



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Tiago Ventura Viegas

Rádios Cognitivos e Alocação Dinâmica de Espectro

Contributos para uma
Aplicação Prática na
Marinha Portuguesa

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



**Alfeite
2015**



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Tiago Ventura Viegas

*Rádios Cognitivos e Alocação Dinâmica de Espectro
Contributos para uma Aplicação Prática na Marinha*

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

Orientação de: Eduardo Ludovico Bolas

Co-orientação de: NIL

O Aluno Mestrando

O Orientador

Tiago Ventura Viegas

Eduardo Ludovico Bolas

**Alfeite
2015**

*Ao meu avô,
Joaquim José Filipe Ventura*

Agradecimentos

Reservo este espaço para um especial agradecimento a todas as pessoas que tiveram contributos diferentes mas relevantes na realização deste trabalho.

Ao Eng. Eduardo Bolas pela sua orientação e apoio. A dedicação e esforço por este demonstrado proporcionaram as condições necessárias para a realização deste trabalho.

Ao Eng. Germano Capela, pela sua ajuda e paciência, sem as quais não teria sido possível conseguir aprender a utilizar as ferramentas de medidas usadas neste trabalho, em tempo útil.

Ao meu camarada Luís Menezes, pelo tempo dedicado em conjunto a debater ideias e a realizar testes, permitindo um auxílio mútuo e que elevou a qualidade deste trabalho.

Ao Eng. Ribeiro Correia, pela sua preocupação em certificar que os moldes em que decorreram os estágios anuais permitissem a realização da tese sem empenhamentos excessivos, e pelo acompanhamento ao longo de todo o ano do desenvolvimento da tese.

Aos meus pais, aos meus irmãos, à minha família e à minha namorada, Ana Galhós, que me apoiaram incondicionalmente e procuraram motivar e inspirar em momentos menos fáceis e sem os quais seria árduo encontrar força para enfrentar as dificuldades.

A todos, um sentido obrigado

Resumo

As comunicações marítimas atuais baseiam-se em sistemas de banda estreita, tipicamente voz e dados de baixo débito, nas bandas de *Medium Frequency* (MF), *High Frequency* (HF) e *Very High Frequency* (VHF), para dar suporte a serviços associados à segurança e socorro da navegação. O acesso a serviços de banda larga, como a Internet, faz-se exclusivamente através de *Sattelite Communications* (SATCOM) ou, quando a distância a terra permite, a redes móveis terrestres como o *Global System for Mobile Communications* (GSM) ou *Long Term Evolution* (LTE). A Marinha segue esta tendência tecnológica e a necessidade de recorrer ao SATCOM, para os serviços de banda larga, tem consequências na disponibilidade dos serviços e significativo impacto financeiro. Torna-se premente uma alternativa, economicamente viável e passível de acautelar os requisitos operacionais. Contudo, o maior problema, associado à implementação de sistemas rádio de banda larga, é a escassez de espectro. As atuais políticas de alocação estática, manifestamente ineficientes no que diz respeito à utilização do espectro, não potenciam o desenvolvimento de novos serviços, centrando-se unicamente na proteção dos incumbentes contra interferências. Apesar disso, os recentes desenvolvimentos nas áreas do processamento de sinais e das telecomunicações, nomeadamente associadas ao conceito de rádios cognitivos, vêm disponibilizar tecnologias que permitem acautelar as necessidades dos incumbentes, permitindo assim revolucionar a forma como o espectro pode ser utilizado. Desta forma, é possível criar condições para o desenvolvimento e exploração de sistemas oportunistas de banda larga, que possam constituir alternativas válidas ao SATCOM. O presente trabalho pretende apresentar uma reflexão sobre a problemática da alteração dos paradigmas da gestão do espectro e o seu impacto nos sistemas em exploração, discutindo a forma como a introdução de tecnologia baseada em rádios cognitivos pode revolucionar a infraestrutura tecnológica da Marinha e a arquitetura de serviços operacionais.

Palavras Chave: Rádios Cognitivos, Alocação Dinâmica de Espectro, Comunicações Marítimas, Gestão de Espectro.

Abstract

Nowadays, maritime communications are based on narrow-band systems, like voice or low rate data, in the MF, HF and VHF bands so that they can provide security and safety services. The access to wide-band services, like Internet, are made exclusively through SATCOM. In some cases, when the distance to land so allows, that access can be made through GSM or LTE. The Portuguese Navy follows this technologic tendency. Relying on SATCOM access for wide-band services has consequences on service availability and financial impact. Consequently, a need for an alternative emerges, which is cost effective and is able to accommodate the needed operational requirements. The biggest problem however, regarding the implementation of wide-band services on the radio band, is spectrum scarcity. The current spectrum management policies, static allocations, do not allow the development of new services due to the fact that they do not take full advantage of the unused spectrum, focusing on interference free communications. Nonetheless, recent developments in digital signal processing and telecommunications, regarding cognitive radios, provide technology that can accommodate the incumbents needs thus changing the mindset on how spectrum is accessed. This will make way for creating the foundations for development of opportunistic wide-band systems that can become a reliable alternative for SATCOM. The present work will show a discussion on changing spectrum management policies and the impact that follows. The cognitive radio technology is considered the revolutionary element, not only for the Portuguese Navy technologic infrastructure, but also for the architecture of operational services.

Keywords: Cognitive Radio, Dynamic Spectrum Allocation, Maritime Communications, Spectrum Management.

Lista de Figuras

2.1	Panorama de Comunicações Marítimas	8
2.2	80 MHz até 174 MHz [1]	15
2.3	Alocação de Canais de TV na banda VHF e UHF [2]	21
2.4	Ilustração dos Passos Propostos [3]	24
3.1	RR Appendix 18 [4]	26
3.2	Organização da Gestão de espectro na NATO	29
3.3	Taxonomia da Gestão Dinâmica de Espectro [5]	30
4.1	Fluxograma da técnica de <i>spectrum sensing</i> utilizada [6]	41
4.2	Esquema utilizado em <i>GNURADIO</i>	42
4.3	Placa eletrónica que simula um utilizador	44
4.4	Departamento de Ciências e Tecnologias, Escola Naval	45
4.5	Departamento de Armas e Eletrónica e Departamento de Ope- rações, ETNA	46
4.6	Resultados do Teste na ETNA	46
4.7	Montagem realizada na Escola Naval	48
4.8	Montagem de teste na Escola Naval	48
4.9	Snapshot do espectro eletromagnético durante uma transmis- são, usando USRP, nos testes de calibração.	50
4.10	Snapshot do espectro eletromagnético durante uma transmis- são, usando o analisador de espectros FSH3, nos testes de cali- bração.	50
4.11	Parâmetros introduzidos no cartão SD	51
4.12	Probabilidade do canal estar ocupado, nos testes de calibração.	51
4.13	Número de transmissões, nos testes de calibração.	52
4.14	Localização da antena a bordo do NRP Zarco.	53
4.15	Trajeto realizado pelo navio NRP Zarco durante a recolha de dados.	53
4.16	Dados recolhidos a bordo do NRP Zarco das 1159 às 1559	54
4.17	Dados recolhidos a bordo do NRP Zarco das 0810 às 1210	54
4.18	Localização da Antena	56

4.19	Montagem da Antena CX4	57
4.20	Dados recolhidos Estação de Comunicação Satélite, F12	57
4.21	Número de Transmissões	58
4.22	Localização da Antena	58
4.23	Dados recolhidos na Capitania de Cascais	59
5.1	Evolução da Implementação [7]	63

Lista de Acrónimos

ACP: Allied Communications Publications.
AGC: Automatic Gain Control.
AIS: Automatic Identification System.
AMN: Autoridade Marítima Nacional.
ANACOM: Autoridade Nacional de Comunicações.
BNL: Base Naval de Lisboa.
BSMP: Battlespace Spectrum Management Plan.
CEPT: Conference of Postal Telecommunications Administrations.
CSM: Combined Spectrum Managers.
CSMC: Combined Spectrum Management Cell.
CTFC: Combined Task Force Commander.
DAE: Departamento de Armas e Eletrónica.
DC: Duty Cycle.
DCT: Departamento de Ciências e Tecnologias.
DSA: Dynamic Spectrum Allocation.
DSC: Digital Selective Calling.
DOP: Departamento de Operações.
DSP: Digital Signal Processors.
DySPAN: Dynamic Spectrum Access Networks.
ECC: Electronic Communications Committee.
ECF: Electronics Communications Framework.
EN: Escola Naval.
EOB: Electronic Order of Battle.
ETNA: Escola de Tecnologias Navais.
FCC: Federal Communications Commission.
FFT: Fast Fourier Transform.
FPGA: Field Programmable Gate Arrays.
GMDSS: Global Maritime Distress Safety System.
GPP: General Purpose Processors.
GSM: Global System for Mobile Communications.
HDTV: High Definition Television.

HF: High Frequency.
 IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
 IMO: International Maritime Organization.
 ISM: Industrial, Scientific and Medical.
 ITU: Internacional Telecommunications Union.
 LTE: Long Term Evolution.
 MF: Medium Frequency.
 MP: Marinha Portuguesa.
 NC-OFDM: Non Contiguous Orthogonal Frenquency Division Multiple-
 xing.
 NE: National Elements.
 NSM: National Spectrum Manager.
 NSWAN: Nato Secret Wireless Area Network.
 OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
 OSA: Opportunistic Spectrum Access.
 PTT: Push to Talk.
 QoS: Quality of Service.
 RC: Rádios Cognitivos.
 RCM: Rede de Comunicações da Marinha.
 RR: Radio Regulations.
 SAR: Search and Rescue.
 SATCOM: Sattelite Communications.
 SDR: Software Defined Radio.
 SICALN: Sistema de Informação da Configuração e Apoio Logístico aos
 Navios.
 SIGDN: Sistema Integrado de Gestão da Defesa Nacional.
 SMM: Serviço Móvel Marítimo.
 SMT: Serviço Móvel Terrestre.
 SoC: System on Chip.
 SRRC: State Radio Regulatory Comission of China.
 SWOT: Stregnths, Weaknesses, Opportunities and Threats.
 TD-LTE: Time Division Long Term Evolution.
 TVWS: Television White Spaces.
 UHF: Ultra High Frequency.
 UMTS: Universal Mobile Telecommunications System.
 UE: União Europeia.
 UR: Underlay Radios.
 USRP: Universal Software Radio Peripheral.
 UWB: Ultra Wide Band.
 VHF: Very High Frequency.
 WLAN: Wirelees Local Area Network.

WRC: World Radio Conferences.

Conteúdo

Dedicatória	I
Agradecimentos	III
Resumo	V
Abstract	VI
Lista de Figuras	VIII
Lista de Acrónimos	XI
1 Introdução	3
2 Enquadramento	7
2.1 Comunicações na Marinha	7
2.2 Alternativas ao SATCOM	9
2.3 Gestão de Espetro	9
2.4 Bandas Rádio com Interesse para Comunicações Banda Larga	12
2.5 Exploração do Espetro VHF	13
2.5.1 Rádios Cognitivos	16
2.5.2 <i>Software Defined Radio</i>	17
2.5.3 Estudos Relacionados	19
3 Paradigmas de Gestão de Espetro	25
3.1 Paradigma Atual da Gestão do Espetro VHF	25
3.2 Gestão do Espetro na NATO	27
3.2.1 Fase de Planeamento	27
3.2.2 Fase de Implementação	28
3.2.3 Fase da Recuperação	29
3.2.4 Observações	29
3.3 Acesso Dinâmico ao Espetro	29

3.3.1	Modelo de Uso Dinâmico Exclusivo	30
3.3.2	Modelo de Partilha Livre	32
3.3.3	Modelo de Acesso Hierárquico	34
3.3.4	Observações finais	36
4	Utilização do Espetro na Marinha	39
4.1	Utilização do Espetro na Marinha	39
4.1.1	Introdução	39
4.1.2	Deteção de Ocupação dos Canais	40
4.1.3	Computação	42
4.1.4	Testes e Medidas	44
4.1.5	Análise de Resultados	59
5	Introdução de Rádios Cognitivos	61
5.1	Introdução	61
5.1.1	Arquitetura	62
5.2	Análise SWOT	63
5.2.1	Pontos Fortes	64
5.2.2	Pontos Fracos	65
5.2.3	Oportunidades	65
5.2.4	Ameaças	66
5.2.5	Observações Finais	67
6	Conclusão	69
	Bibliografia	78
A	Anexos	79
A.1	Alocações do Espetro Português [8]	79
A.2	Mapa da estrutura edificada de apoio às comunicações VHF	81
A.3	Serviço Móvel Marítimo - Plano Nacional de Comunicações em VHF	82

Capítulo 1

Introdução

Uma parte significativa de toda a navegação marítima é feita a menos de 40 milhas de costa. Sejam cruzeiros internacionais, navios de transporte de mercadorias ou navios petroleiros, todos planeiam as suas viagens o mais próximo de costa possível. Este facto torna evidente que, para poder suportar as necessidades de comunicações inerentes a uma navegação segura, os estados costeiros necessitam de toda uma infraestrutura que permita uma cobertura de todas as áreas dentro do alcance das estações costeiras VHF, ou seja, até às 40 milhas, que providencie serviços rádio como voz e sistema de alerta de socorro automático como o *Digital Selective Calling* (DSC).

Para um navio obter licença para navegar necessita de ter uma instalação de comunicações rádio de acordo com a sua área de operação, nomeadamente VHF que é obrigatório para a A1 [9] do *Global Maritime Distress Safety System* (GMDSS) por forma a que se garanta comunicação em ambos os sentidos para alcances de linha de vista geometricamente estendidos (35 milhas).

Com os avanços da tecnologia, relativamente ao desenvolvimento de serviços e aplicações, as necessidades do utilizador, e consequentemente a demanda por serviços de banda larga, têm aumentado significativamente e torna-se comum seja qual for o meio de transmissão. A realidade da comunidade marítima não é diferente [7]. Surgem conceitos relacionados com a segurança da navegação, nomeadamente o conceito de *e-Navigation* [10], que se prova uma oportunidade para implementar um sistema que ajude a reduzir o número de acidentes nos navios dos quais, segundo a *International Maritime Organization* (IMO) [11], 60% estão diretamente relacionados com

o erro humano. O acesso à Internet é cada vez mais comum e a possibilidade de o fazer a bordo dos navios de cruzeiro, ou em qualquer outra embarcação, surge cada vez mais como uma necessidade. No entanto, estes serviços requerem sistemas de banda larga que apenas podem ser fornecidos por SATCOM que se prova muito dispendioso e, por vezes, indisponível.

A falta de alternativa às SATCOM é preocupante pois, apesar de existir cobertura de comunicações VHF estas apenas acomodam serviços de voz e dados de baixo débito (DSC) e o *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) e LTE apresentam uma cobertura marítima muito limitada. Tendo isto em conta, torna-se evidente que um sistema de banda larga implementado na banda VHF seria muito vantajoso pelo que, não iria apenas reduzir o impacto financeiro dos serviços de banda larga, como iria representar um avanço nas comunicações marítimas na medida em que potencializaria a circulação de informação entre navios aumentando a segurança da navegação. No entanto, o maior desafio no que diz respeito à implementação de um sistema destes na banda marítima VHF é, sem dúvida, a escassez de espectro e a sua gestão. Torna-se complicado encontrar espectro que se possa utilizar (principalmente espectro contíguo). Um estudo conduzido pela *Federal Communications Commission* (FCC) [12] mostrou que, dado um determinado espaço e tempo, a maior parte do espectro nesse momento encontra-se inutilizado. Isto deve-se a má gestão de espectro pelas políticas reguladoras e não à escassez física do mesmo. Contudo, existem tecnologias emergentes que podem vir colmatar esta má gestão de espectro. Os Rádios Cognitivos (RC) são um exemplo disso pois combinados com técnicas de modulação com múltiplas portadoras e "*smart antennas*", aplicados à banda VHF, tornar-se-ia possível encontrar e utilizar espectro disponível como proposto por Eduardo Bolas na sua proposta de tese de doutoramento [13]. Mais uma vez a questão que impede qualquer tipo de avanço que caminhe para uma utilização mais eficiente de espectro são as políticas reguladoras que ditam que o espectro deve estar alocado exclusivamente ao utilizador ou serviço destinado, sem tolerância a interferência. Esta política tem de evoluir para um paradigma mais dinâmico para que tal tecnologia possa ser implementada [14]. Existem várias formas de utilizar o espectro de forma dinâmica que serão discutidas no decorrer do trabalho e cuja a análise será feita tendo em conta a banda de VHF, nomeadamente o Serviço Móvel Marítimo (SMM). A utilização desta banda levanta dificuldades (como em qualquer banda) pois torna-se muito difícil garantir *Quality of Service* (QoS) e imunidade às interferências. Estas questões estão associadas ao estado de pouca maturidade em que se encontra esta tecnologia e, comparando com o facto de a maior parte das navegações marítimas serem feitas junto a costa (nomeadamente as missões de

patrulha da Marinha Portuguesa), a banda VHF parece bastante promissora.

É também importante reforçar aspetos que fazem com que uma implementação na Marinha Portuguesa (MP) seja algo muito exequível. A Marinha Portuguesa detém canais dentro do SMM que são de uso exclusivo desta, o que, logo à partida, elimina todos os constrangimentos relacionados com coordenação com entidades exteriores. Existem também já trabalhos concluídos e a decorrer à volta desta temática, pertencentes a militares da MP como a tese de doutoramento de Eduardo Bolas que se encontra em desenvolvimento e cuja proposta foi feita em 2012 [13] e a tese de mestrado de Germano Capela concluída em 2014 [6]. Isto significa que a MP tem neste momento autonomia para desenvolver e implementar esta tecnologia, tornando-se pioneira naquilo que será o futuro das telecomunicações.

Este trabalho irá portanto apresentar várias reflexões sobre as temáticas envolventes, nomeadamente as políticas de gestão de espetro e técnicas de alocação dinâmica do espetro. Neste trabalho será também realizado um estudo com o objetivo de determinar como é que os canais do SMM são utilizados para podermos perceber que oportunidades poderão existir passíveis de serem aproveitadas. Serão ainda apresentados contributos sobre o caminho a percorrer para uma possível implementação na Marinha e quais os primeiros passos a dar.

É importante salientar que este trabalho não pretende analisar de forma exaustiva as características técnicas específicas da implementação (i.e. modulação, algoritmos de *sensing*) mas sim proporcionar um estudo sobre a viabilidade da introdução desta tecnologia na MP e dissertar sobre qual o caminho a seguir, tudo isto suportado por uma recolha de dados de campo, devidamente descrita no capítulo respetivo.

O trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 serão explicados conceitos fundamentais para o entendimento desta temática e para proporcionar um enquadramento para as questões abordadas no decorrer dos restantes capítulos. No Capítulo 3 entrar-se-à em mais detalhe em questões relacionadas com a gestão do espetro na banda VHF bem como possíveis técnicas de alocação dinâmica de espetro. No capítulo 4 serão descritos os testes realizados no âmbito do estudo da ocupação dos canais de VHF. No Capítulo 5 será apresentada uma proposta de implementação destas tecnologia acompanhada de uma análise *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats* (SWOT) sobre o impacto na MP. No Capítulo 6 serão discutidas conclusões retiradas de todo o trabalho.

Capítulo 2

Enquadramento

2.1 Comunicações na Marinha

Seguindo a normal evolução dos sistemas de comunicações, a Marinha foi introduzindo sistemas que tornaram mais eficiente a troca de informação garantindo que a mesma se mantém segura.

Por forma a garantir uma maior eficiência no empenhamento dos navios da Marinha Portuguesa, é necessário saber a todo o momento o estado e localização de todo o dispositivo naval. Para tal, existem vários serviços de comunicações disponibilizados aos navios que são fundamentais para o cumprimento da missão. Estas missões ocorrem tanto junto como longe de costa e a arquitetura para manter comunicações com os navios é a representada na seguinte figura:

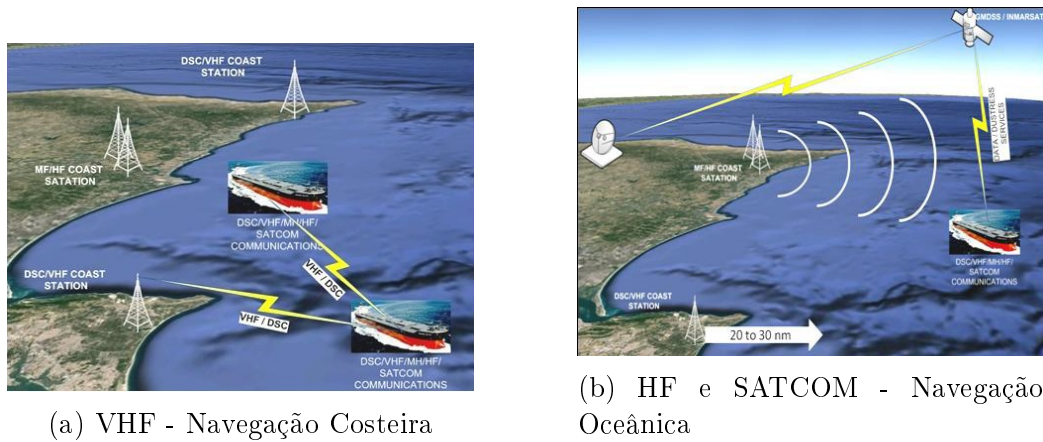


Figura 2.1: Panorama de Comunicações Marítimas

Como podemos ver na figura 2.1 a), as comunicações para navegação costeira são feitas por VHF e os serviços disponibilizados são voz e transmissão de dados em banda estreita (DSC). Ao longo de toda a costa existe uma edificação de estações, como podemos observar na figura em anexo, que garante cobertura em toda a costa. Na figura 2.1 b) observamos de que forma se mantêm comunicações com navios fora do alcance das 35 milhas, utilizando o espectro HF e comunicações satélite. Nestas frequências é necessário disponibilizar os seguintes serviços:

- Serviço de mensagens formais ACP 127
- Voz tática
- Internet
- Intranet
- Telefonia
- NSWAN (*NATO Secret Wireless Area Network*)

O *Allied Communications Publications* (ACP) 127 é um conjunto de instruções e procedimentos para gerir mensagens militares. Estas são transmitidas em HF e existem duas estações em terra responsáveis pela transmissão e receção das mesmas (Penalva e Fonte da Telha, respetivamente) complementadas pela estação de Ponta Delgada. Este serviço é fornecido através de canais de 3 kHz. O serviço de voz é disponibilizado em três bandas de frequências (HF, VHF e *Ultra High Frequency* (UHF)). Dos serviços fornecidos, apenas a Internet e Intranet são serviços de banda larga mas nem

todos os navios têm possibilidade de aceder aos mesmos, tanto por falta de equipamentos instalados, como pelo valor avultado do custo de utilização das SATCOM.

Quando atracados, através de ligação por fibra ótica, os navios estão ligados à Rede de Comunicações da Marinha (RCM) e usufruem de acesso a serviços como Inter e Intranet referidos acima, bem como serviços *web based* como: Sistema Integrado de Gestão da Defesa Nacional (SIGDN), Sistema de Informação da Configuração e Apoio Logístico aos Navios (SICALN), etc.

2.2 Alternativas ao SATCOM

O uso de redes móveis no mar não é possível pelo que a única alternativa existente no momento são as SATCOM. No entanto, podemos pensar em utilizar a banda rádio como alternativa.

Para as frequências rádio o panorama é o seguinte para comunicação de dados:

- HF - Canais de 3 kHz com débitos máximos de 9.6 kbps
- VHF - Canais de 25 kHz, em que, para DSC se usa 9.6 kbps
- UHF - Canais de 125 kHz com débitos máximos de 28 kbps
- 2.4 GHz - Canais de 22 MHz Wifi ou WiMax com débitos de 40Mbps

2.3 Gestão de Espectro

O espectro eletromagnético é um recurso escasso, finito mas reutilizável. Este recurso torna-se cada vez mais vital, influenciando fatores económicos, sociais e políticos nas nações.

O facto de ser um recurso finito, torna necessário que exista uma forma de assegurar uma utilização eficiente, bem como de igualdade, por parte de todos os utilizadores e serviços que usufruem do mesmo.

Quando se equaciona gerir o espectro, existem várias variáveis a considerar: a diferença entre alocação e atribuição de espectro (na literatura inglesa *assignment* e *allotment*, respetivamente), a vertente política (tanto a nível

nacional como a nível internacional), o próprio efeito que a utilização do espectro tem na sociedade, o impacto económico e também considerações técnicas para a sua utilização.

A alocação de espectro é uma autorização dada pela entidade reguladora responsável para uso de frequências ou canais rádio de acordo com condições específicas. Assim que é feita a alocação, é criada uma proteção para o uso dessa frequência na região geográfica apropriada. Esta autorização vem na forma de uma licença na qual se encontram discriminadas as condições. Na atribuição de espectro, uma, várias ou blocos de frequências dentro de uma banda, dadas a uma autoridade subordinada que fica responsável por fazer as suas próprias alocações. As frequências associadas a estas atribuições são geralmente usadas dentro de uma área específica ou com outras condicionantes. O espectro militar é proveniente de uma atribuição e todo esse espectro é depois alocado tendo em conta as várias necessidades, ficando sempre à responsabilidade dos militares [15].

Na vertente política temos o facto de o acesso ao espectro ser global, o que implica que em muitos casos terá de existir cooperação internacional para que os serviços nacionais de cada país sejam assegurados, sem interferência de nações vizinhas. É necessário também perceber quem é que tem soberania sobre o espectro, ou seja, quem é que tem direito a que porção de espectro. O estado do desenvolvimento tecnológico é também uma questão importante a ter em conta pois este vai condicionar a forma como o espectro é gerido na medida em que é este que providencia opções de implementação.

Quando se aloca espectro a um serviço, este deixa de ser um recurso pois, qualquer serviço que concorra às mesmas frequências e que provoque interferências, não pode ser utilizado. Eventualmente, o que irá suceder será a lotação completa do espectro sem possibilidade de acrescentar novos utilizadores ou disponibilizar novos serviços.

A demanda por espectro é, no entanto, incessante pois a necessidade que a sociedade tem em partilhar informação é cada vez maior o que se traduz numa maior necessidade de largura de banda. Pode então dizer-se que quem controla o acesso ao espectro, controla a forma como a informação é passada. Com isto, torna-se evidente a necessidade de existir uma política de gestão de espectro. Esta é elemento chave na manutenção da "saúde" económica das telecomunicações. Trata das questões nacionais e internacionais e garante um uso do espectro livre de interferências pelo maior número de utilizadores e serviços possíveis.

É perfeitamente compreensível que cada nação queira ter acesso exclusivo ao espectro que lhe foi atribuído, no entanto, as características deste recurso tornam esta situação impossível pois a energia eletromagnética não respeita as fronteiras nacionais. Assim, a coordenação necessária para aceder ao espectro encontra-se ao nível internacional.

Para estabelecer esta coordenação internacional existe a *Internacional Telecommunications Union* (ITU). Esta foi criada em 1903 como *International Telegraph Union* devido ao reconhecimento da necessidade de gerir o espectro que nesta altura já existia. Em 1947 adotou o nome que hoje se conhece devido à expansão das telecomunicações e do interesse global sobre o controlo do espectro. Esta regula a utilização global do espectro e o processo de gestão é desenvolvido nas *World Radio Conferences* (WRC) onde novas regras e procedimentos são discutidos. Os resultados das WRC são depois vertidos nas *ITU-Radio Regulations* (RR) que, ao terem estatuto de tratado, servem como doutrina. O papel desta é assegurar o acesso justo, flexível e aberto ao espectro com o objetivo de providenciar o melhor serviço possível a todos os utilizadores. É também responsabilidade da ITU um planeamento que permita acomodar novos serviços.

A ITU está portanto encarregue da gestão global do espectro. Esta gestão pode ser vista como uma pirâmide em que temos três camadas: global, regional e nacional.

Ao nível regional existem na Europa duas entidades que regulam o espectro: a União Europeia (UE) e a *Conference of Postal Telecommunications Administrations* (CEPT). Ao nível da União Europeia, são tomadas iniciativas sobre diretivas da *Spectrum Decision* [16] e da *EU Framework for Eletronics Communications* [17]. Em alguns casos, as medidas adotadas por autoridades nacionais para harmonização de frequências podem ser dificultadas devidos aos ajustes a serem feitos com as nações adjacentes. Assim, a *Eletronics Communications Framework* (ECF) encontra-se a ser integrada na legislação nacional dos estados membro. Diretivas e decisões tomadas pela UE baseadas nas diretivas acima referidas são mandatórias para todos os estados membro.

A CEPT é uma organização com 45 estados membro que estabeleceu o *Electronic Communications Committee* (ECC). Este junta todas as entidades reguladoras dos espectro dos estados membro por forma a tomar decisões e desenvolver recomendações para o uso do espectro. A implementação das

decisões e recomendações a nível nacional é opcional.

A nível nacional, em Portugal, temos a Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM). Esta, enquanto autoridade reguladora nacional, garante o acesso a redes, recursos e vários serviços, contribui para o desenvolvimento do mercado interno das comunicações eletrónicas, protege os direitos e interesses dos consumidores, assegura que se mantém o acesso a serviços de emergência, entre outras atribuições. Faz parte da sua missão, a coadjuvação do Governo no domínio das Comunicações prestando apoio técnico, juntamente com pareceres, estudos e projetos de legislação. O seu domínio de intervenção encontra-se regulamentado pela ANACOM em [18].

Para prosseguir as suas atribuições, a ANACOM dispõe de poderes de regulamentação, supervisão, fiscalização e sancionatórios. Utilizando estes poderes, deve atribuir, revogar e alterar direitos de utilização de frequências, implementar as leis, regulamentos e atos da UE no sector das comunicações e verificar o cumprimento dos mesmos, monitorizar a atividade das entidades sujeitas à sua supervisão e o funcionamento dos mercados das comunicações, determinar ou promover a realização de auditorias e proceder a inspeções e inquéritos, entre várias outras incumbências [19]. Toda esta organização em torno da gestão do espetro permite regulamentar o acesso ao mesmo por forma a garantir o fornecimento de vários serviços, nas várias bandas.

Espectro não licenciado é algo muito raro, dificultando novas atribuições para tecnologias ou serviços emergentes motivando assim o estudo de alternativas que permitam melhorar o desempenho dos atuais serviços, ou no caso do que é proposto neste trabalho, aumentar a eficiência espectral.

2.4 Bandas Rádio com Interesse para Comunicações Banda Larga

Para uma possível aplicação de uma rede banda larga para comunicações marítimas é necessário ponderar qual a banda de frequências mais indicada para acomodar tal aplicação. Existem vários parâmetros que poderiam ser levados em conta na escolha desta banda, mas tendo em conta que se está a estudar uma aplicação para comunicações marítimas, torna-se evidente que os parâmetros fundamentais a ter em conta são: o alcance e a largura de banda associada às atuais alocações nas respetivas bandas.

Começando pelas bandas mais elevadas, os 2.4 GHz não são apropriados para este propósito pois, apesar de possuírem elevadas taxas de transmissão de dados, vão ter o mesmo problema que a banda de UHF: as condições de propagação das frequências nesta banda não permitem obter o alcance adequado tendo em conta a área de operação dos navios. As estações costeiras poderiam aumentar o seu alcance aumentando a potência do sinal que transmitem, mas isso torna-se impraticável por parte dos navios.

Na banda de HF, apesar de já existirem algumas tentativas de alocar canais de 24 kHz (WRC 12), esta largura de banda não permite comunicação de banda larga. Mesmo que fosse possível associar vários canais e conseguir extrair maiores larguras de banda, existe um problema muito difícil de ultrapassar que é o facto de ser necessário conseguir coordenação internacional. Esta banda possui condições de propagação ionosférica o que lhe confere elevados alcances, ao ponto de ultrapassarem largamente fronteiras. Coordenação a este nível (internacional) requer processos burocráticos muito demorados e penosos que não se apresentam com solução possível neste trabalho.

Na banda do VHF, as condições de propagação que lhe estão inerentes prevêm alcances até 35 milhas de costa (tendo em conta a costa portuguesa que possui uma infraestrutura edificada ao longo da costa de estações VHF). Nesta banda encontramos o SMM onde podemos encontrar muitos canais dedicados exclusivamente à Marinha. Os canais apresentam larguras de banda de 25 kHz. Estes canais, utilizados individualmente apenas poderiam suportar serviços de banda estreita mas, de acordo com o que se propõe neste trabalho e será explicado com mais detalhe mais à frente, podemos pensar em aproveitar a tecnologia de rádios cognitivos, alocação dinâmica de espectro e técnicas de múltiplas portadoras [7] por forma a extrair maiores larguras de banda. É necessário ter em conta que, sejam cruzeiros internacionais, navios de transporte de mercadorias ou navios petroleiros, todos planeiam as suas viagens o mais próximo de costa possível, dentro do alcance VHF. Assim, torna-se evidente que uma aplicação de rede banda larga em comunicações marítimas tem todo o sentido ser na banda VHF. O presente trabalho ir-se-á focar, portanto, nesta banda.

2.5 Exploração do Espectro VHF

Como foi acima referido, a banda VHF revela particular interesse no que respeita a utilização dinâmica do espectro, no entanto, é necessário estudar

esta banda para perceber como é que esta é utilizada e ocupada. Esta necessidade de estudar o espectro surge na comunidade internacional como forma de encontrar formas de integrar novos serviços (disponibilizados por tecnologias emergentes e pelo crescimento das comunicações sem fios) nas várias bandas. É, portanto, essencial uma utilização do espectro eficaz e eficiente.

Estudos realizados pela FCC [12] revelam que uma grande porção do espectro alocado é utilizado de forma esporádica e, esta utilização, varia geograficamente entre os 15% e os 85% [20]. Assim estes estudos concluem que não se pode considerar a alocação estática de espectro uma solução para as futuras gerações das telecomunicações. Esta subutilização do espectro leva a que surja a ideia de permitir que se criem condições para que sejam utilizadas todas as oportunidades espectrais que existam. É essencial compreender que oportunidades é que existem por forma a saber que quantidade de espectro existe disponível. Já foram feitas por todo o mundo várias medições [21–30] demonstrando que se trata de uma preocupação que antecede a viragem do milénio. Estas medições motivaram vários estudos mais recentes como é o caso do estudo realizado em Singapura [1] em 2008 onde são analisadas as bandas entre os 80 MHz e os 5.85 GHz com o objetivo de perceber quais são as bandas que estão a ser pouco utilizadas ou não utilizadas de todo. Neste estudo, a análise é feita a uma grande largura de banda o que implica que as conclusões sobre as frequências mais baixas (nomeadamente o SMM) sejam mais grosseiras pois são utilizadas definições que resultam em espaçamento entre pontos de 150 kHz o que implica falharem muitos canais no SMM. No entanto, permite ter, à partida, uma ideia da percentagem de utilização dos canais como demonstra a figura seguinte:

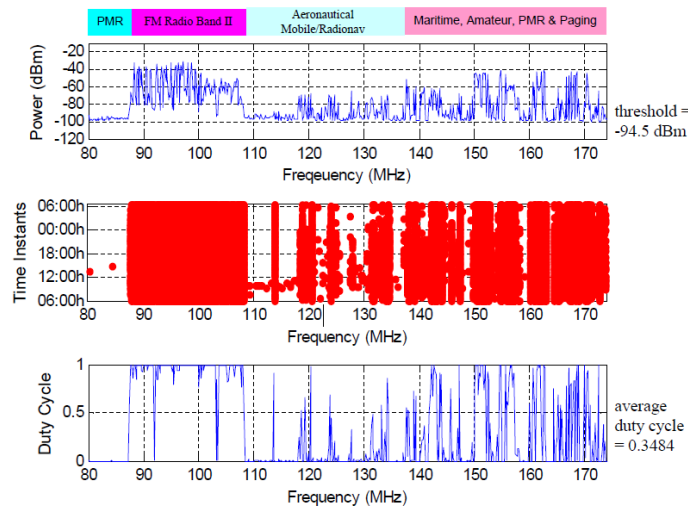


Figura 2.2: 80 MHz até 174 MHz [1]

Como podemos observar as taxas de utilização desta banda, nesta medição, estão nos 34.84%, o que demonstra baixa utilização do espectro e funciona como incentivo para que novos estudos sejam desenvolvidos. Este estudo conclui que em toda a banda que foi alvo de estudo (80 MHz - 5.85 GHz) a utilização total foi de 4.54%. No entanto, estas medições não podem ser utilizadas no estudo de serviços alternativos para melhor aproveitar o espectro. Para o fazer, são necessários mais testes, nas bandas específicas onde foram detetadas baixas utilizações por forma a obter informação detalhada da ocupação das mesmas. É ainda sugerido neste estudo que seja tomado em consideração o nível de ruído na determinação do limiar de deteção nas medições adaptando assim, os recetores a transmissões de potência mais baixa.

No seguimento do estudo referido, surge um outro realizado nas Filipinas procurando estudar a banda de VHF e UHF, ou seja, procurando reduzir a largura de banda a que é dirigido o estudo e, assim, obter informação mais detalhada sobre a utilização destas bandas. Este estudo [31] foi realizado em 2012 com o intuito de estudar as bandas da televisão analógica (VHF banda baixa, 54 MHz - 88 MHz), serviço móvel terrestre (VHF banda alta, 174 MHz - 216 MHz) e banda UHF, 470 MHz - 800 MHz. Apesar do SMM não se encaixar nestas frequências em estudo, a utilização deste será previsivelmente mais baixa do que o Serviço Móvel Terrestre (SMT) pois em terra existiram mais utilizadores e mais aplicações do que para quem se encontra no mar que apenas vê disponibilizados maioritariamente serviços de voz. Este estudo já permite uma análise mais fina do espectro relativamente ao outro realizado em Singapura pois o espaçamento entre pontos são 12 kHz o que permite

analisar os canais existentes nestas bandas. Este estudo é baseado num detector de energia que conta os canais ocupados e no final faz o quociente com o número total de canais em estudo. Neste estudo obtiveram-se os seguintes resultados: 57.14% na banda baixa VHF, 60% na banda alta VHF e 7.14% na banda UHF, tendo-se obtido como utilização total do espectro de 16.17%. Estas conclusões, no entanto, não podem ser extrapoladas para todo o espectro pois apenas estão em estudo alguns canais e é necessário analisar todos os canais da banda para melhorar e defender os resultados obtidos numa medição de ocupação do espectro.

É, então, previsível que a ocupação dos espectro do SMM seja baixa. Na banda do SMM os canais de VHF *per si* não possuem largura de banda suficiente para suportar serviços de banda larga. No entanto, podemos pensar em utilizar vários canais disponíveis pois juntos já se consegue extrair uma largura de banda maior. O maior obstáculo relativamente a isto é o facto de não ser possível utilizar espectro contíguo nesta banda. Existem, no entanto, soluções como técnicas de múltiplas portadoras *Non Contiguous Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (NC-OFDM) [32] que permitem aproveitar vários canais não contíguos e providenciar assim transmissão de dados de banda larga. Antes de se pensar numa implementação desta técnica, é necessário que sejam alteradas as políticas de espectro para se poder acomodar tais mudanças. Esta alteração pressupõe uma utilização dinâmica do espectro onde são aproveitadas as oportunidades (canais disponíveis). Apesar desse ser um fator crítico é também necessário ponderar como é que se poderia materializar a implementação dessa técnica. Na pesquisa realizada neste trabalho foi encontrada tecnologia de suporte já existente. A secção seguinte irá descrever o conceito que permite utilizar os espectro de forma dinâmica.

2.5.1 Rádios Cognitivos

Muito associado à *Dynamic Spectrum Allocation* (DSA), vêm os Rádios Cognitivos. Inicialmente proposto por Mitola [33], o conceito de Rádios Cognitivos surge como uma forma de aumentar a eficiência da utilização do espectro explorando a capacidade de incluir utilizadores secundários, sem afetar as comunicações dos utilizadores primários. De acordo com [34] um rádio cognitivo é um rádio ou sistema que faz uma apreciação do ambiente operacional eletromagnético e consegue, de forma dinâmica e autónoma, ajustar os seus parâmetros de funcionamento para maximizar *throughput*, mitigar a interferência, facilitar a interoperabilidade e aceder a mercados secundários. Torna-se então evidente que esta tecnologia demonstra potencial enquanto solução para o problema da escassez de espectro e da má gestão do mesmo.

No entanto, esta capacidade de tornar a utilização do espectro eficiente será proporcional à capacidade, do Rádio Cognitivo, de encontrar oportunidades (canais não utilizados) de comunicação. Para o conseguir, o Rádio Cognitivo, terá de obter um panorama multidimensional que incluirá os perfis de todos os transmissores e recetores o que implica que é necessária capacidade de reconfiguração dinâmica [35] que pode ser obtida através da plataforma *Software Defined Radio* (SDR) [36]. É então esta capacidade de adaptação ao panorama em que se insere, conseguindo retirar deste as características espectrais em várias dimensões (tempo, espaço, etc), que permite determinar as tais oportunidades de comunicação. Existe, contudo, outro facto que deve ser tomado em consideração quando se coloca a possibilidade da utilização de rádios cognitivos para criação de uma rede banda larga em VHF: o espectro não é contíguo. Este obstáculo pode ser ultrapassado considerando uma variante de *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) ficando assim com um conjunto de NC-OFDM como proposto por Eduardo Bolas na sua proposta de tese de doutoramento [13] e em consequentes trabalhos [37]. Esta técnica já foi implementada num protótipo desenvolvido por Germano Capela [6]. A eficiência que se poderia atingir com um rádio destes conseguiria uma performance em termos de serviço de banda larga que se tornaria numa alternativa viável e barata para as SATCOM. Todavia é necessário ter em consideração que os rádios cognitivos não iram, só por si, resolver todos os problemas pois a tecnologia ainda não se encontra num estado de maturidade que o permita mas também, a resistência à mudança e consequente dificuldade de alteração das políticas de gestão de espectro, pode vir a ser o maior obstáculo.

2.5.2 *Software Defined Radio*

Tradicionalmente, as cartas de comunicação rádio são criadas para protocolos específicos. Um exemplo disto são os telemóveis, estes possuem várias cartas para lidar com as suas comunicações rádio: uma carta para comunicação com estações base, uma carta para comunicação *Wi-Fi*, uma carta para receber sinal GPS e outra ainda para comunicação *Bluetooth*. Esta é a grande diferença para os equipamentos de *Software Defined Radio* pois o *hardware* destes lida com os sinais eletromagnéticos "crus" permitindo implementar aplicações específicas através de *software* [38].

Isto torna os equipamentos SDR muito versáteis pois, com o *software* apropriado estes podem desempenhar as funções de todas aquelas cartas específicas (como é o exemplo dos telemóveis). Para além disso, facilita também o teste de novos protocolos de comunicação e de novos sistemas permitindo

avaliar desempenhos de forma expedita e menos dispendiosa.

Esta tecnologia torna possível utilizar o espectro de forma revolucionária. Os padrões definidos para os rádios convencionais estão desenhados para utilização de uma banda estreita e fixa. Ao contrário destes, os SDR permitem sintonizar vários canais em simultâneo tornando assim possível implementar novos esquemas de acesso ao espectro que um rádio convencional não conseguiria realizar.

É importante salientar que as atuais políticas de gestão de espectro não são compatíveis com a utilização deste tipo de tecnologia pois não permitem que haja um controlo no acesso ao espectro tão eficaz como na utilização dos rádios convencionais onde é relativamente simples especificar os limites de operação. A alteração destas políticas de espectro envolve processos burocráticos complexos e a pouca maturidade desta tecnologia não permite ainda que possa ser aceite como regra de acesso ao espectro. Esta precisa de ser desenvolvida e utilizada em várias propostas de implementação de novos serviços por forma a ganhar maturidade e apresentar-se como uma possível solução para a escassez de espectro.

Uma definição de SDR atribuída pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) é (e cito) "Um rádio no qual algumas, ou todas, as funções da camada física são definidas por *software*". Assim, compreende-se que é constituído por uma série de tecnologias de *software* e *hardware* onde as funções do rádio são definidas por um *software* ou *firmware* que opere com tecnologia programável de processamento digital de sinal [39]. Estes dispositivos podem ser *Field Programmable Gate Arrays* (FPGA), *Digital Signal Processors* (DSP), *General Purpose Processors* (GPP), *System on Chip* (SoC) programáveis ou qualquer outro tipo de processadores programáveis.

Os benefícios que os SDR trazem consigo estão muito relacionados com a redução de custos para os fabricantes de equipamento rádio, criação de novas capacidades para os criadores de serviços rádio poderem explorar e também uma redução de custo para os utilizadores dos equipamentos. Existem vários fabricantes de SDR entre os quais se salientam:

- Ettus Research

Foi uma empresa que surgiu em 2010. Neste momento é o maior fabricante de plataformas para SDR onde se inclui a família de produtos

Universal Software Radio Peripheral (USRP). Esta família de produtos pode ser utilizada para aplicações desde DC até aos 6 GHz incluindo sistemas de múltiplas antenas [40]. Aplicações destes produtos são exploração de *white spaces*, aplicações para telemóveis, segurança pública, rádio amador, navegação satélite e aplicações com especial relevância para este trabalho: rádios cognitivos e monitorização de espectro. Para a monitorização do espectro realizada neste trabalho foi utilizada um USRP B100.

- Nutaq

Esta é uma empresa que se especializa em processamento digital de sinal e que também oferece soluções de implementação de SDR como é o caso do PicoSDR. Estes equipamentos funcionam até aos 3.8 GHz e também oferecem suporte para a interface GNU radio [41].

Para utilizar estes equipamentos é necessária uma interface, sendo o GNU Radio a normalmente utilizada. Este oferece o maior e melhor leque de ferramentas para explorar as capacidades dos SDR. O equipamento utilizado para a receção do sinal oferece uma interface com o ambiente eletromagnético e de seguida uma conversão analógica-digital, entregando o resultado da mesma ao GNU Radio. Este *software*, através de várias ferramentas que permitem que a informação flua pela cadeia de processamento em blocos de informação em vez de amostra em amostra, torna-se mais eficiente em termos de processamento. As linguagens utilizadas em GNU Radio são *Python* e C++ mas existe também uma ferramenta que permite fazer o processamento por blocos já criados denominada *GNU Radio Companion*. Esta interface permite desenhar uma cadeia de receção e transmissão por blocos, gerando depois um *script* em *Python* do esquema que se criou.

O GNU Radio é um *software open source* com uma comunidade de seguidores muito grande o que facilita a quantidade de informação e apoio que existe sobre este. Existem vários fóruns onde são discutidos trabalhos e trocadas ideias para novos projetos, sendo também uma fonte valiosa para a aprendizagem. Assim, tornou-se a escolha indicada para conseguir fazer a análise dos canais em tempo real, algo que não se consegue com o MATLAB.

2.5.3 Estudos Relacionados

- Medidas na China

A utilização de rádios cognitivos como solução para combater a escassez de espectro (aproveitando de forma mais eficiente) é uma ideia já levantada em vários estudos. Foi realizado um estudo em Pequim, China, no qual foi feito uma monitorização do espectro por forma a perceber de que modo se poderia acomodar esta tecnologia [42]. Para tal, é conduzido um estudo que mede a utilização do espectro dos 440 MHz aos 2700 MHz por forma a trazer mais conhecimento sobre esta banda e estudar quais as bandas mais indicadas para a aplicação desta tecnologia.

A entidade reguladora na China é a *State Radio Regulatory Commission of China* (SRRC). Esta, à semelhança das várias entidades reguladoras a nível nacional, divide o espectro em secções que depois são atribuídas a serviços e aplicações específicas. Este método garante que não existem interferências entre os vários sistemas que utilizam bandas adjacentes uns aos outros. Isto leva, no entanto, a que o espectro não seja utilizado de forma eficiente e que já não esteja livre para implementar novas tecnologias como *Time Division Long Term Evolution* (TD-LTE). Aqui, como em vários casos em estudo por todo o mundo, a solução natural e a previsão para o futuro é a introdução de rádios cognitivos. Esta tecnologia trás consigo a necessidade de alterar as políticas de gestão de espectro mas, como indica este estudo, a entidade reguladora de espectro chinesa (SRRC) já considera uma alteração das mesmas permitindo utilização dinâmica do espectro. Contudo, para se tomar uma decisão nesse sentido é necessário compreender muito bem os padrões de ocupação do espectro nas banda de interesse para que se consigam atingir os objetivos desejados (utilização eficiente do espectro) e não se prejudique os atuais serviços disponíveis.

Este estudo foi motivado pelo já referido estudo em Singapura [1] e utiliza um detetor de energia no qual determina a ocupação do canal (ou o *duty cycle* como é referido no estudo) fazendo o quociente entre as amostras com valor acima do limite de deteção utilizado e o número total de amostras. Com este método foi calculada a utilização em várias bandas, nomeadamente bandas utilizadas para serviços móveis digitais e serviços de dados para telemóveis. Para a banda do GSM registou-se uma utilização de 40.2% (que é considerada uma banda muito utilizada) tendo-se, na banda total em estudo - dos 440 MHz aos 2700 MHz - registado uma ocupação de 15.2% no espaço de duas semanas o que revela que 84% do espectro, que se encontra alocado a serviços específicos, não está a ser utilizado. Este estudo conclui que é necessário continuar a estudar as bandas alvo para a implementação pretendida dos rádios cognitivos criando assim condições para que se desenvolvam aplicações de elevada eficiência espectral, recorrendo a acesso dinâmico ao espectro.

- Medidas na Índia

À semelhança do acima referido, foi também desenvolvido um estudo na Índia com o intuito de medir a ocupação do espectro por forma a entender de que forma é que este poderia ser aproveitado por um sistema baseado em rádios cognitivos [2]. Contrariamente ao estudo que foi acima referido, as bandas alvo propostas são as bandas de VHF e UHF. Com o *switchover* da transmissão, do sinal de televisão, de analógico para digital, os utilizadores ganharam mais canais disponíveis, melhor qualidade de imagem e novos serviços como *High Definition Television* (HDTV). Não só ganham os utilizadores como o espectro pois este passa a ser utilizado de forma muito mais eficiente na sua forma digital do que na analógica. Esta mudança liberta, portanto, muito espectro regularmente denominado como *Television White Spaces* (TVWS). A utilização de rádios cognitivos nestas bandas é um tópico muito discutido na atualidade e já conta com algumas tentativas de legislar o acesso, feitas pela entidade reguladora americana, FCC [43] [44], onde se encontram vertidas regras para utilizadores não atribuídos a estas bandas.

Este trabalho realizado na Índia vem então estudar estas bandas de TV tendo como alvo uma implementação de rádios cognitivos nas mesmas. A utilização destas bandas pode ser observada na figura abaixo:

Band	No of TV channels available	TV channel number	Amount (MHz)
VHF band I (47-68 MHz)	3	2-4	21
VHF band III (174-230 MHz)	8	5-12	56
UHF band IV (470-582 MHz)	14	21-34	115
UHF band V (582-806 MHz)	28	35-62	221

Figura 2.3: Alocação de Canais de TV na banda VHF e UHF [2]

Para a medição do espectro foi utilizado um analisador de espectros e rotinas *MATLAB*, baseado-se num detetor de energia. As medições foram feitas com uma distância entre pontos de 200 KHz, possuindo, assim, a discriminação necessária para a análise da televisão analógica cujos canais usa larguras de banda entre os 4.5 e os 6 MHz.

Para as bandas de VHF e UHF, os valores obtidos de ocupação do espectro foram 3.55% e 7.22%, respetivamente. Isto demonstra a baixa utilização do espectro e mais uma vez a necessidade de ocupar este espectro de forma mais eficiente. Para tal, este estudo propõe a utilização de rádios cognitivos nestas bandas, salientando a importância de não afetar os serviços dos utilizadores primários. Para definir os requisitos técnicos e de operação dos rádios cognitivos na banda dos TVWS são necessários ainda vários estudos na área de compatibilidade e proteção dos incumbentes. Um passo nesse sentido seria uma harmonização no acesso ao espectro, já tendo sido feitas algumas tentativas de standardização, nomeadamente *IEEE* 802.11af e 802.22 [45]. O primeiro foi criado com o intuito de endereçar a camada física e a camada de controlo de acesso ao meio por forma a que estas cumprissem os requisitos legais para aceder aos TVWS. É baseado num esquema OFDM que lhe permite utilizar canais de larguras de banda de 5, 10 e 20 MHz acomodando várias modalidades que venham a ser regulamentadas para o acesso aos TVWS. No entanto, este standard é uma *Wireless Local Area Network* (WLAN) pelo que está preparada para alcances na ordem de 1 km, valor que não se adequa às comunicações marítimas. O standard 802.22 é focado em serviços de banda larga para zonas rurais, sem causar interferência aos TVWS. É o primeiro standard a incluir técnicas de rádios cognitivos como acesso dinâmico ao espectro, *spectrum sensing* e coexistência.

- Proposta de Introdução de Rádios Cognitivos na NATO

A utilização de rádios cognitivos tem muitas possibilidades a nível militar. Como tal, foi desenvolvido um estudo em 2012 que propôs uma forma de introduzir gestão dinâmica de espectro nas comunicações rádio militares [3]. Neste estudo foram levantados vários desafios chave para a implementação desta tecnologia. O processo de planeamento de frequências para uma missão é feito antes da missão e é proporcional às características da força. Isto requer um planeamento exaustivo e complexo sempre que uma força é empenhada. Assim, surge com naturalidade a gestão dinâmica de espectro como forma de melhorar os procedimentos de atribuição de frequências, aumentando a eficiência operacional e facilitando a gestão das comunicações rádio militares. No entanto, estas são tecnologias complexas e representam uma mudança de paradigma que dificulta o processo de implementação. Aliando a este fator, o facto dos militares serem particularmente conservadores no que respeita às comunicações militares é perceptível o trabalho que ainda é necessário desenvolver para esta ser uma solução em que os militares confiam. Para tal, este estudo sugere uma abordagem gradual, por passos, por forma a criar experiência e conhecimento sobre o funcionamento de rádios cognitivos. Os passos propostos são os seguintes:

1º Passo

O primeiro passo que é proposto é dedicar uma banda específica (entre 5 a 10 MHz na banda de UHF), dentro das alocações militares para utilização exclusiva de rádios cognitivos. Nesta banda, todos os utilizadores de RC teriam igual prioridade de acesso ao espectro, de acordo com o modelo de partilha livre do espectro. São apresentados vários argumentos que defendem a aplicação deste primeiro passo: não existe risco de interferência com bandas alocadas a outros serviços, familiaridade como a forma de acesso ao meio (igual ao GSM), facilita os requisitos para um sistema RC e possível extensão após ganhar confiança.

2º Passo

O segundo passo consiste na utilização oportuna por parte dos militares, das bandas civis. Assim, é proposta uma extensão da utilização de RC à banda civil, operando como utilizador secundário, na base da oportunidade espacial e temporal.

3º Passo

O que é proposto no terceiro passo é a coexistência de RC com bandas militares com serviços alocados. Baseando-se na experiência adquirida nos últimos dois passos nesta proposta considerou-se que já se estaria em condições de utilizar também as bandas militares na base da oportunidade como era feito no segundo passo com as bandas civis.

4º Passo

Como passo final é proposto um uso flexível das bandas militares e uma utilização oportunística a grande escala das bandas civis. Neste passo, o estudo realizado prevê que, quando for altura de avançar para este passo, todos os sistemas de alocação militares já tenham transitado para sistemas RC. Assim, é proposta uma utilização flexível e dinâmica na qual o acesso é controlado apenas por políticas de alocação dinâmica de espectro.

Uma imagem que ilustra estes passos é apresentada abaixo:

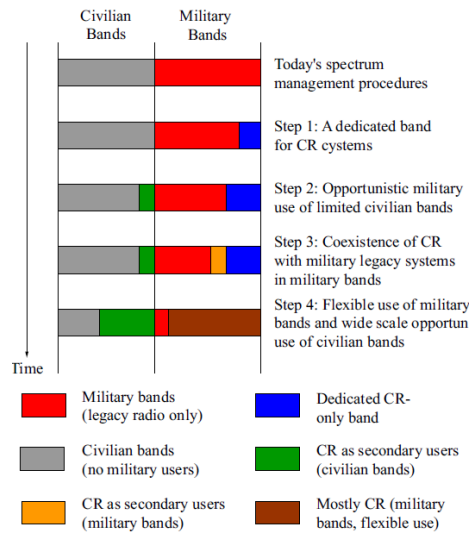


Figura 2.4: Ilustração dos Passos Propostos [3]

A proposta foi apresentada ao *NATO CaP3 (Capability Panel)*. Este painel tem como responsabilidade garantir que a NATO tem espectro suficiente para completar a missão e harmonizar as frequências rádio por todos os Aliados da NATO. A resposta a esta proposta foi negativa tendo, no entanto, sido reconhecido o problema da utilização pouco eficiente do espectro e da falta de confiança que a tecnologia ainda possui. Tornou-se impossível a libertação da banda que foi solicitada pois o espectro já se encontra completamente alocado e nunca poderia ser libertado espectro para uma tecnologia que ainda iria demorar muitos anos a estar operacional.

Trabalho realizado pela Marinha Portuguesa nesta Área

No contexto nacional, esta tecnologia é também vista como uma excelente oportunidade para a aproveitar o espectro de forma mais eficiente. Foi proposto o conceito de Rádios Cognitivos aplicados à banda marítima por Eduardo Bolas [13] onde foi apresentado o conceito de operação e a arquitetura da solução técnica. O trabalho de PhD é focado nas técnicas de deteção e exploração de oportunidades espectrais (múltiplos canais 25 kHz) na banda do SMM, nomeadamente *full-duplex sensing*.

No seguimento do conceito proposto, surge uma solução de implementação baseada em *GNU Radio* em [6]. Aqui são propostas soluções de implementação de NC-OFDM e é explorado o sistema *end-to-end* recorrendo a soluções que, não sendo ótimas, permitem demonstrar a exequibilidade da ideia. Estes dois investigadores são militares da Marinha Portuguesa.

Capítulo 3

Paradigmas de Gestão de Espectro

3.1 Paradigma Atual da Gestão do Espectro VHF

O papel das comunicações marítimas tem sido reconhecido e suportado por entidades tanto nacionais (ANACOM) como internacionais (ITU). Sucessivas WRC têm contribuído para adaptações na alocação de espectro que acomodassem evoluções tecnológicas no SMM com o propósito de melhorar as comunicações marítimas. Tomando alguns exemplos, em 1938 na *Radio Regulations Conference*, no Cairo, a ITU reconhece as frequências de 157-162 MHz alocando-as para o serviço móvel marítimo regional. Desde 1983 todo o equipamento dedicado a comunicações marítimas tem de cumprir com as especificações na Resolution 308 (WRC-79), sendo estas: espaçamento entre canais de 25 kHz com um desvio máximo de 5 kHz. Mais tarde, em 2000, a WRC-00 atualizou a Resolution 342 com a introdução de novas tecnologias que viessem melhorar o uso da banda dos 156-174 MHz. Foi ainda alterado o *Radio Regulations Appendix 18* [4] por forma a permitir tanto uma introdução de tecnologias futuras como flexibilidade a nível nacional que não interfira com o ambiente marítimo internacional. Podemos ver isto na fig 2.1.

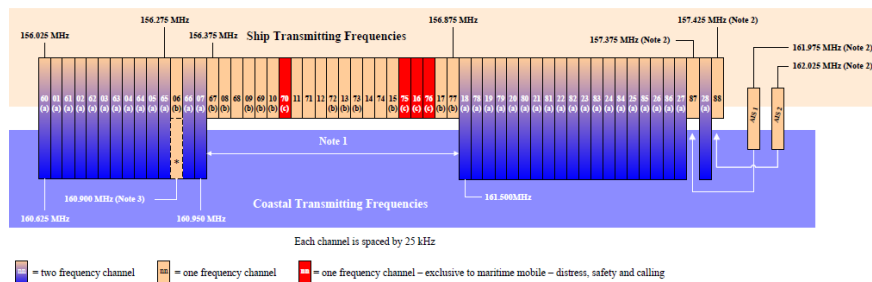


Figura 3.1: RR Appendix 18 [4]

Assim, o SMM foi atribuído a nesta banda, constituído por vários canais contíguos, alocados de forma estática. Como já foi visto anteriormente, estas alocações são determinadas a nível internacional e têm de ser respeitadas tanto a nível regional como a nível nacional. Desta forma, a nível nacional fica registado na legislação [46] que as frequências nesta banda serão utilizadas para aplicações relativas a comunicações marítimas. Maioritariamente nesta banda apenas se encontram canais destinados a voz e alguns a transmissão de dados de banda estreita (*Automatic Identification System* (AIS) e DSC). Existem, de facto, alguns canais destinados à experimentação de novas tecnologias mas cujas estatísticas ou padrões de utilização são completamente aleatórios devido ao facto de, a qualquer momento, alguém os poder utilizar para qualquer tipo de aplicação. Dentro destas bandas atribuídas a aplicações de comunicações marítimas, existem também canais que são reservados a entidades específicas como a Autoridade Marítima Nacional (AMN) e a MP. Respeitando a confidencialidade dos canais atribuídos a aplicações militares, não serão mencionadas as frequências nas quais estes trabalham mas podem ser consultadas em [47] com a devida credenciação e necessidade de conhecer.

Ao ser decidido que o espectro estaria assim alocado para o SMM, teve-se apenas em consideração as aplicações disponíveis no momento, a necessidade de salvaguardar os canais de possíveis interferências, mantendo sempre disponível uma porção de espectro dedicada a testes de possíveis avanços tecnológicos. É também definido pela IMO que é obrigatório para todos os navios que naveguem na área A1 do GMDSS, possuírem equipamentos com capacidade de comunicações VHF [9]. A esta alocação estática do SMM estão associadas várias vantagens e desvantagens que se enumeram:

Vantagens

- Esta alocação permite que os canais não sofram interferência por parte de outro serviço, garantindo QoS.
- Facilidade no desenvolvimento e comércio de equipamentos que operem nesta banda.
- Mecanismos de segurança à navegação são altamente fiáveis devido à não existência de interferências.
- Baixa complexidade do sistema, permite a intuitiva operação de qualquer equipamento por parte de todos os que navegam no mar.

Desvantagens

Em termos de desvantagens, não se podem enumerar muitas pois podem ser resumidas em apenas uma grande desvantagem. O facto haver esta alocação estática, não se podem utilizar canais disponíveis para outras aplicações. O presente trabalho irá providenciar dados que comprovam aquilo que é conhecimento geral de quem tem experiência de navegar. O espectro é muito pouco utilizado o que resulta numa baixa eficiência espectral na banda do SMM.

3.2 Gestão do Espectro na NATO

A utilização de todo o espectro eletromagnético é regulado pela ITU. Esta determina regulamentos compilados numa tabela de atribuição de frequências global, a partir da qual cada nação define a sua própria tabela de frequências de acordo com necessidades civis, militares ou partilhadas. A NATO, como organização militar internacional, faz a gestão do espectro militar por forma a uniformizar as comunicações entre as nações pertencentes aquando de uma missão. Para tal, apoiada no [15], a gestão é feita através de três fases: a fase de planeamento, a fase de implementação e a fase de recuperação [3].

3.2.1 Fase de Planeamento

O propósito desta fase é produzir o *Battlespace Spectrum Management Plan* (BSMP). Este é utilizado para informar todas as entidades participantes da gestão e uso previsto do espectro durante a missão. Nesta fase o *Combined Task Force Commander* (CTFC) assume o comando da missão e define o *Combined Spectrum Management Cell* (CSMC) que coordena todas

as necessidades de espectro para a missão. Esta célula divide-se ainda em várias componentes (as *Component Spectrum Managers* (CSM)) onde estão incluídas as componentes para comunicações marítimas, aéreas, terrestres, logística e forças especiais. Cada componente pode conter ainda vários elementos responsáveis por gestão a nível de um país (os *National Elements* (NE)).

Quando é formada uma força, existe sempre uma nação que é eleita para, através dos processos de gestão de espectro, fornecer apoio técnico ao CSMC garantindo que as frequências necessárias são disponibilizadas. Cada nação que compõe a força é obrigada a ter a sua própria célula de gestão de espectro (a *National Spectrum Manager* (NSM)) que coordena todos os processos relacionados com necessidades de espectro da sua força nacional. Cada NSM identifica todos os equipamentos a serem utilizados pelos NE fornecem informação ao CSMC. Esta célula faz a compilação da informação proveniente de todos os NSM e produz a *Electronic Order of Battle* (EOB) onde estão descritos todos os requisitos de espectro para a missão.

É, em condições normais, possível ajustar e providenciar todos os requisitos descritos no EOB. Um fator que se tem em conta é a informação topográfica que dá conta de todas as oportunidades para reutilizar espectro. Após ter a informação de como é o modelo, baseado no EOB, das necessidades do espectro, o CSMC faz a alocação do espectro necessário para o cumprimento da missão. Dependendo do facto de a missão ser apoiada pela nação anfitriã, o CSMC estabelece as frequências necessárias sem ter em conta utilizadores locais.

3.2.2 Fase de Implementação

Na fase de implementação, os NE implementa o BSMP que lhes foi indicado pelo CSMC através do seu CSM. Como foi referido, as frequências são determinadas sem consideração por utilizadores locais o que, muitas vezes resulta em interferências. É a obrigação dos NE investigar as causas das interferências e fazer os possíveis para as mitigar ou eliminar. Se as ações locais executadas não forem o suficiente e se as interferências provocarem uma redução na capacidade de operação, deve ser reportado ao CSM através de um modelo de relatório previsto em [15]. Os CSM são responsáveis por todo o controlo e gestão do espectro da sua área de operação. as suas responsabilidades passam por resolver os conflitos de frequências que surjam, refazendo as alocações caso não haja outra solução. As alterações feitas pelo CSM são enviadas para o NE que as implementa. No caso de o CSM não conseguir resolver as interferências, a responsabilidade é sempre do CSMC

que também deve intervir.

3.2.3 Fase da Recuperação

É a fase em que cada NE é responsável por avisar o CSM de que irá deixar de utilizar a frequência que lhe foi atribuída de modo a que o CSM possa atribuir a outra unidade. Este é responsável por rever e consolidar o espectro utilizado na força, identificando alterações necessárias aos NE no BSMP.

A imagem abaixo mostra um esquema que clarifica este procedimento:

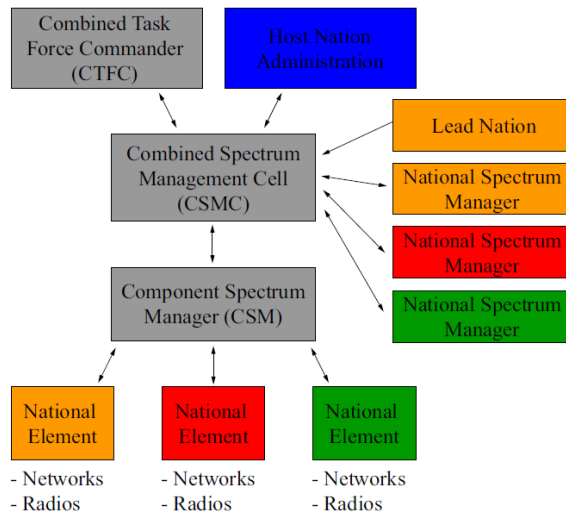


Figura 3.2: Organização da Gestão de espectro na NATO

3.2.4 Observações

Esta forma de gerir o espectro assenta da mesma forma na alocação estática, apesar de provisória, estando suscetível a interferências e a utilização pouco eficiente do espectro. É necessário garantir alguma flexibilidade no espectro para acomodar mais facilmente as necessidades de espectro, permitindo um aproveitamento mais proveitoso e menos disruptivo.

3.3 Acesso Dinâmico ao Espectro

As políticas de gestão de espectro, devido ao receio da existência de interferências e a falta de alternativas na altura, alocaram os canais de forma estática. Esta medida veio evitar que os canais sofressem interferências, mas

veio também trazer aquilo que se chama uma escassez artificial [5] do espectro, pois quando ninguém está a usar um canal para o serviço que ele foi alocado, mais ninguém o pode utilizar. Para podermos utilizar o espectro de forma mais eficiente é necessário partir para acesso dinâmico. As várias ideias discutidas no *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks* (DySPAN) [48] sugerem várias formas de utilizar o espectro de forma dinâmica, estas são: ***Dynamic Exclusive Use Model***, ***Open Sharing Model*** e ***Hierarchical Access Model*** organizadas como podemos observar na figura 3.3.

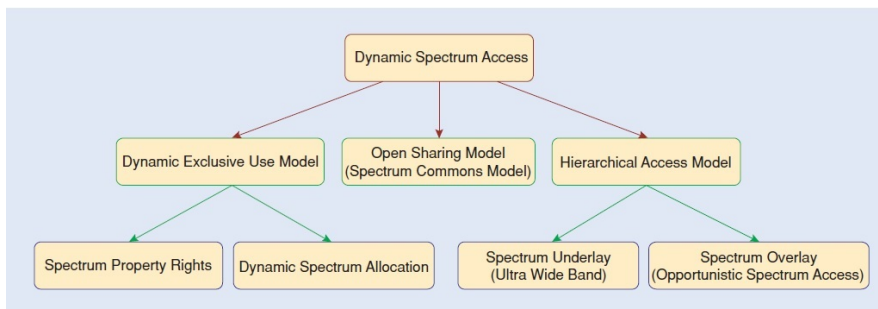


Figura 3.3: Taxonomia da Gestão Dinâmica de Espectro [5]

3.3.1 Modelo de Uso Dinâmico Exclusivo

Este modelo mantém a estrutura básica das atuais políticas reguladoras do espectro. As várias bandas encontram-se alocadas a serviços aos quais apenas utilizadores exclusivos têm acesso. Existe neste modelo, tal como nos restantes, a intenção de atribuir alguma flexibilidade à gestão do espectro. Assim, dentro deste modelo podemos encontrar duas abordagens: *spectrum property rights* [49] e *dynamic spectrum allocation* [50]. A primeira, permite que utilizadores licenciados possam vender ou trocar espectro e escolher de forma livre que tipo de tecnologia implementam para o utilizar. Assim, atribui-se um papel muito importante à economia e mercados, procurando sempre a forma mais lucrativa de gerir o espectro. A outra abordagem, surgiu no âmbito do *European DRiVE project* [50] (este foca-se na alocação dinâmica em redes heterogêneas utilizando um canal de coordenação à semelhança do proposto por [6]). O objetivo desta é aumentar a eficiência espectral, através de alocações dinâmicas do espectro, tendo em conta estatísticas de utilização dos serviços a duas dimensões (espaço e tempo). Ou seja, em muito similares com as atuais políticas, podemos dizer que ambas as abordagens em que se pode correr este modelo, gerem a utilização do espectro numa determinada região num determinado momento, alocando-o a um serviço para o

uso exclusivo do utilizador. No entanto, estas abordagens não conseguem aproveitar todas as oportunidades espectrais devido à natureza inconsistente das comunicações sem fios.

Um exemplo de aplicação deste modelo é o roaming no GSM que acontece sempre que se sai do país. Outro exemplo é o seguinte, imagine-se que num determinado momento, numa célula da responsabilidade de uma operadora de telemóveis, encontram-se um número de utilizadores do serviço de banda larga tal que não permite à operadora fornecer a todos o serviço devido ao espectro limitado que tem. Nesse caso, imagine-se que outra operadora móvel na mesma célula, naquele momento, não tem nenhum operador a requisitar os serviços de banda larga. É possível que, a operadora que está a necessitar de mais espectro para fornecer o seu serviço a todos os utilizadores, compre ou troque espectro com a outra operadora. Por forma a sumarizar o conceito do modelo e analisar a sua aplicabilidade foi feita uma análise SWOT:

Pontos Fortes

- Utilização elevada do espectro disponível.
- As decisões relativamente ao uso do espectro são deixadas juntos dos mercados.
- A inércia do sistema regulador não prejudica as mudanças tecnológicas disruptivas, ou seja, alterações tecnológicas apenas dependem que quem adquiriu o espectro e das suas intenções.
- No contexto militar é de salientar a possibilidade de adquirir mais espectro para colmatar a falta deste na utilização de novas tecnologias nas diversas missões.

Pontos Fracos

- Necessidade de grandes alterações, nomeadamente na definição de que direitos sobre o espectro é que seriam vendidos e trocados, estabelecimento de estruturas que acomodassem trocas de espectro em tempo real e alterações na gestão de registo no plano nacional de frequências.
- Devido à natureza transitória da exclusividade espectro (compras e trocas) torna-se difícil implementar estratégias de gestão de interferências.

Oportunidades

- O espectro encontra-se em constante reorganização, o que potencia a utilização eficiente e lucrativa.
- Em todo o caso, as frequências serão sempre utilizadas pelos serviços que mais se adequam pois são os que mais as valorizam.

Ameaças

- Acumulação por parte de entidades com mais poder económico.
- Cada vez mais elevados os custos das transações do espectro.
- Aparecimento de monopólios que dificultam a integração de entidades emergentes com menos poder económico.
- Dificuldade em manter o espectro alocado a aplicações militares, podendo comprometer a segurança da informação ou comprometer a fiabilidade dos serviços.

3.3.2 Modelo de Partilha Livre

Também conhecido na comunidade científica como *spectrum commons* [51] [52], este modelo segue uma utilização livre e aberta do espectro, em que todos os utilizadores têm igual direito a aceder e fazem-no na base da disponibilidade. As entidades reguladoras alocam uma certa porção de espectro com o objetivo de este ser utilizado por qualquer tipo de equipamento que cumpra simples requisitos (como potência máxima emitida e requisitos de manipulação de interferência fora da banda atribuída), tendo por base o princípio do bom senso na utilização do espectro. Esta utilização não está limitada a um serviço específico, deixando o espectro disponível para ser utilizado para qualquer aplicação. Sendo o espectro livre, não faz sentido falar em vender ou trocar espectro à semelhança do modelo anterior [53]. O conceito de espectro não licenciado ou acesso livre ao espectro é sem dúvida uma utilização muito próxima da ideal do "espectro isento". O conceito é baseado em regras muito pouco restritas e apoiado no bom senso dos utilizadores. As únicas regras necessárias de serem implementadas serão regras como emissões fora da banda atribuída, limitação de níveis de potência nos equipamentos e alguns conceitos tais como *listen before talk* (observar primeiro a utilização do ambiente eletromagnético antes de o utilizar) por forma a impedir que os sistemas fiquem "gananciosos" e desrespeitem a igualdade no acesso

ao espectro. Para uma eventual implementação deste modelo de gestão dinâmica seria necessário dedicar mais espectro por forma a entender primeiro qual o efeito que realmente teria se se expandisse a outras bandas. Este espectro teria de seguir nos mesmos parâmetros que a banda dos 2.4 GHz, ou seja, sem limitações quanto à natureza do serviço ou quanto a questões técnicas. Este modelo ganha apoio devido ao sucesso dos serviços *wireless* na banda *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) não licenciada (por exemplo, *WiFi*). As estratégias de partilha de espectro neste modelo podem ser centralizadas [54] [55] ou distribuídas [56] [57] [58] por forma a colmatar as dificuldades tecnológicas.

Pontos Fortes

- Requisitos para aceder ao espectro muito baixos.
- Permite a introdução rápida de nova tecnologia.
- Fácil de implementar devido ao facto de já existirem aplicações a utilizarem (nomeadamente *WiFi*).

Pontos Fracos

- Não existem quaisquer direitos para os utilizadores.
- De cada vez que se acrescenta um utilizador àquela porção de espectro, as condições de acesso para os restantes utilizadores são afetadas.
- Não permite salvaguardar os direitos dos militares no acesso ao espectro.

Oportunidades

- Espectro não licenciado tem ótimas condições para a inovação o que facilita a introdução de novas tecnologias.
- Vários sistemas cognitivos podem partilhar a mesma porção de espectro.
- Na perspetiva marítima, são menos os utilizadores concorrentes ao espectro, significando mais espectro disponível.

Ameaças

- Utilizadores deste modelo não estão protegidos contra interferências.
- Possíveis conflitos entre utilizadores e dificuldade em resolver esses conflitos.

- Um utilizador com um equipamento mais "agressivo" (ou seja, com maior potência de emissão e com maior interferência em bandas adjacentes) pode dominar o espectro e suprimir o acesso dos outros utilizadores.
- Não possuindo direitos sobre o espectro, os militares podem ver os seus serviços (indispensáveis para o cumprimento da missão) indisponíveis.

3.3.3 Modelo de Acesso Hierárquico

Este modelo, como o próprio nome indica, é construído com base numa estrutura hierárquica na qual existem utilizadores primários e utilizadores secundários. Este modelo pode ser considerado um híbrido dos dois acima referidos pois a ideia é garantir na mesma exclusividade para utilizadores primários, permitindo que existam utilizadores secundários que acedam ao espectro com igual direito, entre eles, minimizando as interferências sentidas pelos utilizadores primários. Podem ser feitas duas abordagens à partilha de espectro entre utilizadores primários e secundários, *spectrum underlay* e *spectrum overlay*.

Spectrum Underlay

Num sistema *underlay*, máscaras espectrais impõem limites na potência radiada em função da frequência, e eventualmente da localização. Os rádios coexistem na mesma banda que os utilizadores primários mas estão regulados por forma a causarem interferência sempre abaixo de um determinado limite. Esta limitação na potência implica que os *Underlay Radios* (UR) tenham de espalhar o seu sinal por uma banda muito superior, ou apenas operar a ritmos de transmissão baixos. Um exemplo disto é *Ultra Wide Band* (UWB). A vantagem deste sistema é que os rádios não precisam de ser dotados de capacidades cognitivas avançadas pois o próprio princípio dos UR assume que os utilizadores, ou utilizam serviços de banda estreita ou têm um nível de potência que permite que a interferência por parte dos UR seja sempre mínima. Como se utiliza uma grande largura de banda, os UR estão susceptíveis a interferências provenientes de uma série de fontes incluindo sinais de banda estreita dos utilizadores primários. Isto pode provocar distorção no sinal devido a saturação no *Automatic Gain Control* (AGC) e é complexo suprimir os sinais mais fortes dos utilizadores principais. OS UR's são muito complexos em termos de implementação de *hardware* [59] mas são particularmente simples no que diz respeito às capacidades cognitivas que necessita de

ter para ser implementado. Os principais problemas/desafios são portanto: implementação do *hardware* e supressão de interferências.

Spectrum Overlay

Esta abordagem, também conhecida como *Opportunistic Spectrum Access* (OSA), primariamente defendida por Mitola [60] pode ser aplicada tanto no domínio espacial como temporal [61]. Na primeira, os utilizadores secundários procuram aproveitar-se de oportunidades que surjam nas frequências não utilizadas pelos utilizadores primários numa determinada área geográfica enquanto que na segunda, o objetivo é tirar proveito da natureza inconstante dos utilizadores primários e utilizar o espectro sempre que este não esteja a ser utilizado. No entanto, as oportunidades espectrais surgem tanto no tempo como no espaço e deve existir um sistema que as aproveite às duas. Dado um utilizador primário com uma banda de uso exclusivo, uma população homogênea de utilizadores secundários pode considerar aceder ao espectro fazendo os seguintes passos: *Spectrum Sensing*, cada equipamento deve ter capacidade de interpretar o ambiente eletromagnético por forma a detetar transmissões dos utilizadores primários e conseqüentemente, detetar oportunidades. Coordenação entre os utilizadores secundários, se vários utilizadores secundários detetarem a mesma oportunidade para transmitir, esta deve ser coordenada entre eles pois têm o mesmo direito sobre a oportunidade. Detetar que utilizador primário volta a transmitir, é importante que cada equipamento continue sempre a interpretar o ambiente eletromagnético pois assim que houver uma nova utilização por parte do primário, o secundário deve "retirar-se" de imediato por forma a não causar interferências. Uma possível implementação desta abordagem é proposta nesta dissertação e foi também já indicada em [7] [6] [62].

Pontos Fortes

- Ótima eficiência espectral.
- Oferece uma maior disponibilidade para aceitar novas tecnologias que o *Dynamic Exclusive Use Model* mantendo o cuidado com as interferências que se perde no *Open Sharing Model*.
- Mantém os direitos dos utilizadores primários, característica que é necessária para que se mantenham disponíveis serviços imprescindíveis, como por exemplo os de emergência, socorro ou outros.

- Precisa de poucas alterações em termos de estrutura da gestão do espectro, o que favorece a sua implementação devido a dificuldade e reticência militar em aplicar mudanças complexas.

Pontos Fracos

- QoS não garantido pode assustar os utilizadores dos serviços militares e atrasar o processo de alteração do paradigma atual da gestão do espectro.
- Dificuldade em convencer os utilizadores a mudarem-se de um ambiente livre de interferências para um ambiente tolerável a interferências, principalmente os utilizadores militares.
- Dificuldade em criar uma entidade que consiga perceber como é que o acesso ao espectro está a ser feito por parte de utilizadores primários e secundários.

Oportunidades

- Possíveis implementações já propostas com protótipos funcionais [6].
- Método indicado para aplicações militares, aplicando-se inicialmente a espectro exclusivamente militar, facilitando os processos burocráticos entre várias entidades.

Ameaças

- Muitas dúvidas por parte da indústria sobre a sua aplicabilidade, o que atrasa o desenvolvimento da tecnologia.
- Dificuldade em garantir que os utilizadores primários não têm disrupção nos seus serviços.
- Mais referente ao *Spectrum Overlay*, dificuldade em saber quando é que o utilizador primário volta a transmitir depois de uma oportunidade identificada pelo secundário.

3.3.4 Observações finais

Após terem sido descritos os vários modelos de acesso dinâmico ao espectro e ter sido feita uma análise que permite compreender as variáveis associadas a cada um deles, é evidente que existem várias vantagens e desvantagens para

cada um. A escolha é associada ao tipo de serviço que se pretende para a banda em questão como foi visto pelos exemplos descritos. A banda do SMM não é exceção e, portanto, para se poderem implementar novas tecnologias é necessário rever e alterar o paradigma de gestão de espectro. Tendo em conta a análise que foi feita, o modelo que mais se adequa à introdução de rádios cognitivos na Marinha é o modelo de acesso hierárquico.

Capítulo 4

Utilização do Espectro na Marinha

4.1 Utilização do Espectro na Marinha

4.1.1 Introdução

Uma das condições que incentivam o estudo destas matérias é, como tem sido descrito, a escassez do espectro eletromagnético e a sua utilização pouco eficiente. A afirmação de que o espectro destas bandas marítimas está pouco utilizado é perceptível para quem navega mas tem, no entanto, de ser quantificada e demonstrada. Com o fim de esclarecer se, de facto, existem oportunidades no espectro que podem ser aproveitadas pela tecnologia de rádios cognitivos e alocação dinâmica de espectro torna-se necessário compreender como é que este é utilizado. Para tal, foi realizada uma medição da ocupação do espectro, medição esta que não é trivial e que trás consigo muitas variáveis a ter em conta para garantir que os dados recolhidos e as conclusões retiradas são válidas. Assim, serão descritos, neste capítulo, os equipamentos utilizados, o software utilizado, os parâmetros de receção, testes de calibração que permitem avaliar e readaptar esses parâmetros. O objetivo final é conseguir caracterizar o espectro da banda do SMM no que respeita a percentagem de utilização para que se possa contribuir para futuros estudos no desenvolvimento da tecnologia de RC e para a sua introdução na MP. De referir que, devido à sua complexidade e morosa execução, os testes foram feitos em conjunto com o ASPOF EN-AEL César Meneses. Este trabalho conjunto permitiu aumentar as oportunidades que ambos tivemos para recolher dados tendo em conta os estágios e embarques em que estávamos empenhados.

4.1.2 Detecção de Ocupação dos Canais

Para a realização destas medições é necessário uma série de ferramentas que juntas permitam retirar conclusões válidas. Em primeiro lugar temos de pensar como é que se vai perceber se, de facto, existem transmissões no ar e existem várias formas de fazer isto denominadas de técnicas de *spectrum sensing*: deteção dependente de ruído, deteção de características e deteção cega.

Dentro das várias técnicas que se poderiam utilizar (filtros adaptados, deteção cicloestacionária, entre outras) a que foi escolhida para este estudo foi o detetor de energia (técnica de deteção dependente de ruído). Um detetor de energia compara a potência do canal com a de um nível de deteção (*threshold*) para determinar se o canal está ocupado ou não. Esta técnica é bastante comum e, devido à sua baixa complexidade computacional [6], pode ser implementada tanto no domínio do tempo como da frequência. Para se poder ajustar o nível de decisão é necessário saber em cada medição qual o nível de ruído na banda em estudo. Como no nosso caso a banda em estudo (156-174 MHz) é superior ao espaçamento de canais VHF (25 kHz) é necessário fazer o cálculo de múltiplos canais ao mesmo tempo. Este é um processo que é muito exigente a nível computacional o que condiciona a utilização de outras técnicas. Uma implementação no domínio da frequência permite esta deteção multi-canal utilizando apenas a estimativa da densidade espectral no momento da medida. Não é possível identificar qual o tipo de sinal que é detetado mas tal não é problema pois o objetivo desta medida é perceber se está ocupado ou não, independente do sinal a ser utilizado.

Para o desenvolvimento do detetor de energia foi solicitada a ajuda do Eng. Germano Capela cuja experiência e trabalhos já realizados em GNU Radio permitiram desenvolver as ferramentas necessárias para as medições a efetuar. A deteção de energia, como técnica dependente de ruído que é, depende essencialmente de estimativas espectrais e de estimativas do nível de ruído para definir níveis de deteção. São recolhidas amostras que são processadas por um programa (*script*) escrito em *Python* que faz a estimativa espectral, a estimativa de ruído e consequentemente a deteção da ocupação do respetivo canal. Estas amostras são recolhidas utilizando a USRP. Com a ajuda do programa *GNURADIO Companion* é sintonizada a frequência central e respetiva banda onde se vai trabalhar. No caso da aplicação neste trabalho a frequência em que está centrado o equipamento é 159 MHz e a largura de banda são 7 MHz (são 8MHz aos quais depois se trunca 500 kHz em cada "extremidade" por forma a anular efeitos de *aliasing*). Este

valor permite que se não se exceda o esforço computacional, conseguindo analisar dez amostras por segundo. Assim que é obtida a estimativa espectral, é feito o cálculo para a detecção da ocupação, juntamente com a banda total (frequência de amostragem), o espaçamento entre canais e o tamanho da *Fast Fourier Transform* (FFT), como representado na figura 4.1.

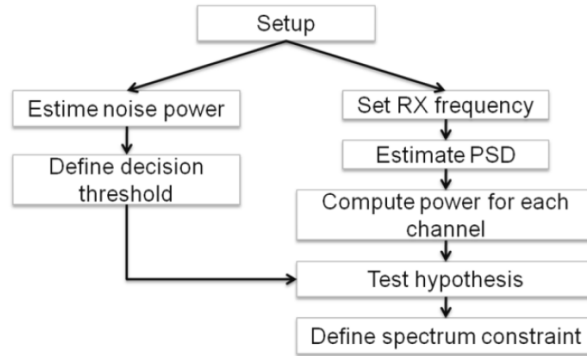


Figura 4.1: Fluxograma da técnica de *spectrum sensing* utilizada [6]

A relação entre o nível de ruído e o nível de decisão para uma dada probabilidade de falso alarme é dada pela expressão:

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

onde:

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

Existe uma incerteza associada à estimativa do nível de ruído que está sempre presente quando se utilizam detetores de energia. Motivado por este fator e calculando a potência de cada canal a cada amostra recolhida, o nível de ruído é considerado, nesta implementação, como a menor potência calculada de todos os canais. O limite de detecção é calculado a partir deste valor.

4.1.3 Computação

Utilizando o *software GNURADIO Companion* foi utilizada a estrutura indicada na figura 4.2.

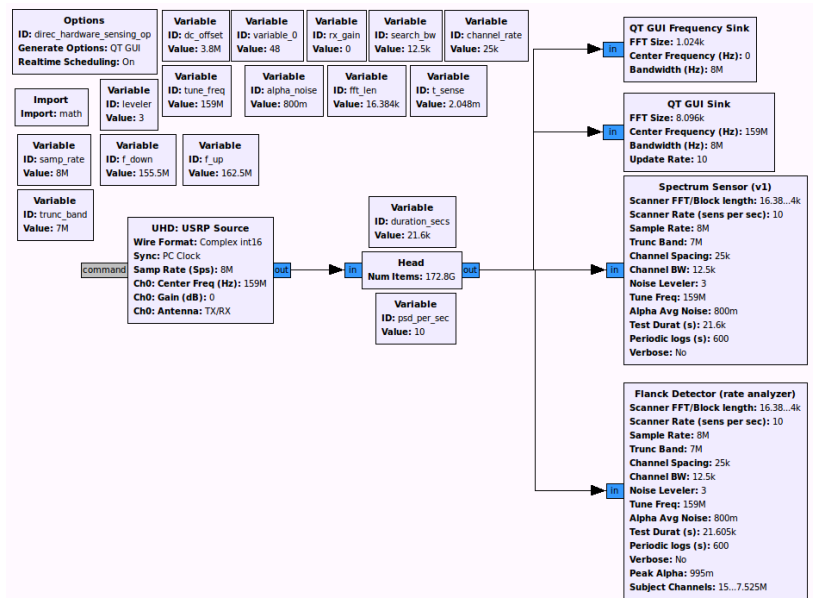


Figura 4.2: Esquema utilizado em *GNURADIO*

Aqui podem-se observar os parâmetros utilizados para a recepção e os blocos que mostram como é feita a detecção. A informação é distribuída para os blocos "Spectrum Sensor (v1)" e "Flanck Detector" para análise. O primeiro é um bloco desenvolvido pelo Eng. Gonçalves Capela e o segundo uma adaptação da técnica utilizada por este para a contagem do número de transmissões (cuja importância será discutida no seguimento desta secção). Os parâmetros foram, no entanto, adaptados à aplicação específica deste trabalho de acordo com calibrações que serão discutidas de seguida.

Dentro destes blocos existe um contador que incrementa com cada amostra. Se existirem canais com potência acima do nível de decisão, é incrementado um contador para a frequência de cada canal. No fim, é feito o quociente entre os dois e obtém-se assim a percentagem de utilização de cada canal.

É muito importante para este trabalho saber qual a percentagem de tempo em que os canais estão a ser utilizados mas, é também importante saber como é que essa utilização foi efetivamente feita, daí medir-se também o número de transmissões. Um exemplo para esclarecer esta necessidade é o seguinte:

se um canal estiver utilizado 50% do tempo mas for utilização contínua, a forma como o algoritmo de acesso dinâmico do rádio cognitivo está projetado tem de ser diferente do que para um canal com a mesma percentagem de ocupação mas uma utilização mais intermitente. Isto é, no entanto, um processo de elevado esforço computacional limitando assim o número de canais em estudo para este parâmetro específico.

Desenvolveu-se então uma rotina que detetasse o "flanco ascendente" duma transmissão incrementado um contador próprio. Para tal, existem várias considerações a tomar: só pode ser contabilizado o início da transmissão e não todas as amostras que se encontrarem acima do nível de decisão, a deteção desta transmissão não pode ser sensível demais senão iria contabilizar transmissões provenientes de picos de ruído, tem de ser adaptado para que seja compatível com a ação humana de carregar num *Push to Talk* (PTT) e desligar. Isto levou a que se utilizasse a seguinte expressão:

$$F = n(1 - \alpha) + (n - 1)\alpha$$

onde;

- F é o valor a comparar com o limite de deteção para avaliar se houve transição.
- n amostra inicial.
- $n - 1$ amostra anterior.
- α é um valor entre 0 e 1.

Esta formulação explica que o valor a ser comparado com nível de deteção tem de ser um valor ponderado entre a amostra atual e a anterior por forma a não tornar tão abrupta a variação e salvaguardar as transmissões falsas provenientes de picos de ruído. Assim que é detetada uma transmissão é ativada uma *flag* que indica ao contador para não incrementar e põe o valor de α a 0. Este valor retoma o seu valor inicial assim que termina a transmissão. Isto permite que sistema nunca perca uma transmissão que ocorra imediatamente a seguir pois o valor de F cai abruptamente.

Para realizar os testes de calibração foi também necessário simular um utilizador da forma mais controlada possível para que se comportasse sempre da mesma forma em todos os testes e eliminar o erro humano inerente ao movimento mecânico de carregar num PTT. Para tal foi aproveitada uma placa eletrónica - elaborada por Messias Pessoa e Vitor Batista no âmbito

de um trabalho da Escola Naval - que lê um ficheiro .txt de um cartão SD e reproduz o sinal de PTT. Nesse ficheiro .txt encontram-se duas colunas com início da transmissão e duração da mesma, respetivamente.

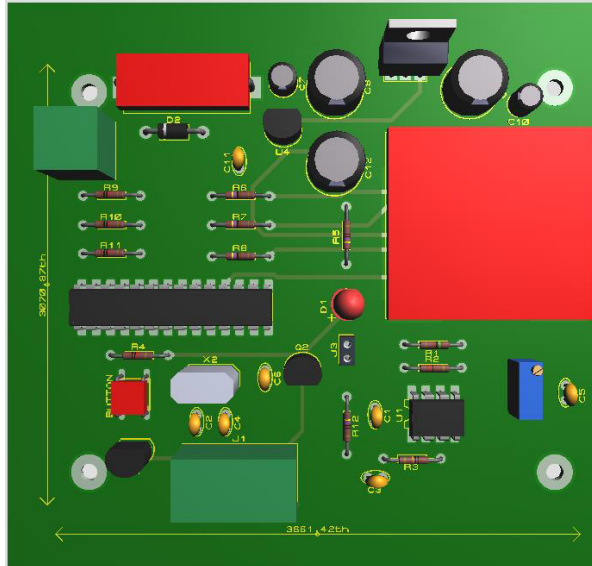


Figura 4.3: Placa eletrónica que simula um utilizador

Com o objetivo de aproximar o mais possível do aleatório, foi criada uma rotina em *MATLAB* onde apenas se introduz a percentagem com que se quer o canal ocupado e esta que escreve os ficheiros.

4.1.4 Testes e Medidas

Testes de Calibração

Com as ferramentas referidas acima, é necessário realizar testes num ambiente onde já se sabe o que se pretende obter de modo a despistar eventuais erros nas medições e poder afirmar que os dados retirados são de confiança. Estes testes permitem avaliar os parâmetros de receção definidos e ajusta-los para que fiquem calibrados. Para tal, foi escolhido como locais de teste a Escola Naval e a Escola de Tecnologias Navais da Armada.

1ª Abordagem

O primeiro teste foi realizado no Departamento de Ciências e Tecnologias (DCT) da Escola Naval (EN). O objetivo deste teste era perceber se o

equipamento estava a receber os valores de potência que era suposto. Para tal, utilizou-se o seguinte material

- 1 antena VERT400
- 1 antena HE500
- 1 PC's
- 1 USRP B100
- 1 Analisador de Espetros FSH3
- Radio VHF Sailor

O teste consistiu em fazer transmissões no rádio referido e comparar a potência recebida no nosso recetor com a recebida no analisador de espetros, como podemos perceber na seguinte figura:

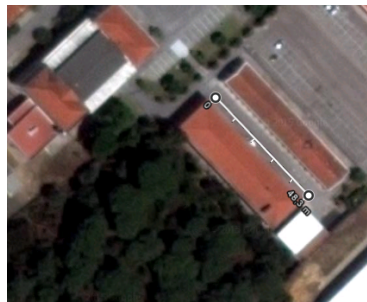


Figura 4.4: Departamento de Ciências e Tecnologias, Escola Naval

Este teste mostrou que, mesmo a poucos metros do emissor, os valores registados nos dois equipamentos eram distintos e, há medida que se afastavam os recetores, a diferença era ainda maior. Isto deve-se ao facto de existirem fenómenos não-lineares associados às propriedades da própria antena VERT400. Esta antena é *triband*, ou seja, é projetada para três bandas distintas de frequências que vão desde a banda VHF até ao limite superior da banda UHF. Isto significa que a adaptação para estas frequências não é a ideal pelo que se concluiu que a utilização de uma antena dedicada exclusivamente à banda VHF seria mais indicado, permitindo eliminar também interferências e produtos de intermodulação provenientes de outras bandas.

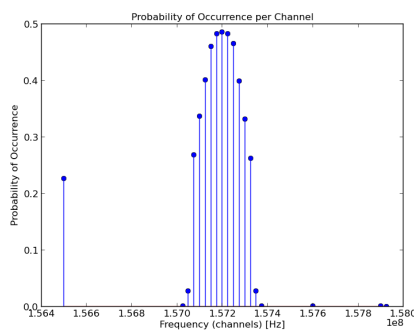
2ª Abordagem

Após concluída a 1ª abordagem era importante perceber se o algoritmo da detecção de transmissões estaria a funcionar corretamente. Para tal, foi escolhido como local de testes o Departamento de Armas e Eletrónica (DAE) e o Departamento de Operações (DOP) da Escola de Tecnologias Navais (ETNA), pois o edifício DOP possui uma antena VHF ligada a um rádio marítimo no próprio edifício, com antena no telhado. Isto permitiu colocar o recetor noutra edifício (DAE), a uma distância de 100 metros como vemos na seguinte imagem:

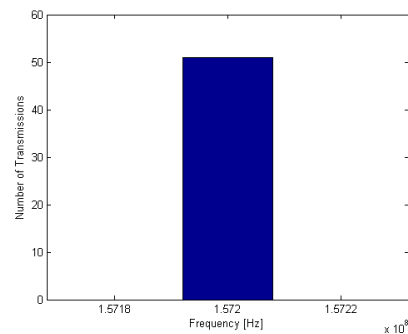


Figura 4.5: Departamento de Armas e Eletrónica e Departamento de Operações, ETNA

A realização do teste que consistiu no seguinte: Um operador junto do rádio realizava transmissões de acordo com o padrão descrito abaixo (falta tabela) enquanto o equipamento recebia a informação. No final obtivemos os seguintes resultados:



(a) Percentagem de ocupação do canal



(b) Número de transmissões registadas

Figura 4.6: Resultados do Teste na ETNA

Assim, foi verificado que o detetor de transmissões estava a funcionar corretamente. No entanto, a ocupação não chegou aos 50%, um fenómeno que se deve ao facto de existir um erro humano associado, sendo apenas possível eliminar recorrendo ao controlador referido na secção anterior.

3ª Abordagem

Nesta 3ª abordagem o foco tornou-se conseguir simular um canal sem o erro humano associado, permitindo assim perceber se o sistema recebe a potência que é suposto, calcula a ocupação correta do canal bem como todas as transmissões que sejam efetuadas. O material utilizado para este teste foi o seguinte:

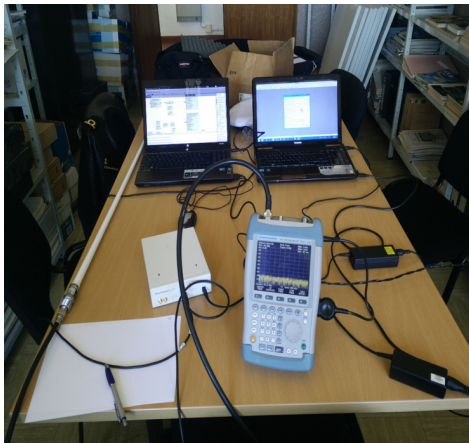
- 2 antenas CX4 VHF
- 1 antena HE500
- 2 PC's
- 1 USRP B100
- 1 Analisador de Espetros FSH3
- 1 Fonte de Alimentação
- 1 Microcontrolador
- Radio VHF Sailor

Este teste foi desenhado para ser feito em 10 minutos que será suficiente para verificar se tudo corre como é suposto. Em primeiro lugar foi criada uma rotina em MATLAB em que se introduz a percentagem de tempo que queremos para a utilização do canal e o número de transmissões que serão feitas. O que esta rotina faz é gerar aleatoriamente transmissões e tempos de transmissão que cumpram os requisitos introduzidos por forma a tornar mais consistentes os resultados. Esta informação é carregada num cartão SD que é depois lido pelo micro controlador, que depois fornece sinal de PTT ao rádio. Foram introduzidos como parâmetros, 30% do tempo está a transmitir em 5 transmissões. O rádio, por sua vez está ligado a uma antena CX4 VHF. Os equipamentos de receção foram colocados numa configuração de acordo com as figuras 4.7 e 4.8.

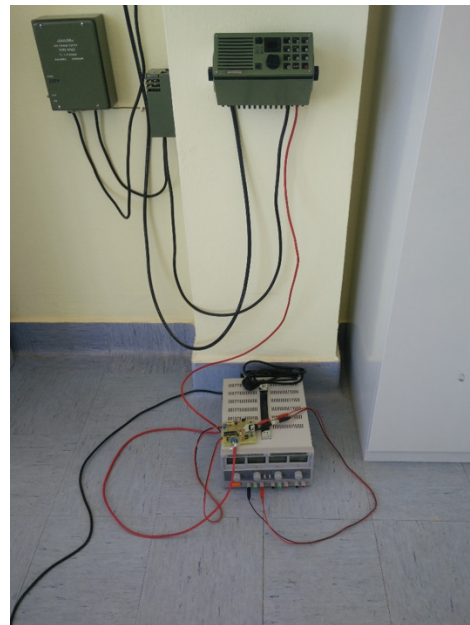


Figura 4.7: Montagem realizada na Escola Naval

No que diz respeito à receção, foi utilizada uma antena CX4 VHF ligada à USRP B100 e uma antena HE500 ligada ao analisador de espectros FSH3. O objetivo de ter, tanto a USRP como o analisador de espectros, a receber deve-se ao facto de o último ser um aparelho de medida profissional e certificado pelo que garante resultados de confiança que foram comparados com os obtidos pela USRP.



(a) Montagem de sistema recetor



(b) Microcontrolador e rádio emissor

Figura 4.8: Montagem de teste na Escola Naval

Para compreender se os sinais que são analisados são corretos é importante saber se temos no recetor a potência que é proporcional à potência

do emissor e da distância percorrida. Sabendo a distância a que estavam os equipamentos foi simples calcular qual a potência do sinal que deveríamos receber, de acordo com as seguintes relações:

$$Pr = \frac{Pe.Ge.Gr}{Ael}$$
$$Ael = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$$

onde:

- Pr, Pe - Potência no recetor e emissor, respetivamente;
- Gr, Ge - Ganho do recetor e emissor, respetivamente;
- Ael - Atenuação em espaço livre;
- d - Distância;
- λ - Comprimento de onda do sinal;

Tendo em conta que os equipamentos não têm ganho ($Ge = Gr = 0$ dB), a distância entre emissor e recetor são 150 metros, a potência de transmissão é 1 W e a frequência utilizada é 157.2 MHz ($\lambda = 1.9m$) a potência do sinal no recetor deverá ser -59 dB ($1.016 * 10^{-6}W$).

Como seria de esperar as medidas foram de acordo com o valor calculado analiticamente como podemos observar nas figuras 4.9 e 4.10.

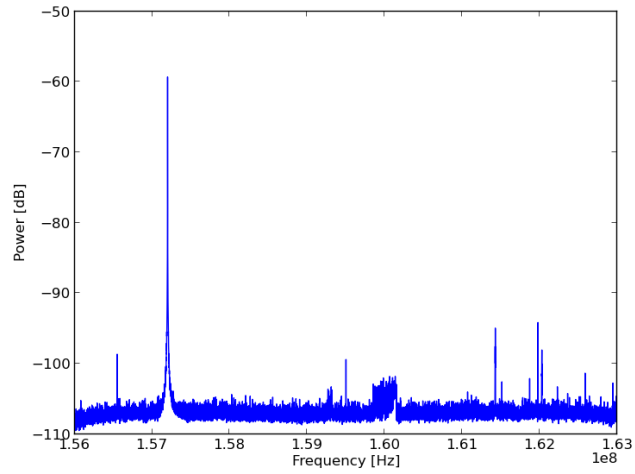


Figura 4.9: Snapshot do espectro eletromagnético durante uma transmissão, usando USRP, nos testes de calibração.

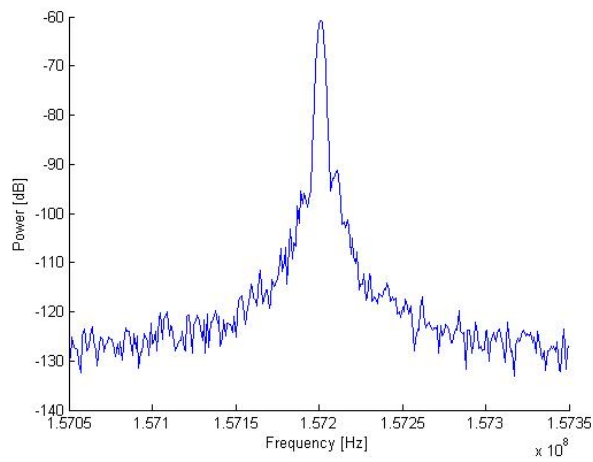


Figura 4.10: Snapshot do espectro eletromagnético durante uma transmissão, usando o analisador de espectros FSH3, nos testes de calibração.

No cartão SD foram introduzidos os parâmetros de acordo com a seguinte tabela:

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

Figura 4.11: Parâmetros introduzidos no cartão SD

Podemos verificar nas figuras a baixo que a percentagem de utilização e o número de transmissões, respetivamente, são iguais aos valores que foram introduzidos no micro controlador.

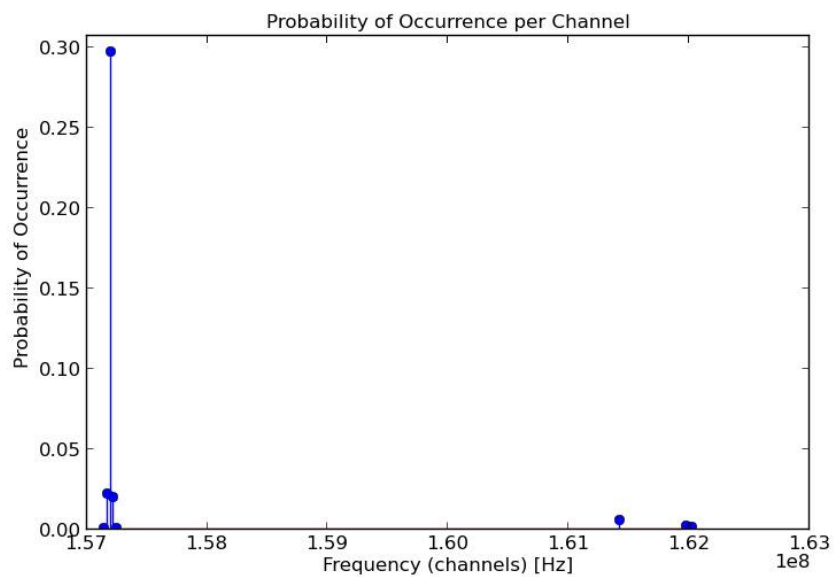


Figura 4.12: Probabilidade do canal estar ocupado, nos testes de calibração.

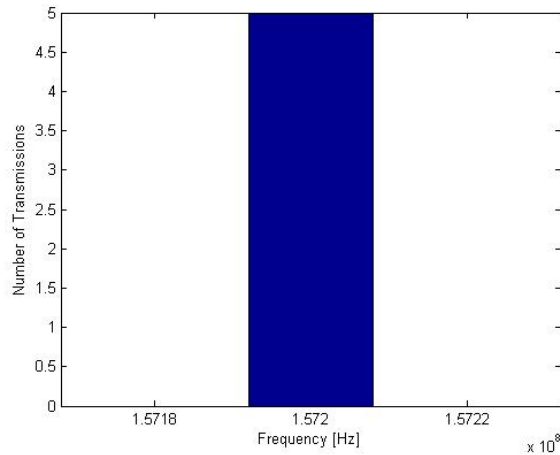


Figura 4.13: Número de transmissões, nos testes de calibração.

Como se pode observar pelos resultados, o equipamento foi calibrado e encontra-se a receber e a tratar os dados de forma correta, viabilizando assim testes no "terreno". É importante realçar a importância que os testes de calibração realizados tiveram na nossa compreensão e aprendizagem das várias variáveis que envolvem a temática de medições espectrais.

Testes

Com os equipamentos calibrados e todas as condições reunidas para iniciar a monitorização do espectro do serviço móvel terrestre. Foram realizados dois testes em dois locais diferentes para recolher informação sobre áreas de alcance VHF diferentes. Estes testes foram realizados a bordo do veleiro da Escola Naval NRP Zarco enquanto este realizava trânsito entre a Base Naval de Lisboa e a marina de Cascais, nos dois sentidos. O segundo teste foi realizado na estação de comunicações satélite da NATO (F12) localizada na Fonte da Telha, Almada e o terceiro foi realizado na Capitania de Cascais. Estes três cenários permitiram analisar tanto a ocupação em todo o porto de Lisboa e a ocupação ao longo da costa da península de Setúbal, permitindo adquirir perspetivas diferentes da mesma área.

- Teste a bordo do NRP Zarco

Para a recolha dos dados, foi montada uma antena CX4 VHF no topo do mastro mais a ré do veleiro que se encontrava a uma altura de 17 metros de acordo com figura abaixo.



Figura 4.14: Localização da antena a bordo do NRP Zarco.

Com os parâmetros obtidos após a calibração introduzidos no equipamento, preparámos o recetor para retirar dados durante o período de trânsito entre a BNL e a marinha de Cascais que são sensivelmente 4 horas. Desta forma, foram feitas medidas no período das 1159 às 1559 e, no dia seguinte, das 0810 às 1210. O percurso realizado pelo veleiro foi conforme é mostrado na figura abaixo.

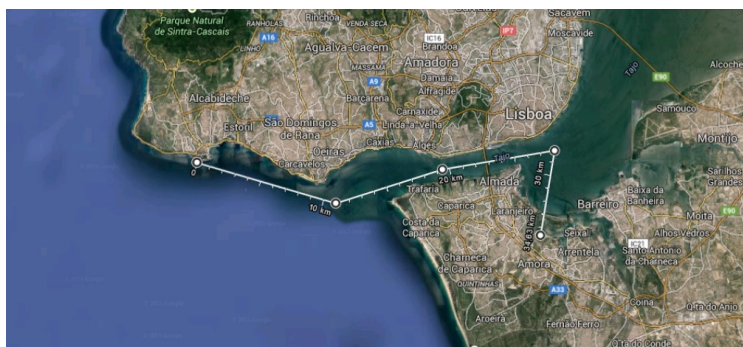
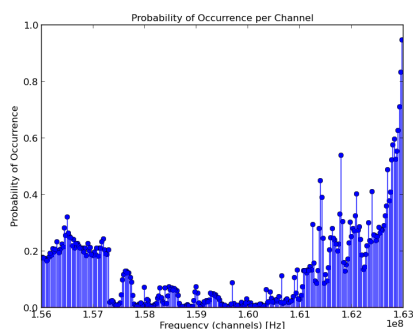
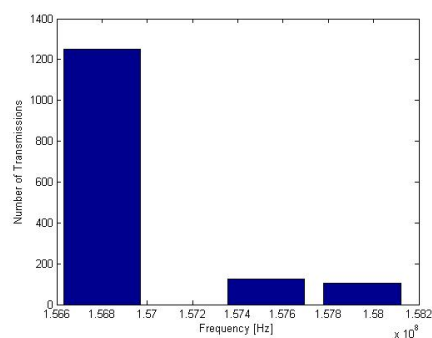


Figura 4.15: Trajeto realizado pelo navio NRP Zarco durante a recolha de dados.

Os dados retirados durante este período podemos observar nas figuras seguintes onde vemos a ocupação em percentagem dos dois sentidos e o número de transmissões nos canais: 16 (socorro e emergência) e dois canais privativos de Marinha.

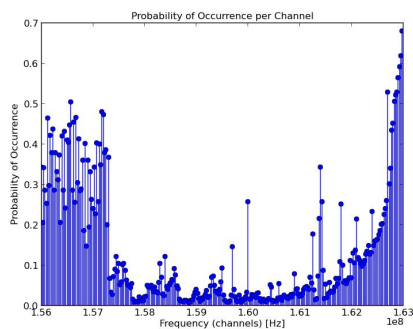


(a) Percentagem de Ocupação

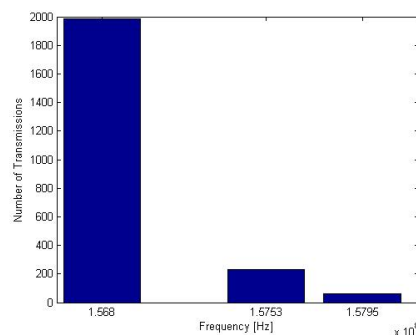


(b) Número de transmissões

Figura 4.16: Dados recolhidos a bordo do NRP Zarco das 1159 às 1559



(a) Percentagem de Ocupação



(b) Número de transmissões

Figura 4.17: Dados recolhidos a bordo do NRP Zarco das 0810 às 1210

Começando por analisar a percentagem de ocupação, é necessário começar por cruzar a informação com a tabela de frequências constante em anexo. Isto permite-nos saber quais dos canais vertidos nestes 7 MHz analisados (dos 156 aos 163 MHz) é que pertencem ao SMM. Feita esse filtro percebemos que nas frequências entre os 158.050 - 160.600 MHz e entre 162.650 - 169.400 MHz são canais que são utilizados no Serviço Móvel Terrestre e cuja análise não entra no âmbito deste trabalho. Para melhor compreensão representam-se alguns canais na figura abaixo por forma a ajudar a interpretação sendo estes os mais ocupados.

Observaram-se então valores de ocupação máximos de cerca de 30% no primeiro caso e de 50% no segundo caso. Como esta recolha foi realizada num período relativamente curto, é normal que se tenham obtido valores desta ordem pois foram em altura de elevado tráfico e é expectável que os

valores sejam mais reduzidos quanto maior for o tempo de duração do teste. Esta duração tem que ser tal que contemple todos os períodos do dia, durante vários dias por forma a apanhar tantos instantes de maior tráfego como de menor, nomeadamente no período noturno.

Os valores das transmissões são essenciais para a otimização de períodos de *sensing* nos algoritmos de acesso ao espectro por parte dos rádios cognitivos pois providenciam informação sobre a forma como é utilizado o canal. Nestes casos podemos, por exemplo, perceber que a duração média de uma comunicação, utilizando o canal 16 no trajeto realizado das 0810 às 1210 é 3.6 segundos pois:

$$ttu = dt * po$$

$$dmt = \frac{ttu}{nt}$$

onde:

- *ttu* - Tempo total utilização
- *dt* - Duração do Teste
- *po* - Percentagem de Ocupação
- *dmt* - Duração Média por Transmissão
- *nt* - Número de Transmissões

Assim fica,

$$ttu = 4horas * 0.5 = 2h = 7200s$$

$$dmt = \frac{7200}{1988} = 3.6s$$

O canal 16 é um canal utilizado maioritariamente para chamada de outros navios devido à obrigatoriedade de todos em escuta-lo. Após chamada, é sempre combinado outro canal entre os dois utilizadores, permitindo assim que o canal 16 fique livre para emergências. O valor de 3.6 segundos é portanto um valor plausível.

- Teste na Estação NATO F12

Para o segundo teste, foi escolhida a Estação de comunicações satélite da NATO, F12. Junto a esta estação encontra-se também a estação recetora de HF pois este local é junto à costa e não apresenta nenhum obstáculo em todo o horizonte nos setores de oeste, sendo também que se encontra numa arribas alta do que o nível médio do mar. A imagem abaixo mostra o local onde foi montada a antena.

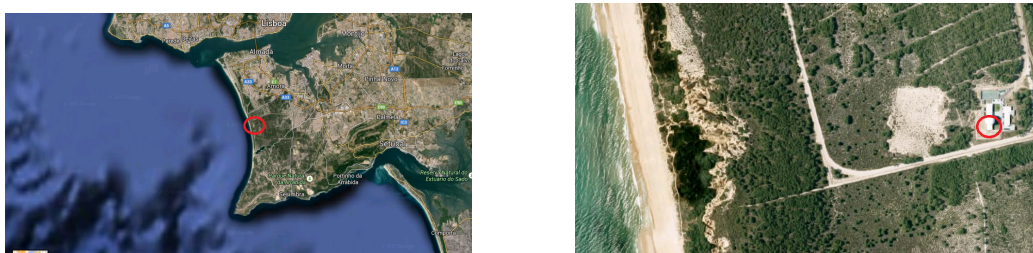


Figura 4.18: Localização da Antena

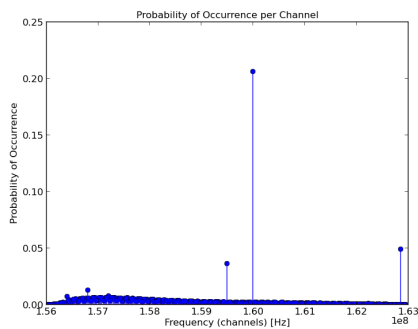
Este local apresenta condições ótimas para proceder à recolha de dados dos navios que circulam junto àquela área. Dentro do alcance rádio de 30 milhas, característico da banda VHF, encontram-se zonas de tráfego marítimo como a saída da barra sul do porto de Lisboa e navios que navegam no sentido sul-norte ou norte-sul que preferem navegar junto a costa (veleiros, embarcações de pesca e mercantes provenientes, ou com destino, ao porto de Sines).

Neste local procedeu-se à montagem da antena conforme imagem abaixo e configurou-se o equipamento com os mesmo parâmetros de receção que nos outros testes.

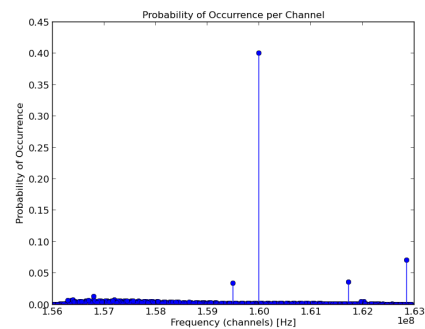


Figura 4.19: Montagem da Antena CX4

Desta vez, o objetivo foi aproveitar as excelentes condições do local para fazer um teste mais longo, recolhendo mais dados que permitiram ter uma perspetiva da ocupação do espetro durante uma semana. Estes sete dias foram divididos a metade, para efeitos de controlo. Os dados recolhidos foram os seguintes:



(a) Primeiros 3 dias



(b) Restantes 4 dias

Figura 4.20: Dados recolhidos Estação de Comunicação Satélite, F12

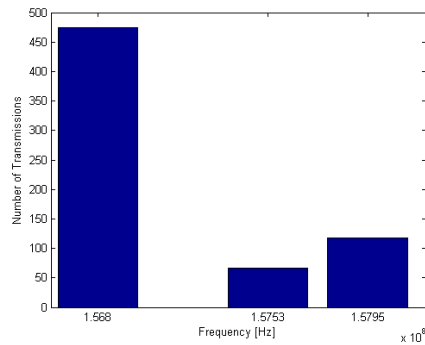


Figura 4.21: Número de Transmissões

Fazendo a mesma análise que nos testes retirados no porto de Lisboa, é necessário primeiro cruzar a informação com as tabelas de frequências em anexo. Assim, percebe-se que o canal (160.000 MHz) que possui ocupações de 21% e 41% (primeiros três dias e restantes quatro dias, respetivamente) não pertence ao SMM mas sim ao SMT. Os restantes canais do SMM têm ocupações baixas, havendo apenas um canal com ocupações na ordem dos 4.5%, destacando-se o canal 16 com apenas 2% de utilização.

- Teste na Capitania de Cascais

Foi também montada o equipamento recetor na Capitania de Cascais por forma a conseguir recolher mais dados e cruza-los com os mais existentes.

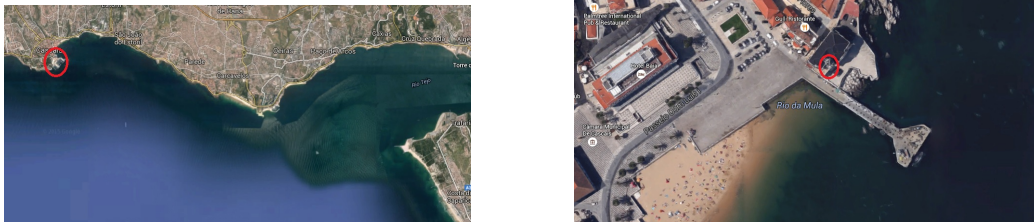
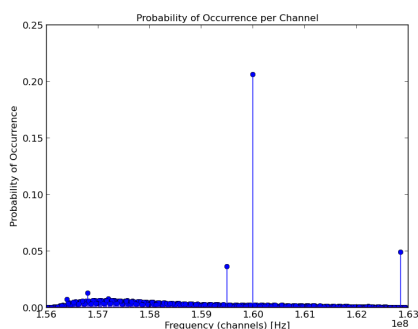
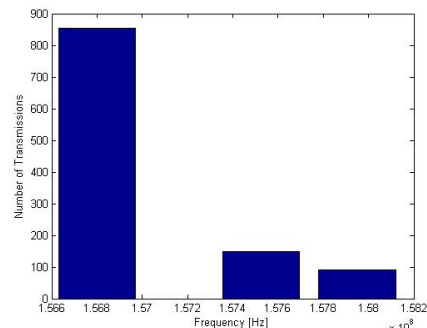


Figura 4.22: Localização da Antena

Como podemos ver nas figuras seguintes, a zona de cobertura do equipamento recetor abrange toda a área a sul de Cascais incluindo ambas as barras do Porto de Lisboa (norte e sul), zonas de elevado tráfego de embarcações de recreio e de pesca. Os resultados obtidos foram os seguintes:



(a) Percentagem de Ocupação dos Canais



(b) Número de Transmissões

Figura 4.23: Dados recolhidos na Capitania de Cascais

Da mesma forma que para a recolha de dados em F12, o canal de frequência 160 MHz juntamente com o canal 159.595 MHz, apresentam as maiores taxas de ocupação mas estes não pertencem ao SMM e ficam por isso, excluídos da análise. Os canais pertencentes ao SMM apresentam utilizações que não passam dos 2%. Esta localização é privilegiada pois foi possível montar a antena a uma altura de 30 metros, sem obstáculos para toda a área a sul de Cascais. Os dados foram recolhidos durante um período de 10 dias seguidos, mostrando consistência nos dados recolhidos nos vários testes.

4.1.5 Análise de Resultados

A recolha de dados nestes dois locais proporciona uma visão sobre como é utilizado o espectro VHF junto à costa, nomeadamente, junto à península de Setúbal e dentro do porto de Lisboa. Como foi referido no decorrer deste trabalho, vários estudos de monitorização do espectro demonstravam a baixa utilização do espectro, tanto de uma forma geral (desde os 84 MHz aos 2700 MHz) como alguns estudos mais específicos (TVWS). Os resultados aqui obtidos confirmam essa baixa utilização, tendo estes sido orientados especificamente para os canais VHF do SMM. Como vimos, no pico de tráfego do porto de Lisboa, o máximo de ocupação de um canal foi 50%, tendo a maioria ficado a baixo dos 20%. Já nos testes realizados na estação F12, a utilização média do espectro é de 1.5%. Estes dados são tornados ainda mais consistentes quando os resultados dos testes realizados na Capitania de Cascais mostram resultados semelhantes em que as utilizações máximas não ultrapassam os 2%. Isto demonstra que os canais do SMM apenas são utilizados em casos pontuais de necessidade de comunicar com outro navio, revelando que, de facto, o espectro está muito pouco utilizado. Tendo em conta que o

espectro se encontra 98.5% livre, é necessário encontrar uma alternativa que o permita utilizar e desenvolver novos serviços, suportados por novas tecnologias, por forma a tornar a sua utilização mais eficiente. Estes resultados contribuirão também para futuros estudos relacionados com a otimização de algoritmos de acesso dinâmico ao espectro para uma implementação efetiva de rádios cognitivos.

Capítulo 5

Introdução de Rádios Cognitivos

5.1 Introdução

Como visto no decorrer do trabalho, para se poder aproveitar o espectro de forma eficiente, é necessário caminhar para uma gestão dinâmica do espectro para que tecnologias, como a de Rádios Cognitivos, possam emergir e ganhar maturidade suficiente para serem implementadas. Na Marinha Portuguesa existem condições extraordinárias para a implementação desta tecnologia: existe espectro exclusivamente alocado à Marinha, esta possui meios de projeção do mar ideais para o desenvolvimento desta tecnologia, existe toda uma estrutura de edificada que garante uma cobertura VHF em toda a costa (conforme mapa em anexo) e vários militares que contribuem para o estudo desta temática. É, portanto, necessário criar condições para que seja possível aplicar o trabalho destes militares aproveitando o "*know how*" e produzindo trabalhos pioneiros naquilo que será o futuro das telecomunicações.

Estas condições traduzem-se numa alteração do paradigma da gestão de espectro, para uma que permita avançar com testes e implementações experimentais. Esta alteração de paradigma implica que se aceite que em algum momento, alguns canais não prioritários ou não vitais, possam sofrer alguma interferência. É importante salientar que esta interferência implicaria apenas uma indisponibilidade momentânea de um canal que corresponde a uma interrupção aceitável do serviço. Por forma a contribuir para uma possível implementação desta tecnologia é descrita uma proposta de arquitetura da sua introdução na Marinha.

5.1.1 Arquitetura

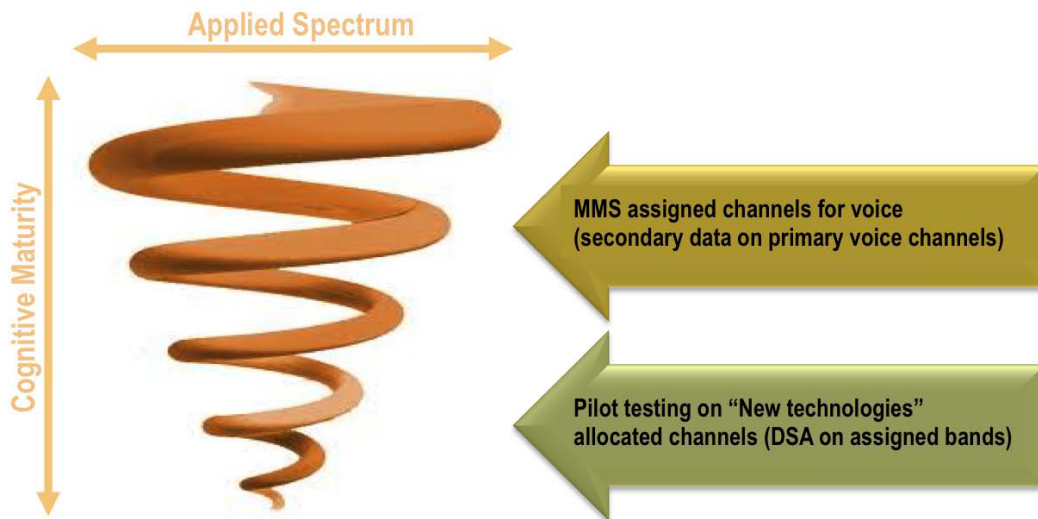
Os testes elaborados demonstram que todos os canais do SMM estão subutilizados e isso motiva o estudo de alternativas. Como já foi referido no trabalho, já existiram várias tentativas para acomodar esta tecnologia (inclusive tentativas por parte da NATO). O problema que se associa a todas elas é a dificuldade de encontrar espectro onde possam efetuar testes e implementar efetivamente a tecnologia pois o receio de interferências e a difícil coordenação entre as várias entidades que utilizam o espectro, criam um impasse.

Uma alteração do paradigma da gestão de espectro a nível internacional, ou mesmo a nível nacional, é uma tarefa burocraticamente demorada e difícil de ser aceite sem uma demonstração real das capacidades deste conceito. É aqui que surge a grande oportunidade da Marinha Portuguesa de ser pioneira, a nível internacional, na criação de uma aplicação real de rádios cognitivos, com grandes benefícios para a projeção de forças navais. A Marinha tem espectro atribuído que mais ninguém tem acesso e isso significa que a utilização desse espectro depende apenas de gestão interna da organização. Isto simplifica imenso o processo de coordenação pois o único utilizador é a Marinha.

Para uma implementação na Marinha Portuguesa o que se propõe é a utilização dos canais de Marinha do SMM para uma recolha inicial de dados sobre a resposta dos mesmos em coexistência com um sistema de banda larga a correr em "plano de fundo". Estes canais vão eventualmente estar sujeitos a disrupções acima do nível aceitável devido a algoritmos ainda não otimizados e isso permitirá reconhecer as falhas e orientar futuros trabalhos no sentido de colmatar as mesmas. No entanto, estas interferências são facilmente resolvidas pois a Marinha saberá sempre quem é que está a coordenar este acesso oportunista. Este será, sem dúvida, o primeiro passo a dar e contribuirá com informação crucial para ser comparada com modelos simulados e otimização de algoritmos.

Após conseguir endereçar todas as questões necessárias para colmatar as lacunas identificadas, o produto será uma tecnologia funcional com capacidade de fornecer comunicações de banda larga aos navios que circulem até às 35 milhas de costa. Ao ganhar maturidade, o sistema estará preparado para lidar cada vez com mais canais, sendo possível, após validação prática na Marinha, expandi-lo a todo o SMM aumentando assim a largura de banda disponível para os navios e conseqüente aumento da quantidade de informação possível de ser fornecida. Pode-se então dizer que a forma que se pretende evoluir será a de uma espiral em que se começa com poucos canais enquanto a tecnologia ainda se encontra pouco madura mas, à medida que for ama-

durecendo, vai ganhando confiança e apresentado resultados mais robustos o que irá permitir aumentar a sua área de aplicação (leia-se mais canais), como ilustrado na figura abaixo.



Build a little, test a little...

Figura 5.1: Evolução da Implementação [7]

Para se realizar esta implementação são necessários: os canais (número já referido acima), um navio e uma estação costeira VHF. Admitindo que os canais são disponibilizados, o que se propõe será equipar um navio que esteja empenhado em patrulha costeira (nomeadamente as corvetas que fazem missões *Search and Rescue* (SAR) pois estas navegam, em grande parte, dentro do alcance VHF. A estação costeira que se propõe é a da Fonte da Telha, que é operada por militares. É este o cenário inicial que seria necessário para impulsionar esta tecnologia e caminhar para uma utilização mais eficiente do espetro e providenciar mais serviços de banda larga sem os custos de SATCOM associados, aos navios que patrulham a nossa costa.

5.2 Análise SWOT

A análise SWOT é uma técnica que avalia estrategicamente possíveis otimizações organizacionais, introdução de novas tecnologias no mercado, entre outras [63]. Esta análise ajuda as organizações a identificar os seus pontos fortes, pontos fracos e oportunidades de melhoramento utilizando

aquilo que são as suas valências.

Esta análise surge, portanto, como forma indicada de perceber quais as várias áreas que poderão afetar a organização. Desta forma, (e tendo em conta o contexto organizacional da MP) foi considerando relevante uma aplicação desta análise à introdução de rádios cognitivos.

5.2.1 Pontos Fortes

- Eficiência Espectral - A tecnologia de rádios cognitivos permite detetar oportunidades de transmissão em canais disponíveis tanto espacialmente como temporalmente permitindo assim utilizar o espectro que se encontra livre, aumentando a eficiência da utilização do mesmo.
- Capacidade de mais utilizadores e mais serviços - A utilização do espectro de forma eficiente permite fornecer mais serviços, nomeadamente serviços de banda larga, a um maior número de utilizadores da mesma banda (SMM).
- Capacidade de priorizar o acesso ao espectro - Por forma a permitir que os utilizadores dos atuais canais mantenham os seus serviços dedicados, estes serão caracterizados como utilizadores primários no RC permitindo que tenham sempre prioridade na utilização do espectro que lhes está alocado.
- Capacidade para aprender e ajustar-se - Através da constante recolha e análise do ambiente radio elétrico, o RC pode ajustar os seus parâmetros de transmissão por forma a aproveitar as oportunidades no espectro e também para libertar canais sempre que estes sejam acedidos pelos utilizadores primários.
- Redução de custos (SATCOM) - As comunicações satélite são a única alternativa disponível para se poder aceder a banda larga no mar. Estas comunicações têm custos alargados e a utilização do espectro VHF (principalmente aquele que já pertence à Marinha) não possui custos acrescidos.
- Implementação de sistemas como e-navigation - A utilização de banda larga em VHF permite disponibilizar aos navios serviços que têm por base o funcionamento em rede. Esta comunicação em rede potencia a partilha de informação (dados) o que facilita a implementação de sistemas que possam compilar o panorama situacional marítimo e difundir informação melhorando assim a segurança da navegação.

- Acesso a inter e intranet até às 30/40 milhas - As características do espectro de VHF são tais que o seu alcance máximo está compreendido entre as 30 e 40 milhas. Dentro deste alcance o acesso a Inter e Intranet estaria assegurado. Isto permitiria acesso a todo o serviço do navio o que potenciaría o emprego dos navios e colmatasse as atuais limitações do serviço de mensagens ACP127.

5.2.2 Pontos Fracos

- Tecnologia disruptiva - Para utilizar esta tecnologia é necessária uma mudança no paradigma de gestão de espectro o que dificulta a sua implementação pois carece de processos burocráticos demorados.
- QoS não garantido - Aceder ao espectro de um modo oportunista não possibilita garantir a que o QoS providenciado pelo serviço seja assegurado.
- Dificuldade em garantir a prioridade de utilizadores - Apesar da implementação desta tecnologia assentar na utilização dinâmica ao espectro baseada em hierarquia de acesso (utilizador primário e secundário), garantir esta hierarquia pode tornar-se complexo.
- Existência de interferências e conseqüente dependência do nível tolerável de ruído - A atual alocação estática de espectro foi assim desenhada por forma a garantir comunicações livres de interferências de outros serviços. No entanto, como já referido, esta é uma tecnologia é usada para implementar técnicas de acesso dinâmico ao espectro, obrigando assim às políticas de gestão do espectro aceitarem algum nível de interferências.
- Tecnologia com pouco maturidade - O facto de ser uma tecnologia recente implica que ainda não ganhou a confiança da indústria nem dos agentes reguladores do espectro para que possa ser desenvolvida e testada em aplicações reais, muito devido ao enorme impacto enorme que as telecomunicações têm no mundo atual. Isto cria um impasse em que nenhuma das partes está disposta a dar o primeiro passo.

5.2.3 Oportunidades

- Espectro exclusivo à Marinha - A Marinha tem espectro alocado apenas para aplicações por esta designadas. Isto possibilita uma gestão interna e flexível sobre a utilização do mesmo, ou seja, uma alteração

de finalidade de um canal VHF apenas carece de gestão intra Marinha sem necessidade de questões burocráticas complexas e demoradas com entidades civis.

- Espectro pouco utilizado - Apesar de existir espectro alocado à Marinha, isto não significa que este esteja totalmente utilizado, aliás, a secção anteriormente apresentada mostra isso mesmo, a baixa utilização, não só do espectro todo do SMM como em particular de alguns canais de Marinha, tomados como os mais utilizados.
- Canais de SMM dedicados à exploração de novas tecnologias - Para além dos canais exclusivos de Marinha, existem também outros canais do espectro do SMM que preveem o teste de novas tecnologias. A utilização destes canais, no entanto, concorre com outras aplicações e não se tem controlo sobre quem neles opera. Não desconsiderando, são na mesma canais passíveis de serem aproveitados.
- Interesse global - Como já mencionado anteriormente, é consensual a nível internacional a afirmação de que o espectro está subutilizado e existem várias tentativas de começar a dedicar espectro para implementar esta tecnologia, nomeadamente (a nível militar) a NATO em [64] e [3].

5.2.4 Ameaças

- Resistência em investir por parte da indústria - Como foi visto também em [64], existe um impasse em que nenhum dos agentes com capacidade de potenciar a expansão desta tecnologia quer dar o primeiro passo. No caso particular da indústria, esta não vê ainda um mercado para a tecnologia devido à sua falta de maturidade e incerteza nas políticas reguladoras do espectro. A indústria não irá, portanto, investir sem existir primeiro uma aplicação específica.
- Necessidade de alterar as políticas de gestão de espectro - Como já foi visto, a gestão do espectro é feita a nível internacional. Assim, torna-se evidente que, com alterações a esse nível associam-se processos burocráticos que demoram décadas a ser resolvidos. No entanto, apenas uma alteração nestas políticas permite a implementação da tecnologia.
- Perda, por parte dos utilizadores primários, da imunidade a interferências - A alocação dos canais foi feita de forma estática, tendo em vista a garantia da não existência de interferências entre os vários serviços.

A alocação dinâmica não é compatível com interferências inexistentes mas sim com tolerância às mesmas, definida pelo serviço que está em causa.

- Dificuldade em ter uma entidade responsável em caso de falha - Como referido no ponto anterior, a implementação desta tecnologia pressupõe que existirão algumas interferências. Surge, portanto, a necessidade de ter uma entidade que supervisione todo o espectro a ser utilizado por forma a conseguir controlar possíveis interferências que causem disrupção completa aos serviços dos utilizadores primários.
- Grande resistência à mudança tipicamente militar - Existe um potencial enorme para aplicações militares e facilidade na implementação devido ao espectro exclusivamente militar. No entanto, existe uma resistência à mudança característica dos militares, que surge devido ao receio de ver informação sensível comprometida ou ver os seus serviços não operacionais.

5.2.5 Observações Finais

Após esta análise, é perceptível que, tanto os pontos fracos como as ameaças, advêm da pouca maturidade da tecnologia. A resistência à mudança é também um fator que complica o processo de implementação pois a utilização de rádios cognitivos, assente numa política de gestão de espectro é algo que ainda não foi feito. No entanto, não se podem ignorar as oportunidades com que nos deparamos tendo em conta as condições que a Marinha tem para proporcionar o desenvolvimento deste conceito.

Esta abordagem ao tema, explica que com alguma maturidade todas as questões negativas podem ser resolvidas dando assim lugar às oportunidades e pontos fortes desta tecnologia. O fornecimento aos navios de um sistema de banda larga permanente permitiria a qualquer navio (comunicações VHF todos os navios da Marinha têm) aceder à Inter ou Intranet. Permitiria ligações à rede de Marinha enquanto a navegar e a qualquer outro serviço de dados que seja necessário, nomeadamente sistemas que aumentam a segurança da navegação, aumentam a capacidade de resposta a emergências e, de uma forma geral, aumentam a projeção dos navios no mar.

Capítulo 6

Conclusão

Na abordagem inicial ao tema foi feito um levantamento de questões pertinentes para o entendimento do contexto que envolve esta temática. As comunicações na Marinha assentam em estruturas antigas que não permitem a evolução dos sistemas e serviços disponibilizados. Estas são fundamentais e garantem o cumprimento com sucesso das missões mas, com a evolução tecnológica torna premente criar condições para evoluir e disponibilizar novas e melhores capacidades.

Para entender a dimensão das potencialidades desta tecnologia foi feito também um levantamento de estudos feitos por todo o mundo que demonstram que o espetro está, de facto, subutilizado apesar de estar completamente alocado.

Para aproveitar este espetro, a solução que se apresenta como denominador comum é a de rádios cognitivos como se pode ver também no enquadramento inicial. No enquadramento inicial verificou-se ainda que a Marinha Portuguesa já possui estudos nesta área, com um protótipo funcional de implementação.

No seguimento desta abordagem inicial foi verificado qual o estado atual da gestão do espetro, tanto a nível de doutrina internacional como a nível de comunicações militares NATO e a nível de doutrina nacional. Aqui verificou-se que o atual modelo de gestão de espetro é estático e este não permite acomodar a tecnologia de rádios cognitivos. Para acomodar tal tecnologia é necessária uma mudança no paradigma de gestão de espetro e foi

assim discutido os possíveis modelos de gestão de espectro e entre eles, qual o mais indicado para uma implementação na Marinha Portuguesa.

Um dos principais argumentos para justificar uma alteração da política de espectro é que o espectro está pouco utilizado. Tendo em conta que este trabalho propõe a utilização do SMM para a implementação, foi necessário fazer um estudo que compreendesse essa porção de espectro em espaço marítimo costeiro. Assim, como descrito no quarto capítulo, recorreu-se a vários testes de calibração que permitiram calcular de forma correta a utilização dos canais do SMM. Esta utilização provou-se baixa contribuindo assim com um forte argumento para alterar a forma de aceder ao espectro.

Uma implementação na Marinha compreende variáveis que foram tomadas em consideração no capítulo seguinte e do qual se conclui que a resistência à mudança é um fator difícil de vencer mas que o proveito que se poderia extrair juntamente para o pequeno impacto que teria a curto prazo na comunicações marítimas, faz todo o sentido para a Marinha investir nesta tecnologia.

O contínuo avanço tecnológico consubstancia o interesse de desenvolver sistemas de banda larga, não só para implementação de sistemas de gestão de informação essencial à segurança da navegação como acesso à Internet, tendo como objetivo utilizar o espectro já existente de forma eficiente para que este ofereça uma alternativa sólida às SATCOM. Os conceitos de Alocação Dinâmica de Espectro e Rádios Cognitivos surgem como estratégias fundamentais para obter esta utilização eficiente do espectro e assim combater a escassez do mesmo. Estes conceitos ainda não atingiram maturidade suficiente para permitir uma implementação imediata mas, só uma primeira implementação permitirá evoluir substancialmente. Foi com esta visão que este trabalho endereçou questões que contribuem para a implementação desta tecnologia na MP.

Existem também alguns obstáculos a ultrapassar, nomeadamente o facto de ser necessário garantir que os utilizadores primários mantêm o acesso aos seus serviços alocados. Isto passa por melhorar os algoritmos de *sensing* e de processamento do sinal por forma a aproveitar o máximo das oportunidades espectrais garantindo que, quando um utilizador primário vai utilizar um canal este estará disponível por forma a não causar interferência.

Existe, portanto, uma oportunidade enorme de tornar a MP pioneira na utilização desta tecnologia que promete ser o futuro das telecomunicações, providenciando mais serviços para os navios, aumentando a segurança da

navegação e melhorando a forma como Portugal usa o seu mar costeiro.

Trabalho Futuro

Para continuar este trabalho existem muitas áreas que têm que ser melhoradas. A mais relevante será o desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas de *Spectrum Sensing*. Estas é que permitem verificar se efetivamente os canais estão a ser ocupados e, caso estejam livres, decidem quanto tempo é que será disponibilizado aos utilizadores secundários garantindo que os serviços dos utilizadores primários não sofrem interferências.

Para que este trabalho possa ser continuado é necessário continuar a investir na formação académica dos militares, criando condições para que possam realizar trabalhos de mestrado ou de doutoramento na área, criando conhecimento valioso para a implementação com sucesso da tecnologia na Marinha.

É necessário começar a experimentar o já existente protótipo recorrendo aos canais alocados especificamente para a Marinha e tomando proveito dos navios e das estações costeiras para realizar testes reais permitindo desenvolver a tecnologia e aumentar o seu nível de maturidade.

Bibliografia

- [1] M. H. Islam, C. L. Koh, S. W. Oh, X. Qing, Y. Y. Lai, C. Wang, Y.-C. Liang, B. E. Toh, F. Chin, G. L. Tan, and W. Toh, “Spectrum survey in singapore: Occupancy measurements and analyses,” tech. rep., Institute for Infocomm Research (I2R), 21 Heng Mui Keng Terrace, Singapore, 2008.
- [2] K. Patil, K. E. Skouby, and R. Prasad, “Spectrum measurement and analysis of tv band in support of cognitive radio operation in india,” tech. rep., Center for TeleInFrastruktur, Aalborg University, Aalborg, Denmark and Center for Communication, Media and Information Technologies, Aalborg University, Copenhagen, Denmark, 2013.
- [3] B. Scheers, A. Mahoney, and H. Åkermark, “A realistic roadmap for the introduction of dynamic spectrum management in military tactical radio communication,” 2013.
- [4] I. T. U. . R. Sector, “Report itu-r m.2231- use of appendix 18 to the radio regulations for the maritime mobile service,” 2011.
- [5] Q. Zhao, “A survey of dynamic spectrum access: signal processing, networking, and regulatory policy,” in *in IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 79–89, 2007.
- [6] G. G. Capela, “Software defined radio implementation for maritime cognitive radio communications,” Master’s thesis, Instituto Superior Técnico, 2014.
- [7] E. Bolas, N. B. de Carvalho, J. N. Vieira, and P. M. de Oliveira, “Opportunistic usage of maritime vhf band—deployment challenges for a new regulatory framework,” 2014.
- [8] A. N. de Comunicações (ANACOM), “Quadro nacional de atribuição de frequências - edição 2010/2011 (versão 2),” 2012.

- [9] I. M. Organization.
- [10] E. Bolas, N. B. de Carvalho, J. N. Vieira, and P. M. de Oliveira, “Maritime cognitive radio networks: Boosting e-navigation towards service oriented architectures,”
- [11] U. Acar, R. Ziarati, and M. Ziarati, “Collisions and groundings major causes of accidents at sea. european platform for maritime education, research, and innovation.”
- [12] F. S. P. T. Force, “Report of the spectrum efficiency working group,” 2002.
- [13] E. J. L. Bolas, *Broadband VHF Maritime Communications based on Cognitive Radio*. PhD thesis, Universidade de Aveiro, 2012.
- [14] F. Berggren, O. Queseth, J. Zander, B. Asp, C. Jönsson, P. Stenumgaard, N. Z. Kviselius, B. Thorngren, U. Landmark, and J. Wessel, “Dynamic spectrum access,” 2004.
- [15] C. C.-E. B. (CCEB), “Acp190(d) guide to electromagnetic spectrum management in military operations,” 2013.
- [16] “Decision no 676/2002/ec of the european parliament and of the council,” 7 March 2002.
- [17] “Directive 2002/21/ec of the european parliament and of the council,” *Official Journal of the European Communities*, 7 March 2002.
- [18] “Decreto-lei n.º 7/2004 de 7 de janeiro,”
- [19] ANACOM, “Missão, atribuições e poderes,” 3 de Março de 2015.
- [20] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, “Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey,” 2006.
- [21] M. A. McHenry, P. A. Tenhula, D. McClosky, D. A. Roberson, and C. S. Hood, “Chicago spectrum occupancy measurements, analysis and a longterm studies proposal,” *First International Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum (TAPAS’06)*, Boston, 2006.
- [22] F. H. Sanders, B. J. Ramsey, and V. S. Lawrance, “Broadband spectrum survey at san francisco, ca,” 1995.

- [23] F. H. Sanders, B. J. Ramsey, and V. S. Lawrance, "Broadband spectrum survey at denver, colorado," 1995.
- [24] F. H. Sanders, B. J. Ramsey, and V. S. Lawrance, "Broadband spectrum survey at san diego, ca," 1996.
- [25] M. A. McHenry and K. Steadman, "Spectrum occupancy measurements, location 1 of 6: Riverbend park, great falls, virginia, april 7, 2004," 2005.
- [26] M. A. McHenry and K. Steadman, "Spectrum occupancy measurements, location 2 of 6: Tyson's square, center, vienna, virginia, april 9, 2004," 2005.
- [27] M. A. McHenry and S. Chunduri, "Spectrum occupancy measurements, location 3 of 6: National science foundation building roof, april 16, 2004, revision 2," 2005.
- [28] M. A. McHenry, D. McCloskey, and G. L. Roberts, "Spectrum occupancy measurements, location 4 of 6: Republican national convention, new york city, new york, august 30, 2004 - september 3, 2004, revision 2," 2005.
- [29] M. A. McHenry and K. Steadman, "Spectrum occupancy measurements, location 5 of 6: National radio observatory (nrao), green bank, west virginia, october 10 - 11, 2004, revision 3," 2005.
- [30] M. A. McHenry, D. McCloskey, and J. Bates, "Spectrum survey in singapore: Occupancy measurements and analyses," 2005.
- [31] A. L. C. Pintor, M. R. S. To, J. S. Salenga, G. M. Geslani, D. P. Agpawa, and M. K. Cabatuan, "Spectrum survey of vhf and uhf bands in the philippines," tech. rep., Electrical Engineering Department, College of Engineering and Agro-Industrial Technology, University of the Philippines Los Baños, Los Baños, Laguna, Philippines and Electronics and Communications Engineering Department, College of Engineering, De La Salle University, Taft Avenue, Manila, Philippines and Department of Electronics Engineering, College of Engineering and Architecture, Bataan Peninsula State University – Main Campus, Tenejaro, Balanga City, Bataan, Philippines and Electronics and Communications Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Santo Tomas España, Manila, Philippines and Electrical Engineering Department, College of Engineering and Technology, Pangasinan State University – Urdaneta City Campus, Urdaneta, Pangasinan, Philippines, 2012.

- [32] M. Sajatovic, C. Rihacek, and B. Haindl, “Operational concept for multi-carrier broadband vhf communications,” 2008.
- [33] J. M. III, “Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio,” 2000.
- [34] F. C. Commission, ““notice of proposed rulemaking and order: Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies,” 2005.
- [35] S. Haykin, “Cognitive radio: Brain–empowered wireless communications,” 2005.
- [36] J. H. Reed, “Software radio – a modern approach to radio engineering,” 2002.
- [37] E. Bolas, N. B. de Carvalho, J. N. Vieira, and P. M. de Oliveira, “Regulatory and standardization issues on cognitive radio based maritime b-vhf communications,”
- [38] T. B. Lee, “How software-defined radio could revolutionize wireless,” 2012.
- [39] S. Forum, “Sdrf cognitive radio definitions,” 2007.
- [40] A. N. I. C. Ettus Research, “About,” 2015.
- [41] Nutaq, “About,” 2015.
- [42] J. Xue, Z. Feng, and K. Chen, “Beijing spectrum survey for cognitive radio applications,” tech. rep., Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education and Wireless Technology Innovation Institute (WTI), Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [43] F. C. Commission, “In the matter of unlicensed operation in the tv broadcast bands (et docket no. 04-186) and additional spectrum for unlicensed devices below 900 mhz and in the 3 ghz band (et docket no. 02-380): Notice of proposed rulemaking,” tech. rep., Federal Communications Commission, Washington, 2004.
- [44] F. C. Commission, “In the matter of unlicensed operation in the tv broadcast bands (et docket no. 04-186) and additional spectrum for unlicensed devices below 900 mhz and in the 3 ghz band (et docket no. 02-380): Second report and order and memorandum opinion and order,” tech. rep., Federal Communications Commission, Washington, 2008.

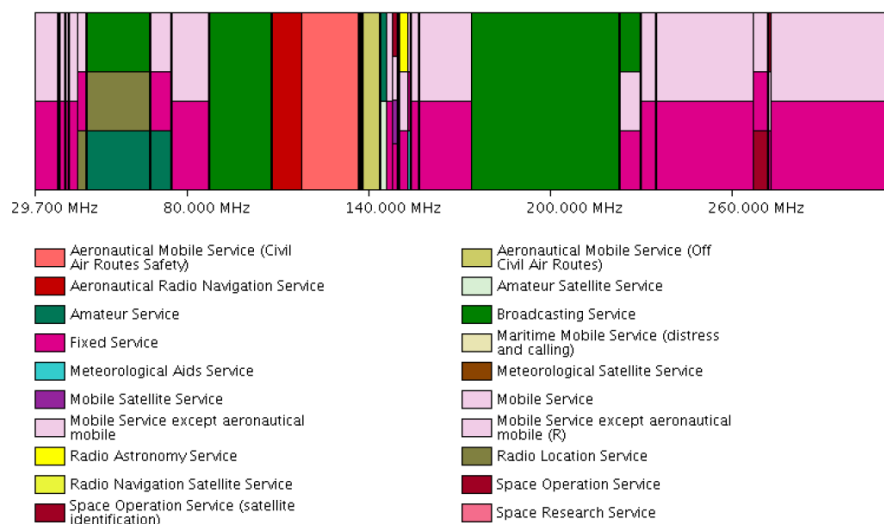
- [45] K. Shin, H. Kim, A. Min, and A. Kumar, “Crs for dynamic spectrum access: From concept to reality,” *IEEE Wireless Communication Magazine (IEEE WCM)*, Vol. 17, No. 6, 2010.
- [46] “Portaria n.o 630/2002 de 12 de junho,” *DIÁRIO DA REPÚBLICA*.
- [47] M. Portuguesa, “Ica-2 (i) instruções de comunicações da armada.”
- [48] “*Proceedings of the first IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*”, November 2005.
- [49] D. Hatfield and P. Weiser, ““property rights in spectrum: taking the next step”,” in *in Proceedings of the first IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, November 2005*.
- [50] R. T. L. Xu, T. Paila, W. Hansmann, M. Frank, and M. Albrecht, ““drive-ing to the internet: Dynamic radio for ip services in vehicular environments”,” in *in Proc. of 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp. 281 – 289, Nov. 2000.
- [51] M. M. Buddhikot and A.-L. B. Labs, ““understanding dynamic spectrum access: Models, taxonomy and challenges”,” in *Proceedings of IEEE DySPAN 2007, Dublin, April 17-21, 2007*.
- [52] W. Lehr and J. Crowcroft, ““managing shared access to a spectrum commons”,” in *in Proceedings of the first IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, November 2005*.
- [53] E. Noam, ““beyond spectrum auctions: Taking the next step to open spectrum access”,” in *Telecommunications Policy*, Vol. 21, No. 5, pp. 461-475, 1997.
- [54] C. Raman, R. Yates, and N. Mandayam, ““scheduling variable rate links via a spectrum server”,” in *in Proceedings of the first IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, November 2005*.
- [55] O. Ileri, D. Samardzija, and N. Mandayam, ““demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via a spectrum server”,” in *in Proceedings of the first IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, November 2005*.
- [56] R. Etkin, A. Parekh, and D. Tse, ““spectrum sharing for unlicensed bands”,” in *in Proceedings of the first IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, November 2005*.

- [57] S. Chung, S. Kim, J. Lee, and J. Cioffi, ““a game-theoretic approach to power allocation in frequency-selective gaussian interference channels”,” in *in Proceedings of the first IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, November 2005*.
- [58] J. Huang, R. Berry, and M. Honig, ““spectrum sharing with distributed interference compensation”,” in *in Proceedings of the first IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, November 2005*.
- [59] Q. Zhao and A. Swami, “A survey of dynamic spectrum access: Signal processing and networking perspectives.”
- [60] J. Mitola, ““cognitive radio for flexible mobile multimedia communications”,” in *in Proceedings of IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications, November 1999*.
- [61] T. Fujii and Y. Suzuki, ““ad-hoc cognitive radio”,” in *Proceedings of IEEE DySPAN 2007, Dublin, April 17-21, 2007*.
- [62] T. Viegas, ““novos paradigmas de gestão de espectro e a introdução de radios cognitivos na marinha”,” in *in Jornadas do Mar, Escola Naval, November 2014*.
- [63] M. B. Khan and M. Asim, “Swot analysis of mobile telecommunications sector of pakistan,” 2010.
- [64] B. Scheers, “Introduction of dynamic spectrum access technology in nato europe tactical communications,” 2013.

Apêndice A

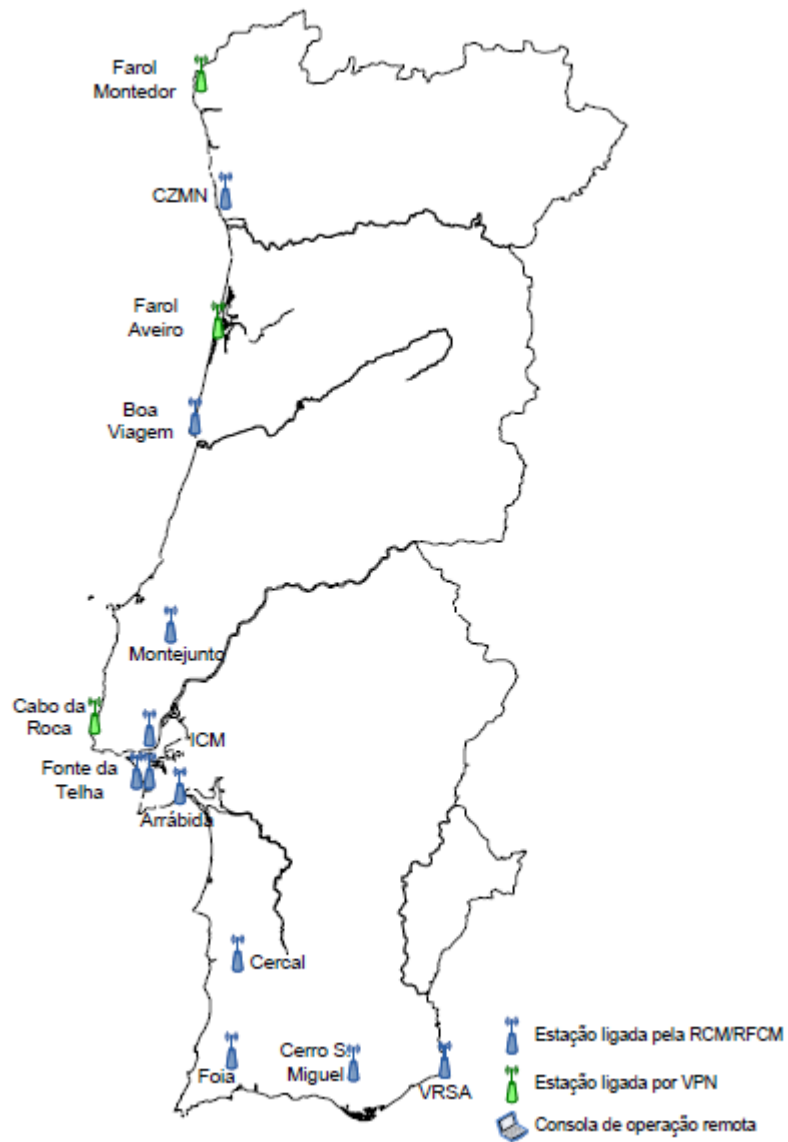
Anexos

A.1 Alocações do Espectro Português [8]



Bandas de frequência	Serviços de rádio	Aplicações	Channeling
156.0125 - 157.4375	Serviço Móvel Marítimo	Comunicações marítimas	25 KHz
156.525 - 156.525	Serviço Móvel Marítimo	DSC	
157.4325 - 158.0125	Serviço Móvel Marítimo	Comunicações marítimas	25 KHz
158.050 - 160.600	Serviço Móvel Terrestre	Rádios Móveis Privados	12,5 KHz
160.6125 - 162.3375	Serviço Móvel Marítimo	Comunicações marítimas	25 KHz
161.975 - 161.975	Radionavegação Marítima	AIS	25 KHz
162.025 - 162.025	Radionavegação Marítima	AIS	25 KHz
162.650 - 169.400	Serviço Móvel Terrestre	Rádios Móveis Privados	12,5 KHz
169.175 - 169.175	Serviço Móvel Terrestre	On-site paging	25 KHz
169.400 - 169.475			50 KHz
169.4125 - 169.4625		Ajudas de emparelhamento	50 KHz
169.475 - 169.4875		Alarmes sociais	12,50 KHz
169.4875 - 169.5875		Ajudas de emparelhamento	50 KHz
169.5875 - 169.600		Alarmes sociais	12,50 KHz
169.800 - 173.9875	Serviço Móvel Terrestre	Rádios Móveis Privados	12,50 KHz
173.965 - 174.015		Ajudas de emparelhamento	50 KHz

A.2 Mapa da estrutura edificada de apoio às comunicações VHF



A.3 Serviço Móvel Marítimo - Plano Nacional de Comunicações em VHF

SERVIÇO MÓVEL MARÍTIMO - PLANO NACIONAL DE COMUNICAÇÕES EM VHF

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