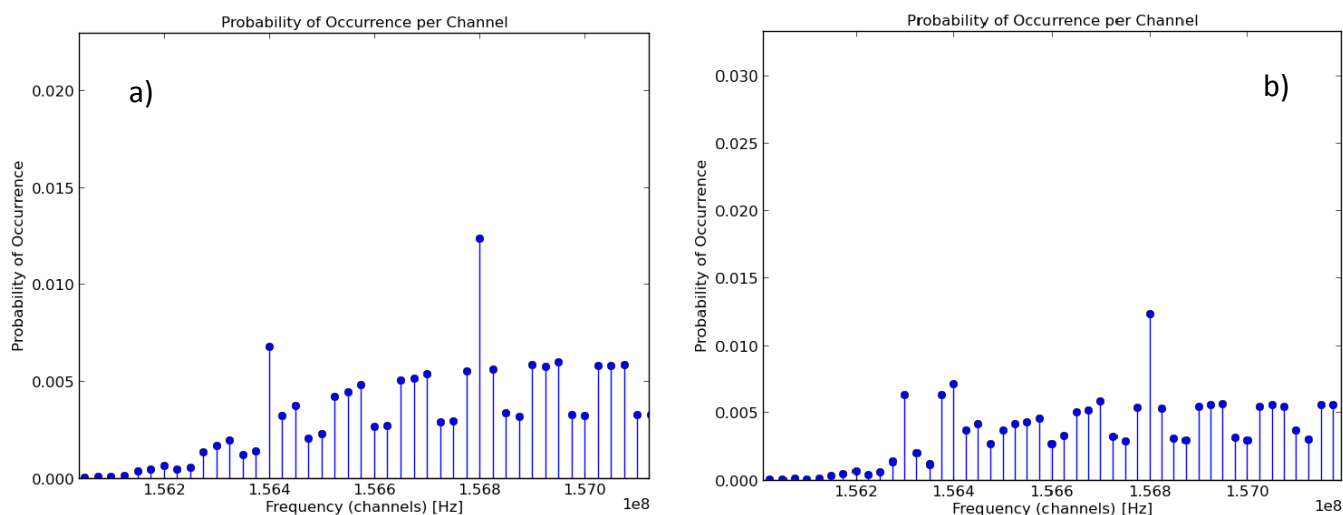


Figura 38 - Ocupação de alguns canais do MMS: a) 3 primeiros dias, b) 4 últimos dias

Nos canais pertencentes ao MMS, representados mais em pormenor na Figura 38 observa-se que tiveram uma ocupação entre 0,5 a 1,4% do tempo total. À semelhança do

teste anterior, e tomando como exemplo o canal 16, é possível verificar que nos primeiros três dias teve uma ocupação de 1,3% (um total de 56 minutos) e nos restantes dias esteve ocupado 1,4% (cerca de 1 hora e 20 minutos). Para além deste, também é notório outro canal com uma taxa de ocupação ligeiramente superior aos restantes (cerca de 0,7% do tempo ocupado), o canal 8 (156,400 MHz). Este é um canal destinado a comunicações navio-navio e manobra de navio, bastante utilizado em zonas portuárias.

Assim, e tendo este teste durado mais tempo que o anterior, abrangendo todos os períodos do dia, é possível concluir que o MMS se encontra muito pouco utilizado.

4.3.3 – Teste na Escola Naval

Para terceiro teste de monitorização, foi escolhida a Escola Naval (Figura 39), por ser um local de maior acessibilidade e por se encontrar numa zona mais interior do porto de Lisboa, sendo de igual forma interessante para se estudar a ocupação do MMS. Como tal, e à semelhança dos testes anteriores, foi montado o mesmo material no ponto mais alto do edifício de comando da Escola Naval (altitude topográfica cerca de 30 metros [34]), como ilustrado na Figura 40.

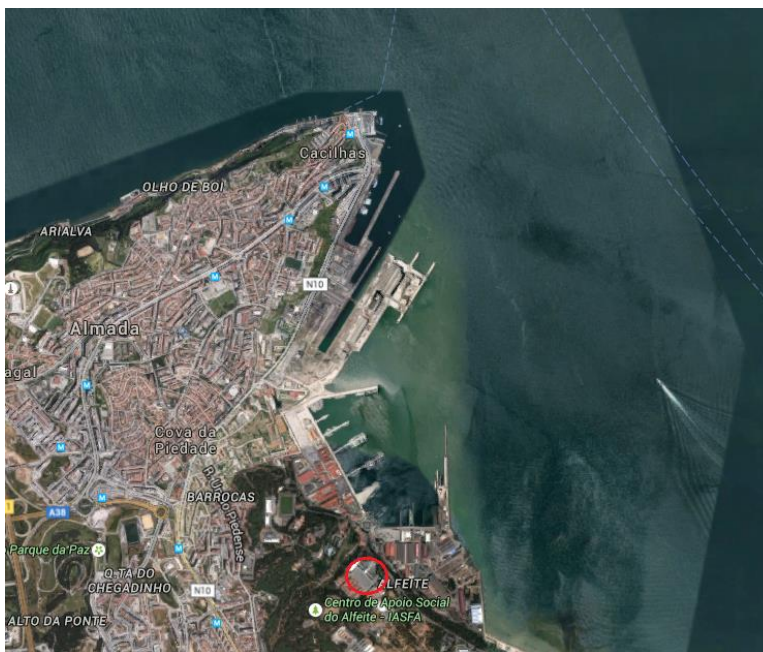


Figura 39 - Localização da Escola Naval
Fonte: [43]



Figura 40 - Local da montagem da antena

4.3.3.1 – Análise de resultados obtidos

Este teste teve a duração de 6 dias (4 + 2 dias), e pôde ser monitorizado grande parte do rio Tejo, incluindo o Mar da Palha. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 41 e na Figura 42.

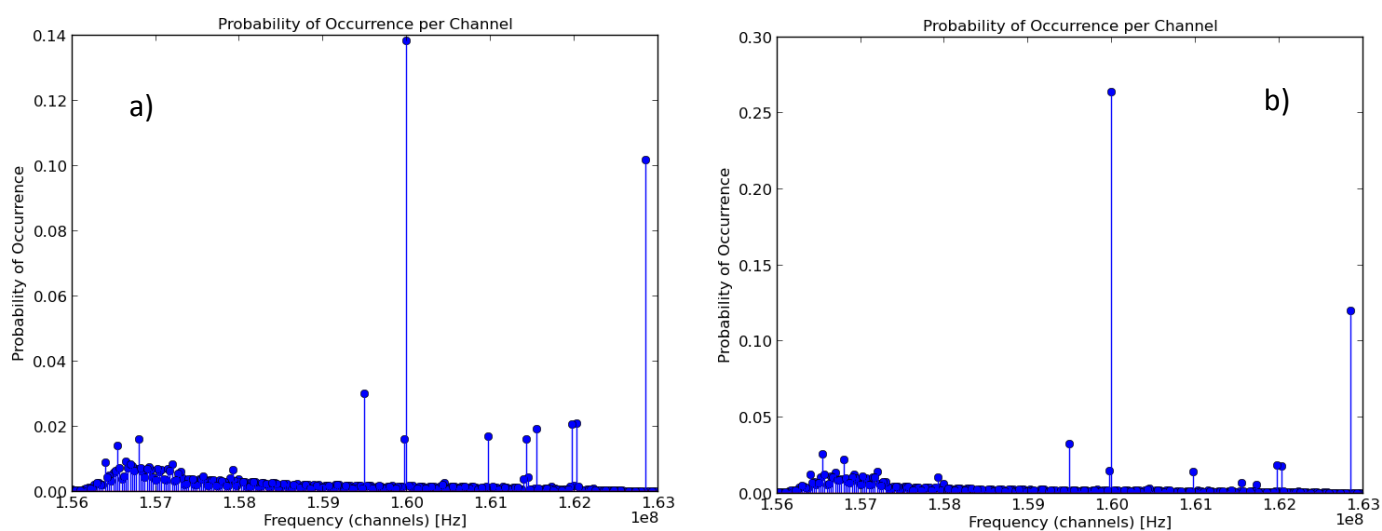


Figura 41 - Ocupação dos canais do espectro: a) 2 primeiros dias, b) 4 últimos dias

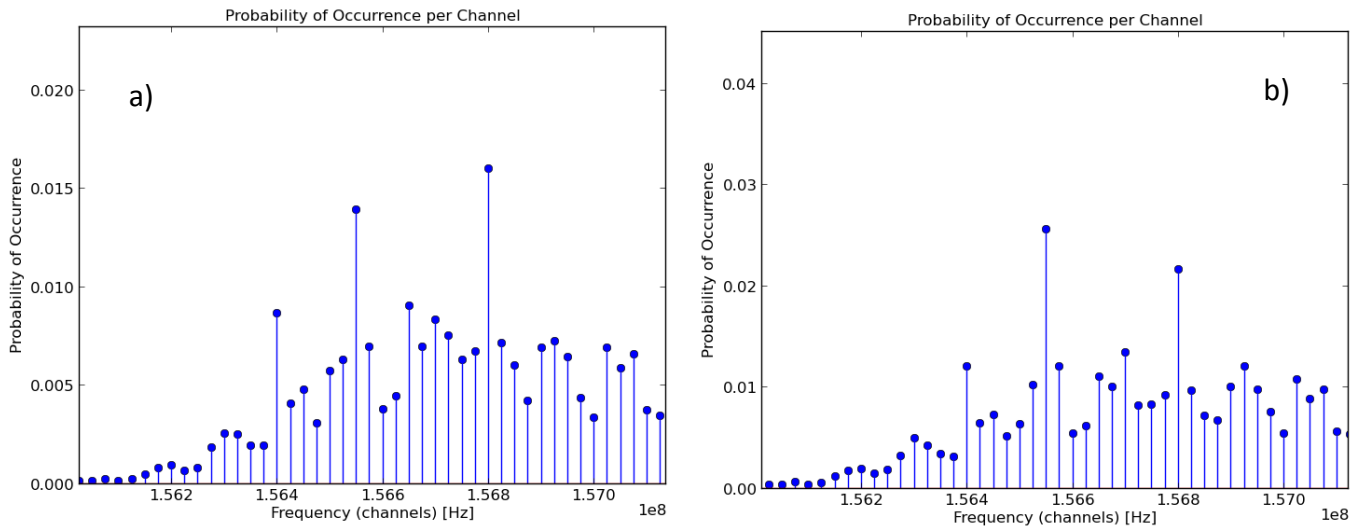


Figura 42 - Ocupação de alguns canais do MMS: a) 2 primeiros dias, b) 4 últimos dias

Através da análise das figuras, é possível observar que ocorreu um ligeiro aumento da ocupação dos canais, comparativamente ao teste anterior. É possível constatar que os canais que estiveram mais ocupados durante este período foram alguns com maior importância nas zonas portuárias:

- 8 (156,400 MHz) – nos primeiros dois dias esteve ocupado cerca de 0,8% (cerca de 23 minutos) e nos restantes 1,3% (uma hora e 15 minutos);
- 10 (156,500 MHz) – este canal está alocado para comunicações de manobras entre navios. Durante este teste teve uma ocupação de 0,5% (14 minutos) e 0,7% (44 minutos);
- 11 (156,550 MHz) – destinada à receção dos avisos de navegação. Nos primeiros dias teve uma ocupação de aproximadamente 0,9% (26 minutos) e nos últimos dias 2,7% (duas horas e 36 minutos);
- 13 (156,650 MHz) – este canal é destinado à segurança da navegação, e teve uma ocupação de 0,9% (26 minutos) nos primeiros dias e 1,2% (uma hora e 11 minutos);
- 16 – como mostrado nos exemplos anteriores, este é o canal com maior ocupação do MMS. Durante este teste, teve ocupações entre os 1,7% (49 minutos) e 2,3% (2 horas e 12 minutos).
- 14 (156,700 MHz) – canal destinado a comunicações com a autoridade portuária – pilotos. Nos primeiros dias esteve ocupado 0,85% (25 minutos)

do tempo e nos dias seguintes teve uma ocupação de 1,4% (uma hora e 20 minutos);

- 70 (156,525 MHz) – canal de DSC. Nos primeiros dois dias teve uma ocupação de 0,6% (17 minutos) e nos restantes dias 0,7% (40 minutos);
- 71 (156,575 MHz) – este canal é destinado às comunicações de manobras de navios e esteve ocupado 0,75% (22 minutos) e 1,3% (uma hora e 15 minutos) do tempo de teste;
- 78 (156,925 MHz) – à semelhança do canal anterior, este também se destina à comunicação de manobra entre navios. Durante os primeiros dois dias teve uma ocupação a rondar os 0,75 % (22 minutos) e nos restantes dias esteve ocupado 1,3% (uma hora e 15 minutos) do tempo de teste.

Através desta análise é possível concluir que, para além dos restantes canais do MMS, os que têm uma maior importância a nível de comunicações portuárias encontram-se ocupados cerca de 3% do tempo. Isto significa que durante largos períodos de tempo estes canais encontram-se livres de comunicações.

4.3.4 – Teste na Capitania de Cascais

O último teste de monitorização do espectro foi realizado na capitania de Cascais (Figura 43). À semelhança da SGT F12, esta também é uma zona que, dentro do alcance VHF, abrange a área da barra sul do porto de Lisboa e a própria zona de Cascais que também apresenta um elevado número de navios a transitar.



Figura 43 - Localização da Capitania de Cascais
Fonte: [52]

4.3.4.1 – Análise de resultados obtidos

Este último teste teve a duração de 11 dias, no qual foram obtidos os seguintes resultados:

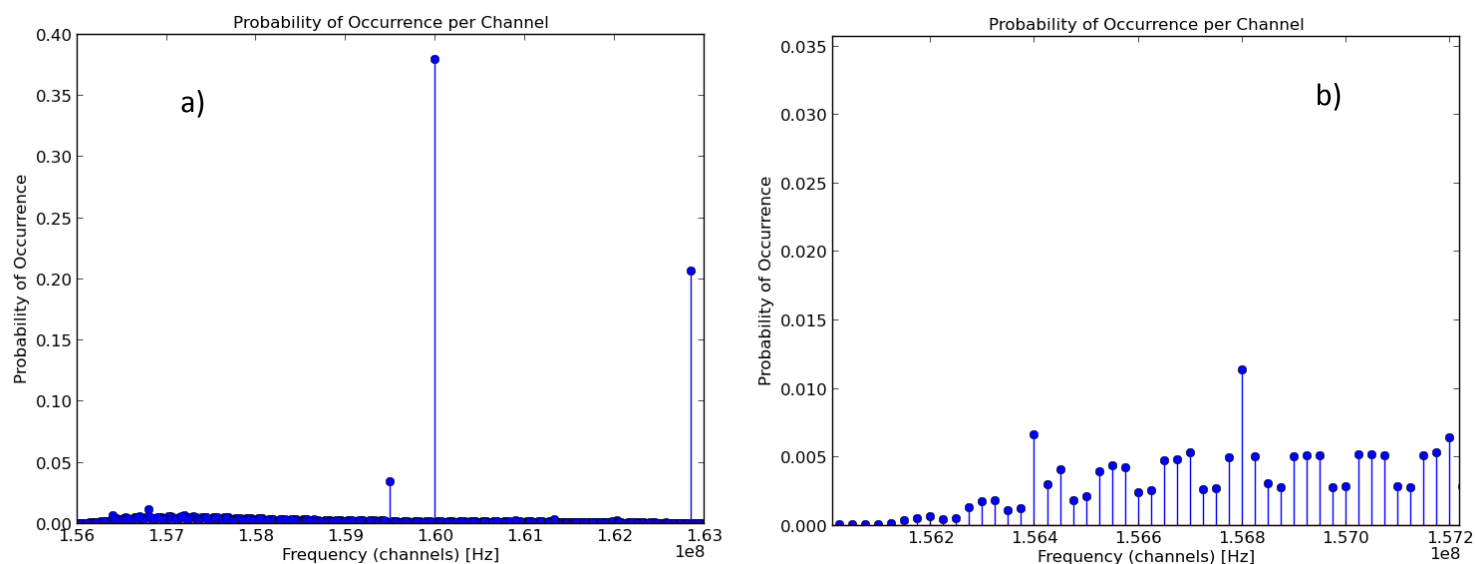


Figura 44 - Taxa de ocupação do espectro VHF: a) visão geral, b) alguns dos canais do MMS

Como é possível observar, os canais do MMS que apresentam uma maior taxa de ocupação são o 8 e o 16, tal como sucedeu no teste anterior. No total de 11 dias (264 horas), estes canais estiveram ocupados cerca de 0,7% (aproximadamente duas horas) e 1,25% (aproximadamente 3 horas e 18 minutos), respetivamente. Os restantes canais apresentam ocupações médias entre os 0,5% e os 0,25%. Mais uma vez, este teste permitiu demonstrar que o MMS tem uma taxa de ocupação bastante reduzida, o que demonstra ser uma excelente oportunidade para o uso de CR.

4.4 – Conclusão

Este capítulo foi dividido em duas partes: testes de calibração e testes de monitorização do espectro. Numa primeira fase foi necessário calibrar todos os equipamentos e ajustar as suas configurações, por forma a ir de encontro aos objetivos. Durante este período foi comparada a potência recebida no analisador de espectro e no SDR, sendo este ligado a uma antena *triband* e, alternativamente, a outra de VHF. Desta forma, foi possível rejeitar a hipótese de utilizar a primeira antena pois apresentava piores

resultados na potência recebida e também pelo facto de sofrer interferências de outras bandas. Simultaneamente foi testado o algoritmo de deteção e contagem de transmissões, as quais podem ser úteis para a compreensão da forma como são utilizados os canais de VHF. Por fim, foi testado o recetor de AIS que descodifica estas mensagens, identificando os navios na região.

Após a conclusão dos testes de calibração, foi procedida à monitorização do espectro, com maior incidência no MMS. Foram realizados diversos testes que permitiram verificar que o espectro tem uma baixa percentagem de utilização, havendo períodos do dia onde ocorre um aumento significativo devido ao elevado tráfego marítimo. Este aumento de tráfego pode estar relacionado com uma maior movimentação de navios de transporte de passageiros. Todavia, mesmo com este aumento de tráfego o espectro apenas teve ocupações entre os 20 % e os 50% no porto de Lisboa, o que significa que o espectro se encontra livre grande parte do tempo.

A nível nacional, o porto de Lisboa não é o que apresenta maior número de movimentações portuárias. Contudo, por esta zona passam diariamente inúmeros navios cargueiros, de transporte de passageiros e embarcações de recreio. No entanto, os testes anteriores demonstram que as taxas de ocupação do MMS são bastante reduzidas, quer seja dentro do porto ou nas suas proximidades. Com isto, torna-se evidente a necessidade da implementação de novas formas de utilizar e gerir o espectro do MMS, tal como os CR.

CAPITULO V

Modelo de Previsão para Ocupação do Espectro

5.1 – Introdução

Em muitas situações certos valores de interesse observados dependem dos valores assumidos por uma ou mais variáveis (ditas explicativas). Quando a relação entre as observações referidas e as variáveis explicativas é de natureza linear, é natural procurar ajustar um modelo linear aos dados disponíveis recorrendo a técnicas de regressão linear simples e regressão linear múltipla. No caso em que exista apenas uma variável explicativa o modelo de aproximação denomina-se por regressão linear simples. Quando são consideradas duas ou mais variáveis, este modelo é estendido para uma aproximação linear múltipla.

Neste capítulo é apresentada a teoria da regressão linear simples e múltipla. As técnicas apresentadas serão utilizadas para, com base nos dados experimentais recolhidos, desenvolver e avaliar modelos lineares de previsão da ocupação do canal 16.

O modelo considerado mais adequado (1, 2 ou mais variáveis explicativas) será igualmente proposto/utilizado na descrição da taxa de ocupação dos restantes canais.

5.2 – Modelo de Regressão Linear Múltipla

Na regressão linear múltipla assume-se que existe uma relação linear entre uma variável dependente Y_i e k variáveis independentes, x_{ij} ($j = 1, 2, \dots, k$) [35], sendo definida pela seguinte expressão:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

onde x_{i1}, \dots, x_{ik} e Y_i denotam as variáveis, $\beta_0, \dots, \beta_j, j = 0, \dots, k$ os parâmetros ou coeficientes de regressão e ε_i corresponde aos erros aleatórios. Este modelo descreve um hiperplano no espaço $(k + 1)$ -dimensional. As hipóteses inerentes [36] são:

1. x_{ik} é não estocástico;
2. ε_i é o erro aleatório associado;
3. ε_i tem média nula;
4. ε_i são independentes para todo o $i = 1, \dots, n$;
5. ε_i varia com a variância σ^2 constante e desconhecida para todo o $i = 1, \dots, n$;
6. Não existe multicolinearidade (relação linear) entre as variáveis x_{i1}, \dots, x_{ik} .

No trabalho que se segue, começaremos por utilizar duas variáveis independentes (número de navios e horas do dia). Desta forma, consideraremos o caso particular do modelo de regressão linear múltipla com duas variáveis explicativas x_1 e x_2

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (6)$$

Ao definir este modelo estamos a pressupor as hipóteses anteriormente referidas (ver ANEXO E).

No processo de determinação dos parâmetros desconhecidos, a partir de um conjunto de n medições, para verificarem a equação (5), são originados sistemas de equações lineares sobredeterminados [37] [35], ou seja, o conjunto de equações é superior ao número de incógnitas ($n > k + 1$). Para se proceder ao ajuste deste modelo de regressão linear, é útil expressar as equações matemáticas em notação matricial, devido às dificuldades de cálculo na utilização de um vasto número de parâmetros

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (7)$$

onde

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \text{ e } \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Relativamente à constituição das diferentes matrizes, pode referir-se o seguinte:

- A matriz Y é o vetor coluna ($n \times 1$) constituído pelas observações da variável resposta;
- A matriz X , denominada matriz modelo, tem uma dimensão ($n \times (k + 1)$), sendo constituída pelos valores das variáveis independentes. Na primeira coluna, todos os valores são iguais a 1 pois são referentes aos coeficientes de β_0 , e a partir da segunda coluna, surgem as observações da variável x ;
- A matriz β é o vetor coluna dos coeficientes de regressão.
- A matriz ε é o vetor coluna dos erros aleatórios.

5.2.1 – Equações Normais

Para determinar os coeficientes β_n recorre-se ao estabelecimento das equações normais, através do método dos mínimos quadrados. Segundo [37], este método consiste em determinar o vetor $\beta \in \mathbb{R}^n$ que minimize o valor do quadrado da norma dos resíduos¹³ ($\|SQ_E\|^2$), dado por

$$\|SQ_E\|^2 = \|Y - \hat{Y}\|^2 = \|Y - X\beta\|^2 \quad (8)$$

Desenvolvendo a expressão anterior, é obtido

$$\begin{aligned} \|SQ_E\|^2 &= \|Y - X\beta\|^2 = (Y - X\beta)^T (Y - X\beta) \\ &= \beta^T X^T X \beta - 2\beta^T X^T Y + Y^T Y \end{aligned} \quad (9)$$

¹³ Resíduo é a diferença entre o valor observado da variável resposta Y e o valor ajustado (\hat{Y}) pelo modelo.

onde X^T e β^T são as matrizes transpostas¹⁴ de X e β , respetivamente. O valor mínimo de $\|SQ_E\|^2$ ocorre no seu ponto de estacionaridade (ponto onde as suas derivadas parciais se anulam). Assim, o estimador dos mínimos quadrados $\hat{\beta}$ será solução de $\frac{\partial SQ_E}{\partial \beta} = 0$, ou seja,

$$X^T X \hat{\beta} - X^T Y = 0 \quad (10)$$

isto é

$$X^T X \hat{\beta} = X^T Y \quad (11)$$

De acordo com [37], o sistema (11) é conhecido como sistema de equações normais. Este sistema tem $(k + 1)$ equações e $(k + 1)$ incógnitas, sendo possível e determinado se as colunas da matriz X forem linearmente independentes (ver ANEXO F). No ANEXO G é demonstrado que a solução destas equações produz, efetivamente, um mínimo.

Para resolver a equação (11) em ordem a β e obter os coeficientes de regressão, multiplicam-se ambos os membros por $(X^T X)^{-1}$, obtendo-se

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (12)$$

O modelo de regressão ajustado, correspondente a (6) é

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 \quad (13)$$

Por conseguinte, a diferença entre a observação Y_i e o correspondente valor ajustado (estimativa) \hat{Y}_i é o valor do resíduo, $\varepsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i$.

5.2.2 – Análise da variância

Após o cálculo do modelo de regressão linear, é necessário verificar se as variáveis independentes contribuem significativamente com informação para explicar linearmente a variação da variável resposta [38] [39]. Para este efeito, utiliza-se um teste de hipóteses. As hipóteses a testar são:

¹⁴ Matriz transposta é a matriz que se obtém da troca de linhas por colunas de uma determinada matriz. Considerando a matriz $C = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix}$, a sua transposta é dada por $C^T = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}$.

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ (hipótese nula)

$H_1 : \beta_j \neq 0$ para algum $j, j = 1, \dots, k$, (hipótese alternativa)

A hipótese nula que se pretende testar é a não existência de regressão. Segundo [38] e [39], a rejeição de H_0 significa que pelo menos umas das variáveis independentes contribui significativamente para explicar a variação da variável dependente. Esta explicação pode ser representada por um modelo de regressão linear. Caso não ocorra essa rejeição, não existe regressão linear entre as variáveis, e o modelo não pode ser utilizado.

Para testar esta hipótese, considera-se a estatística de teste

$$F = \frac{\frac{SQ_R}{k}}{\frac{SQ_E}{n - k - 1}} \quad (14)$$

onde

$$SQ_E = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (15)$$

e

$$SQ_R = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2 \quad (16)$$

A soma dos quadrados dos resíduos (SQ_E) corresponde à variação da variável resposta que não é explicada pelo modelo, e a soma dos quadrados explicada (SQ_R) à soma dos quadrados da diferença entre a médias das observações e o valor estimado para cada uma. A soma total dos quadrados, que mede a variação total das observações em torno da média, é dada por

$$SQ_T = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 = SQ_E + SQ_R \quad (17)$$

A rejeição de H_0 é feita de acordo com o seguinte critério: $f_0 > f_{(1-\theta; n; n-k-1)}$. Na tabela 8 [38], encontra-se sumariado o processo de análise de variância

Causas de variação	Graus de liberdade (gl)	Soma de Quadrados	Média quadrática	F_0
Regressão	k	SQ_R	$MQ_R = \frac{SQ_R}{k}$	F
Erro	$n - k - 1$	SQ_E	$MQ_E = \frac{SQ_E}{n - k - 1}$	
Total	$n - 1$	SQ_T		

Tabela 8 - Tabela ANOVA

Assim, relativamente a H_0 , rejeita-se a hipótese nula, com um grau de significância θ , se F_0 for maior que o valor tabelado para a distribuição F^{15} (ANEXO B) concluindo-se com $(1 - \theta) \times 100\%$ de confiança que o modelo explica a variação de β . No entanto, é necessário outro teste [38] [39] para se concluir sobre a qualidade do ajustamento do modelo de regressão linear, antes de ser usado no caso prático. Como tal, é utilizada uma medida de ajustamento denominada coeficiente de determinação (R^2). Este valor varia entre zero e um, e é usado para quantificar a capacidade explicativa do modelo. Por outras palavras, quanto maior o valor de R^2 , mais explicativo é o modelo. R^2 é dado pela seguinte equação:

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} = \frac{SQ_R}{SQ_T} \quad (18)$$

No entanto, um grande valor de R^2 não significa que o modelo de regressão represente um bom ajustamento aos dados, pois a adição de uma variável aumenta sempre este coeficiente [38]. Como tal, recorre-se ao cálculo do coeficiente de determinação ajustado

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-k-1} \right) (1 - R^2) \quad (19)$$

Ao contrário do que acontece com R^2 , o coeficiente ajustado não aumenta com a inserção de novas variáveis, mas sim caso a sua adição traga vantagens. Este valor

¹⁵A distribuição F de Fisher-Snedecor, é uma distribuição de probabilidade contínua que surge frequentemente como a distribuição nula de uma estatística de teste, particularmente na análise da variância

também permite ter uma ideia da proporção da variação de β , explicada pelo modelo da regressão.

Outra medida frequentemente utilizada para estimar a qualidade do modelo de regressão linear baseia-se na raiz quadrada da soma do erro quadrático médio (RMSE – *Root Mean Square Error*), dado por

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (20)$$

ou seja, quanto mais próximo este valor se encontrar de zero, melhor o modelo se ajusta aos dados.

5.2.3 – Intervalos de confiança para Y

Quando se utilizam modelos de regressão linear, é útil construir intervalos de confiança de Y para um determinado vetor x_0 [39]. Este último é uma linha da matriz X , ou seja, o vetor $x_0^T = [1 \ x_{01} \ \dots \ x_{0n}]$. Assim, os extremos do intervalo de $(1 - \theta) \times 100\%$ de confiança para o valor esperado da resposta Y para um determinado ponto x_0 , são dados por

$$\hat{\mu}_{\beta|x_0} \pm t_{\frac{\theta}{2}}[n - k - 1]se(\hat{\mu}_{Y|x_0}) \quad (21)$$

onde

$$\hat{\mu}_{Y|x_0} = x_0^T \hat{\beta} \quad (22)$$

e

$$se(\hat{\mu}_{Y|x_0}) = \sqrt{\hat{\sigma}^2 x_0^T C x_0} \quad (23)$$

sendo $se(\hat{\mu}_{Y|x_0})$ o desvio padrão e $\hat{\sigma}^2 = MQ_E$, a variância. O valor de $t_{\frac{\theta}{2}}$ é dado no

ANEXO B, para $P(t) = \frac{\theta}{2}$ e $f = n - k - 1$ [39].

5.2.4 – Previsão de novas observações

O modelo de regressão linear múltiplo pode ser utilizado para fazer a previsão de uma determinada resposta Y , com base em valores particulares das variáveis independentes [38] [39]. Como $x_0^T = [1 \ x_{01} \ \dots \ x_{0k}]$, uma estimativa de Y_0 é dada por $\hat{Y}_0 = x_0^T \hat{\beta}$. Assim, segundo [39] e [38], os extremos do intervalo de previsão a $(1 - \theta) \times 100\%$ para uma futura observação de Y são dados por

$$\hat{Y}_0 \pm t_{\frac{\theta}{2}}[n - k - 1] \sqrt{\hat{\sigma}^2 [1 + x_0^T C x_0]} \quad (24)$$

É de salientar que a amplitude do intervalo de previsão é superior à do intervalo de confiança para Y quando calculado para os mesmo valores das variáveis independentes [38].

5.2.4 – Análise de resíduos

Os resíduos de um modelo de regressão representam as diferenças entre os valores observados e os estimados através da equação de regressão linear. A equação (13) traduz o cálculo do valor dos resíduos para uma determinada observação e o seu valor estimado através da regressão. Em termos gráficos, os resíduos são representados pelas distâncias verticais entre os valores observados e os valores estimados, como ilustrado na Figura 45.

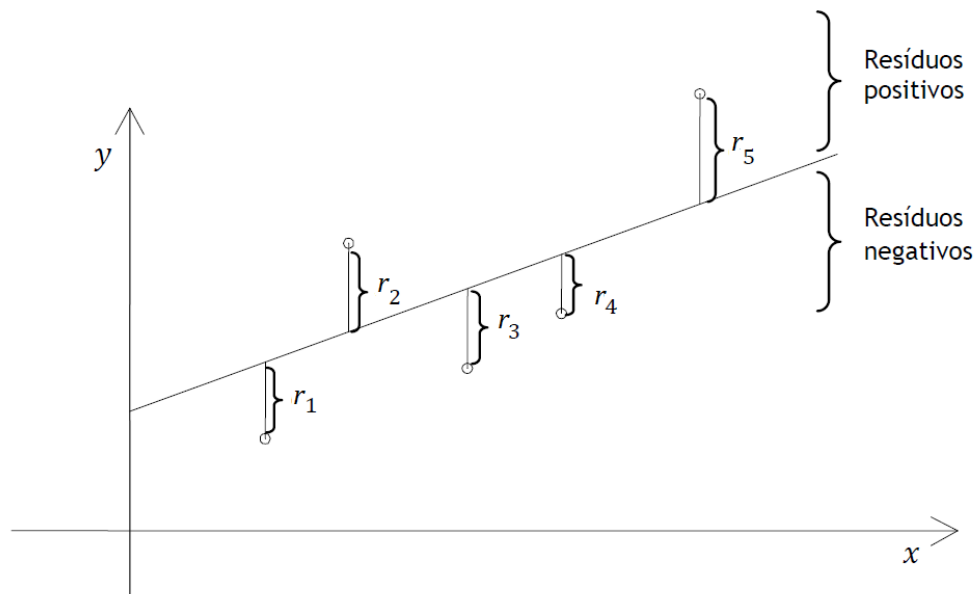


Figura 45 - Representação gráfica dos resíduos
Fonte: [35]

Para além da representação gráfica, os resíduos também podem ser analisados analiticamente. Assim, podem adquirir uma forma *standard* [38], ou seja, ter uma média zero e variância aproximadamente um, sendo esta relação expressa por

$$d_i = \frac{e_i}{\hat{\sigma}}, \quad i = 1, \dots, n \quad (25)$$

Caso os resíduos sejam normalmente distribuídos, cerca de 95% destes na forma *standard*, deverão estar compreendidos no intervalo $[-2, 2]$ [38]. Os restantes poderão ser considerados *outliers*, ou seja, observações que não seguem o padrão das restantes.

5.3 – Modelo Estimador da Ocupação do MMS

O principal objetivo desta dissertação de mestrado consiste em avaliar e estimar as oportunidades existentes para utilização dinâmica do espectro na banda de VHF do MMS. No presente subcapítulo, é proposta a utilização de um modelo matemático da ocupação destes canais no porto de Lisboa. Esta taxa de ocupação é influenciada por diversos fatores, tais como: tráfego portuário, maior número de comunicações, dia da semana, entre outros.

Tipicamente, o canal mais utilizado é o 16 por ser dedicado, não só, a chamadas navio-navio e navio-terra, mas também por ser possível efetuar chamadas de segurança, de socorro e de urgência. Por esta razão, neste trabalho foi inicialmente modelada a ocupação do canal 16, servindo o modelo obtido de base para os restantes canais do MMS.

Os detalhes relevantes para obtenção do modelo encontram-se no APÊNDICE D.

5.3.1 – Canal VHF 16

Para desenvolver um modelo matemático para este canal, primeiramente é necessário definir as variáveis a utilizar. Neste contexto, considere-se:

- P_{off} – ocupação do canal, em percentagem (variável dependente)
- N – número de navios numa determinada área geográfica (variável independente)
- H – horas do dia (variável independente)

Deste modo, o modelo a ser ajustado é do tipo exposto na expressão (5), sendo neste caso em concreto dado por

$$P_{off} = \beta_0 + \beta_1 N + \beta_2 H \quad (26)$$

onde os coeficientes de regressão (β_n) são os valores a estimar

Realizando-se vários testes de recolha de dados no porto de Lisboa, foram obtidos os valores de P_{off} , N e H , que se encontram no APÊNDICE E, e uma amostra exemplificativa na Tabela 9.

Nº da observação	Horas do dia (H)	Navios (N)	Ocupação (Poff, %)
1	0	11	2,51
2	1	10	1,61
3	2	9	1,47
4	3	8	1,36
5	4	7	1,44
6	5	9	1,5
7	6	10	1,46
8	7	11	1,46
9	8	10	1,66
10	9	10	1,8
11	10	12	1,95
12	11	11	1,939
13	12	10	2,002
14	13	12	2,23
15	14	13	2,06
16	15	14	3,85
17	16	11	2,81
18	17	13	1,87
19	18	12	1,9
20	19	10	3,25
21	20	11	1,47
22	21	12	1,6
23	22	12	1,73
24	23	9	2,22

Tabela 9 - Amostra de dados recolhidos

Antes de se proceder à modelação dos dados, é necessário desenvolver uma série de passos com vista à sua normalização¹⁶. Como tal, os dados foram normalizados da seguinte forma

$$H' = \frac{H}{\max(H)}, N' = \frac{N}{\max(N)} \text{ e } P_{off}' = \frac{P_{off}}{100} \quad (27)$$

¹⁶ A normalização de dados é um processo de análise que minimiza a redundância destes e as anomalias nas operações de modificação de dados, evitando que se tornem inconsistentes.

em que H, N e P_{off} são os dados reais e H', N' e P_{off}' a sua normalização. Após este processo, considerando os dados em anexo, são estimados os coeficientes de regressão através da equação (7) ($P_{off} = \beta Y$), onde

$$P_{off} = \begin{bmatrix} 2,5 \\ 1,61 \\ \vdots \\ P_{off_n} \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 1 & 11 & 0 \\ 1 & 10 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & N_n & H_n \end{bmatrix} \text{ e } \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$$

donde

$$\beta = \begin{bmatrix} 1,4851e^{-5} \\ 0,1465 \\ -4,2315e^{-4} \end{bmatrix}$$

Assim, o modelo de regressão linear ajustado aos dados é dado por

$$P_{off} = 1,4851e^{-5} + 0,1465N - 4,2315e^{-4}H \quad (28)$$

No entanto, considerando o caso em que $N = 0$ e $H = 0$, é obtida uma taxa de ocupação diferente de zero ($P_{off} = 1,4851e^{-5}$). Este facto aponta para a utilização de um modelo do tipo

$$P_{off} = \beta_1 N + \beta_2 H \quad (29)$$

Desta forma, a partir de (7) obtém-se

$$P_{off} = 0,1465N - 4,4797e^{-4}H \quad (30)$$

Numa primeira abordagem para se ter uma ideia da percentagem de contribuição de cada regressor, recorre-se à determinação dos coeficientes de determinação parcial. Desta forma, são consideradas regressões lineares simples entre a variável dependente e cada um dos regressores. Ou seja, para a variável N tem-se

$$R_N^2 = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} = 1 - \frac{0,0162}{0,1020} = 0,8412$$

e

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{234 - 1}{234 - 1 - 1} \right) (1 - 0,8412) = 0,8405$$

Para a variável H é obtido

$$R_H^2 = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} = 1 - \frac{0,1202}{0,1437} = 0,1635$$

e

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{234 - 1}{234 - 1 - 1} \right) (1 - 0,1635) = 0,1599$$

A partir destes resultados é possível concluir que a variável das horas contribui de forma reduzida para explicar a ocupação do canal (cerca de 16%). Por outro lado, o número de navios explica cerca de 84% a ocupação.

Todavia, calculando o coeficiente de determinação ajustado para (30) tem-se

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{234 - 1}{234 - 2 - 1} \right) (1 - R^2) = 0,8396$$

Analisando este resultado, verifica-se que ocorreu uma ligeira diminuição do coeficiente de determinação ajustado com a adição da variável H , o que significa que esta não é necessária para o modelo matemático. Este facto aponta para a utilização de modelo de regressão linear simples

$$P_{off} = \beta_0 + \beta_1 N \quad (31)$$

logo

$$P_{off} = -2,1723e^{-4} + 0,1464N$$

No modelo anterior quando $N = 0$ é obtida uma ocupação diferente de zero e negativa. Como tal, o modelo adequado é dado por

$$P_{off} = \beta_1 N \quad (32)$$

ou seja

$$P_{off} = 0,1456N \quad (33)$$

Na figura 46 é possível observar a reta de regressão obtida.

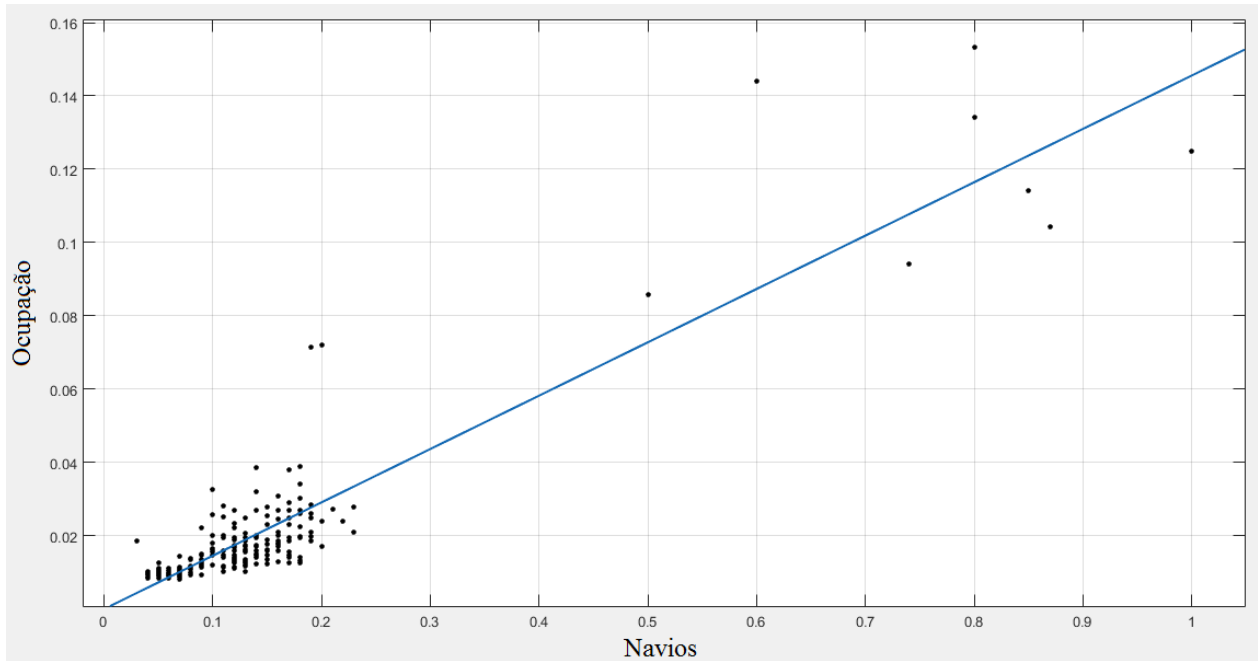


Figura 46 - Representação gráfica do modelo de regressão linear

A partir da expressão (33) é possível prever os valores estimados da ocupação do canal 16.

Antes de se concluir como sendo adequado o modelo, é necessário utilizar os testes estatísticos do subcapítulo anterior por forma a verificar a sua qualidade de ajuste (significância de regressão). Primeiramente, é realizado o teste de hipóteses documentado na secção 5.2.2, com vista a determinar o potencial uso de cada regressor no modelo de regressão.

Assim, as hipóteses a testar são:

$$H_0 : \beta_1 = 0;$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

É obtida a seguinte tabela Anova:

Causas de variação	Graus de liberdade (gl)	Soma de Quadrados	Média quadrática	F_0
Regressão	1	0,0848	0,0848	1212,3
Erro	$234 - 1 - 1 = 232$	0,0162	$6,9924e^{-5}$	
Total	$234 - 1 = 233$	0,1020		

Tabela 10 - Tabela ANOVA com dados recolhidos

Desta tabela, verifica-se que $f_0 = 1212,3$ e $f_0 > f_t = f_{0,05}[1,232] = 3,8415$, ou seja, é rejeitada a hipótese nula (H_0), para $\theta = 0,005$. Conclui-se com 95% de confiança que a ocupação do canal 16 está linearmente relacionada com o número de navios na área geográfica. Repare-se ainda que $f_{0,001}[1,232] = 10,83$, o que significa que se rejeita H_0 com 99,9% de confiança, tornando o modelo de regressão altamente significativo.

Por forma a ser obtida uma maior certeza na qualidade do modelo desenvolvido, utiliza-se o coeficiente de determinação ajustado dado por (19) e o $RMSE$ (20). Anteriormente foi obtido $R^2 = 0,8412$, podendo então ser concluído que cerca de 84% da ocupação do canal 16 é explicada pelo modelo. Por outro lado, $RMSE = 0,0083$, erro este que é satisfatório.

Para além destes testes, também é útil construir intervalos de confiança para o valor esperado da variável resposta. Considerando a observação 2 (Tabela 9) que corresponde a $N = 10$ tem-se

$$0,0189 \pm 1,960\sqrt{1,4085e^{-7}}$$

donde, é possível concluir que o valor da taxa de ocupação se encontra no intervalo $[1,3992; 1,5124]$, com uma probabilidade de 95%. Numa escala temporal, este intervalo é equivalente a $[50; 54]$ segundos.

Nessa observação, verifica-se uma taxa de ocupação de 1,61% (58 segundos) que, comparando com os valores previstos, origina uma diferença de quatro e oito segundos. O objetivo deste trabalho consiste na previsão da ocupação dos canais VHF do MMS, estimando as oportunidades de utilização dinâmica do espetro. Como tal, a diferença entre o valor real e o estimado não origina um erro significativo para o cumprimento deste mesmo objetivo. Tal facto permite também concluir que o erro calculado é satisfatório.

Relativamente à previsão de novos valores de ocupação, considere-se a seguinte tabela:

Navios (N)	Navios (Normalizado)	Ocupação ($P_{off}\%$)	Ocupação (segundos)
8	0,008	1,024	61
7	0,007	1,03	62
7	0,007	1,012	60
8	0,008	1,071	64
9	0,009	1,1089	66
8	0,008	1,077	64
7	0,007	1,04	62
7	0,007	1,089	65
8	0,008	1,142	68
8	0,008	1,171	70
7	0,007	1,031	62

Tabela 11 – Valores de ocupação do canal 16 obtidos experimentalmente

Os valores registados na tabela 11 foram obtidos experimentalmente, e serão utilizados para testar o modelo proposto. Pela equação (33), e tendo em conta a coluna dois da tabela 11, onde estão representados os valores normalizados dos navios, são obtidos os seguintes resultados:

Estimado			Verificado		Erro
Ocupação (Normalizado)	Ocupação (%)	Ocupação (segundos)	Ocupação (%)	Ocupação (segundos)	
0,0116465	1,1646535	70	1,024	61	0,140654
0,0101907	1,0190718	61	1,03	62	-0,01093
0,0101907	1,0190718	61	1,012	61	0,007072
0,0116465	1,1646535	70	1,071	64	0,093654
0,0131024	1,3102352	79	1,1089	67	0,201335
0,0116465	1,1646535	70	1,077	65	0,087654
0,0101907	1,0190718	61	1,04	62	-0,02093
0,0101907	1,0190718	61	1,089	65	-0,06993
0,0116465	1,1646535	69	1,142	68	0,022654
0,0116465	1,1646535	70	1,171	70	-0,00635
0,0101907	1,0190718	61	1,031	62	-0,01193

Tabela 12 – Erros de estimação do modelo proposto com base nos dados experimentais na tabela 11

Na tabela anterior, é possível observar os dados estimados com o modelo (33) e os dados verificados. Como observado anteriormente, os erros obtidos apresentam valores reduzidos (entre um a doze segundos), sendo $RMSE = 0,0868$. Em termos de ocupação dos canais, estes não são significativos, pois as previsões que deles resultam são satisfatórias.

Por último, e partindo da equação (25) (onde $\hat{\sigma} = 6,9924e^{-5}$), é possível verificar que existem 9 *outliers*, sendo o gráfico dos resíduos representado pela figura 47.

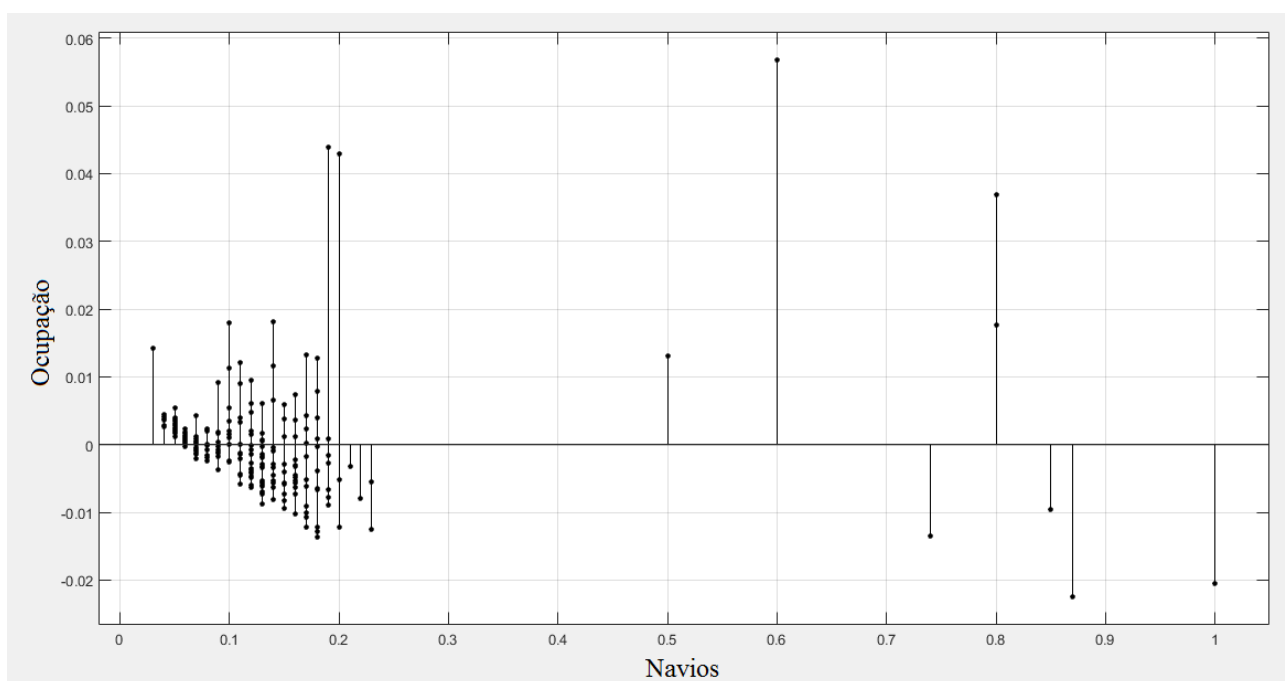


Figura 47 - Gráfico dos resíduos do modelo desenvolvido

5.3.2 – Aplicação do modelo para restantes canais do MMS

Através do ANEXO D é possível constatar que, para além do canal 16, existem outros canais com potencial de representarem as comunicações portuárias, e são eles o canal 8, 10, 12, 13, 14, 70, 71 e 78.

O modelo de regressão desenvolvido para o canal 16 pode também ser utilizado para estes canais, variando os coeficientes de regressão. Na Tabela 13 encontram-se, para cada um destes canais, os coeficientes de regressão e o respetivo erro do modelo.

Canal	Frequência (MHz)	β_1	RMSE
8	156,400	0,0170	0,0047
10	156,500	0,0093	0,0043
12	156,600	0,0081	0,0039
13	156,650	0,0202	0,0184
14	156,700	0,0208	0,0122
70	156,525	0,0141	0,0049
71	156,575	0,0152	0,0054
78	156,925	0,0166	0,0045

Tabela 13 - Resultados obtidos para os principais canais portuários do MMS

Como se pode observar pela tabela anterior, o modelo desenvolvido para o canal 16 também se adequa para os outros principais canais portuários do MMS. Os erros médios não variam significativamente entre cada um dos canais, o que sugere a existência de uma relação linear entre a ocupação e o número de navios na área.

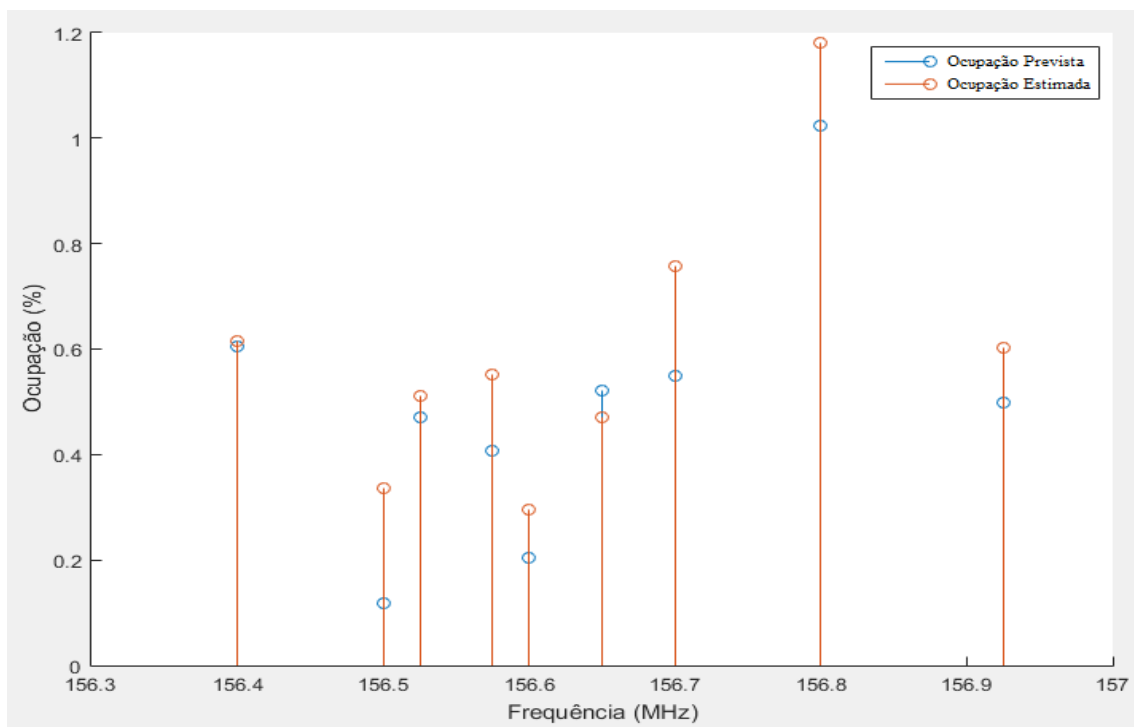


Figura 48 - Comparação dos valores reais e estimados da ocupação, através do modelo proposto (7 navios)

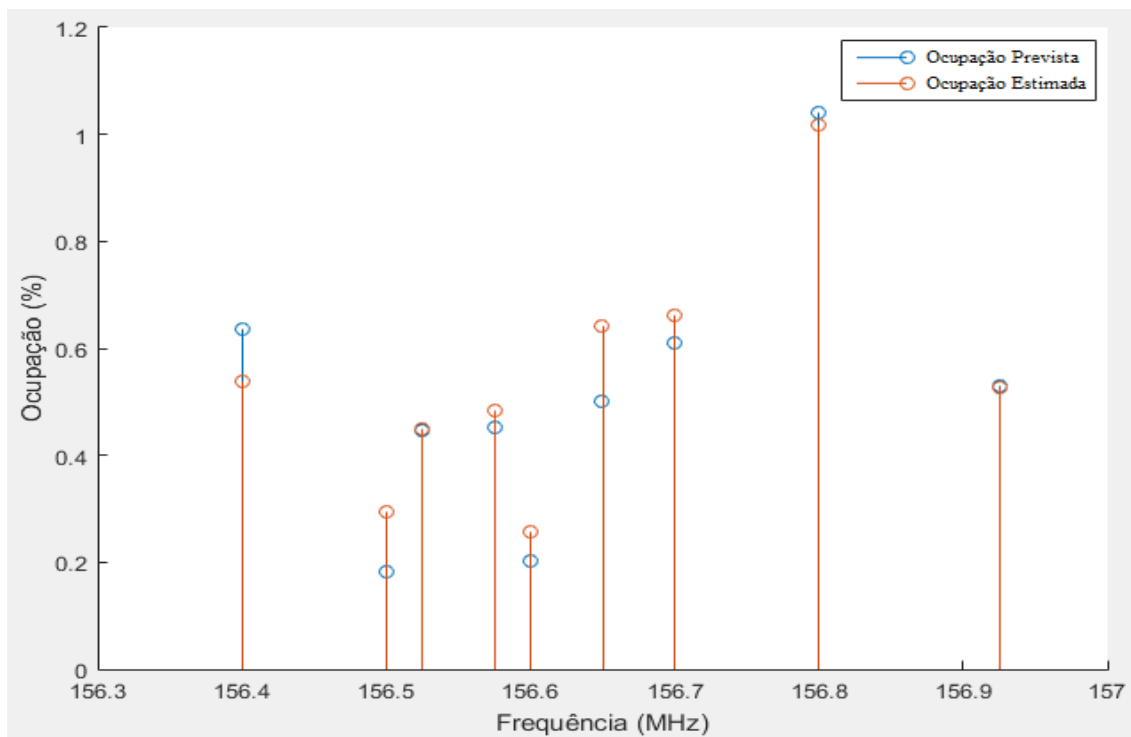


Figura 49 - Comparação dos valores reais e estimados da ocupação, através do modelo proposto (9 navios)

Nas duas figuras anteriores, é possível comparar os valores reais e os estimados com o modelo proposto, para os diferentes canais portuários do MMS. Para além da reduzida taxa de ocupação do espectro, é possível observar que ambos os valores se encontram próximos, indicando que o modelo de regressão linear permite explicar de uma forma satisfatória a ocupação dos canais VHF do MMS. O facto do primeiro caso apresentar um $RMSE = 0,1262$ e o segundo $RMSE = 0,07$, indica um ajuste satisfatório do modelo aos dados, visto estes valores serem reduzidos.

5.4 – Conclusão

Este capítulo abordou a teoria referente à regressão linear múltipla e a sua aplicação no caso em estudo. Na primeira parte foi estudada esta teoria, com especial incidência para a obtenção dos coeficientes de regressão que minimizam o valor do quadrado da norma dos resíduos e para a análise de variância, que permite avaliar o ajuste do modelo aos dados utilizados.

Posteriormente, com base nos dados experimentais recolhidos, foram utilizadas as técnicas apresentadas para desenvolver um modelo linear de previsão da ocupação do

canal 16. Inicialmente, nesta fase, partiu-se da utilização de duas variáveis explicativas (navios na área e horas do dia). Através do coeficiente de determinação foi concluído que a adição da variável H não trazia vantagens para o modelo de regressão, pois ocorria um decréscimo do valor deste coeficiente. Perante isto, foi proposta a utilização de um modelo de regressão linear simples, no qual a única variável explicativa é o número de navios.

Através da análise da variância foi possível concluir com 99,9% de confiança que a ocupação do canal 16 está linearmente relacionada com o número de navios na área. Foi também constatado que $RMSE = 0,0083$ para o modelo normalizado, e que a variável N permite explicar 84% da ocupação do canal 16.

Posteriormente, foram estimados diferentes resultados para o canal 16, tendo sido obtido um $RMSE = 0,0868$. Daqui, é possível concluir que os valores estimados encontram-se próximos dos valores previstos, logo o modelo adequa-se de uma forma satisfatória aos dados.

Por último, foi proposto o modelo desenvolvido para a descrição dos restantes canais VHF do MMS que melhor representam as comunicações portuárias. Ficou assim comprovado que este modelo permite descrever satisfatoriamente a ocupação dos referidos canais, com erros entre 0,0039 e 0,0184.

CAPITULO VI

Conclusões e Recomendações

A presente dissertação de mestrado descreve o estudo da ocupação do espectro radioelétrico, mais especificamente na banda do MMS. O principal objetivo foi avaliar a ocupação destes canais e respetivas oportunidades para utilização dinâmica do espectro. Assim, é proposto um modelo matemático que permite estimar a ocupação e respetivas oportunidades de utilização do MMS.

Durante este trabalho, foi analisado o estado atual do MMS, com especial foco para as problemáticas do espectro ser contíguo e de seguir uma política de alocação estática. Perante este cenário, estudou-se a tecnologia de CR, que, em 1999, surge como a solução para o referido tipo de alocação do espectro, permitindo um acesso dinâmico através da utilização das frequências que se encontrem livres. Verificou-se o estado de arte nesta temática, fazendo referência a uma proposta de tese de doutoramento para a utilização dos CR para suportarem serviços de banda larga no MMS, através da sua capacidade de acesso dinâmico ao espectro e de técnicas de múltiplas portadoras NC-OFDM [1], bem como o estudo [3] no qual foi desenvolvido um SDR com base no pressuposto anteriormente.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessário um equipamento de monitorização. Assim, e devido ao tempo disponível para conclusão do trabalho ser limitado, foi utilizado o SDR desenvolvido em [3]. Deste modo, no capítulo 3 foi analisada a técnica de deteção de energia desenvolvida em [3]. Foi também descrita uma rotina que permite detetar o início e fim de cada transmissão, permitindo avaliar a percentagem de tempo que os canais se encontram ocupados. Por forma a cumprir com o objetivo inicialmente proposto, foi ainda estudado um recetor AIS que ao receber estas mensagens, é capaz de as descodificar e determinar o número de navios presentes a uma certa hora, na área geográfica em questão.

Posteriormente, foi utilizado este equipamento para trabalho de campo, o qual consistiu na monitorização do MMS. Com estas medidas foi possível demonstrar que a banda de VHF do MMS se encontra com uma taxa de utilização bastante reduzida. Este

facto comprova a necessidade de alteração das políticas de alocação do espectro, bem como a existência de oportunidades para a implementação de CR. Para além disso, esta recolha permitiu criar uma base de dados relativa ao MMS na zona do porto de Lisboa, a qual poderá ser útil em trabalhos futuros.

Por fim, no capítulo 5, foi utilizada esta base de dados para o desenvolvimento de um modelo matemático para estimar a ocupação dos canais do MMS do porto de Lisboa. Durante este capítulo, foi rejeitada a hipótese da inclusão de uma variável referente às horas, pois a sua adição ao modelo não contribuía para o ajuste dos dados. Assim, foi apenas considerado o número de navios como variável independente, sendo obtido um modelo de regressão linear simples. A escolha da utilização deste tipo de regressão centra-se na sua simplicidade de implementação e no facto de a distribuição das amostras apresentar um comportamento linear. Escolhido o modelo, foram utilizados diversos testes estatísticos por forma a avaliar a qualidade do respetivo ajustamento.

Destes testes, conclui-se que $R^2 = 0,8402$, ou seja, o número de navios permite explicar 84% da ocupação dos canais VHF do MMS do porto de Lisboa com um erro médio normalizado de 1% ($RMSE = 0,0083$). Verificou-se que os erros obtidos na estimativa de alguns valores geravam desvios de um a doze segundos. Estes desvios não são significativos, permitindo obter uma estimativa concreta da ocupação futura do MMS.

Este trabalho permitiu obter um primeiro modelo para previsão das oportunidades para utilização dinâmica do espectro. Contudo, existem trabalhos futuros que podem ser realizados, de acordo com as seguintes recomendações:

- Técnicas de *spectrum sensing*:
 - Neste trabalho foi utilizada a técnica de deteção de energia, pois é a mais simples de implementar, exigindo menores requisitos computacionais. No entanto, e como foi constatado neste trabalho, existem técnicas com maior sensibilidade a erros e com maior robustez na incerteza de ruído. Como tal, sugere-se a implementação de outras técnicas de monitorização, comparando os seus resultados com o referido detetor de energia;
- Monitorização do espectro:
 - Realizar uma monitorização do MMS em diferentes estações costeiras país, por forma a enriquecer a base de dados;

- Esta monitorização irá permitir avaliar a ocupação do espetro em Portugal, podendo contribuir para a defesa da alteração das políticas de gestão do espetro, bem como a implementação dos CR;
- Aumento da eficácia do modelo de regressão:
 - Através da monitorização referida anteriormente, é possível obter um modelo matemático para estimar a taxa de ocupação da banda de VHF do MMS em Portugal;
 - A análise individualizada das previsões com erros mais significativos e dos *outliers* poderá traduzir-se na proposta de novas variáveis explicativas da ocupação. A análise anterior poderá alternativamente conduzir à introdução de pequenas correções nas previsões, associadas às condições climatéricas e características da localização em que se procura estimar a ocupação (proximidade de porto).

REFERÊNCIAS

- [1] E. J. L. Bolas, “Broadband VHF Maritime Communications based on Cognitive Radio,” Universidade de Aveiro, 2012.
- [2] G. Capela, A. Rodrigues, J. Sanguino e E. Bolas, Implementação de um Rádio Definido por Software para Comunicações Marítimas Cognitivas, 2014.
- [3] G. G. Capela, Software Defined Radio Implementation for Maritime Cognitive Radio Communications, Dissertação de Mestrado do Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Outubro 2014.
- [4] Sourceforge, “Sourceforge,” [Online]. Available: <http://gnuais.sourceforge.net/>.
- [5] “Portaria nº 630/2002 de 12 de Junho”.
- [6] C. T. Authority, “Guide to Applicants for a Maritime ICT (Ship Radio Station)”.
- [7] “Autoridade Nacional de Comunicações,” [Online]. Available: <http://www.anacom.pt/render.jsp?categoryId=1680>.
- [8] J. P. e. a. Borrego, “Novos Desafios à Monitorização e Controlo do Espetro, na Perspetiva dos Sistemas de Medida,” 2012, pp. 1-7.
- [9] “International Telecommunication Union,” [Online]. Available: <http://www.itu.int/en/about/Pages/overview.aspx>.
- [10] E. Bolas, N. B. d. Carvalho, J. N. Vieira e P. M. d. Oliveira, “Opportunistic Usage of Maritime VHF Band—Deployment Challenges for a New Regulatory Framework,” *Wireless Engineering and Technology*, Novembro 2013.
- [11] A. M. Balieiro, *Handoff De Espectro Em Redes Baseadas Em Rádio Cognitivo utilizando Redes Neurais Artificiais*, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.
- [12] E. Bolas, N. B. d. Carvalho, N. J. Vieira e P. M. d. Oliveira, “Maritime Cognitive Radio Networks: Boosting e-Navigation towards Service Oriented Architectures”.
- [13] C. Tang, “Spectrum Sensing for Cognitive Maritime VHF Networks”.
- [14] J. R. M. D. Elias, Sistema de Apoio à Navegação baseado em Automatic Identification System, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Dec. 2010.

- [15] J. MITOLA, “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications,” *IEEE International*, pp. 3-10, 1999.
- [16] S. HAYKIN, “Brain empowered wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in*, vol. 23, pp. 201-219, Fevereiro 2005.
- [17] P. S. COUTINHO, *DETECÇÃO DE ENERGIA PARA RÁDIOS COGNITIVOS USANDO GNU RADIO E USRP2*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [18] FCC, *Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies*, Washington, D.C, 2003.
- [19] E. P. L. ALMEIDA, . Desenvolvimento de Técnica de Sensoriamento do Espectro Embasada em Detecção de Energia para Aplicações em Sistemas Rádio-Cognitivos, Brasília: Dissertação de Mestrado da Universidade de Brasília, 2010.
- [20] P. M. S. YOSHIOKA, Uma Abordagem Para Otimização Do Período De Sensoriamento Em Rádio Cognitivo Com Algoritmo Genético Multiobjetivo, Belém: Universidade Federal do Pará, 2001.
- [21] J. S. Neto, Contribuições ao Estudo sobre Sensoriamento Espectral Baseado em Autovalor para Aplicações de Rádio Cognitivo, Santa Rita do Sapucaí, Oct. 2011.
- [22] W.-Y. Lee e I. F. Akyildiz, Optimal Spectrum Sensing Framework for Cognitive Radio Networks, 10 ed., vol. 7, Oct. 2008.
- [23] T. Yücek e H. Arslan, “A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications,” *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 1, 2009.
- [24] S. Shankar, C. Cordeiro e K. Challapa, “Spectrum Agile Radios: Utilization and Sensing Architectures”.
- [25] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee e M. C. Vuran, “NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive generation/dynamic spectrum access/cognitive,” *Computer Networks*, vol. 50, pp. 2127-2159, 2006.
- [26] D. Noguét, “Sensing techniques for cognitive radio-state of the art and trends,” 2009.

- [27] M. V. d. Lima, Medição de Ocupação Espectral e Estudo das Oportunidades de Espectro para Uso de Sistemas Radio Cognitivo, Dissertação de Mestrado da Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Fev. 2013.
- [28] P. J. Alvarez, Experimental Study on Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks, Dissertação de Mestrado do Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Dec. 2011.
- [29] R. Rashid, Spectrum Sensing Measurement using GNU Radio and USRP Software Radio Platform, 2011.
- [30] S. Maharjan, Distributed Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks with Heterogeneous Traffic.
- [31] A. Crohas e J. N. Laneman, Practical implementation of a cognitive radio system for dynamic spectrum access, Jul. 2008.
- [32] F. Paisana e A. Rodrigues, Implementação Alternativa de um Detector Cicloestacionário.
- [33] “Scribd,,” [Online]. Available: <http://pt.scribd.com/doc/7885291/Aula-9-Revisao-e-Leakage#scribd>. [Acedido em 2015].
- [34] “topographic-map.com,,” [Online]. Available: <http://pt-pt.topographic-map.com/places/Lisboa-8900752/>. [Acedido em 8 Agosto 2015].
- [35] S. C. A. Rodrigues, Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações, Universidade da Beira Interior - Covilhã, 2012.
- [36] M. L. Morgado, M. F. Teodoro e T. P. Perdicoulis, Métodos Estatísticos em Ciências Biomédicas - Série Didáctica Ciências Aplicadas 400, Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2010.
- [37] H. Pina, Métodos Numéricos, Lisboa: McGraw-Hill De Portugal, Lda., 1995.
- [38] Complementos de Matemática, Escola Superior de Tecnologia - Universidade do Algarve, 2007.
- [39] E. L. Crow, F. A. Davis e M. W. Maxfield, Statistics Manual, Nova Iorque: Dover Publications, INC., 1960.
- [40] “Manchester 1824 - School of Mathematics,,” [Online]. Available: <http://www.maths.manchester.ac.uk/~cds/internal/tables/tdist.pdf>. [Acedido em 29 Julho 2015].

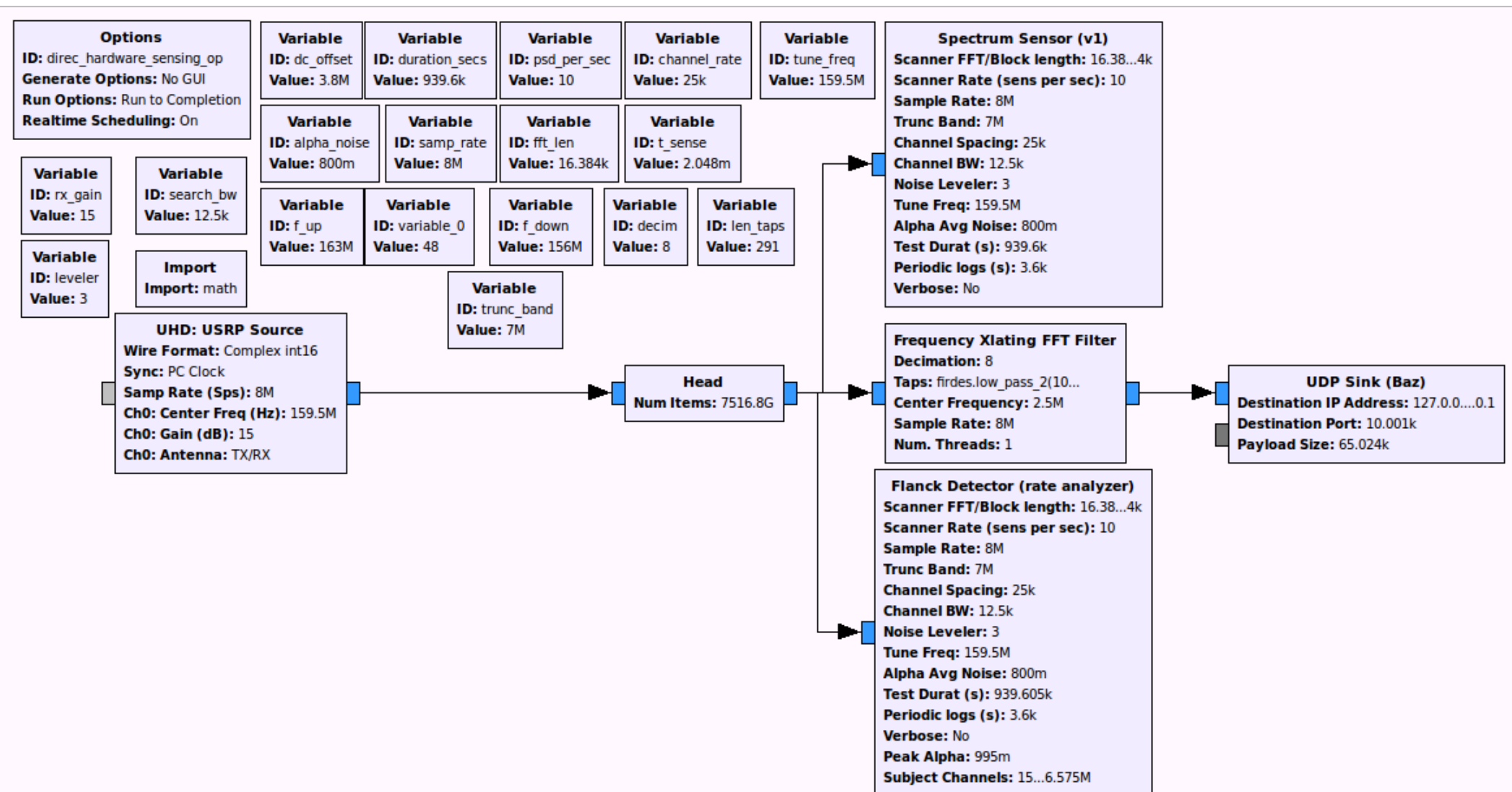
- [41] “Instituto Hidrográfico,” [Online]. Available: http://websig.hidrografico.pt/www/content/produtos/HISkipper/Servico_movel_maritimo_PlanoNacionalComunicacoesVHF.pdf. [Acedido em 30 Julho 2015].
- [42] “Ettus Research,” [Online]. Available: <http://www.ettus.com/>.
- [43] “Google Maps,” [Online]. Available: <https://www.google.pt/maps/place/Escola+Naval/@38.6623966,-9.1468423,306m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0xd193507bff61a07:0xfbfd8dc464c319f9!6m1!1e1>. [Acedido em 15 Março 2015].
- [44] “Google Maps,” 2015. [Online]. Available: <https://www.google.pt/maps/place/Escola+Naval/@38.6564994,-9.1378354,227m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0xd193507bff61a07:0xfbfd8dc464c319f9!6m1!1e1>.
- [45] “Vishay Precision Group,” Novembro 2010. [Online]. Available: <http://www.vishaypg.com/docs/11067/tn517.pdf>. [Acedido em 16 Julho 2015].
- [46] [Online]. Available: <http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>. [Acedido em Julho 2015].
- [47] “NMEA,” [Online]. Available: https://www.nmea.org/content/nmea_standards/nmea_0183_v_410.asp. [Acedido em Julho 2015].
- [48] “The Bosuns's Mate,” [Online]. Available: <http://www.bosunsmate.org/ais/>. [Acedido em Julho 2015].
- [49] “Barco à Vista,” 4 Março 2013. [Online]. Available: <http://barcoavista.blogspot.pt/2013/02/blaus-vii-um-veleiro-de-apoio-ao-treino.html>. [Acedido em 7 Agosto 2015].
- [50] “Google Earth,” [Online]. Available: <https://www.google.pt/maps/place/Escola+Naval/@38.6686334,-9.2929815,15792m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0xd193507bff61a07:0xfbfd8dc464c319f9>. [Acedido em 7 Agosto 2015].
- [51] “Google Earth,” [Online]. Available: <https://www.google.pt/maps/place/Fonte+da+Telha,+2825+Costa+da+Caparica/@38.5499658,->

9.1842163,6946m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0xd1eb4cddef39a5d:0x2600ebb
ed3cca3e2. [Acedido em 8 Agosto 2015].

- [52] “Google Maps,” [Online]. Available:
[https://www.google.pt/maps/@38.6810618,-
9.3667587,10327m/data=!3m1!1e3](https://www.google.pt/maps/@38.6810618,-9.3667587,10327m/data=!3m1!1e3). [Acedido em 8 Agosto 2015].
- [53] M. Fitton, “Principles of Digital Modulation,” Toshiba Telecommunications
Research Lab.

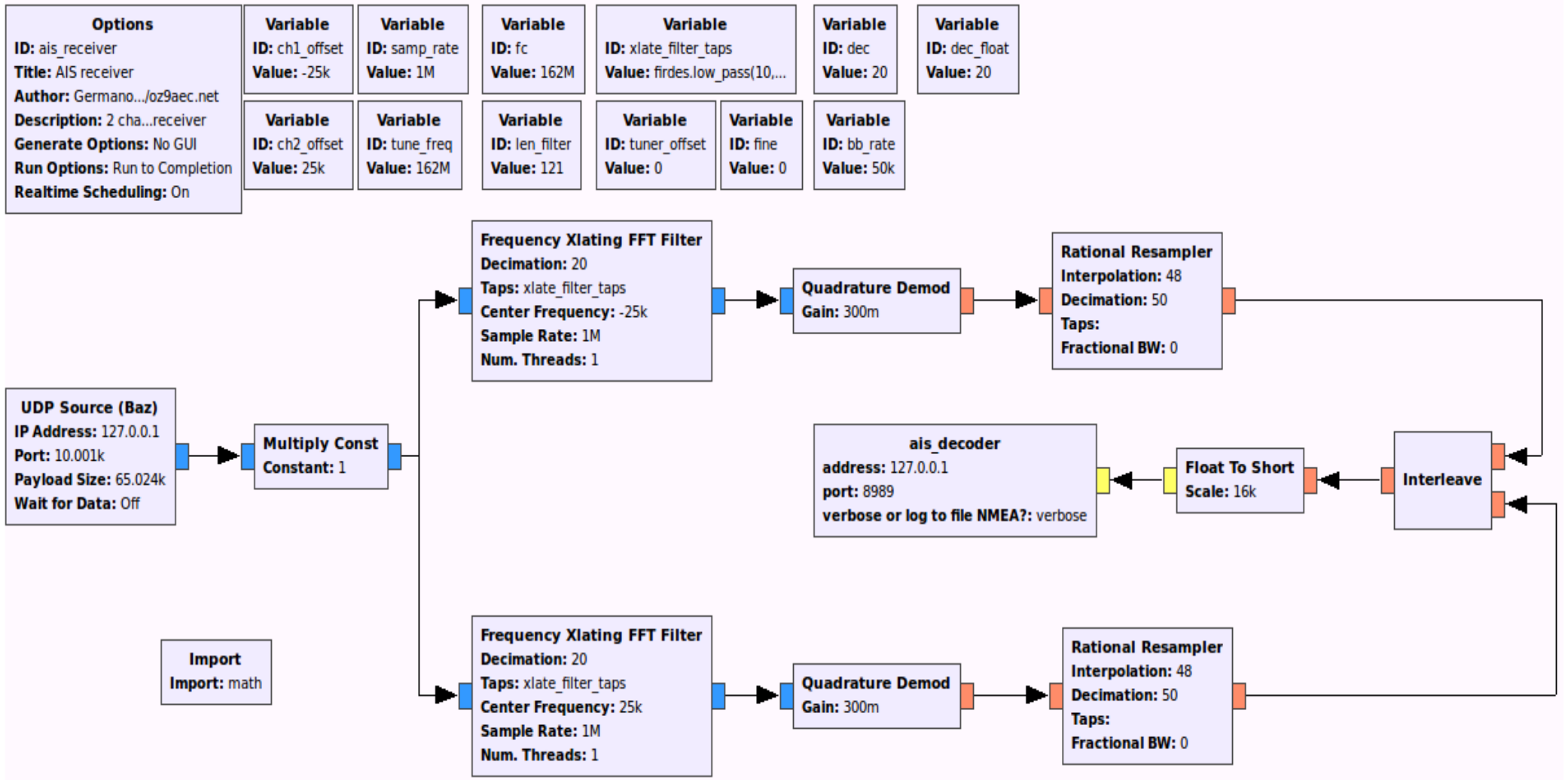
APÊNDICE A

DIAGRAMA DE FLUXO DO GNU RADIO PARA MONITORIZAÇÃO



APÊNDICE B

DIAGRAMA DE FLUXO DO RECETOR AIS



APÊNDICE C

ROTINA MATLAB PARA DEFINIÇÃO DO TEMPO DE TRANSMISSÃO


```

test_duration = 600000 %1 min = 60000
transitions = 5
occupancy = 0.3
ocupado = test_duration * occupancy
for i=1:transitions

    r = (test_duration).*rand(5,1)

end
y = 0
time_tx_ = sort(r)
duration_t = [];
tt = 0
for i=1:transitions

    t1 =time_tx_(i)

    if i < transitions
        t2 = time_tx_(i+1)
        t = (t2-t1).*rand(1,1)+t1

        x = t-t1

        y = y + x

    else
        %t2 = test_duration
        %t = (t2-t1).*rand(1,1)+t1
        tt = ocupado - y
        x = tt

    end
    y = y + tt

    v(i)= x

end

if (r(5) + v(5)) > test_duration
    sobra = v(5) - (test_duration - r(5))
    v(5) = v(5) - sobra

    i = 1

    while sobra > 0
        if v(i) < r(i+1)
            if sobra < (r(i+1) - v(i))
                v(i) = v(i) + sobra
            else
                if r(i) + v(i) == r(i+1)
                    i = i + 1
                else
                    xx = r(i+1) - v(i)

```

```

        sobra = sobra - xx
        i = i + 1
    end
end
end
end
end
time_tx= time_tx_'
Matrix_1 = [time_tx;v]

Matrix = Matrix_1'

file = fopen('Mymatrix.txt','wt'); % Cria o ficheiro de escrita em
formato txt com o nome "Mymatrix"
for i = 1:length(Matrix)
    for j=1:2
        fprintf(file,'%d',Matrix(i,j)); % Escreve em notação de
numero inteiro alternadamente o tempo de inicio de PTT (linhas
pares) e a duração do PTT (linhas impares)
        fprintf(file,'\n'); % fim de linha
    end
end
fclose(file);

```

APÊNDICE D

MODELO DE REGRESSÃO LINEAR EM MATLAB


```

% Carregar ficheiros de dados e teste
load tudo.mat          % tudo.mat é uma matriz de 3 colunas (horas,
navios, ocupação) e n linhas
load teste.mat

x = tudo(:,2)

y = tudo(:,1)

z = tudo(:,3)

% ----- Determinar Coeficientes da Regressão Linear -----
---
norm_horas = y / 23 % normalizar horas
norm_nav = x / max(x) % normalizar navios
norm_poff = z / 100 % normalizar poff

tudo_norm(:,1) = norm_nav % atribuição dos valores anteriores a uma
nova matriz
tudo_norm(:,2) = norm_horas
tudo_norm(:,3) = norm_poff

% A = B*C

% matriz A - ocupação
A(:,1) = tudo_norm(:,3)

% matriz B - dados de navios
Bb(:,1) = norm_nav

% matriz C - coeficientes A
C = sym('C', [1 1])

% determinar coeficientes
transposta = Bb.' % matriz transposta
BB = Bb.' * Bb
inversor = inv(BB) % matriz inversa
C = inv(BB) * Bb.' * A % determinação dos coeficientes

% Z = AX - > Tipo de equação pretendida (Eq. linear simples)

Z = C(1,1) * norm_nav % normalizado

tamanho = size(norm_poff,1) % tamanho do array do poff

% RMSE - raiz quadrada do erro quadrático médio
erro = Z - norm_poff
sqerr = erro.^2
msqerro = mean(sqerr)
rmse_modelo = sqrt(msqerro)

ZZ = Z*100

```

```

eroo = ZZ - z
sq = eroo.^2
msq = mean(sq)
RMSEE = sqrt(msq)

% Análise da Variância
SQE = sum(erro.^2) % Soma do quadrado dos
resíduos
SQR = sum((Z - mean(norm_poff)).^2) % soma dos quadrados da
diferença entre a médias das observações e o valor estimado
SQT = sum((norm_poff - mean(norm_poff)).^2) % Soma total dos quadrados
MQR = SQR / 1
MQE = SQE / (tamanho-1-1)

F0 = (SQR/1) / (SQE / (tamanho-1-1))

R2 = 1 - SQE/SQT % coeficiente de
determinação
R2a = 1 - ((tamanho-1)/(tamanho-1-1)) * (1 - R2) % coeficiente de
determinação ajustado

delta = SQE / (tamanho) % Média do quadrado dos erros

t = 1.960 % pela tabela da função t

% Intervalo de confiança Z a 95%

for j=1:tamanho
    x0(1,1) = tudo_norm(j,1)
    u = x0 * C

    v = delta * x0 * inversor * x0.'
    sqrt(v)
    intervalo(j,2) = u + 1.960 * sqrt(v) % intervalo normalizado
    intervalo(j,1) = u - 1.960 * sqrt(v)

    interval(j,2) = intervalo(j,2) * 100
    interval(j,1) = intervalo(j,1) * 100
end

d = erro / delta
Soma = sum(x) + sum(y)
z1 = C(1,1) * sum(x)

% Predição novas observações
for k=1:tamanho
    %x1(1,1) = 1
    x1(1,1) = tudo_norm(k,1)
    % x1(1,3) = tudo_norm(k,2)
    U = x1 * C

    v1 = x1 * inversor * x1.'

    predicao(k,1) = U - 1.960 * sqrt(delta * (1+v1)) % intervalo
normalizado

```

```

    predicao(k,2) = U + 1.960 * sqrt(delta * (1+v1))

    predict(k,2) = predicao(k,2) * 100
    predict(k,1) = predicao(k,1) * 100
end

% Residuos e contagem de outliers
d = erro / sqrt(MQE)

outlier = 0
for l=1:tamanho
    if d(l) < (-2) | d(l) > (2)
        outlier = outlier + 1
    end
end

%----- TESTAR MODELO -----

% Normalizar dados de teste
Tnorm(:,2) = teste(:,2) / max(x)
Tnorm(:,1) = teste(:,1) / 23
Tnorm(:,3) = teste(:,3) / 100

% substituir dados no modelo
for i=1:size(teste,1)

    W = C(1,1) * Tnorm(i,2) % Está normalizado
    teste(i,6) = W
    POFF = W * 100
    teste(i,4) = POFF

    Erro = teste(i,4) - teste(i,3)
    teste(i,5) = Erro

end

SQERR = teste(:,5).^2
msqerr = mean(SQERR)
RMSE = sqrt(msqerr)

sqe = sum(SQERR)

```


APÊNDICE E

DADOS RECOLHIDOS

Nº da observação	Horas do dia (H)	Navios (N)	Ocupação (Poff, %)
1	11	17	2,7
2	12	16	2,01
3	13	14	3,2
4	14	15	1,9
5	15	16	2,7
6	16	17	2,5
7	17	18	2,6
8	18	16	1,8
9	19	15	1,9
10	20	15	1,6
11	21	13	1,33
12	22	12	1,38
13	23	14	1,4
14	1	14	1,22
15	3	11	1,147
16	5	9	1,28
17	7	13	1,61
18	9	15	2,56
19	21	23	2,8
20	22	23	2,1
21	23	18	1,98
22	0	15	1,78
23	1	15	1,62
24	2	14	1,58
25	3	16	1,76
26	4	19	1,87
27	5	17	1,4
28	6	17	1,46
29	7	13	1,3
30	8	13	1,36
31	9	16	2,1
32	10	19	2,85
33	11	19	2,5
34	12	16	1,87
35	13	17	1,96
36	14	16	2,02
37	15	16	2,45
38	16	18	2,7
39	17	19	1,98
40	18	21	2,74
41	19	18	3,01
42	20	17	1,86
43	21	18	1,4
44	12	100	12,49996

45	13	80	13,41663333
46	14	60	14,41663333
47	15	80	15,3333
48	8	50	8,5833
49	9	74	9,41663333
50	10	87	10,41663333
51	11	85	11,41663333
52	16	17	2,9
53	17	20	2,4
54	18	20	1,7
55	19	19	2,6
56	20	18	1,96
57	21	16	2,1
58	22	12	1,67
59	23	13	1,6
60	0	14	2
61	1	12	1,35
62	2	8	1,38
63	3	8	1,38
64	4	8	1,39
65	5	10	1,55
66	6	11	1,4
67	7	13	1,34
68	8	13	1,7
69	9	13	1,71
70	10	13	1,56
71	11	12	2,35
72	12	13	2,5
73	13	13	1,94
74	14	3	1,86
75	15	15	2,78
76	16	17	3,8
77	17	18	2,24
78	18	16	1,7
79	19	14	1,95
80	20	14	1,75
81	21	13	1,57
82	22	12	2,7
83	23	10	2,58
84	0	11	2,51
85	1	10	1,61
86	2	9	1,47
87	3	8	1,36
88	4	7	1,44
89	5	9	1,5

90	6	10	1,46
91	7	11	1,46
92	8	10	1,66
93	9	10	1,8
94	10	12	1,95
95	11	11	1,939
96	12	10	2,002
97	13	12	2,23
98	14	13	2,06
99	15	14	3,85
100	16	11	2,81
101	17	13	1,87
102	18	12	1,9
103	19	10	3,25
104	20	11	1,47
105	21	12	1,6
106	22	12	1,73
107	23	9	2,22
108	0	10	1,61
109	1	11	1,6
110	2	8	0,98
111	3	8	1
112	4	9	1,2
113	5	9	1,34
114	6	14	1,47
115	7	22	2,4
116	8	20	7,2
117	9	19	7,15
118	10	18	3,4
119	11	16	3,07
120	12	16	1,85
121	13	14	2,7
122	19	17	1,56
123	20	15	1,46
124	21	13	1,2
125	22	12	1,47
126	23	13	1,32
127	0	13	1,18
128	1	12	1,26
129	2	9	1,18
130	3	10	1,2
131	4	10	1,21
132	5	11	1,16
133	6	12	1,28
134	12	11	2

135	13	13	1,96
136	14	14	1,7
137	15	16	1,6
138	16	17	2,3
139	17	19	2,1
140	18	18	1,33
141	19	17	1,25
142	20	16	1,3
143	21	15	1,24
144	22	15	1,36
145	23	13	1,27
146	0	13	1,19
147	1	12	1,12
148	2	12	1,14
149	3	11	1,16
150	4	13	1,02
151	5	11	1,025
152	6	13	1,16
153	7	14	1,23
154	8	18	1,26
155	9	15	2,3
156	10	18	3,9
157	11	16	2,45
158	12	14	1,5
159	13	12	1,4
160	14	12	1,32
161	15	13	1,75
162	16	5	1,014
163	17	7	1,06
164	18	6	1,053
165	19	5	0,9699
166	20	5	1,079
167	21	4	1,0235
168	22	5	1,039
169	23	5	0,9239
170	0	6	1,005
171	1	5	1,116
172	2	5	1,07
173	3	5	1,095
174	4	4	0,9878
175	5	5	1,102
176	6	6	1,099
177	7	7	0,9683
178	8	7	0,9594
179	9	7	0,9176

180	10	5	0,8961
181	11	5	1,266
182	12	5	0,946
183	13	5	1,0016
184	14	7	1,145
185	16	7	1,073
186	17	8	1,095
187	18	8	1,158
188	19	7	1,055
189	20	6	0,9884
190	21	5	0,9644
191	22	7	1,037
192	23	8	1,003
193	0	6	0,9198
194	1	4	0,9444
195	2	5	1,081
196	3	5	0,85
197	4	5	0,9796
198	5	4	0,9564
199	6	6	0,9026
200	7	6	0,907
201	9	4	0,8419
202	10	7	0,9576
203	11	7	0,9449
204	12	7	1,022
205	13	9	1,229
206	14	5	0,9234
207	15	6	0,9744
208	16	6	0,9699
209	17	7	0,8897
210	20	6	0,9646
211	21	6	0,9635
212	22	9	1,132
213	23	7	0,9259
214	0	6	0,9464
215	1	6	0,9699
216	2	4	0,8655
217	3	5	0,9837
218	4	5	0,9051
219	5	7	0,9551
220	6	6	0,8948
221	7	6	0,8504
222	8	7	0,8099
223	9	6	0,8958
224	10	8	0,9225

225	11	6	0,842
226	12	9	0,9322
227	13	8	0,9279
228	14	8	1,17
229	15	7	1,1
230	16	7	0,9
231	17	6	1,048
232	18	6	0,902
233	19	5	1,025
234	20	6	1,003

ANEXO A

ALOCAÇÃO DO ESPETRO EM PORTUGAL

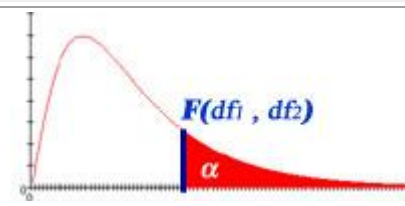
Bandas de Frequência (MHz)	Serviços de Rádio	Aplicações	Espaçamento (kHz)
156,0125 - 157,4375	MMS	Comunicações Marítimas	25
156,525 - 156,525	MMS	DSC	-
157,4325 - 158,0125	MMS	Comunicações Marítimas	25
158,050 - 160,600	SMT	Rádios Móveis Privados	12,5
160,6125 - 162,3375	MMS	Comunicações Marítimas	25
161,975 - 161,975	Radionavegação Marítima	AIS	25
162,025 - 162,025	SMT	AIS	25
162,650 - 169,400	SMT	Rádios Móveis Privados	12,5
169,175 - 169,175	-	<i>On-Site Paging</i>	25
169,400 - 169,475	-	-	50
169,4125 - 169,4625	-	Ajudas de Emparelhamento	50
169,475 - 169,4875	-	Alarmes Sociais	12,5
169,4875 - 169,5875	-	Ajudas de Emparelhamento	50
169,5875 - 169,600	-	Alarmes Sociais	12,5
169,800 - 173,9875	SMT	Rádios Móveis Privados	12,5

Adaptado de: [3]

ANEXO B

TABELA DE DISTRIBUIÇÃO F

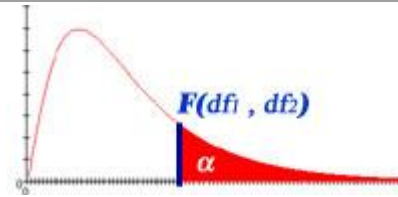
F Table for $\alpha = 0.05$



/	df ₁ =1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
df ₂ =1	161.4476	199.5000	215.7073	224.5832	230.1619	233.9860	236.768 4	238.882 7	240.543 3	241.881 7	243.906 0	245.949 9	248.013 1	249.051 8	250.095 1	251.143 2	252.195 7	253.252 9	254.314 4
2	18.5128	19.0000	19.1643	19.2468	19.2964	19.3295	19.3532	19.3710	19.3848	19.3959	19.4125	19.4291	19.4458	19.4541	19.4624	19.4707	19.4791	19.4874	19.4957
3	10.1280	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123	8.7855	8.7446	8.7029	8.6602	8.6385	8.6166	8.5944	8.5720	8.5494	8.5264
4	7.7086	6.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	5.9988	5.9644	5.9117	5.8578	5.8025	5.7744	5.7459	5.7170	5.6877	5.6581	5.6281
5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725	4.7351	4.6777	4.6188	4.5581	4.5272	4.4957	4.4638	4.4314	4.3985	4.3650
6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990	4.0600	3.9999	3.9381	3.8742	3.8415	3.8082	3.7743	3.7398	3.7047	3.6689
7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767	3.6365	3.5747	3.5107	3.4445	3.4105	3.3758	3.3404	3.3043	3.2674	3.2298
8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881	3.3472	3.2839	3.2184	3.1503	3.1152	3.0794	3.0428	3.0053	2.9669	2.9276
9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789	3.1373	3.0729	3.0061	2.9365	2.9005	2.8637	2.8259	2.7872	2.7475	2.7067
10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204	2.9782	2.9130	2.8450	2.7740	2.7372	2.6996	2.6609	2.6211	2.5801	2.5379
11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962	2.8536	2.7876	2.7186	2.6464	2.6090	2.5705	2.5309	2.4901	2.4480	2.4045
12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964	2.7534	2.6866	2.6169	2.5436	2.5055	2.4663	2.4259	2.3842	2.3410	2.2962
13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144	2.6710	2.6037	2.5331	2.4589	2.4202	2.3803	2.3392	2.2966	2.2524	2.2064
14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458	2.6022	2.5342	2.4630	2.3879	2.3487	2.3082	2.2664	2.2229	2.1778	2.1307
15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876	2.5437	2.4753	2.4034	2.3275	2.2878	2.2468	2.2043	2.1601	2.1141	2.0658
16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377	2.4935	2.4247	2.3522	2.2756	2.2354	2.1938	2.1507	2.1058	2.0589	2.0096
17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943	2.4499	2.3807	2.3077	2.2304	2.1898	2.1477	2.1040	2.0584	2.0107	1.9604
18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563	2.4117	2.3421	2.2686	2.1906	2.1497	2.1071	2.0629	2.0166	1.9681	1.9168
19	4.3807	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227	2.3779	2.3080	2.2341	2.1555	2.1141	2.0712	2.0264	1.9795	1.9302	1.8780
20	4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928	2.3479	2.2776	2.2033	2.1242	2.0825	2.0391	1.9938	1.9464	1.8963	1.8432

21	4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660	2.3210	2.2504	2.1757	2.0960	2.0540	2.0102	1.9645	1.9165	1.8657	1.8117
22	4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419	2.2967	2.2258	2.1508	2.0707	2.0283	1.9842	1.9380	1.8894	1.8380	1.7831
23	4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201	2.2747	2.2036	2.1282	2.0476	2.0050	1.9605	1.9139	1.8648	1.8128	1.7570
24	4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002	2.2547	2.1834	2.1077	2.0267	1.9838	1.9390	1.8920	1.8424	1.7896	1.7330
25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821	2.2365	2.1649	2.0889	2.0075	1.9643	1.9192	1.8718	1.8217	1.7684	1.7110
26	4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655	2.2197	2.1479	2.0716	1.9898	1.9464	1.9010	1.8533	1.8027	1.7488	1.6906
27	4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501	2.2043	2.1323	2.0558	1.9736	1.9299	1.8842	1.8361	1.7851	1.7306	1.6717
28	4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360	2.1900	2.1179	2.0411	1.9586	1.9147	1.8687	1.8203	1.7689	1.7138	1.6541
29	4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229	2.1768	2.1045	2.0275	1.9446	1.9005	1.8543	1.8055	1.7537	1.6981	1.6376
30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107	2.1646	2.0921	2.0148	1.9317	1.8874	1.8409	1.7918	1.7396	1.6835	1.6223
40	4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240	2.0772	2.0035	1.9245	1.8389	1.7929	1.7444	1.6928	1.6373	1.5766	1.5089
60	4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401	1.9926	1.9174	1.8364	1.7480	1.7001	1.6491	1.5943	1.5343	1.4673	1.3893
120	3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588	1.9105	1.8337	1.7505	1.6587	1.6084	1.5543	1.4952	1.4290	1.3519	1.2539
∞	3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799	1.8307	1.7522	1.6664	1.5705	1.5173	1.4591	1.3940	1.3180	1.2214	1.0000

F Table for $\alpha = 0.01$



/	df ₁ =1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
df ₂ =1	4052.181	4999.500	5403.352	5624.583	5763.650	5858.986	5928.356	5981.070	6022.473	6055.847	6106.321	6157.285	6208.730	6234.631	6260.649	6286.782	6313.030	6339.391	6365.864
2	98.503	99.000	99.166	99.249	99.299	99.333	99.356	99.374	99.388	99.399	99.416	99.433	99.449	99.458	99.466	99.474	99.482	99.491	99.499
3	34.116	30.817	29.457	28.710	28.237	27.911	27.672	27.489	27.345	27.229	27.052	26.872	26.690	26.598	26.505	26.411	26.316	26.221	26.125
4	21.198	18.000	16.694	15.977	15.522	15.207	14.976	14.799	14.659	14.546	14.374	14.198	14.020	13.929	13.838	13.745	13.652	13.558	13.463
5	16.258	13.274	12.060	11.392	10.967	10.672	10.456	10.289	10.158	10.051	9.888	9.722	9.553	9.466	9.379	9.291	9.202	9.112	9.020
6	13.745	10.925	9.780	9.148	8.746	8.466	8.260	8.102	7.976	7.874	7.718	7.559	7.396	7.313	7.229	7.143	7.057	6.969	6.880
7	12.246	9.547	8.451	7.847	7.460	7.191	6.993	6.840	6.719	6.620	6.469	6.314	6.155	6.074	5.992	5.908	5.824	5.737	5.650
8	11.259	8.649	7.591	7.006	6.632	6.371	6.178	6.029	5.911	5.814	5.667	5.515	5.359	5.279	5.198	5.116	5.032	4.946	4.859
9	10.561	8.022	6.992	6.422	6.057	5.802	5.613	5.467	5.351	5.257	5.111	4.962	4.808	4.729	4.649	4.567	4.483	4.398	4.311
10	10.044	7.559	6.552	5.994	5.636	5.386	5.200	5.057	4.942	4.849	4.706	4.558	4.405	4.327	4.247	4.165	4.082	3.996	3.909
11	9.646	7.206	6.217	5.668	5.316	5.069	4.886	4.744	4.632	4.539	4.397	4.251	4.099	4.021	3.941	3.860	3.776	3.690	3.602
12	9.330	6.927	5.953	5.412	5.064	4.821	4.640	4.499	4.388	4.296	4.155	4.010	3.858	3.780	3.701	3.619	3.535	3.449	3.361
13	9.074	6.701	5.739	5.205	4.862	4.620	4.441	4.302	4.191	4.100	3.960	3.815	3.665	3.587	3.507	3.425	3.341	3.255	3.165
14	8.862	6.515	5.564	5.035	4.695	4.456	4.278	4.140	4.030	3.939	3.800	3.656	3.505	3.427	3.348	3.266	3.181	3.094	3.004
15	8.683	6.359	5.417	4.893	4.556	4.318	4.142	4.004	3.895	3.805	3.666	3.522	3.372	3.294	3.214	3.132	3.047	2.959	2.868
16	8.531	6.226	5.292	4.773	4.437	4.202	4.026	3.890	3.780	3.691	3.553	3.409	3.259	3.181	3.101	3.018	2.933	2.845	2.753
17	8.400	6.112	5.185	4.669	4.336	4.102	3.927	3.791	3.682	3.593	3.455	3.312	3.162	3.084	3.003	2.920	2.835	2.746	2.653
18	8.285	6.013	5.092	4.579	4.248	4.015	3.841	3.705	3.597	3.508	3.371	3.227	3.077	2.999	2.919	2.835	2.749	2.660	2.566

19	8.185	5.926	5.010	4.500	4.171	3.939	3.765	3.631	3.523	3.434	3.297	3.153	3.003	2.925	2.844	2.761	2.674	2.584	2.489
20	8.096	5.849	4.938	4.431	4.103	3.871	3.699	3.564	3.457	3.368	3.231	3.088	2.938	2.859	2.778	2.695	2.608	2.517	2.421
21	8.017	5.780	4.874	4.369	4.042	3.812	3.640	3.506	3.398	3.310	3.173	3.030	2.880	2.801	2.720	2.636	2.548	2.457	2.360
22	7.945	5.719	4.817	4.313	3.988	3.758	3.587	3.453	3.346	3.258	3.121	2.978	2.827	2.749	2.667	2.583	2.495	2.403	2.305
23	7.881	5.664	4.765	4.264	3.939	3.710	3.539	3.406	3.299	3.211	3.074	2.931	2.781	2.702	2.620	2.535	2.447	2.354	2.256
24	7.823	5.614	4.718	4.218	3.895	3.667	3.496	3.363	3.256	3.168	3.032	2.889	2.738	2.659	2.577	2.492	2.403	2.310	2.211
25	7.770	5.568	4.675	4.177	3.855	3.627	3.457	3.324	3.217	3.129	2.993	2.850	2.699	2.620	2.538	2.453	2.364	2.270	2.169
26	7.721	5.526	4.637	4.140	3.818	3.591	3.421	3.288	3.182	3.094	2.958	2.815	2.664	2.585	2.503	2.417	2.327	2.233	2.131
27	7.677	5.488	4.601	4.106	3.785	3.558	3.388	3.256	3.149	3.062	2.926	2.783	2.632	2.552	2.470	2.384	2.294	2.198	2.097
28	7.636	5.453	4.568	4.074	3.754	3.528	3.358	3.226	3.120	3.032	2.896	2.753	2.602	2.522	2.440	2.354	2.263	2.167	2.064
29	7.598	5.420	4.538	4.045	3.725	3.499	3.330	3.198	3.092	3.005	2.868	2.726	2.574	2.495	2.412	2.325	2.234	2.138	2.034
30	7.562	5.390	4.510	4.018	3.699	3.473	3.304	3.173	3.067	2.979	2.843	2.700	2.549	2.469	2.386	2.299	2.208	2.111	2.006
40	7.314	5.179	4.313	3.828	3.514	3.291	3.124	2.993	2.888	2.801	2.665	2.522	2.369	2.288	2.203	2.114	2.019	1.917	1.805
60	7.077	4.977	4.126	3.649	3.339	3.119	2.953	2.823	2.718	2.632	2.496	2.352	2.198	2.115	2.028	1.936	1.836	1.726	1.601
120	6.851	4.787	3.949	3.480	3.174	2.956	2.792	2.663	2.559	2.472	2.336	2.192	2.035	1.950	1.860	1.763	1.656	1.533	1.381
∞	6.635	4.605	3.782	3.319	3.017	2.802	2.639	2.511	2.407	2.321	2.185	2.039	1.878	1.791	1.696	1.592	1.473	1.325	1.000

	<i>Numerator degrees of freedom</i>																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	998.5	999.0	999.2	999.2	999.3	999.3	999.4	999.4	999.4	999.4	999.4	999.4	999.4	999.5	999.5	999.5	999.5	999.5	999.5
3	167.0	148.5	141.1	137.1	134.6	132.8	131.6	130.6	129.9	129.2	128.3	127.4	126.4	125.9	125.0	125.0	124.5	124.0	123.5
4	74.14	61.25	56.18	53.44	51.71	50.53	49.66	49.00	48.47	48.05	47.41	46.76	46.10	45.77	45.43	45.09	44.75	44.40	44.05
5	47.18	37.12	33.20	31.09	29.75	28.84	28.16	27.64	27.24	26.92	26.42	25.91	25.39	25.14	24.87	24.60	24.33	24.06	23.79
6	35.51	27.00	23.70	21.92	20.81	20.03	19.46	19.03	18.69	18.41	17.99	17.56	17.12	16.89	16.67	16.44	16.21	15.99	15.75
7	29.25	21.69	18.77	17.19	16.21	15.52	15.02	14.63	14.33	14.08	13.71	13.32	12.93	12.73	12.53	12.33	12.12	11.91	11.70
8	25.42	18.49	15.83	14.39	13.49	12.86	12.40	12.04	11.77	11.54	11.19	10.84	10.48	10.30	10.11	9.92	9.73	9.53	9.33
9	22.86	16.39	13.90	12.56	11.71	11.13	10.70	10.37	10.11	9.89	9.57	9.24	8.90	8.72	8.55	8.37	8.19	8.00	7.81
10	21.04	14.91	12.55	11.28	10.48	9.92	9.52	9.20	8.96	8.75	8.45	8.13	7.80	7.64	7.47	7.30	7.12	6.94	6.76
11	19.69	13.81	11.56	10.35	9.58	9.05	8.66	8.35	8.12	7.92	7.63	7.32	7.01	6.85	6.68	6.62	6.35	6.17	6.00
12	18.64	12.97	10.80	9.63	8.89	8.38	8.00	7.71	7.48	7.29	7.00	6.71	6.40	6.25	6.09	5.93	5.76	5.59	5.42
13	17.81	12.31	10.21	9.07	8.35	7.86	7.49	7.21	6.98	6.80	6.52	6.23	5.93	5.78	5.63	5.47	5.30	5.14	4.97
14	17.14	11.78	9.73	8.62	7.92	7.43	7.08	6.80	6.58	6.40	6.13	5.85	5.56	5.41	5.25	5.10	4.94	4.77	4.60
15	16.59	11.34	9.34	8.25	7.57	7.09	6.74	6.47	6.26	6.08	5.81	5.54	5.25	5.10	4.95	4.80	4.64	4.47	4.31
16	16.12	10.97	9.00	7.94	7.27	6.81	6.46	6.19	5.98	5.81	5.55	5.27	4.99	4.85	4.70	4.54	4.39	4.23	4.06
17	15.72	10.66	8.73	7.68	7.02	6.56	6.22	5.96	5.75	5.58	5.32	5.05	4.78	4.63	4.48	4.33	4.18	4.02	3.85
18	15.38	10.39	8.49	7.46	6.81	6.35	6.02	5.76	5.56	5.39	5.13	4.87	4.59	4.45	4.30	4.15	4.00	3.84	3.67
19	15.08	10.16	8.28	7.26	6.62	6.18	5.85	5.59	5.39	5.22	4.97	4.70	4.43	4.29	4.14	3.99	3.84	3.68	3.51
20	14.82	9.95	8.10	7.10	6.46	6.02	5.69	5.44	5.24	5.08	4.82	4.56	4.29	4.15	4.00	3.86	3.70	3.54	3.38
21	14.59	9.77	7.94	6.95	6.32	5.88	5.56	5.31	5.11	4.95	4.70	4.44	4.17	4.03	3.88	3.74	3.58	3.42	3.26
22	14.38	9.61	7.80	6.81	6.19	5.76	5.44	5.19	4.99	4.83	4.58	4.33	4.06	3.92	3.78	3.63	3.48	3.32	3.15
23	14.19	9.47	7.67	6.69	6.08	5.65	5.33	5.09	4.89	4.73	4.48	4.23	3.96	3.82	3.68	3.53	3.38	3.22	3.05
24	14.03	9.34	7.55	6.59	5.98	5.55	5.23	4.99	4.80	4.64	4.39	4.14	3.87	3.74	3.59	3.45	3.29	3.14	2.97
25	13.88	9.22	7.45	6.49	5.88	5.46	5.15	4.91	4.71	4.56	4.31	4.06	3.79	3.66	3.52	3.37	3.22	3.06	2.89
26	13.74	9.12	7.36	6.41	5.80	5.38	5.07	4.83	4.64	4.48	4.24	3.99	3.72	3.59	3.44	3.30	3.15	2.99	2.82
27	13.61	9.02	7.27	6.33	5.73	5.31	5.00	4.76	4.57	4.41	4.17	3.92	3.66	3.52	3.38	3.23	3.08	2.92	2.75
28	13.50	8.93	7.19	6.25	5.66	5.24	4.93	4.69	4.50	4.35	4.11	3.86	3.60	3.46	3.32	3.18	3.02	2.86	2.69
29	13.39	8.85	7.12	6.19	5.59	5.18	4.87	4.64	4.45	4.29	4.05	3.80	3.54	3.41	3.27	3.12	2.97	2.81	2.64
30	13.29	8.77	7.05	6.12	5.53	5.12	4.82	4.58	4.39	4.24	4.00	3.75	3.49	3.36	3.22	3.07	2.92	2.76	2.59
40	12.61	8.25	6.60	5.70	5.13	4.73	4.44	4.21	4.02	3.87	3.64	3.40	3.15	3.01	2.87	2.73	2.57	2.41	2.23
60	11.97	7.76	6.17	5.31	4.76	4.37	4.09	3.87	3.69	3.54	3.31	3.08	2.83	2.69	2.55	2.41	2.25	2.08	1.89
120	11.38	7.32	5.79	4.95	4.42	4.04	3.77	3.55	3.38	3.24	3.02	2.78	2.53	2.40	2.26	2.11	1.95	1.76	1.54
∞	10.83	6.91	5.42	4.62	4.10	3.74	3.47	3.27	3.10	2.96	2.74	2.51	2.27	2.13	1.99	1.84	1.66	1.45	1.00

ANEXO C

TABELA DISTRIBUIÇÃO T

ν	P=0.90	P=0.95	0.975	0.990	0.995	0.999	0.9995
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.302	636.619
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.598
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.941
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.894	6.859
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.405
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.611	3.922
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
24	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
50	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261	3.496
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.391
200	1.286	1.653	1.972	2.345	2.601	3.131	3.340
∞	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291

Fonte: [40]

ANEXO D

PLANO NACIONAL DE COMUNICAÇÕES EM VHF DO MMS

Número do canal	Frequências (MHz)		Função	
	Navio	Costeira		
	60	156,025	160,625	Autoridade portuária.
1		156,050	160,650	Autoridade portuária.
	61	156,075	160,675	Novas tecnologias.
2		156,100	160,700	Novas tecnologias.
	62	156,125	160,725	Novas tecnologias.
3		156,150	160,750	Novas tecnologias.
	63	156,175	160,775	Novas tecnologias.
4		156,200	160,800	Novas tecnologias.
	64	156,225	160,825	Novas tecnologias; escolas e entidades de formação náutica.
5		156,250	160,850	Novas tecnologias; autoridade portuária.
	65	156,275	160,875	Novas tecnologias.
6		156,300		Navio-navio (a).
	66	156,325	160,925	GNR - Brigada Fiscal.
7		156,350	160,950	Marinha.
	67	156,375	156,375	Operações de busca e salvamento e de combate à poluição.
8		156,400	156,400	Navio-navio; manobra de navios.
	68	156,425	156,425	Controlo de tráfego marítimo - VTS portuário.
9		156,450	156,450	Navegação de recreio.
	69	156,475	156,475	Controlo de tráfego marítimo - VTS costeiro.
10		156,500	156,500	Manobra de navios.
	70	156,525	156,525	Chamada selectiva digital (DSC) (b).
11		156,550	156,550	Comunicações com entidades oficiais.
	71	156,575	156,575	Manobra de navios.
12		156,600	156,600	Chamada comum de porto.
	72	156,625		Pesca (navio-navio).
13		156,650	156,650	Segurança da navegação.
	73	156,675	156,675	Controlo de tráfego marítimo - VTS portuário.
14		156,700	156,700	Autoridade portuária - pilotagem.
	74	156,725	156,725	Controlo de tráfego marítimo - VTS portuário.
15		156,750	156,750	Comunicações internas a bordo (c).
	75	156,775		Operações portuárias (c).
16		156,800	156,800	Socorro, urgência, segurança e chamada (d).
	76	156,825		Navio-navio (c).
17		156,850	156,850	Comunicações internas a bordo (c).
	77	156,875	156,875	Controlo de tráfego marítimo - VTS costeiro.
18		156,900	161,500	Controlo de tráfego marítimo - VTS portuário.
	78	156,925	161,525	Manobra de navios.
19		156,950	161,550	Sistema de Autoridade Marítima.
	79	156,975	161,575	Controlo de tráfego marítimo - VTS costeiro.
20		157,000	161,600	Operações portuárias.
	80	157,025	161,625	Controlo de tráfego marítimo - VTS portuário.
21		157,050	161,650	GNR - Brigada Fiscal.
	81	157,075	161,675	Actividades de apoio a navios.
22		157,100	161,700	Controlo de tráfego marítimo - VTS.
	82	157,125	161,725	Marinha.
23		157,150	161,750	Correspondência pública.
	83	157,175	161,775	Correspondência pública.
24		157,200	161,800	Correspondência pública.
	84	157,225	161,825	Actividades de apoio a navios.
25		157,250	161,850	Correspondência pública.
	85	157,275	161,875	Correspondência pública.
26		157,300	161,900	Correspondência pública.
	86	157,325	161,925	Correspondência pública.
27		157,350	161,950	Correspondência pública.
	87	157,375	157,375	Sistema AIS local.
28		157,400	162,000	Correspondência pública.
	88	157,425	157,425	Sistema AIS local.
AIS1	AIS1	161,975	161,975	Sistema AIS nacional.
AIS2	AIS2	162,025	162,025	Sistema AIS nacional.

(a) Este canal pode ser utilizado para comunicações entre navios e aeronaves que participem em actividades de busca e salvamento.

(b) Este canal deve ser utilizado para emissão de sinais de alerta navio - navio e navio - terra dentro da área A1.

(c) Este canal deve ser utilizado com uma potência de saída máxima de 1 W.

(d) Em conformidade com a Resolução MSC 77 (69) da IMO, deixa de ser obrigatória a escuta do canal 16 depois de 1 de Fevereiro de 2005.

Fonte: [41]

ANEXO E

DEMONSTRAÇÃO DAS HIPÓTESES INERENTES AO MODELO DE
REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Na página 72 foram descritos as hipóteses inerentes ao modelo de regressão linear múltipla, e que são as seguintes:

1. x_{ik} é não estocástico;
2. ε_i é o erro aleatório associado;
3. ε_i tem média nula;
4. ε_i são independentes para todo o $i = 1, \dots, n$;
5. ε_i varia com a variância σ^2 constante e desconhecida para todo o $i = 1, \dots, n$;
6. Não existe multicolinearidade (relação linear) entre as variáveis x_{i1}, \dots, x_{ik} .

No caso de 3, pressupõe-se que $E(\varepsilon_i) = 0$, ou seja,

$$\begin{aligned} E(Y_i) &= E(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon_i) \\ &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + E(\varepsilon_i) \\ &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \end{aligned}$$

Por outro lado, através de 4 pode-se afirmar que o erro de uma observação é independente do erro de outra, o que significa que

$$\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = E(\varepsilon_i \varepsilon_j) - E(\varepsilon_i)E(\varepsilon_j) = E(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0, \quad \text{para } i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, n$$

Através de 5 pressupõe-se que $\text{var}(\varepsilon_i) = \sigma^2, i = 1, \dots, n$, pois

$$\text{var}(\varepsilon_i) = E(\varepsilon_i^2) - \underbrace{|E(\varepsilon_i)|^2}_{=0} = E(\varepsilon_i^2) = \sigma^2,$$

e conseqüentemente

$$\text{var}(Y_i) = \text{var}(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon_i) = \underbrace{\text{var}(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2)}_{=0} + \text{var}(\varepsilon_i) = \sigma^2$$

ANEXO F

DEMONSTRAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE EXISTÊNCIA E UNICIDADE
DA SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES NORMAIS

Teorema: Seja $X \in \mathbb{R}^{n \times (k+1)}$. Então a matriz $X^T X$ é invertível sse as colunas de X forem linearmente independentes [37].

Demonstração: Se as colunas de X forem linearmente independentes, então $\beta \neq 0$ implica que $X\beta \neq 0$, caso contrário existiria uma combinação não trivial das colunas de X cujo valor seria zero [37]. Nas referidas condições tem-se que

$$\|X\beta\|^2 = (X\beta)^T(X\beta) = \beta^T(X^T X)\beta > 0, \quad \forall \beta \neq 0$$

Isto significa que a matriz $X^T X$ é simétrica definida positiva, logo é invertível [37].

Supondo agora que $X^T X$ não é invertível. Neste caso existe um vetor $\beta \neq 0$ [37] tal que $X^T X\beta = 0$, ou seja,

$$\beta^T X^T X\beta = 0 \Rightarrow (X\beta)^T(X\beta) = \|X\beta\|^2 = 0 \Rightarrow X\beta = 0$$

Daqui se conclui que nesta circunstância as colunas de X não seriam linearmente independentes [37] ■

ANEXO G

DEMONSTRAÇÃO DA PRODUÇÃO DE RESÍDUO MÍNIMO PELAS
EQUAÇÕES NORMAIS

Teorema: De acordo com [37], a solução β das equações normais satisfaz a seguinte relação

$$\|Y - X\beta\| \leq \|Y - X\gamma\|, \quad \forall \gamma \in \mathbb{R}^n$$

Demonstração: Da relação anterior tem-se

$$Y - X\gamma = (Y - X\beta) + X(\beta - \gamma)$$

Da equação anterior, tomando normas [37] obtém-se

$$\begin{aligned} \|Y - X\gamma\|^2 &= \|(Y - X\beta) + X(\beta - \gamma)\|^2 \\ &= ((Y - X\beta) + X(\beta - \gamma))^T ((Y - X\beta) + X(\beta - \gamma)) \\ &= \|Y - X\beta\|^2 + 2(X(\beta - \gamma))^T (Y - X\beta) + \|X(\beta - \gamma)\|^2 \end{aligned}$$

A partir de (11) pode-se concluir [37] que

$$X^T (Y - X\beta) = X^T \varepsilon = 0$$

Ou seja, o resíduo ε associado à solução β é normal às colunas da matriz X .

Assim tem-se que

$$(X(\beta - \gamma))^T (Y - X\beta) = (\beta - \gamma)^T X^T (Y - X\beta) = 0$$

Portanto, de acordo com [37], é verdade que

$$\|Y - X\gamma\|^2 = \|Y - X\beta\|^2 + \|X(\beta - \gamma)\|^2$$

Esta igualdade só é verificada quando $X(\beta - \gamma) = 0$, o que acontece quando $\beta - \gamma = 0$, pois as colunas de X são linearmente independentes [37]. Foi demonstrado que a solução das equações normais é a única que, de entre todos os vetores em \mathbb{R}^n , produz um resíduo mínimo [37]. ■