



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharia

**Sistemas com Rádios Cognitivos para a Partilha Eficiente
dos Espaços Vazios da TV com LTE**

Helder Roberto Rodrigues Alves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Fernando José Da Silva Velez
Co-orientador: Eng. Álvaro Henrique da Conceição Gomes

Covilhã, Outubro de 2011

Dedicatória

À minha família, namorada e amigos

Agradecimentos

Expresso o meu agradecimento ao Professor Doutor Fernando J. Velez, Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior e investigador do Instituto de Telecomunicações, pela metodológica orientação científica, pelos conhecimentos transmitidos, assim como, pelo empenho e disponibilidade.

Ao Eng. Álvaro Gomes pela contribuição e colaboração que tornou possível a elaboração da presente dissertação, do mesmo modo, o meu especial reconhecimento pelo excelente acolhimento, local de trabalho e equipamento disponibilizado pela PT Inovação e pelo Instituto de Telecomunicações.

Quero expressar igualmente o meu apreço à minha família, namorada e amigos pela disponibilidade dispensada em todos os momentos, pela confiança que sempre depositaram em mim e pelo apoio manifestado.

Manifesto a minha gratidão a todos os elementos do Instituto de Telecomunicações (IT) de Aveiro, como também aos do IT-DEM da Covilhã que contribuíram directa ou indirectamente para a realização desta dissertação.

Uma palavra final de agradecimento a todos os docentes responsáveis pela licenciatura e mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade da Beira Interior que possibilitaram a evolução da minha aprendizagem.

Resumo

Os sistemas de telecomunicações sem fios dependem fundamentalmente do espectro de frequências radioelétrico. Actualmente, os estudos dos organismos reguladores indicam que a utilização do espectro com licenciamento fixo é subaproveitada e que existe o problema da escassez de oferta do espectro. Assim, com o aumento da procura de novos serviços e do número de utilizadores os operadores de telecomunicações têm por obrigação de procurar novas soluções, que visem o aumento da eficiência espectral através de técnicas avançadas de processamento para a gestão do espectro. Esta dissertação propõe a operação do LTE em frequências mais baixas (UHF) para o aumento da eficiência espectral em conjunto com a gestão do espectro de rádio com atribuição temporária, no contexto da inter-coexistência. Assim, a transição da televisão analógica para a TDT oferece uma nova oportunidade no aproveitamento das bandas UHF para o aumento da oferta por parte dos operadores de telecomunicações. Em particular, os canais nas bandas UHF são adequados para aplicações móveis, devido às suas excelentes condições de propagação e penetração (superior) em edifícios. Além disso, o comprimento de onda nestas bandas é suficientemente curto, permitindo construir antenas com um tamanho adequado para uso portátil. Como possibilita a cobertura eficiente por parte dos operadores de telecomunicações de vastas áreas geográficas com um menor número de estações base. Assim sendo, a atribuição temporária de espectro nas bandas de TV (espaços vazios da TV, *TV White Spaces - TVWS*) com direitos exclusivos temporários é muito valiosa. Dado que os TVWS estarão disponíveis em 2012, as bandas utilizadas são um sério candidato para suportar o sistema LTE. As vantagens da utilização do sistema LTE são a flexibilidade em operar em várias bandas de frequência e em várias larguras de banda. No entanto, a maioria dos países europeus pensa utilizar a frequência 2.6 GHz para o sistema LTE o que poderá limitar a sua cobertura e diminuir o seu desempenho. Assim, através da utilização temporária das portadoras LTE nos TVWS (700MHz) poderá obter-se uma capacidade extra em redes próximas da saturação ou de cobertura melhorada. Para se observarem as diferenças entre a utilização dos 2.6GHz e os 700 MHz desenvolveu-se um simulador de LTE em MATLABTM, numa linguagem *script* orientada a objectos. O simulador permite obter resultados de cobertura e capacidade nas frequências actuais (*Legacy*) e nos TVWS. No processo de atribuição dinâmico dos recursos do LTE, o simulador utiliza dois algoritmos de Radio Resource Management (RRM), no contexto de *Multi Band Access* (MBA). Um dos algoritmos atribui recursos das duas bandas de forma equilibrada enquanto a outra dá prioridade a um das bandas, originado numa utilização mais eficiente dos recursos disponíveis. O objectivo é maximizar a utilização dos TVWS na atribuição dinâmica do espectro e minimizar a fragmentação do espectro, mantendo-se a QoS e evitar interferências entre os sistemas secundários e primário.

Palavras-chave

LTE, TVWS, DVB-T, Rádios Cognitivos, MATLABTM e cobertura.

Abstract

The wireless systems are dependent of the electromagnetic spectrum. The studies from the regulatory bodies show that, with a permanent licensing, the spectrum is underused; and there exists a shortage in the spectrum availability. Therefore, with the introduction of new services and the growth in the number of subscribers, operators face a new challenge and must find engineering solutions to increase the spectral efficiency and manage the available spectrum. This thesis purposes the extension of LTE operation over low frequency bands (UHF) in order to increase the spectral efficiency in conjunction with temporary use of the available spectrum, in the context of inter-coexistence. Hence, the transition to digital TV (i.e., digital TV switch-over) represents an opportunity to re-use UHF band with the respective increase in the operator's services offers. Namely, the UHF band is considered valuable for mobile services due to its excellent propagation characteristics and penetration through walls. Besides, the wavelength in this band is small enough to allow the construction of antennas that can be used in mobile devices. Additionally, in this band, the cell radius is larger than in upper frequencies (due to the lower path loss) which allow for operators to cover larger areas with less base stations. Therefore, the licensing process to use frequency spectrum in the TV bands for mobile services with temporary exclusive rights is seen to be very valuable. These channels are known as TV white spaces (TVWS). Since TVWS will be available in 2012, they are a serious candidate to support the LTE standard. The advantages of LTE are related with the flexibility to operate in different frequencies with various bandwidths. However, most of the European countries intent to use the 2.6 GHz frequency for LTE networks, which may limit the system's coverage and performance. Hence, with the use of temporary LTE carriers in TVWS (700MHz) it is possible to achieve extra capacity in networks near the saturation point and/or with ameliorated coverage. For this purpose, in order to evaluate the differences in terms of performance between LTE networks at 2.6 GHz and 700 MHz, a simulator was developed using a script language in MATLAB™. The simulator enables to achieve results about the coverage and capacity in the actual Legacy frequencies as well as in TVWS. In the dynamic process of distributing the LTE radio resources, two algorithms were used for Radio Resource Management (RRM), in a Multi Band Access (MBA) context. One of the algorithms try to equally distribute the resources while the other prioritize one of the bands against the other, lending to a more efficient use of available resources. The objective is to maximize the use of TVWS and minimize the fragmentation of the spectrum while keeping the comparable QoS levels.

Keywords:

LTE, TVWS, DVB-T, Cognitive Radios, Matlab™ and coverage

Índice

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO.....	1
Motivação.....	1
Objectivos.....	3
Contribuições e Inovações.....	4
Organização do Relatório.....	5
Capítulo 2 - <i>Long Term Evolution</i>	7
Introdução.....	7
Visão Geral da Arquitectura.....	8
<i>Vantagem do SAE</i>	11
<i>Sumário do LTE SAE</i>	12
Camada Física do E-UTRA.....	13
<i>Largura de banda e características do LTE</i>	13
<i>Downlink no LTE</i>	13
<i>O cyclic prefix (CP) do OFDM</i>	15
<i>Uplink no LTE</i>	16
<i>Operação FDD e TDD</i>	17
<i>Vantagens e desvantagens do TDD e do FDD</i>	19
<i>Multiple Input Multiple Output</i>	20
<i>Aplicações e classes de QoS</i>	21
Sumário e Conclusões.....	22
Capítulo 3 - Espaços vazios da TV.....	25
Introdução.....	25
Visão Geral dos TVWS.....	25
<i>Situação actual do switchover digital</i>	25
<i>Situação fora da Europa</i>	25
<i>Dentro da Europa</i>	26
O que é TVWS?.....	29
<i>Switch-over do digital</i>	29
<i>O dividendo digital</i>	29
Visão geral do TVWS disponível na Europa.....	31
<i>Reino Unido</i>	31
<i>França</i>	34
<i>Itália</i>	35
Desafios técnicos para o acesso cognitivo ao TVWS na Europa.....	37
Mecanismos de detecção (<i>sensing</i>).....	37
Base de dados de geolocalização.....	39
Sumário e Conclusões.....	41

Capítulo 4 - LTE sobre TVWS	43
Introdução	43
Características do cenário e a viabilidade técnica	44
<i>Terminal</i>	44
<i>Área de cobertura</i>	45
<i>Frequências de operação</i>	46
<i>Viabilidade técnica do LTE</i>	48
<i>Requisitos Específicos das Estações de Base</i>	49
<i>Requisitos Específicos do Terminal</i>	50
<i>Portadora de Transporte do LTE</i>	51
<i>Emissão fora de banda no LTE</i>	53
Mercado Potencial	54
<i>Aumento de capacidade através da TVWS</i>	56
<i>Aumento de cobertura com TVWS</i>	57
Utilização por cenário	58
<i>Áreas Urbanas</i>	58
<i>Áreas Suburbanas</i>	58
<i>Áreas Rurais</i>	58
Sumários e Conclusões	58
Capítulo 5 - Simulador de LTE com partilha eficiente de TVWS	61
Introdução	61
Contextualização	61
Descrição do Funcionamento	62
Sumários e Conclusões	81
Capítulo 6 - Arquitectura da Gestão Simples de Recursos de Rádio	83
Introdução	83
Atribuição dos TVWS	84
Objectivos da atribuição dos TVWS	87
Exemplos de atribuição de TVWS	88
Gestão recursos do LTE sobre TVWS	90
<i>Formulação do Problema de Gestão de Recursos</i>	92
<i>Cenário Urbano</i>	94
<i>Cenário suburbano</i>	95
<i>Cenário rural</i>	96
Formulação do algoritmo	100
<i>Algorithm 1</i>	101
<i>Algorithm 2</i>	101
Avaliação de desempenho inicial	103
Resultados obtidos nas simulações	104
<i>Cenário urbano</i>	104

<i>Cenário suburbano</i>	105
<i>Cénario rural</i>	106
Avaliação dos resultados.....	107
Sumários e Conclusões	108
Capítulo 7 - Conclusões	111
Trabalho Futuro	114
Anexo A.....	117
Anexo B.....	119
Referências	129

Lista de Figuras

FIGURA 1: COMBINAÇÃO ENTRE ARQUITECTURA LTE E SAE [3].....	9
FIGURA 2: ARQUITECTURA LTE [3]	10
FIGURA 3 : TECNOLOGIA OFDMA	14
FIGURA 4 : <i>CYCLIC PREFIX</i> ANEXADA A UM SÍMBOLO OFDM.....	16
FIGURA 5 : ESTRUTURA DA <i>FRAME SC-FDMA</i>	17
FIGURA 6 : SENTIDOS DE TRANSMISSÃO DO <i>UPLINK</i> E <i>DOWNLINK</i>	18
FIGURA 7 : TÉCNICAS MIMO.....	20
FIGURA 8 : MAPA-MUNDO DO PROGRESSO DA TRANSIÇÃO PARA A TELEVISÃO DIGITAL EM 17 DE NOVEMBRO DE 2010, EXTRAÍDO DE [4].....	26
FIGURA 9 : DISTRIBUIÇÃO DE ESPECTRO APÓS A TRANSIÇÃO PARA O DIGITAL NO REINO UNIDO, EXTRAÍDO DE [12]	30
FIGURA 10 : ALTERAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO DIVIDENDO DIGITAL DO REINO UNIDO	32
FIGURA 11 : VARIAÇÃO NA DISPONIBILIDADE DE TVWS É MOSTRADA NOS 18 LOCAIS DO REINO UNIDO.....	32
FIGURA 12 : DISPONIBILIDADE DE FREQUÊNCIAS DE TVWS PARA OS RÁDIOS COGNITIVOS DE BAIXA POTÊNCIA (EM BRISTOL, LONDRES, LIVERPOOL E SOUTHAMPTON EM BARRAS AZUIS, DA ESQUERDA PARA A DIREITA E DE CIMA PARA BAIXO) [14]	33
FIGURA 13 : A) ESTAÇÕES TDT CONSIDERADAS PARA A ZONA DE MORBIHAN, REPRESENTADAS POR PONTOS VERDES, B) PONTOS DE TESTE PARA TVWS, REPRESENTADOS POR PONTOS A AZUL.....	34
FIGURA 14 : CANAIS 1 x 8 MHz:.....	35
FIGURA 15: CANAIS 2 x 8 MHz (DOIS CANAIS CONTÍGUOS):	35
FIGURA 16 : NÚMERO DE TVWS DISPONÍVEL EM WEST PIEMONTE. A) $DT = -120$ dBm E B) $DT = -114$ dBm. A ALTURA DA ANTENA É DE 1.5 M PARA OS DOIS RESULTADOS	36
FIGURA 17 : CCDF DA QUANTIDADE DE <i>ESPAÇOS VAZIOS</i> POR LOCALIZAÇÃO.....	36
FIGURA 18 : CCDF DA QUANTIDADE DE <i>ESPAÇOS VAZIOS</i> POR POPULAÇÃO	37
FIGURA 19 : O PROBLEMA DO TERMINAL ESCONDIDO	38
FIGURA 20 : BASE DE DADOS DE GEOLOCALIZAÇÃO	40
FIGURA 21 : CENÁRIO DE DESENVOLVIMENTO DO LTE [18].....	44
FIGURA 22 : ÁREA DE COBERTURA RURAL.....	45
FIGURA 23 : ÁREA DE COBERTURA URBANA (<i>INDOOR</i>).....	45
FIGURA 24 : AS CARACTERÍSTICAS DE PROPAGAÇÃO DAS DIVERSAS BANDAS DE FREQUÊNCIA DO ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO [19].....	46
FIGURA 25 : ÁREA DE COBERTURA DO LTE PARA DIFERENTES FREQUÊNCIAS NA PERIFERIA DA ÁREA URBANA/SUBURBANA ..	48
FIGURA 26 : CRESCIMENTO DA BANDA LARGA DE 2005 – 2012 [20].....	54
FIGURA 27 : SITUAÇÃO MUNDIAL DO LTE [21]	55
FIGURA 28 : ESTRUTURA DAS <i>CLASSES</i> DO SIMULADOR LTE.....	64
FIGURA 29 : ARQUITECTURA DO SIMULADOR LTE SOBRE TVWS.....	66
FIGURA 30 : INTERFACE GUI DO SIMULADOR LTE SOBRE TVWS	67

FIGURA 31 : CARREGAR OS PARÂMETROS DE ENTRADA.....	68
FIGURA 32 : VISUALIZAÇÃO DOS VÁRIOS MENUS DO SIMULADOR DE LTE	69
FIGURA 33 : ÁREA DE SIMULAÇÃO.....	70
FIGURA 34 : VISUALIZAÇÃO DOS MENUS DO MODO “NORMAL”	70
FIGURA 35: VISUALIZAÇÃO DAS JANELAS POP UP DOS RESULTADOS DO <i>SUB-MENU USER (NUMBER)</i>	71
FIGURA 36 : REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO SNIR	71
FIGURA 37: VISUALIZAÇÃO DO MCS EM TODOS OS PONTOS DA CARTA.....	72
FIGURA 38 : CAPACIDADE DAS ESTAÇÕES DE BASE DE CADA SECTOR	72
FIGURA 39 : CALL BLOCKING RATE	73
FIGURA 40 : VISUALIZAÇÃO DOS MENUS DO MODO “ALGORITHM 1”	73
FIGURA 41 : VISUALIZAÇÃO DOS MENUS DO MODO “ALGORITHM 2”	74
FIGURA 42 : ESCOLHA DO CENÁRIO	75
FIGURA 43 : ESCOLHA DA FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO	76
FIGURA 44 : VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO.....	76
FIGURA 45 : ESCOLHA DO RELEVO	77
FIGURA 46 : EXEMPLO DO CÓDIGO MATLAB TM PARA O CÁLCULO DO <i>PATH LOSS</i> COM O MODELO DE PROPAGAÇÃO <i>ERCEG-URBAN</i>	78
FIGURA 47 : CÁLCULO DO <i>LINK LOSS</i> NO <i>DOWNLINK</i>	78
FIGURA 48 : VISUALIZAÇÃO DO <i>LINK LOSSES</i> NA ÁREA DE SIMULAÇÃO	78
FIGURA 49 : CÁLCULO DO <i>LINK BUDGET</i> DO <i>DOWNLINK</i>	79
FIGURA 50 : CÁLCULO DO SNIR NO <i>DOWNLINK</i>	79
FIGURA 51 : SELECÇÃO DA ESTAÇÃO DE BASE PARA CADA TERMINAL.....	80
FIGURA 52 : CÁLCULO DO <i>DOWNLINK</i> E <i>UPLINK</i>	80
FIGURA 53 : EXEMPLO DA DISPONIBILIDADE DOS RECURSOS TVWS NUMA ZONA ESPECÍFICA	84
FIGURA 54 : ARQUITECTURA DE REDE DO PROJECTO COGEU	85
FIGURA 55 : VISÃO GERAL DA CONFIGURAÇÃO DA ARQUITECTURA DO <i>SECONDARY SPECTRUM MARKET</i> DO PROJECTO COGEU [33].....	86
FIGURA 56 : OFERTA VÁLIDA DE TVWS NUMA ZONA GEOGRÁFICA ESPECÍFICA	89
FIGURA 57 : PERFIL DE ATRIBUIÇÃO DE BLOCOS DE TVWS	90
FIGURA 58 : MÓDULO LTE-RRM QUE INTEGRA NA ARQUITECTURA DO COGEU	91
FIGURA 59 : FLUTUAÇÕES TÍPICAS DO TRÁFEGO AO LONGO DE UM DIA, EXTRAÍDO DE [26]	93
FIGURA 60 : RESULTADOS PARA O DÉBITO BINÁRIO EM LTE NA BANDA DE 2.6 GHz, CENÁRIO URBANO	94
FIGURA 61 : RESULTADOS PARA O DÉBITO BINÁRIO EM LTE NA BANDA DE 700 MHz, CENÁRIO URBANO	95
FIGURA 62 : RESULTADOS PARA O DÉBITO BINÁRIO EM LTE NA BANDA DE 2.6 GHz, CENÁRIO SUBURBANO.....	96
FIGURA 63 : RESULTADOS PARA O DÉBITO BINÁRIO EM LTE NA BANDA DE 700 MHz, CENÁRIO SUBURBANO	96
FIGURA 64 : RESULTADOS PARA O DÉBITO BINÁRIO EM LTE NA BANDA DE 2.6 GHz, CENÁRIO RURAL.....	97
FIGURA 65 : RESULTADOS PARA O DÉBITO BINÁRIO EM LTE NA BANDA DE 700 MHz, CENÁRIO RURAL.....	97
FIGURA 66 : ATRIBUIÇÃO DE PORTADORAS DE LTE SOBRE TVWS E O RRM.....	99

FIGURA 67 : INTERFACE GRÁFICA DO SIMULADOR LTE (“ALGORITHM 1” E “ALGORITHM 2”)	103
FIGURA 68 : RRB NECESSÁRIOS POR SECTOR USANDO ALGORITHM1/ALGORITHM2 NO CENÁRIO URBANO	105
FIGURA 69 : RRB NECESSÁRIOS POR SECTOR USANDO ALGORITHM1/ALGORITHM2 NO CENÁRIO SUBURBANO	105
FIGURA 70 : RRB NECESSÁRIOS POR SECTOR USANDO ALGORITHM1/ALGORITHM2 NO CENÁRIO RURAL	106
FIGURA 71 : DOWNLINK SCHEDULING RESOURCES PER USER [30].....	108
FIGURA 72 : COMBINAÇÃO DE FREQUÊNCIAS PARA CCs	116
FIGURA 73 : INTERFACE DE MULTI-BAND DO IMT-ADVANCED.....	116

Lista de Tabelas

TABELA 1: CONFIGURAÇÕES GERAIS DE CADA TECNOLOGIA	8
TABELA 2 : BLOCOS DE RECURSOS POR LARGURA DE BANDA, EXTRAÍDO DE [35]	15
TABELA 3: BANDAS FDD (ESQUERDA) E TDD (DIREITA) DEFINIDAS PELO 3GPP (JUNHO DE 2007).....	18
TABELA 4 : DIFERENÇAS DO TDD RELATIVAMENTE AO FDD	19
TABELA 5 : CARACTERÍSTICAS DO QCI DO LTE [34].....	22
TABELA 6 : SITUAÇÃO DO SWITCH-OVER EM 05 DE OUTUBRO DE 2011, EXTRAÍDO DE [5]	28
TABELA 7 : MARGEM DO NÓ ESCONDIDO PARA DIFERENTES ÁREAS [15]	38
TABELA 8 : PARÂMETROS CHAVE PARA A DETECÇÃO [15]	39
TABELA 9: PARÂMETROS CHAVES PARA A GEOLOCALIZAÇÃO [15]	40
TABELA 10 : RAIOS DAS CÉLULAS VERSUS NÚMERO DE BS NECESSÁRIAS	47
TABELA 11 : COMPARAÇÃO ENTRE A TRANSMISSÃO DVB-T E LTE	49
TABELA 12 : PRAT DAS ESTAÇÕES DE BASE DO LTE	50
TABELA 13 : INTERVALO DO CONTROLO DINÂMICO DA POTÊNCIA (dB) DO RE.....	50
TABELA 14 : CLASSES DE POTÊNCIA DOS TERMINAIS (UE) DE LTE	51
TABELA 15 : POTÊNCIA DE SAÍDA MÍNIMA DOS TERMINAIS (UE) DO LTE.....	51
TABELA 16 : BANDAS DE OPERAÇÃO EM E-UTRA	52
TABELA 17 : LARGURA DE BANDA NO E-UTRA	52
TABELA 18 : MÁSCARA DE EMISSÃO DO ESPECTRO DO E-UTRA.....	53
TABELA 19 : LIMITE DO EIRP PARA A PROTECÇÃO DO TDT	54
TABELA 20 : PARÂMETROS PRINCIPAIS DOS TRÊS CENÁRIOS	75
TABELA 21 : PARÂMETROS OU FACTORES QUE INFLUENCIA OS CASOS DE USO DO COGEU EM TVWS	88
TABELA 22 : PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES DO LTE COM O “ALGORITHM 1” E “ALGORITHM 2”	103
TABELA 23 : COMPARAÇÃO DOS NÚMEROS DE UTILIZADORES E RRBS ENTRE OS DOIS ALGORITMOS NOS CENÁRIOS CONSIDERADOS.....	107
TABELA 24 : TIPOS DE ANTENAS	122

Lista de Acrónimos

3GPP	3rd Generation Partnership Project
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
AC	Admission Control
AMBR	Aggregate Maximum Bit Rate
AMC	Adaptive Modulation Coding
ARP	Allocation and Retention Priority
ASO	Analog Switch Over
AVC	Advanced Video Coding
BS	Base Station
CA	Carrier Aggregation
CAPEX	Capital Expenditure
CBR	Call Blocking Rate
CC	Component Carriers
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	Conference of European Postal & Telecommunications
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
COGEU	COGnitive radio systems for efficient sharing of TV white spaces in EUropean context
CoMP	Coordinated multi-point transmission
CP	Cyclic Prefix
CR	Cognitive Radio
DAB	Digital Audio Broadcasting
DD	Digital Divided
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
DSO	Digital Switch Over
DT	Detection Threshold
eNodeB	E-UTRAN Node B
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
EPC	Evolved Packet Core Network
EU	European Union
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access

FP7	Seventh Framework Programmer
GBR	Guaranteed Bit Rate
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPRS	General Packet Radio Service
GSA	Global Mobile Suppliers Association
GSM	Global System Mobile
GUI	Graphical user interface
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT	International Mobile Telecommunications
IP	Internet Protocol
ISI	Inter-Symbol Interference
HD	High Definition
HNM	Hidden Node Margin
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
ICT	Information and Communications Technologies
IMT	International Mobile Telecommunications
ITU	International Telecommunication Union
LB	Load Balancing
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBA	Multi Band Access
MBR	Maximum Bit Rate
MCS	Modulation and Coding Schemes
MFN	Multiple Frequency Network
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MME	Mobility Management Entity
MPEG	Moving Picture Experts Group
MU-MIMO	Multi User - MIMO
NAS	Non-Access Stratum
NON-GBR	Non - Guaranteed Bit Rate
OFCOM	Office of Communications
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
P-GW	Packet Data Network Gateway
PCC	Policy and Charging Control
PCRF	Policy and Charging Resource Function

PDCP	Packet Convergence Protocol
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PMSE	Programmer Making and Special Events
PRAT	Rated output power
QCI	<i>QoS Class Identifier</i>
QoS	Quality of Service
R&D	Research and Development
RB	Resource Block
RF	Radio Frequency
RNC	Radio Network Control
RNP	Radio Network Planning
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RSPG	Radio Spectrum Policy Group
RTT	Round Trip Time
SAE	System Architecture Evolution
SAE-GW	System Architecture Evolution - Gateway
SC-FDMA	Single carrier - FDMA
SDR	Software Defined Radio
SDM	Spatial Division Multiplexer
SDMA	Spatial Domain Multiple Access
SFN	Single Frequency Network
SLA	Service Level Agreement
SU-MIMO	Single User - MIMO
TDD	Time Division Duplex
TDT	Televisão Digital Terrestre
TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação
TV	Televisão
TVWS	TV White Spaces
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
US	Unites States of America
VHF	Very High Frequency
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WiFi	IEEE 802.11
WLAN	Wireless Local Area Network
WRC	World Radio communication Conference
WSD	White Space Device

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Motivação

As Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) têm evoluído cada vez mais, proporcionando um aumento e uma rapidez de acesso à informação, levando, desta forma, à massificação e diversificação da aplicabilidade das TICs na sociedade actual. Com partilha do conhecimento, entretenimento e socialização, milhares e milhares de pessoas de todo o mundo partilham o acesso às TICs, com experiências em tempo real e sem atrasos. O acesso às redes móveis de banda larga, onde não existem limitações espaciais como no acesso fixo, permite a comunicação a qualquer hora, em qualquer lugar e de qualquer forma.

No ponto de vista União Europeia (UE), o Tratado de Lisboa [2] prevê proporcionar melhorias significativas na banda larga móvel, na multimédia e no acesso à Internet. Para esse efeito, a Comissão Europeia tenciona criar uma rede de banda larga móvel europeia, cujo acesso irá tornar-se assim uma realidade, através da harmonização do uso do espectro dos 27 Estados-Membros da UE, especialmente através da criação de um espaço de inovação para o dividendo digital, após a redistribuição do espectro. Devido à eficiência espectral da TV digital, a maior parte das faixas do espectro ocupadas pela actual TV analógica vão ser libertadas; esta oportunidade é chamada de dividendo digital.

Os canais de transmissão de baixa frequência em VHF e UHF têm tradicionalmente sido utilizados exclusivamente por emissoras de televisão de transmissão analógica. Estes canais oferecem recursos e propriedades atraentes, como a alta penetração em edifício e ampla cobertura. Além disso, o comprimento de onda dos sinais de UHF é suficientemente pequeno, de tal forma que as antenas podem ter um tamanho razoavelmente reduzido e serem utilizadas em dispositivos portáteis. Contudo, as regras de regulamentação não permitem o uso de dispositivos não autorizados nas faixas de TV, com excepção de dispositivos de controlo remoto, telemetria de dispositivos médicos e microfones sem fios. Actualmente está a decorrer uma transição da TV analógica para o TDT. Essa transição é chamada de *Digital Switch-Over* (DSO); ao plano de cessação das emissões de TV analógicas chama-se *Analog Switch-Off* (ASO). Embora o processo de DSO já esteja em curso nos países da UE, o processo de ASO é diferente de país para país, dependendo da dimensão e configuração do mercado. É previsível que o apelo da Comissão Europeia para a conclusão do processo de ASO em 2012 seja difícil de concretizar para alguns Estados-Membros. Por outro lado, no entanto, espera-se que as experiências de países que já tenham concluído o processo ASO fornecem ensinamentos úteis para os países que apenas iniciaram o processo de planeamento.

Para a Comissão Europeia, o dividendo digital (espectro limpo e espectro intercalados geograficamente) constitui uma grande oportunidade para alcançar os importantes objectivos da estratégia de Lisboa, especialmente no acesso à Internet de banda larga móvel. A análise feita ao mercado indica que o dividendo digital na Europa é uma oportunidade única tanto a nível económico como social. Esta é a chave para manter a competitividade da Europa especialmente tendo em conta aos avanços do dividendo digital noutras regiões, como nos Estados Unidos. Assim, com uma abordagem mais flexível da comercialização e da utilização do espectro de rádio frequências no sector das comunicações móveis contribuirá para criar um mercado das comunicações móveis mais eficiente. A Comissão Europeia lançou um estudo sobre o comércio secundário (*secondary trading*) de radiofrequências e, em meados de 2003. No entanto, o *secondary trading* do espectro ainda é mais um conceito do que uma realidade, mas já existem uma série de etapas que pode marcar o início do comércio *secondary trading*, no contexto global. Na Nova Zelândia começou-se a negociar o espectro em 1987, na Guatemala em 1996, na Austrália em 1997 e tanto o FCC como o OFCOM já aprovaram os regulamentos de comércio do espectro em 2004. No entanto, tem havido pouca actividade económica e no desenvolvimento da regulamentação de um ambiente de comércio secundário activo para pequenos comércios do tipo que se pode considerar no contexto TVWS. O desenvolvimento de sistemas de comércio secundário (*secondary trading*) de espectro na Europa está atrasado em comparação com o resto dos países desenvolvidos. O projecto COGEU no qual o autor desta dissertação está envolvido, prevê preencher esta lacuna, investigando os mecanismos de comércio secundário de espectro, propondo formas para permitir a existência de um regime de espectro secundário no contexto europeu, aproveitado pelo dividendo digital.

O dividendo digital pode ser utilizado de forma útil através de dispositivos cognitivos de comunicação rádio. Os Rádios Cognitivos têm um factor decisivo para os mercados de partilha de espectro dinâmico, com dispositivos licenciados ou não licenciados. O mercado pode realizar aquisição de espectro, seja ele através de compra directa (espectro livre) ou através do *sensing* (por exemplo: na procura de partes do espectro livres geograficamente intercalados num intervalo de canais de frequências no caso do TDT). Irá fazer-se a atribuição dinâmica do espectro não utilizado e operar nesse canal temporariamente, sendo-se assim capaz de se transmitir de forma a não interferir com outros utilizadores e conseguir a qualidade de serviço (QoS) desejado. Os canais apurados que não são utilizados numa zona geográfica proporcionam uma oportunidade para a implantação de novos serviços sem fios como a utilização do sistema LTE. Actualmente, os Rádios Cognitivos estão a ser intensamente investigados para a utilização de espaços vazios da TV (*TV White Spaces* - TVWS), que ficarão disponíveis após a transição para TV digital.

Objectivos

Esta dissertação tem como objectivo analisar o roteiro da transição para o TDT na Europa e no levantamento regulamentar das tendências do mercado TVWS nos diferentes países europeus, a fim de identificar a viabilidade técnica e económica do cenário a ser aplicado, assim como analisar os incentivos de partilha de espectro e investigar em que circunstâncias os potenciais utilizadores secundários no TVWS podem surgir. Assim sendo, nesta dissertação irá afastar-se dos cenários de optimização do espectro dos actuais operadores (nem sempre possível), ou da compra de um novo espectro com direitos exclusivos (muito caro), mas sim no estudo do comércio secundário nas frequências TVWS: o *Spectrum Commons* e *Secondary Spectrum Market*.

O primeiro caso (*Spectrum Commons*) consiste na metodologia de utilização dum ponto de acesso para a cobertura duma zona vasta, utilizando uma banda de frequências "mais baixa", sem garantia de QoS (designado por super-WiFi). O segundo caso (*Secondary Spectrum Market*) é um cenário de operador, com garantia de QoS e com existência de prioridade das comunicações de emergência, que são prioritárias relativamente das comunicações nos cenários seguintes:

- Urbano e Suburbano com falta de capacidade e com portadoras extra TVWS que podem colmatar essa falta;
- Rural, com falta de cobertura e utilizando frequências mais baixas podendo-se obter-se uma melhor cobertura.

Esta dissertação é baseada no projecto COGEU [1], onde considera uma topologia centralizada num *broker* que negocia espectro com o interveniente (*player*). O *broker* controla a quantidade da largura de banda e a potência da emissão atribuída a cada utilizador, a fim de manter a QoS desejada e a interferência abaixo do limite máximo permitido. Torna-se necessária e imprescindível um protocolo de negociação para a troca de informações entre os *players* assim como mecanismos de negociação através dos quais os utilizadores podem solicitar e adquirir os direitos exclusivos temporariamente das bandas TVWS. Para tal, é preciso investigar os modelos de partilha do espectro no contexto de TVWS. Além disso, através da TVWS e de Rádios Cognitivos, é possível garantir o suporte de QoS ao modelo de acesso ao espectro seleccionado, nomeadamente, o *Spectrum Commons* e o *Secondary Spectrum Market*. Para conseguir atingir este objectivo, têm que se identificar os desafios técnicos específicos na TVWS, como o problema do *hidden node*, a protecção dos operadores históricos, a fragmentação da TVWS e as variações espaço/temporais na disponibilidade do espectro.

Para além das questões regulamentares e técnicas, esta dissertação tem como finalidade abordar casos de utilização adequada de TVWS e abordar diversos cenários de aplicação para o sucesso desta dissertação. Os cenários de baixas frequências (inferior a 1 GHz) são ideais

para a cobertura rural e penetração *indoor*. É dada particular importância às áreas rurais, onde a implantação de sistemas móveis é feita para oferecer uma cobertura adequada. Assim, a redução do número de estações de base corresponde directamente a uma redução do custo de serviço que oferecem. Nas áreas urbanas, é o efeito de refacção/reflexão superior nas bandas de baixa frequência que possibilita este aumento de alcance das estações de base e a consequente redução de custos. O sinal pode assim atravessar mais facilmente as janelas/ paredes obtendo-se uma melhor cobertura *indoor*, com a capacidade de servir os dispositivos dentro de casa sem ajuda de uma antena externa.

Neste trabalho, considera-se um caso de uso (*Long Term Evolution - LTE*), investigando-se um cenário que utiliza TVWS, que funciona em paralelo com 2.6 GHz já, de forma a resolver o problema da falta de capacidade ou aumentar a do raio de cobertura de uma célula, reduzir o investimento de custos de capital (CAPEX) e as despesas de operação (OPEX).

De acordo com vários relatórios recentes, as entidades reguladoras em vários países da Europa planeiam para realizar um leilão nos 2.6 GHz para um possível uso em LTE. Na Suécia, Noruega e Finlândia já se realizaram os leilões na banda 2.6 GHz. Em países como Reino Unido, Itália, Espanha, França, Portugal e Alemanha, os leilões nas bandas 2.6 GHz irão ser realizados este ano ou no próximo ano. Neste contexto foram desenvolvidos dois algoritmos, descritos mais à frente, para otimizar a forma como os recursos do LTE podem ser atribuídos a cada terminal nas duas frequências (2.6 GHz e 700MHz). Para a realização dos dois algoritmos, teve-se que desenvolver um simulador de LTE em MATLABTM. O simulador desenvolvido simula o comportamento rádio do LTE na camada física. O objectivo foi obter uma ferramenta aberta e versátil.

Contribuições e Inovações

Esta dissertação enquadra-se no âmbito trabalho de investigação do projecto COGEU (*COGnitive radio systems for efficient sharing of TV white spaces in EUropean context*), enquadrado no programa FP7 ICT-2009.1.1 com o número de contracto INFSO-ICT-248560 [1].

Teve como contributo principal os seguintes *deliverables*:

- [D2.1] “European TV White Spaces Analysis and COGEU use-cases”, April 2010.
- [D2.2] “Policies to enable efficient spectrum sharing over TVWS at European level”, April 2011.
- [D3.1] “Use-cases Analysis and TVWS Systems Requirements”, August 2010.
- [D3.2] “Initial Architecture for TVWS Spectrum Sharing Systems”, January 2011.
- [D6.1] “Dynamic Radio Resource Management algorithms for an efficient use of TVWS”, January 2011.

Teve também como contribuição a publicação da seguinte comunicação:

- Carlos Silva , Hélder Alves, Álvaro Gomes, "Extension of LTE Operational Mode over TV White Spaces", *in proc. of Future Network & Mobile Summit 2011*, Warsaw, Poland, June 2011,

Organização do Relatório

Esta dissertação é composta por sete capítulos. No segundo, capítulo descreve-se a norma LTE que foi introduzida na *Release 9* pelo 3GPP, é descrita a sua arquitectura, a camada física, aplicações e classes de serviços, o objectivo do capítulo é ter uma visão da norma LTE. No terceiro capítulo é feita uma breve descrição da situação fora e dentro da Europa do dividendo digital, é feita uma descrição dos espaços vazios que se vão criar na transição da TV analógica para a TV digital. Para esses fins, é necessário quantificar a sua disponibilidade, analisar se têm potencial de serem utilizados e quais os problemas técnicos que podem ocorrer.

Depois, no capítulo 4, é feito o estudo do potencial dos espaços vazios entre os vários canais do TDT, a viabilidade técnica do LTE sobre esses canais, os requisitos específicos dos terminais e das estações de base e do seu mercado potencial.

No capítulo 5, é feita a descrição do simulador de LTE. Usando métodos analíticos e informáticos para simular o comportamento radioelétrico da tecnologia, foi possível analisar aspectos técnicos como; a cobertura, a capacidade e as sessões bloqueadas. Para além disto, foram desenvolvidos dois algoritmos que serão analisados no capítulo 6.

No sexto capítulo escolheu-se um dos casos de uso do LTE (estudados no capítulo 4) e desenvolveram-se dois algoritmos de forma a utilizar as duas frequências; a frequência *Legacy* (2.6 GHz) usada tipicamente pelo operador tradicional e a frequência de TVWS (700 MHz) libertada pela TV analógica. Estes dois algoritmos têm como objectivo otimizar a gestão de recursos do LTE e verificar qual dos dois é a melhor opção.

Para finalizar, no capítulo 7 apresenta-se a conclusão de toda esta dissertação, apresentando-se também algumas sugestões para trabalho futuro.

Capítulo 2

Long Term Evolution

Introdução

Esta dissertação aborda Rádios Cognitivos, espaços vazios da TV (TV White Spaces - TVWS) e o sistema *Long Term Evolution* (LTE). Numa primeira fase, aborda-se o LTE realizada pelo *3rd generation partnership Project* (3GPP), que é responsável pela especificação do UMTS desde da sua versão inicial a *Release 99*, introduzida no ano de 2000. Ao longo da última década de desenvolvimento, foram lançadas diversas *releases*, apresentadas a seguir:

- Em 2000 - *Release 99*;
- Em 2001 - *Release 4*;
- Em 2002 - *Release 5*;
- Em 2004 - *Release 6*;
- Em 2007 - *Release 7*;
- Em 2008 - *Release 8* (LTE);
- Em 2010 - *Release 9* (LTE);
- Em 2010 - *Release 10* (LTE-Advanced);
- Em 2011 - *Release 11* (LTE-Advanced) em desenvolvimento.

De facto, ainda em 2005, quando foi pela primeira vez especificada, a tecnologia LTE nasceu com os seguintes requisitos:

- Comutação de pacotes (*All-IP*) - a ideia no LTE é abandonar totalmente a comutação de circuitos e tratar todo tráfego por comutação de pacotes;
- *Round Trip Time* (RTT) abaixo de 10 ms e o *Access Delay* abaixo de 300 ms;
- Taxa de débito no *uplink* (canal ascendente) de até 50 Mbps;
- Taxa de débito no *downlink* (canal descendente) de até 100 Mbps;
- Possibilidade de *handover* e de retro-compatibilidade com as tecnologias anteriores (GSM, UMTS e HSPA), mais a possibilidade da migração do CDMA2000 para a rede LTE;
- Atribuição de diferentes larguras de banda (1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz), possibilitando a compatibilidade e interoperabilidade com outras tecnologias;
- Capacidade de tráfego de 2 a 4 vezes superior à da *Release 6*.

A tecnologia LTE tem como uma das suas principais motivações a ampliação do mercado e o aumento da largura de banda para possibilitar novos serviços e melhores desempenhos dos serviços já existentes. As especificações do 3GPP propõem uma ampliação significativa nas

taxas de transmissão. A Tabela 1 apresenta os valores máximos dos ritmos de transmissão, latência e tecnologia de acesso múltiplo de cada tecnologia.

Tabela 1: Configurações gerais de cada tecnologia

	WCDMA (UMTS)	HSPA (HSDPA/HSUPA)	HSPA+	LTE	LTE-Advanced
Transmissão do <i>Downlink</i>	384 Kbps	14 Mbps	28 Mbps	100 Mbps	1 Gbps
Transmissão do <i>Uplink</i>	128 Kbps	5.7 Mbps	11 Mbps	50 Mbps	500 Mbps
Latência (<i>Round Trip Time - RTT</i>)	150 ms	100 ms	50 ms(Max)	10 ms	10 ms
<i>Realese do 3GPP</i>	Rel 99/4	Rel 5/6	Rel 7	Rel 8/9	Rel 10/11
Acesso	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA/SC-FDMA	OFDMA/SC-FDMA

A Tabela 1 mostra que o LTE é uma evolução importante em relação às *releases* anteriores. Nesta dissertação, vamos entender as modificações introduzidas pelo *Release 9*, conhecido como LTE, para se alcançarem os objectivos acima listados. Inicialmente, abordemos a arquitectura da rede LTE para, em seguida, tratarmos dos aspectos da interface rádio, com a descrição sucinta da implementação das tecnologias OFDMA, SC-FDMA e MIMO. Por fim, discutem-se os diferentes tipos de serviços (políticas de QoS) suportados pelo LTE.

Visão Geral da Arquitectura

A *System Architecture Evolution (SAE)* especificada em conjunto com o LTE é o próximo passo na evolução da arquitectura 3GPP. O SAE apresenta uma arquitectura de rede plana com QoS simplificado e uma prestação de serviços totalmente sobre IP. Apesar disso, a rede SAE traz algumas mudanças significativas, como uma maior eficiência e um aumento na transferência de dados.

O SAE é uma evolução do 3GPP *Release 7*, com suporte para o LTE e para tecnologias de acesso que não fazem parte do conjunto de recomendações do 3GPP, bem como as actuais tecnologias de acesso da 2G e da 3G, tal como apresenta-se na Figura 1.

O componente principal da arquitectura do SAE é *Evolved Packet Core Network (EPC)*, também conhecido como núcleo do SAE. O EPC é o sistema de *Core Network* onde faz o fluxo da informação para as estações de base LTE (eNodeB). A arquitectura divide-se em dois planos:

- *User Plane* - que abrange a camada física, ou seja, a camada *Media Access Control (MAC)*, o *Radio Link Control (RLC)* e o *Packet Data Convergence Protocol (PDCP)*;
- *Control Plane* - que contém adicionalmente o *Radio Resource Control (RRC)*, para além das camadas acima supracitadas do *User Plane*.

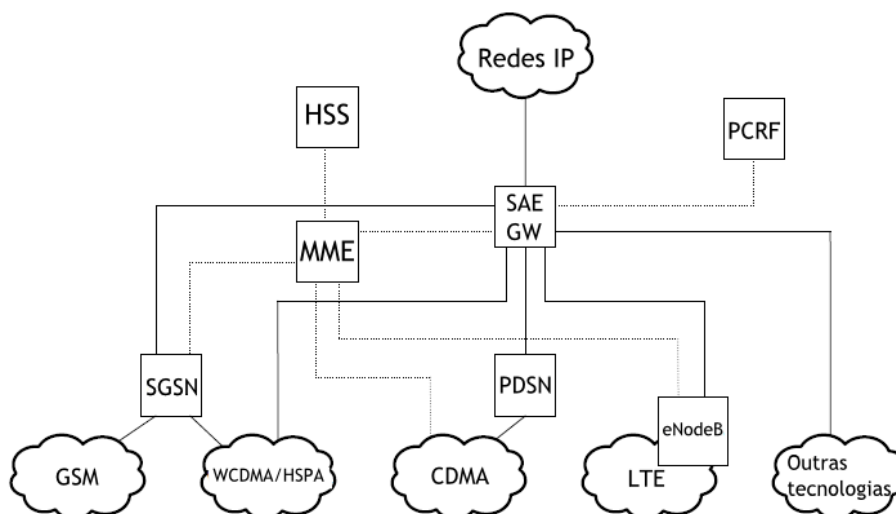


Figura 1: Combinação entre arquitectura LTE e SAE [3]

Além disso, o EPC ainda otimiza a arquitetura *High Speed Packet Access (HSPA)* para serviços de banda larga móvel com dois nós (eNodeB e SAE-GW) no *User Plane*.

A identidade de controlo da mobilidade (*Mobility Management Entity - MME*), uma evolução do (*Serving GPRS Support Node - SGSN*), foi especificada para a funcionalidade de *3G Direct Tunnel* no 3GPP da *Release 7*. O MME é separado do SAE gateway (SAE-GW), facilitando desenvolvimentos de uma rede mais eficiente e modular, que possibilita um dimensionamento de recursos mais flexível. Esta arquitectura adopta uma política de QoS baseada em classes, oferecendo uma diferenciação simples e eficaz entre os serviços.

O elemento SAE-GW irá incluir funcionalidades aperfeiçoadas do *Gateway GPRS Support Node (GGSN)*, tais como interfaces de rede IP e identificação por IP para o utilizador final, inspecção de pacotes (profunda e superficial), bem como a tarifação em tempo real, a política de controlo, e mobilidade para diferentes tipos de acessos no 3GPP usando IP móvel. Além disso, as operadoras que implementarem a evolução das suas redes para LTE/SAE a partir de GSM/WCDMA/HSPA poderão usufruir de compatibilidade plena com as redes tradicionais. Nela podemos verificar mudanças em relação às *releases* anteriores, sendo que no LTE a arquitectura de rede tem quatro grandes domínios, apresentado na Figura 2:

- Terminal (*User Equipment - UE*);
- *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)*;
- *Evolved Packet Core Network (EPC)*;
- Serviços.

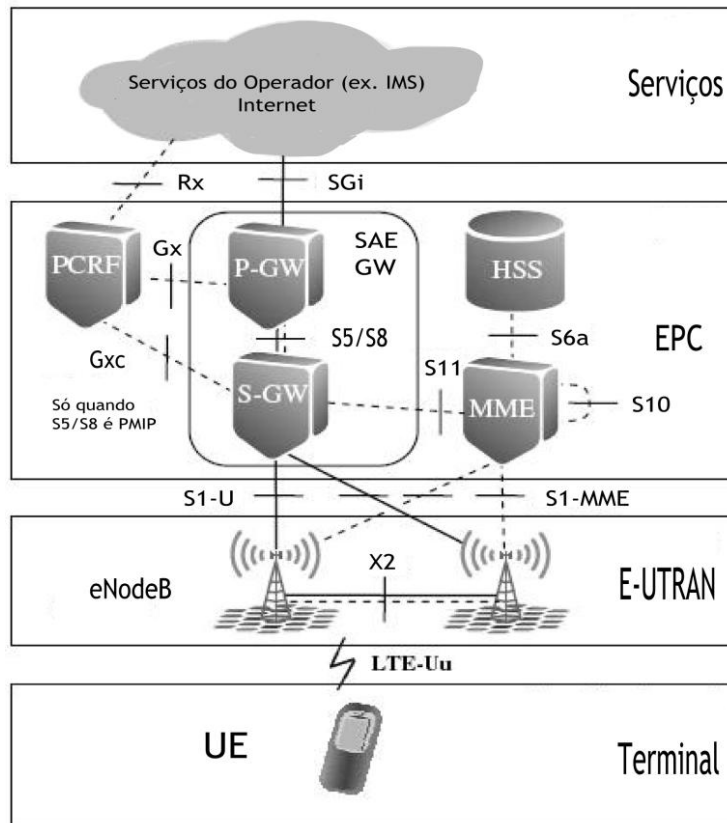


Figura 2: Arquitectura LTE [3]

As grandes diferenças em relação ao UMTS estão presentes na E-UTRAN e no EPC. Na E-UTRAN, não temos o antigo *Radio Network Control* (RNC) do UMTS e existe uma mudança de sigla do NodeB para eNodeB. De facto, a E-UTRAN é composta por uma rede *mesh* de eNodeBs que se comunicam através da interface X2. Este facto proporciona um maior grau de interconexão directa e possibilita a existência de várias ligações que são encaminhadas através de terminais na mesma célula ou células adjacentes. Esta nova estrutura permite uma menor interacção com o Core Network. No EPC temos diversos elementos como MME, S-GW, HSS, P-GW e PCRF, tal, como se descreve a seguir:

- **Mobility Management Entity (MME):** é o principal elemento do controlo do EPC, entre as suas funções estão autenticação, segurança, controlo da mobilidade, controlo do perfil do utilizador, conexão e autorização de serviços, assim como, o *tracking area* do UE em *Idle mode*, para saber a sua posição, e o processo de *Paging*, usado pela rede para solicitar o estabelecimento de uma conexão *Non-Access Stratum* (NAS) de sinalização;
- **Serving Gateway (S-GW):** O *Serving Gateway*, S-GW é um elemento plano de dados no SAE LTE. A sua principal finalidade é controlar o plano de mobilidade do utilizador e também actua como fronteira principal entre a (*Radio Access Network* - RAN) e da rede básica. O S-GW também mantém os caminhos de dados entre o eNodeBs e *Packet Data Network Gateway* (P-GW). Desta forma, o S-GW

forma uma interface para a rede de pacote de dados com a E-UTRAN. Além disso, quando se movem UEs por zonas servidas de diferentes eNodeBs, o S-GW serve como uma âncora de mobilidade garantindo assim que o caminho de dados seja mantido;

- **Packet Data Network Gateway (P-GW):** fornece conectividade entre a UE e a rede externa de pacotes de dados, cumprindo a função de entrada e de saída de dados. Realiza também a filtragem e controlo de pacotes requeridos para os serviços pedidos. Tipicamente, o P-GW atribui endereços IP para o UE, permitindo assim, uma comunicação IP com outras redes externas;
- **Policy and Charging Resource Function (PCRF):** refere-se ao elemento da rede LTE que é responsável pelo *Policy and Charging Control (PCC)*. O PCRF decide quando e como se deve gerir os serviços em termos de QoS e fornece informações a pedidos pelo P-GW, se é ou não aplicável no S-GW. Desta forma, podem-se configurar os *bearers* (portadoras) apropriados e as políticas adequadas para um determinado serviço;
- **Home Subscriber Server (HSS):** refere ao elemento da base de dados dos utilizadores, e executa funções de segurança, autentificação, implementando-se as restrições de *roaming*.

É importante notar que a arquitectura apresentada é relativamente simples na sua descrição geral. No entanto, cada elemento executa uma variedade de funções e procedimentos não referenciados anteriormente.

Vantagem do SAE

A SAE oferece muitas vantagens sobre as arquitecturas anteriores que usam uma arquitectura com um núcleo central. Como resultado, espera-se que seja adoptado pela maioria das operadoras de telecomunicações. A SAE vai oferecer uma série de vantagens importantes:

- **Melhoria da capacidade de dados:** Com LTE oferece-se taxas de transmissão de *downlink* de 100 Mbps, para banda larga móvel, sendo necessário que a rede seja capaz de lidar com maiores ritmos de transferência de dados. Para tal, adopta-se uma arquitectura que suporta esse elevado débito de transferência de dados;
- **Toda a arquitectura sobre IP:** Quando o 3G foi desenvolvido pela primeira vez, a voz ainda era transportado por comutação de circuitos. Desde então, tem havido um movimento para que todas as comunicações sejam por IP. Assim sendo, o novo SAE adopta toda a configuração de rede em IP;
- **Latência reduzida:** Com aumento dos níveis de interacção que cada vez mais são exigidos e com respostas cada vez mais rápidas, o conceito do novo SAE têm evoluído para garantir que os níveis de latência sejam reduzidos para cerca de 10 ms. Esta característica irá garantir que a aplicação que utiliza a tecnologia 3G-LTE seja suficientemente sensível com tempos de resposta reduzidos;

- **Redução de OPEX e CAPEX:** Um elemento-chave para qualquer operadora é reduzir os custos. É portanto essencial para qualquer novo projecto reduzir os custos de capital (CAPEX) e as despesas de operação (OPEX). A nova arquitectura SAE e o E-UTRAN são muito mais simples, deixando de haver um elemento central como o RNC no UMTS.

A fim de que as exigências possam ser satisfeitas para uma maior capacidade de dados e uma latência reduzida, juntamente com a mudança para uma rede totalmente IP, é necessário adoptar uma nova abordagem para a estrutura da rede.

Para UMTS/WCDMA o UMTS *Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN), os NodeB tem baixos níveis de autonomia e são ligados em topologia estrela ao RNC. O RNC é o elemento principal onde realiza a maior parte da gestão dos recursos de rádio.

A funcionalidade dos eNodeBs, para além da nova “*Layer 1*” e “*Layer 2*”, incluem-se outras funções, como o controlo de recursos de rádio (*Radio Resource Management* - RRM), o controlo de admissão (Admission Control - AC), o equilíbrio da carga (*load balancing* - LB), o controlo de mobilidade e as decisões de *handover* para os equipamentos móveis (UE).

Devido aos níveis adicionais de flexibilidade e funcionalidades dadas aos novos eNodeBs, eles tornaram-se mais complexos do que as gerações de estações de base anteriores. No entanto, a nova estrutura de rede 3G-LTE SAE permite níveis mais elevados de desempenho. Além dessa flexibilidade, o eNodeBs ainda pode ser actualizado para lidar com novas actualizações, incluindo a transição do 3G-LTE para o 4G LTE-*Advanced*.

Sumário do LTE SAE

Para além do LTE aplicar uma nova tecnologia de acesso rádio (OFDMA/SC-OFDMA) no sistema celular, existe também uma evolução da rede básica, conhecida como *System Architecture Evolution* (SAE). Esta nova arquitectura foi desenvolvida para proporcionar um nível consideravelmente mais elevado de desempenho, estando em conformidade com os requisitos do LTE. Como resultado, as operadoras começaram a introduzir *hardware* em conformidade com a nova arquitectura (SAE), de modo a antecipar a introdução do 3G-LTE. O novo SAE também foi desenvolvido para que seja totalmente compatível com LTE-*Advanced*, a nova tecnologia 4G. Portanto, quando o LTE-*Advanced* for introduzido, a rede será capaz de lidar com os novos aumentos das taxas de transmissão, sem ser preciso alterar a arquitectura.

O SAE para a LTE também oferece uma nova abordagem para o EPC e E-UTRAN, permitindo que na nova arquitectura se atinjam taxas de transmissão de dados muito elevadas relativamente as tecnologias existentes. Além disso, permite também reduzir o CAPEX e o OPEX, permitindo assim ser alcançados maiores níveis de eficiência dos custos.

Camada Física do E-UTRA

Largura de banda e características do LTE

Um dos principais parâmetros associados com o uso de *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM) em LTE é a escolha da largura de banda. A largura de banda disponível influencia uma variedade de decisões, incluindo o número de portadoras que podem ser acomodados no sinal OFDM e, por sua vez, outros elementos como o número de bits por símbolo, etc. O LTE define o canal com várias de larguras de banda, obviamente quanto maior largura de banda, maior a capacidade do canal. As larguras de banda de canal que foram escolhidos para a LTE são as seguintes: 1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz.

Dentro da largura de banda escolhida temos as sub-portadoras ortogonais com espaçamento de 15 kHz, isso dá uma taxa de símbolo de $1/15 \text{ kHz} = 66.7 \mu\text{s}$, ou seja, cada sub-portadora é capaz de transmitir dados a uma taxa máxima de 15 ksps (*kilo symbols per second*). Por exemplo com 20 MHz de largura de banda tem uma taxa de símbolos de 18 de Msps ($15 \text{ ksps} \times 12 \text{ sub-portadoras} \times 100 \text{ resource block}$), que fornece uma taxa de transmissão bruta de 108 Mbps, utilizando a modulação 64 QAM (que apresenta seis bits por símbolo). Pode parecer que os ritmos de transmissão não se alinham com os principais números indicados nas especificações LTE, porque aos dados reais têm que se subtrair os valores dos bits de codificação e os bits de controlo, e ainda existem os ganhos decorrentes com a multiplexagem espacial, o *Multiple-Input e Multiple-Output* (MIMO).

Downlink no LTE

Um dos elementos-chave da LTE é o uso do OFDM como tecnologia de acesso ao meio. O OFDM é usado em muitos outros sistemas como WLAN, WiMAX, DVB e DAB. O uso do OFDM traz muitas vantagens, incluindo a sua robustez do multi-percurso, desvanecimento e interferências. No entanto a modulação do sinal de rádio em OFDM pode parecer ser complicada. Contudo, utilizando técnicas de processamento digital este problema poderá ser resolvido. Tendo em conta as considerações anteriores, a utilização OFDM é a escolha natural para o LTE.

O sinal OFDM usado na LTE dispõe de, no máximo, 2048 sub-portadoras diferentes, com um espaçamento de 15 kHz. Embora seja obrigatório que os telemóveis tenham capacidade de receber todas as 2048 sub-portadoras, nem todas precisam de ser transmitidas pela estação base, que só precisa de ser capaz de suportar a transmissão de 72 sub-portadoras. Desta forma, todos os terminais serão capazes de comunicar com qualquer BS. Dentro do sinal OFDM é possível escolher entre os três tipos de modulação seguintes:

- QPSK (2 bits por símbolo);
- 16 QAM (4 bits por símbolo);
- 64 QAM (6 bits por símbolo).

A modulação é escolhida consoante as condições de SNR. A modulação inferior (QPSK) não requer um SNR elevado, mas não é capaz de enviar os dados de forma mais eficiente. Somente quando há um SNR suficientemente elevado é que a comunicação é possível.

Uma das grandes diferenças do LTE em relação às *releases* anteriores do UMTS é a técnica de acesso múltiplo. As recentes tecnologias (como o HSPA+) usa o (*Wideband Code Division Multiple Access* - W-CDMA), assim com a introdução do LTE haverá uma mudança significativa ao optar pelo acesso OFDMA. Algumas das motivações para estas mudanças são:

- Excelente desempenho do OFDMA em canais com presença de desvanecimento selectivo em frequência;
- Baixa complexidade no receptor;
- Melhor eficiência espectral e controlo de múltiplas larguras de banda;
- Adaptação de transmissão e controlo no domínio de frequências;
- Compatibilidade com receptores avançados e novas tecnologias de antenas.

Para atingir melhorias na transmissão de dados, a tecnologia OFDMA distingue-se pelo facto de transmitir no domínio da frequência, em diversas sub-portadoras ortogonais entre si. A Figura 3 apresenta o espaçamento básico entre frequências do LTE, que é de 15 kHz, apesar de existir também um espaçamento alternativo de 7.5 kHz descrito na série 36.2 das normas 3GPP (porém não totalmente detalhado, o que deverá ser feito nas *releases* posteriores).

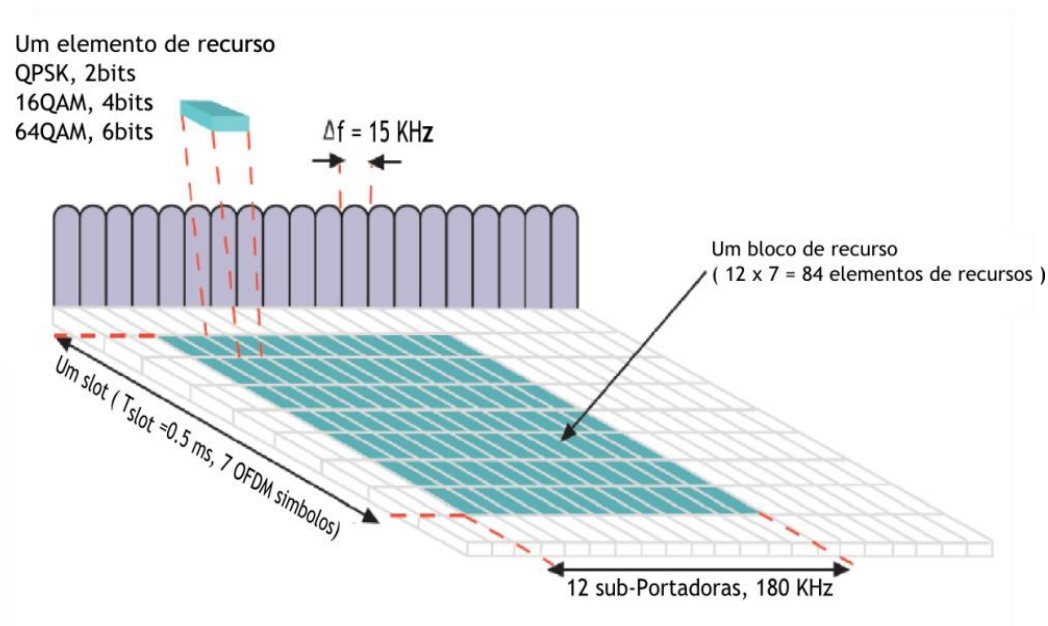


Figura 3 : Tecnologia OFDMA

No *downlink*, as sub-portadoras são divididos em blocos de recursos. Os blocos de recursos são compostos de 12 sub-portadoras por 7 símbolos no caso *Cyclic Prefix* (CP) normal, se for CP estendido são 6 símbolos, mas em todo o caso é independentemente da largura de banda

utilizada. Isto significa que para diferentes larguras de banda existem números de blocos de recursos diferentes. A Tabela 2 apresenta essa relação.

Tabela 2 : Blocos de recursos por largura de banda, extraído de [35]

Largura de Banda (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Número de blocos recursos	6	15	25	50	75	100
Duração da <i>sub-frame</i>	0.5 ms					
Largura da sub-portadora	15 kHz					

Normalmente, seria de esperar que as sub-portadoras do OFDM interferissem entre si, mas tal não acontece devido ao facto de serem ortogonais. Assim, a interferência é nula desde que as sub-portadoras tenham espaçamento igual ao inverso do período de símbolo. Também consegue-se uma redução de largura de banda de quase 50% face ao sistema *Frequency Division Multiplexing* (FDM) devido a sobreposição do espectro. A ideia básica em OFDM é dividir a informação a transmitir, de elevado débito, por várias sub-portadoras de banda estreita, em paralelo, com débitos bastante inferiores. Os dados ao serem transmitidos em diferentes sub-portadoras e usando as técnicas de correcção de erro, mesmo que algumas das sub-portadoras sejam perdidas devido aos efeitos de multi-percurso, os dados podem ainda ser reconstruídos. Além disso, ao dispor os dados a uma taxa mais baixa entre as várias sub-portadoras, os efeitos de reflexão e da interferência de inter-simbólica (*inter-symbol interference* - ISI) resultante podem ser melhorados.

A modulação e demodulação da informação são efectuadas de uma forma eficiente recorrendo a *Fast Fourier Transform* (FFT). Por fim, o OFDM pode ser usado em ambos os formatos *Frequency Division Duplex* (FDD) e o *Time Division Duplex* (TDD), tornando-se uma vantagem adicional descrito no capítulo de operação FDD e TDD.

O *cyclic prefix* (CP) do OFDM

Uma das razões principais para usar OFDM como um formato de modulação é a sua resistência aos atrasos de multi-percurso. No entanto, ainda é necessário implementar métodos que aumentem a resistência ao sistema e que ajuda a superar a interferência inter-simbólica. Em áreas onde a interferência inter-simbólica é esperado, a interferência pode ser evitado através da inserção de um intervalo de guarda no início de cada símbolo de dados e em seguida, é possível copiar uma secção a partir do final do símbolo para o começo, sendo conhecido como o *cyclic prefix* (CP) como se representa na Figura 4. O receptor pode assim receber os dados em tempo óptimo e evitar qualquer interferência inter-simbólica causada pelos atrasos de várias sub-portadoras, até ao máximo tempo do comprimento do CP.

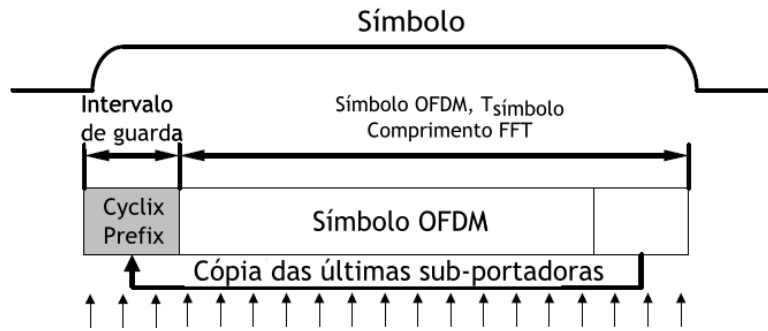


Figura 4 : *Cyclic prefix* anexada a um símbolo OFDM

O comprimento do CP é importante, se não for suficiente não vai contrariar os vários atrasos de reflexão da propagação multi-percurso. Se ele for muito longo, então ele irá reduzir a capacidade na transmissão de dados. Para a LTE, a extensão padrão do CP foi escolhido para ser $4.69 \mu\text{s}$ que permite ao sistema acomodar variações do caminho de até 1.4 km, com o comprimento do símbolo em LTE definido em $66.7 \mu\text{s}$.

A largura de banda do símbolo em OFDM é igual ao espaçamento entre portadoras de forma que sejam ortogonais entre si. A portadora de espaçamento de 15 kHz corresponde a uma duração do símbolo de $66.7 \mu\text{s}$.

***Uplink* no LTE**

Um dos principais parâmetros que afecta todos os terminais é a autonomia da bateria. Mesmo que o desempenho da bateria tenha vindo a melhorar, ainda é necessário garantir que os terminais gastem a menor energia possível. No entanto, usar OFDM a *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) é elevada, o que requer amplificadores de potência caros e eficientes, com elevadas exigências na linearidade, o que aumenta o custo do terminal e acaba com a energia da bateria rapidamente.

O *Single Carrier Frequency Division Multiplex* (SC-FDMA) resolve esse problema pelo agrupamento conjunto dos blocos de recurso, de tal maneira que reduz a necessidade de linearidade e, dessa maneira, o consumo do amplificador de potência. Uma baixa PAPR também melhora a cobertura e o desempenho na borda da célula. Os blocos de transmissão SC-FDMA são baseados num espaçamento de 15 kHz, semelhante ao utilizado no *downlink*, sendo que na forma mais simples, o terminal utilizará pelo menos 12 sub-portadoras, perfazendo um total de 180 kHz, como se apresenta na Figura 5.

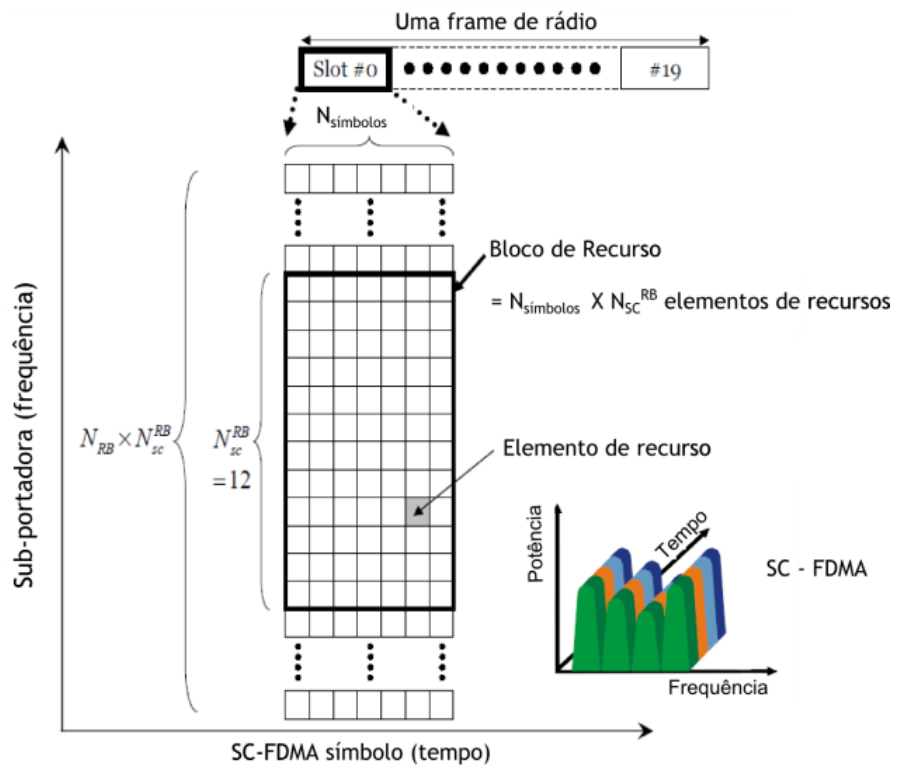


Figura 5 : Estrutura da *frame* SC-FDMA

Operação FDD e TDD

O LTE foi definido para acomodar tanto o espectro emparelhado, em *Frequency Division Duplex* (FDD), como o espectro não emparelhado, em *Time Division Duplex* (TDD). Prevê-se que tanto o TDD como o FDD serão amplamente utilizados no padrão LTE, com as suas próprias vantagens e desvantagens, a decisão sobre o formato a adoptar depende da aplicação escolhida.

Se o padrão LTE optar pelo FDD é mais fácil antecipar o caminho da migração dos actuais 3G para os 4G, devido à maior parte dos países já usarem o FDD. No entanto, tem havido uma ênfase adicional sobre incluir o TDD, principalmente dos países asiáticos. Em vista do aumento da sua importância, está previsto que os equipamentos serão projectados para acomodar ambos os modos FDD e TDD. Com TDD a ter uma maior importância, isso significa que o TDD poderá beneficiar das economias de escala, que antes eram abertas apenas ao FDD. Mas, no entanto para a sua implementação será mais difícil por parte das operadoras que já estão a usar o FDD, sendo assim pouco provável que mudam para o TDD.

O 3GPP já definiu 10 bandas de frequências de FDD ao contrário do TDD que só definiu 4 bandas de frequências. Na Tabela 3 encontra as bandas de frequências definidas por 3GPP para as duas tecnologias.

Tabela 3: Bandas FDD (esquerda) e TDD (direita) definidas pelo 3GPP (Junho de 2007)

Bandas FDD	
Banda	Frequências UL/DL (MHz)
I	1920 - 1980 / 2110 - 2170
II	1850 - 1910 / 1930 - 1990
III	1710 - 1785 / 1805 - 1880
IV	1710 - 1755 / 2110 - 2155
V	824 - 849 / 869 - 894
VI	830 - 840 / 875 - 885
VII	2500 - 2570 / 2620 - 2690
VIII	880 - 915 / 925 - 960
IX	1749.9 - 1784.9 / 1844.9 - 1879.9
X	1710 - 1770 / 2110 - 2170

Bandas TDD	
Banda	Frequências UL/DL (MHz)
a	1900 - 1920 2010 - 2025
b	1850 - 1910 1930 - 1990
c	1910 - 1930
d	2570 - 2620

É essencial que qualquer sistema de telecomunicações seja capaz de transmitir em ambas as direcções. No entanto, é preciso especificar as diferentes direcções de transmissão para que seja possível identificar facilmente a direcção em que a transmissão é feita. Há uma variedade de diferenças entre os dois *links* que vão desde a quantidade de dados transmitidos, o formato de transmissão e os canais de operação. As duas ligações são definidas de seguinte forma:

- *Uplink*: transmissão do UE (terminal) para o eNodeB (BS);
- *Downlink*: transmissão do eNodeB (BS) para a UE (terminal).

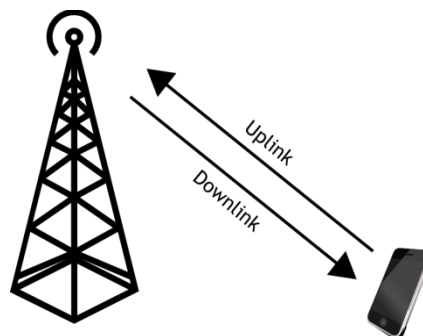


Figura 6 : Sentidos de transmissão do *Uplink* e *Downlink*

O FDD e o TDD têm as suas próprias vantagens e desvantagens, e, assim, podem ser usados em diferentes aplicações, abordando no capítulo seguinte essa diferença.

Vantagens e desvantagens do TDD e do FDD

Há uma série de vantagens e desvantagens de TDD e FDD (Tabela 4) que são de especial interesse para os operadores de telecomunicações móveis. Estas são, naturalmente, reflectidas em LTE.

Tabela 4 : Diferenças do TDD relativamente ao FDD

Parâmetro	LTE-TDD	LTE-FDD
Espectro emparelhado	Não necessita de espectro emparelhado, transmite e receber pelo mesmo canal.	Requer espectro emparelhado com separação da frequência para permitir a transmissão e a recepção simultânea.
Custos de Hardware	Baixo custo, o <i>diplexer</i> não é necessário para isolar o transmissor e o receptor. Como o custo do terminal é de grande importância devido ao grande número, esse é um aspecto fundamental.	<i>Diplexer</i> é necessário e o custo é mais elevado.
Reciprocidade do canal	Canal de propagação é o mesmo em ambos os sentidos, que permite transmitir e receber com mesmo conjunto de parâmetros	Tem características do canal diferentes em ambos os sentidos, como resultado da utilização de diferentes frequências
Assimetria do UL/DL	É possível alterar dinamicamente o tamanho de UL e DL em relação com a capacidade de responder à procura.	UL/DL capacidade determinada por atribuição de frequências definidas pelas entidades reguladoras. Portanto, não é possível fazer mudanças dinâmicas para coincidir com a capacidade.
Intervalo de guarda / canal de guarda	O canal de guarda requer assegurar que o <i>uplink</i> e <i>downlink</i> não se colidem. Em distâncias maiores é necessária que o canal de guarda seja maior. Mas o canal de guardas muito largo leva a diminuição da capacidade.	O canal de guarda necessário para fornecer isolamento suficiente entre <i>uplink</i> e <i>downlink</i> . Grande canal de guarda não tem impacto na capacidade.
Transmissão descontínua	È necessária transmissão descontínua para permitir a transmissão do <i>uplink</i> e <i>downlink</i> . Isso pode degradar o desempenho do amplificador de potência de RF no transmissor.	È necessária transmissão contínua
Interferências	As estações base precisam ser sincronizadas com relação ao tempo de transmissão de <i>uplink</i> e <i>downlink</i> . Se as estações base vizinhas usam diferentes atribuições de <i>uplink</i> e <i>downlink</i> e compartilham o mesmo canal, pode haver interferências entre as células.	Não aplicável

Multiple Input Multiple Output

Uma das tecnologias fundamentais da *Release 9* (LTE) é a operação *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). Este é um conceito que utiliza diversidade para aproveitar os sinais propagados em múltiplos percursos presentes no ambiente rádio móvel. Certamente o multi-percurso podem causar interferência, porém com um esquema de diversidade, pode-se tirar alguma vantagem.

A técnica MIMO está a ser cada vez mais utilizada na transmissão de dados sem fios, e que essencialmente emprega antenas múltiplas no receptor e no transmissor para utilizar favoravelmente os múltiplos caminhos. Os esquemas MIMO empregados no LTE são um pouco diferentes no *uplink* e no *downlink*. No caso no terminal existe uma restrição forte devido ao custo o que acaba limitando as possibilidades de ser implementado.

A configuração padrão no *downlink* é a utilização de duas antenas transmissoras na estação base e duas antenas receptoras no terminal. Porém, existem outras possibilidades que podem ser consideradas. Para o *uplink*, o LTE utiliza o que é conhecido como MU-MIMO ou *Multi-User MIMO*. Esta modalidade o eNodeB tem múltiplas antenas e cada antena transmite a cada terminal, o que reduz o custo. Durante a operação, os vários terminais transmitem simultaneamente nos mesmos canais, porém a interferência mútua é baixa devido aos padrões de piloto ortogonais utilizados, *Spatial Domain Multiple Access* (SDMA).

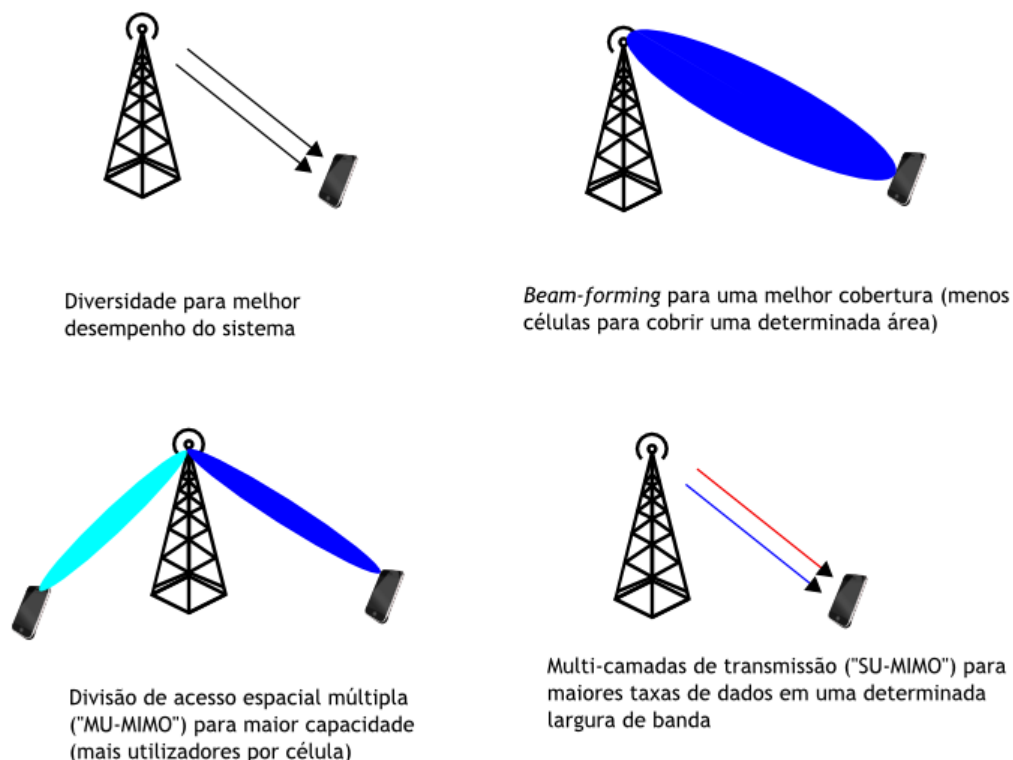


Figura 7 : Técnicas MIMO

As técnicas de MIMO estão disponíveis na Figura 7:

- ***Spatial Division Multiplexing (SDM)***: com esta técnica é possível usar os mesmos *resource block* (RB) por múltiplos *streams*. Cada *streams* poder ser usado para enviar informação para um UE, *Single User-MIMO* (SU-MIMO), ou pode ser usado para enviar informação a diferentes UEs, *Multiple User-MIMO* (MU-MIMO);
- ***Beam-forming***: é uma técnica de *sensing* do canal e de transmitir a mesma *streams* de múltiplas antenas, a fim de criar as direcções onde o sinal é maior e outras onde o sinal é menor.

Aplicações e classes de QoS

O LTE suporta *End-to-End* QoS, o que significa que as características da portadora são definidos e controlados durante toda a sessão entre o terminal (UE) e PDN Gateway (P-GW). A QoS é caracterizada por um índice, *QoS Class Identifier* (QCI), que descreve a taxa de erros e atrasos que estão associados ao serviço. O parâmetro *Allocation and Retention Priority* (ARP) determina se uma portadora pode ser (ou não) descartada se a rede ficar congestionada. Por exemplo, as chamadas de emergência podem estar associadas com um ARP elevado.

Os tipos de portadora pertencem a duas principais classes; as com taxas garantidas (GBR) e não garantidas (*non-GBR*):

- A *guaranteed bit rate* (GBR) a portadora tem ritmos de transmissão garantido entre os seus parâmetros de QoS. Uma portadora GBR seria adequada para um serviço de conversação, por exemplo, uma chamada de voz;
- Uma portadora *non-GBR* não tem ritmos de transmissão garantido. Assim uma portadora *non-GBR* seria adequada para um serviço de background, como o e-mail.

Uma outra classificação é em relação à forma como uma portadora é estabelecido a um terminal:

- Quando o terminal (EU) se conecta com uma rede de dados, a portadora padrão é estabelecida inicialmente no Evolved Packet System (EPS), fornecendo ao utilizador uma conexão “always-on IP” a essa rede. A portadora padrão é sempre *non-GBR*;
- Qualquer portadora adicional no EPS para o mesmo pacote de rede de dados é conhecida como portadora dedicada. A portadora dedicada podem ser GBR ou *non-GBR*.

As classes “*standard*” do QCI e o valor dos parâmetros de cada classe são apresentados na Tabela 5. Cada valor do QCI está relacionado com as suas características, que definem o tratamento de pacotes no encaminhamento do tráfego das portadoras entre o terminal e a rede em termos do tipo de portadora (GBR ou *non-GBR*), da prioridade, no atraso dos pacotes

e das taxas de erro na perda de pacotes. O objectivo de cada um dos QCI é de garantir que os aplicativos/serviços sejam mapeados, para que receba o QCI com o mesmo nível mínimo de qualidade de serviço.

Nos TVWS (700 MHz), no contexto do COGEU é usado na partilha de espectro, como a oferta do espectro nem sempre está disponíveis nas frequências 2.6 GHz, o que significa os TVWS deve ser usado para apoiar o espectro de operadora de telecomunicações de forma aumentar a capacidade, sendo uma forma de garantir a QoS.

Tabela 5 : Características do QCI do LTE [34]

QCI	Tipo de recurso	Prioridade	Atraso máximo	Taxa máxima de pacotes com erro	Exemplo de Serviços
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Voz/conversaço
2		4	150 ms	10^{-3}	Vídeo (<i>Live Streaming</i>)
3		3	50 ms	10^{-3}	<i>Jogos em tempo real</i>
4		5	300 ms	10^{-6}	Vídeo sem voz (<i>Buffered Streaming</i>)
5	Non-GBR	1	100 ms	10^{-6}	Sinalizaço (IMS)
6		6	300 ms	10^{-6}	Vídeo (<i>Buffered Streaming</i>), TCP (exemplo: www, e-mail, chat, ftp, p2p, etc.)
7		7	100 ms	10^{-3}	Voz, Vídeo (<i>Live Streaming</i>), <i>Jogos interactivos</i>
8		8	300 ms	10^{-6}	Vídeo (<i>Buffered Streaming</i>), TCP (exemplo: www, e-mail, chat, ftp, p2p, etc.))
9		9			Partilha de ficheiros, etc.

Sumário e Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas, de forma resumida, as modificaçoes introduzidas pela *Release 9* do 3GPP, referente ao LTE. O LTE é definido para suportar portadoras com largura de banda flexíveis, entre 1.4 MHz até 20 MHz, em várias faixas do espectro e para os modos FDD e TDD. Isso significa que um operador pode introduzir LTE em bandas novas ou nas já existentes. A introduço de uma nova arquitectura SAE-LTE é projectada para otimizar o desempenho de rede, reduzir os custos e facilitar a captura de serviços baseados em *All-IP*.

O LTE utiliza OFDMA para o *downlink*, da estação base para o terminal. O OFDMA corresponde ao requisito do LTE quanto à flexibilidade de espectro e possibilita soluções eficientes e económicas para portadoras de banda larga com taxas de pico elevadas. Para o *uplink*, utiliza o SC-FDMA de forma a reduzir o PAPR, e assim, o consumo ser mínimo na parte do terminal.

Foram apresentadas vantagens e desvantagens do TDD e FDD, sendo o segundo mais generalizado. O primeiro possui uma série de vantagens significativas, especialmente em termos de maior eficiência de espectro, podendo ser utilizado por muitos operadores. Antecipa-se também que os terminais serão capazes de operar usando FDD ou TDD, desde modo, o UEs ou terminais terão duas soluções capazes de operar em vários países independentemente do que é usado, sendo as bandas de frequência o principal problema.

Para além disso o *downlink* LTE (*Release 8* da 3GPP) tem como principais propriedades:

- O período da *frame* (trama) é 10 ms, 20 *slot* com 0.5 ms (7 OFDMA símbolos por slot);
- O espaçamento entre sub-portadoras é de 15 kHz;
- O menor elemento é o *resource block* (RB), com uma largura de banda de 180 kHz (12 sub-portadoras).

Contudo, o LTE também introduz as multi-antenas (MIMO) que são soluções avançadas com o objectivo de atingir maiores débitos, que podem ser atingidas com configurações de 2x2 ou 4x4 do número de antenas, ao com o aumento de cobertura através da técnica *beam-forming*. Podemos concluir que não existe uma solução de antenas que sirva para todos os cenários e conseqüentemente, é preciso uma família de soluções disponível para cada cenário específicos.

No LTE, também é importante a diferenciação no tratamento de diferentes tipos de tráfego de acordo com os requisitos de cada um (diferentes QCI). Por exemplo, a latência é muito mais crítica para um pacote de voz do que para um pacote de dados. Então, pode-se dar prioridade nos pacotes de voz em detrimento dos de dados. Para além disso, o LTE está dividido dois tipos de QoS (*Guaranteed Bit Rate* ou *non-Guaranteed Bit Rate*), para o *non-GBR* significa que os recursos atribuídos não são garantidos pelo eNodeB e não possuem controlo de admissão, no caso do GBR tem uma taxa de transmissão garantida e tem uma *Maximum Bit Rate* (MBR), ou seja, uma taxa de transmissão máxima dedicada a este canal de transporte.

Os canais de transporte *non-GBR* têm um *Aggregate Maximum Bit Rate* (AMBR) que é partilhado por todos terminais com portadoras *non-GBR*. Assim, os canais de transportes *non-GBR* correspondentes estão sujeitos a perda de pacotes em caso de congestionamento, enquanto os canais de transporte GBR são imunes a tais perdas.

Em suma, o LTE oferece um elevado nível de flexibilidade e pode ser implantado em muitos ambientes, cenários e topologias. Assim, a utilização do LTE sobre o TVWS não vai ser muito complicada de implementar. No entanto, é necessário estudar soluções viáveis para a sua coexistência para se quantificar o impacto de se exigir *sensing*, por exemplo, introdução de *overheads*, para protegerem os operadores tradicionais.

Capítulo 3

Espaços vazios da TV

Introdução

Este capítulo é dedicado à descrição dos TVWS, o recurso importante para esta dissertação. Em primeiro lugar, a situação actual da transição global para a TV digital, em segundo lugar, uma definição conceitual do dividendo digital e dos TVWS, em terceiro lugar, a disponibilidade de TVWS na Europa, destacando os estudos do Reino Unido, França e Itália. Finalmente, em quarto lugar, os desafios técnicos para a implementação dos TVWS na Europa.

Visão Geral dos TVWS

Situação actual do *switchover* digital

O processo de transição para o digital está actualmente em andamento. Em todo o mundo, vários países já lançaram os serviços de Televisão Digital Terrestre (TDT), ou já começaram a planear o encerramento das redes analógicas. Mas o fim das transmissões analógicas não é fácil, pois o encerramento destas pode ter consequências terríveis se os espectadores não se encontrarem devidamente preparados. Os governos não irão querer o risco de telespectadores ficarem sem transmissão de canais de televisão e vai querer garantir que sejam tomadas as devidas salvaguardas, o que vai exigir um planeamento cuidadoso e o envolvimento de todos os interessados.

O processo de encerramento da radiodifusão analógica será diferente de país em país, dependendo da configuração do mercado, por exemplo, os países com muitas famílias que tem a plataforma terrestre por cabo (TV cabo) terão que de tomar medidas diferentes em relação a outros países com famílias que aderiram pouco à TV por cabo. Neste caso pode -se ser mais vantajosa a introdução do TDT. As experiências dos países que já cessaram a TV analógico e (ou que já tem um planeamento bastante avançado) podem fornecer ensinamentos úteis para os países que apenas iniciaram o processo de planeamento. O entendimento pode ajudar a garantir um processo bem sucedido. A transição para a televisão digital neste momento é uma grande preocupação das economias mundiais desenvolvidas, como os mercados principais, os EUA, o Japão e a Europa. Na Europa temos os países da Europa Ocidental, Reino Unido, Espanha, Alemanha, Itália e França.

Situação fora da Europa

A transição da radiodifusão analógica para o TDT nos Estados Unidos foi exclusivamente para canais livres. Inicialmente, para as estações de alta potência de TV estava prevista o

encerramento para 17 de Fevereiro de 2009. No entanto, uma vez que cerca de dois milhões de famílias não estavam preparadas para a transição, o *switch-off* do analógico foi adiado. A transição entrou em vigor só no dia 12 Junho de 2009, em que todas as estações analógicas de TV tinham que terminar as emissões até às 23:59, hora local nesse dia.

Este exemplo pode ser útil para países que ainda não cessaram as transmissões analógicas e tirem aqui as suas conclusões. Como no Japão, em que a transição para o digital está prevista para acontecer em 24 de Julho de 2011 e no Canadá, que está programada para acontecer no dia 31 de Agosto de 2011. No caso da China está agendada para *switch-off* só para 2015.

No Brasil, a mudança para digital começou no dia 2 de Dezembro de 2007 nas suas principais cidades e estima-se que levará sete anos para completar a transmissão do sinal digital sobre todo o território brasileiro. A Figura 8 mostra o estado da transição do analógico para digital em todo o mundo.

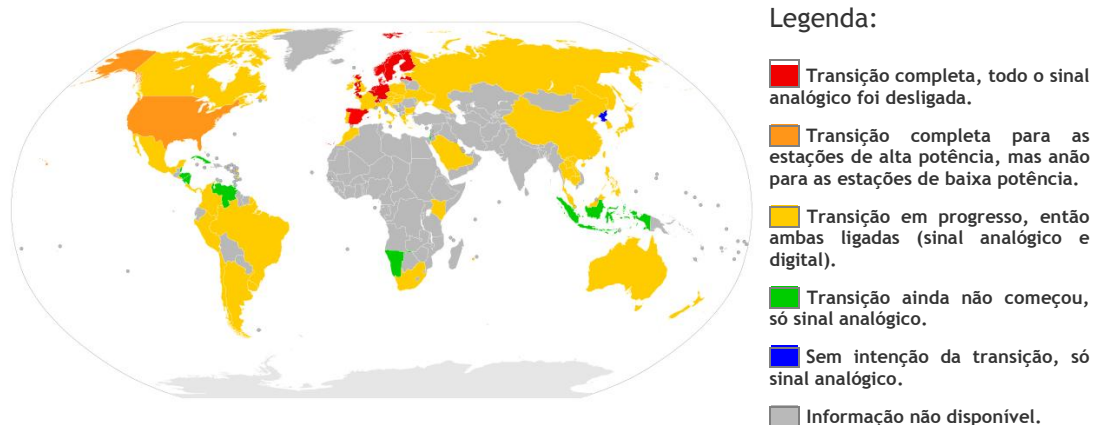


Figura 8 : Mapa-mundo do progresso da transição para a televisão digital em 17 de Novembro de 2010, extraído de [4]

Dentro da Europa

A transição da televisão analógica para a televisão digital terrestre na Europa vai libertar frequências de rádio, isso acontece porque a transmissão digital tem uma maior eficiência espectral, assim frequências libertadas tem um grande valor económico e social. Tem um grande potencial para o fornecimento de uma ampla gama de serviços, devido a esses sinais de rádio terem maior penetração em edifício, e pode ser facilitada o uso de equipamentos em ambientes *indoor*. O dividendo digital representa uma oportunidade única para a Europa para atender à crescente procura por espectro de radiofrequências, sobretudo para fornecer banda larga sem fios para áreas rurais, assim, reduzir a falha digital e estimular a implantação de novos serviços sem fios. Portanto, contribuir significativamente para os objectivos da Agenda de Lisboa [2] da competitividade e o crescimento económico e satisfazer algumas das importantes necessidades sociais, culturais e económicos dos cidadãos europeus.

O espectro do dividendo digital estará disponível em toda a Europa num espaço de tempo relativamente curto, como todos os Estados-Membros devem preencher o *switch-off* da televisão analógica até 2012 o mais tardar. É essencial que esta janela de oportunidade é usada para garantir um nível adequado de coordenação na União Europeia e colher os benefícios sociais e económicos possíveis do acesso a esse espectro e fornecer um caminho claro para os Estados-Membros da UE que avançam em diferentes velocidades e com diferentes perspectivas nacionais. A abertura do espectro do dividendo digital para diferentes serviços cria uma oportunidade especial para os Operadores de rede de banda larga sem fios para obter o espectro valioso, isto permitirá uma concorrência mais elevada na prestação de serviços de banda larga.

No final de 2010, 15 países tinham concluído o processo de encerramento da radiodifusão terrestre analógica. Muitos outros países têm planos para o fazer-lo ou estavam em processo de o concluir. O primeiro país a fazer a transição para a transmissão digital foi Luxemburgo, em 2006, seguidos pelos Países Baixos no final de 2006. Na Finlândia, Alemanha, Andorra, Suécia e Suíça foi em 2007, a Bélgica e a Alemanha, em 2008, e da Dinamarca e da Noruega em 2009. Por último a Espanha, Estónia, Eslovénia e a Letónia em 2010. Os Estados-Membros que lançaram o TDT precocemente, usaram principalmente a tecnologia de compressão MPEG-2, enquanto os Estados-Membros que lançaram recentemente ou que ainda estão para lançar (como a Irlanda, Letónia, Lituânia, Roménia e Portugal) planeiam usar a tecnologia compressão MPEG-4 desde o início. A Áustria, Dinamarca, Finlândia, Alemanha, Itália, Luxemburgo, Portugal, Suécia e Reino Unido consideram o padrão MPEG-4, como a tecnologia mais provável que todos os países a adoptem. Em particular, a Suécia e a Dinamarca pretende usar tanto o MPEG-2 e o MPEG-4 *Advanced Video Coding* (AVC) como padrões a utilizar em *simulcast*.

No mercado mostra que a tecnologia de compressão MPEG-4 AVC é que tem mais evoluído nos receptores de TDT. Mercados que lançaram serviços de TDT desde 2008 a maioria adoptou pelo MPEG-4 AVC, enquanto os mercados que actualmente utilizam MPEG-2 provavelmente transitam para MPEG-4 AVC. Na França e em Espanha a partir de 2010 todos os receptores HD deve incluir um chipset MPEG-4 AVC. Como resultado, MPEG-4 AVC é esperado para se tornar a tecnologia de compressão mais utilizada em quase todos os receptores de TDT.

O período de difusão simultânea do sinal analógica e do TDT nos Estados-Membros tem uma duração média de 5.5 anos. Os membros mais pequenos com infra-estrutura de cabo já totalmente cobertos, como os Países Baixos e Luxemburgo, desligaram a TV analógica e transitaram a nível nacional para o TDT numa só noite. Na Alemanha, como um grande país, com ampla infra-estrutura de cabo, adoptou um plano de transição regional com um período de transmissão de quase seis anos. Em contraste, no Reino Unido, onde a televisão terrestre é uma das principais plataformas de televisão, a transição deverá ocorrer num total de 14 anos. Na Tabela 6 apresentam-se as datas de lançamento da televisão digital e de cessação de TV analógica.

Tabela 6 : Situação do *switch-over* em 05 de Outubro de 2011, extraído de [5]

Países	Data de lançamento	Formato de compressão	“Analog Switch Off “ (ASO) completo
Reino Unido	1998	MPEG-2	2012
Suécia	1999	MPEG-2	Completo
Espanha	2000/ 2005	MPEG-2	Completo
Finlândia	2001	MPEG-2	Completo
Suíça	2001	MPEG-2	Completo
Alemanha	2002	MPEG-2	Completo
Bélgica	2002	MPEG-2	Completo
Países Baixos	2003	MPEG-2	Completo
Itália	2004	MPEG-2	2012
França	2005	MPEG-2/MPEG-4 AVC	2011
Republica Checa	2005	MPEG-2	2011
Dinamarca	2006	MPEG-2/MPEG-4 AVC	Completo
Estónia	2006	MPEG-4 AVC	Completo
Áustria	2006	MPEG-2	2010
Eslovénia	2006	MPEG-4 AVC (TBC)	Completo
Noruega	2007	MPEG-4 AVC	Completo
Lituânia	2008	MPEG-4 AVC	2012
Hungria	2008	MPEG-4 AVC	2011
Ucrânia	2008	MPEG-4 AVC	2014
Lapónia	2009	MPEG-4 AVC	Completo
Portugal	2009	MPEG-4 AVC	2012
Croácia	2009	MPEG-2	2011
Polónia	2009	MPEG-4 AVC	2013
Eslováquia	2009	MPEG-2	2012
Irlanda	2010	MPEG-4 AVC	2012
Rússia	Por confirmar	MPEG-4 AVC	2015

Como vimos, os Estados-Membros têm diferentes abordagens no seu plano de *digital switch-over* (DSO). O ritmo a que estão a ser executados depende da geografia, da plataforma existente da televisão por cabo, dos objectivos e da vontade política, bem como o nível do avanço tecnológico. Em geral, na Europa Ocidental os Estados-Membros já começaram, e provavelmente terminaram, o DSO antes do leste europeu dos Estados-Membros. Na verdade, cinco (Finlândia, Alemanha, Luxemburgo, Países Baixos e Suécia) já desligaram as suas transmissões analógicas. Nesta fase, todos os Estados-Membros, com excepção da Polónia, parece ter confirmado a sua intenção de concluir analógico até 2012. No entanto, os países que ainda não lançaram as suas plataformas de TDT correm o risco de serem incapazes de completar a transmissão até 2012. Os Estados-Membros que ainda não tenham lançado serviços de TDT vão ter mais dificuldade em chegar a um nível suficientemente elevado de penetração para permitir cessação do analógico até 2012. Assim, espera-se que estes países serão capazes de completar a transição até 2012, se não antes [6].

O que é TVWS?

Switch-over do digital

Os serviços de televisão operaram em canais licenciados na parte de VHF e UHF do espectro radioelétrico, este espectro oferece recursos atraentes, como a alta penetração em edifício, ampla cobertura e, além disso, o comprimento de onda é suficientemente pequeno de forma que as antenas com tamanho suficientemente reduzidas possam ser usadas em dispositivos portáteis. Contudo, as regras de regulamentação não permitem o uso de dispositivos não autorizados nas faixas de TV, com excepção do controlo remoto, telemetria de dispositivos médicos e microfones sem fio. Actualmente, há um movimento global para transformar as estações de TV de analógico para a transmissão digital. Isso é chamado de *digital switch-over* (DSO) referente ao tempo da transição para o digital ou, o *analog switch-off* (ASO) onde transmissão analógica efectivamente cessa [7].

O dividendo digital

Devido à eficiência de utilização do espectro da TDT, algumas das faixas do espectro utilizado para a TV analógica serão disponibilizados para outras aplicações. O dividendo digital refere-se ao "resto" das frequências resultantes da mudança da TV analógica para digital, esta oportunidade é chamada dividendo digital na literatura, [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. O regulador do Reino Unido, OFCOM, levou a Europa à criação de um dividendo digital. Como ilustrado na Figura 9, o dividendo digital do Reino Unido compreende como [12]:

- ***Espectro Livre (Cleared Spectrum)***: 128 MHz, que ficará disponível para novas aplicações, principalmente com resultado da transição para o digital;
- ***Espectro intercalado (Geographical interleaved Spectrum ou TVWS)***: a disponibilidade de espectro dentro do TDT após a transição. Isso é conhecido

como o “interleaving” do espectro, porque nem todo o espectro e em qualquer local será utilizado para a TDT, assim será disponível para outros serviços numa base partilhada (ou intercalados).

- **Programmer Making and Special Events (PMSE)** - Novo licenciamento para o canal 38 para o uso de microfones sem fios em espectáculos e eventos culturais.

Após a iniciativa do Reino Unido, levou a outros países europeus a lançar um dividendo digital, dentro de um bloco mais amplo de espectro, em 790-862 MHz (o chamado faixa dos 800 MHz). Por exemplo:

- Na Suécia, uma decisão governamental tomada em 2007 decidiu leiloar a banda 790-862 MHz em 01 de Janeiro de 2009;
- Na Finlândia, o Governo atribuiu a faixa de 790-862 MHz para a banda larga móvel, a decisão entrou em vigor em 01 de Julho de 2008;
- Na França, o Governo anunciou uma atribuição na banda de 790-862MHz para banda larga móvel, com leilões anunciadas para 2011;
- Em Portugal, o regulador ANACOM decidiu, em 11 de Março de 2011, fazer um leilão para a banda larga móvel ainda durante este ano de 2011.



Figura 9 : Distribuição de espectro após a transição para o digital no Reino Unido, extraído de [12]

Como a Finlândia, França e Suécia já decidiram libertar este grande bloco de espectro de 72 MHz, uma série de outros países são esperados a fazer o mesmo. Por outro lado, a Comissão Europeia está em consulta sobre a forma de harmonizar a realização do dividendo digital em toda a Europa, a fim de evitar a fragmentação em termos de políticas entre os Estados-Membros [8], [10], [10], [12], [13]. Como vimos acima, o OFCOM, por seu lado já está

alinhando com dividendo digital para o bloco de 72 MHz mais amplo para que os dispositivos podem operar em todos os Estados-Membros. Para a Comissão Europeia, o dividendo digital (*Cleared spectrum and geographical interleaved spectrum*) constitui uma grande oportunidade para perceber elementos importantes da estratégia de Lisboa da UE, por exemplo, proporcionando melhorias significativas na banda larga móvel, multimédia e acesso à Internet. No entanto esta dissertação visa só a exploração eficiente do espectro geográfico intercalados do TDT (também chamado TVWS) que será detalhada no próximo capítulo.

Visão geral do TVWS disponível na Europa

A capacidade de quantificar a disponibilidade dos TVWS é importante para o desenvolvimento de *white spaces device* (WSD), como também para proteger os operadores históricos. Os parâmetros para quantificar o número de TVWS disponível num determinado local são: o de interferência estabelecido para protegerem os operadores históricos e o de potência de emissão para os WSD. Além disso, a disponibilidade de TVWS é afectada por factores como do relevo geográfico, as propriedades da propagação do sinal, como sombreamento e desvanecimento, bem como os factores de fábrica das estações de base e dos dispositivos (WSD), tais como o padrão da antena, a potência máxima de emissão, etc.

Os resultados da quantificação dos TVWS são informações importantes para ajudar um mercado *Spectrum Commons* ou *Secondary Spectrum Market* para operar sem causar interferência nos operadores históricos. Especificamente, no caso em que os canais estão disponíveis em uma dada localização geográfica, os resultados ajudam o sistema TVWS para determinar a potência de emissão a usar, como também que tipo de modulação a utilizar em função da proximidade ou a disposição dos canais disponíveis, ou seja, se contíguas ou não contíguas, respectivamente. Baseado em relatórios públicos as seguintes subsecções darão uma visão geral de disponibilidade dos TVWS no Reino Unido, França e Itália.

Reino Unido

A norma de TV digital adoptada no Reino Unido é o DVB-T em MPEG-2, que utiliza canais de frequência com 8 MHz de largura de banda para a sua transmissão. Na parte inferior da Figura 10 é apresentado o gráfico de canais de TV analógico do Reino Unido e como estão divididas após a transição para o digital no espectro limpo e repetitivo sequencialmente. A partir deste gráfico pode-se observar o espectro total do Reino Unido, totalmente na faixa de frequência UHF, é de 256 MHz. No entanto, o OFCOM propôs a leiloar os canais 61 e 62 para uso licenciado, reduzindo a largura de banda disponível para acesso à TV por meio de dispositivos cognitivos para um total de 240 MHz [11]. Contudo, o número e a composição exacta da frequência de TVWS podem variar de local para local e é determinada pelo arranjo espacial dos transmissores de TV digital e sua planificação das frequências de âmbito nacional. No Reino Unido decidiu-se a transferência do canal 69 para o canal 38 para uso de microfones sem fios como mostra a Figura 10, mas sujeitos a restrições geográficas específicas. É

reconhecido que o canal 69 é de grande importância para os utilizadores de microfones sem fios, pois está disponível em todo o Reino Unido. Este canal é, portanto, muito utilizado para apoiar as produções de teatro e espectáculos musicais. Com a mudança do canal 69 para o canal 38 dos microfones sem fios e mais a transferência dos canais 61 e 62 para os canais 39 e 40, libertou-se a banda 790-862 MHz para ser usado na banda larga móvel.

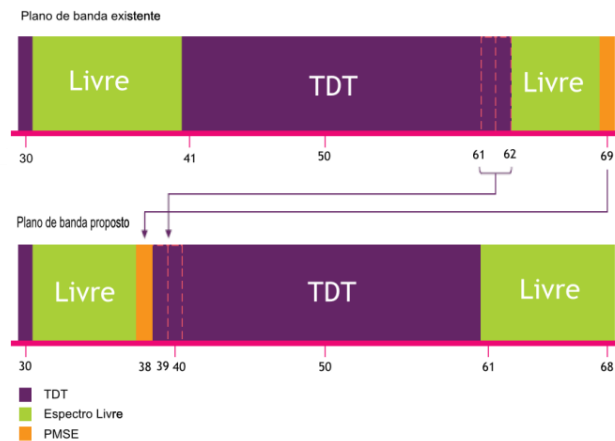


Figura 10 : Alteração da configuração do dividendo digital do Reino Unido

A Figura 11 resume a um gráfico de barras da disponibilidade de canais TVWS para os 18 grandes centros populacionais, na Inglaterra, Gales e Escócia. O número total de canais disponíveis em cada local é apresentado como uma barra vermelha.

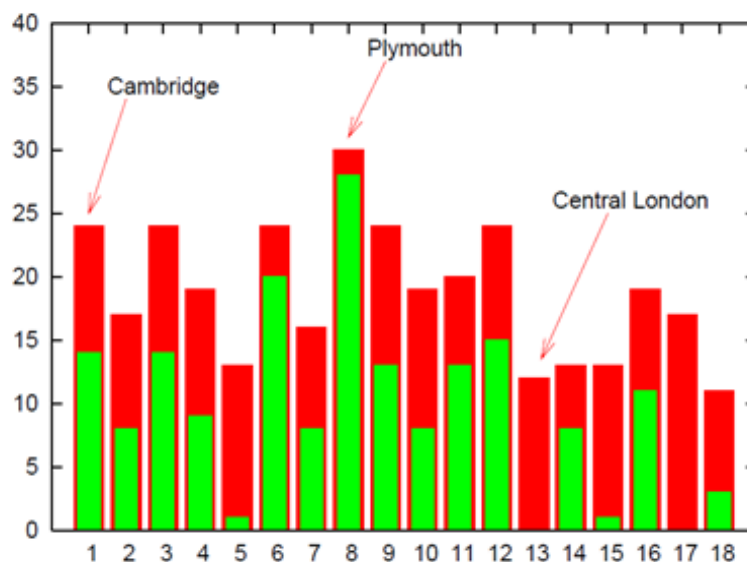


Figura 11 : Variação na disponibilidade de TVWS é mostrada nos 18 locais do Reino Unido

Podemos ver que existem variações consideráveis no número de canais TVWS quando nós nos movemos de um local para outro dentro do Reino Unido. Para qualquer determinado local, no entanto, um mínimo de 12 canais (96 MHz) é acessível para dispositivos cognitivos de baixa potência, enquanto a média do espectro disponível é um pouco mais de 150 MHz [14]. Os

resultados são mostrados antes, barras vermelhas, e após, barras verdes, da inclusão dos canais vagos adjacentes que foram encontrados por serem ocupados pela transmissão TDT [14].

Outros estudos conduzidos pela OFCOM [15] sugerem que mais de 90 % da população pode ter acesso a pelo menos a 100 MHz de todo o espectro intercalado. Também estimam que cerca de 50 % da população possa ter acesso a 150 MHz ou superior e algumas comunidades rurais poderiam desfrutar de mais de 200 MHz de capacidade. Além de estimar o total TVWS disponíveis, é de grande importância investigar a composição dos canais do espectro. A Figura 12 mostra, a composição dos canais TVWS em 4 cidades de Inglaterra: Bristol, Liverpool, Londres e Southampton. Nesta figura os canais vagos são mostrados com barras azuis, enquanto os canais ocupados são deixados em branco. Como pode ser visto na figura, a composição exacta dos canais TVWS varia muito de local para local. Em particular, ambos em Bristol e Liverpool, a maioria dos canais disponíveis estão localizados na extremidade inferior (470-550 MHz) da banda de UHF, enquanto que, no caso de Southampton, estes canais são agrupados na extremidade superior da banda (630 - 806 MHz). Além disto, os canais disponíveis TVWS podem ser altamente não contíguos. No caso de Londres, por exemplo, em princípio, apesar de estar disponível um total de 96 MHz de espectro de banda, apenas 16 MHz podem ser utilizadas para o acesso em frequências contíguas [14].

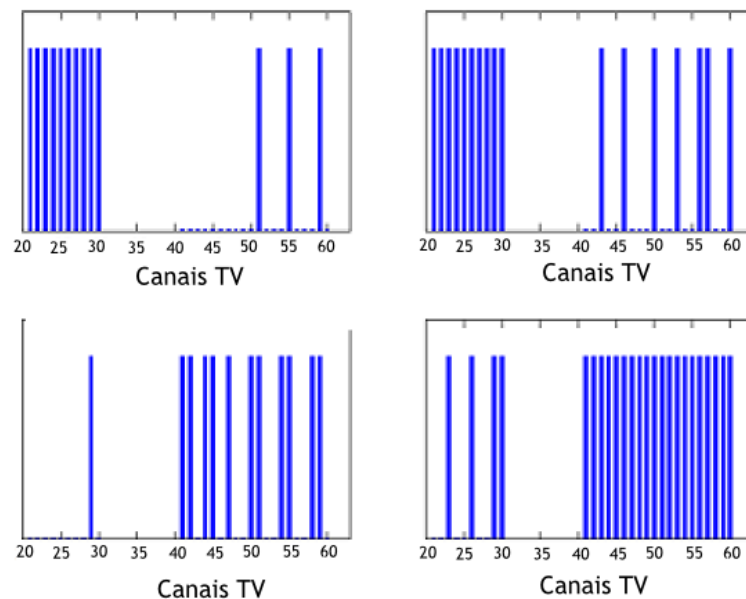


Figura 12 : Disponibilidade de frequências de TVWS para os Rádios Cognitivos de baixa potência (em Bristol, Londres, Liverpool e Southampton em barras azuis, da esquerda para a direita e de cima para baixo) [14]

Em conclusão, o número e composição exacta da frequência de TVWS podem variar de local para local e é determinada pelo arranjo espacial de transmissores de TV digital e pelo planeamento das frequências de âmbito nacional.

França

A disponibilidade de TVWS em França é relatada na terceira reunião de SE43 [17]. Os documentos fornecem uma estimativa dos espectros potencialmente disponíveis, como espaços vazios em três áreas rurais, com características diferentes de topografia em França: Morbihan Creuse e Vosges. Este estudo é feito utilizando a metodologia de *sensing-only*, utilizando 35 dB de *hidden node margin* (HNM), e a metodologia de detecção e de base de dados de geolocalização, usando o efeito de verificação cruzada com a consulta de uma base de dados e HNM = 0 dB. Note-se que a PMSE não foram tidos em conta neste estudo e a protecção da radioastronomia é assumida pelo facto de o canal 38 não estar disponível para a TDT e WSD. Como exemplo, as estações TDT distribuídas em Morbihan estão representadas na Figura 13 a). Os 261 pontos do teste considerado para a determinação do potencial de espectro disponível para dispositivos para espaços vazios (WSD) estão representados na Figura 13 b). Cada ponto de ensaio na área de estudo representa o centro da cidade.

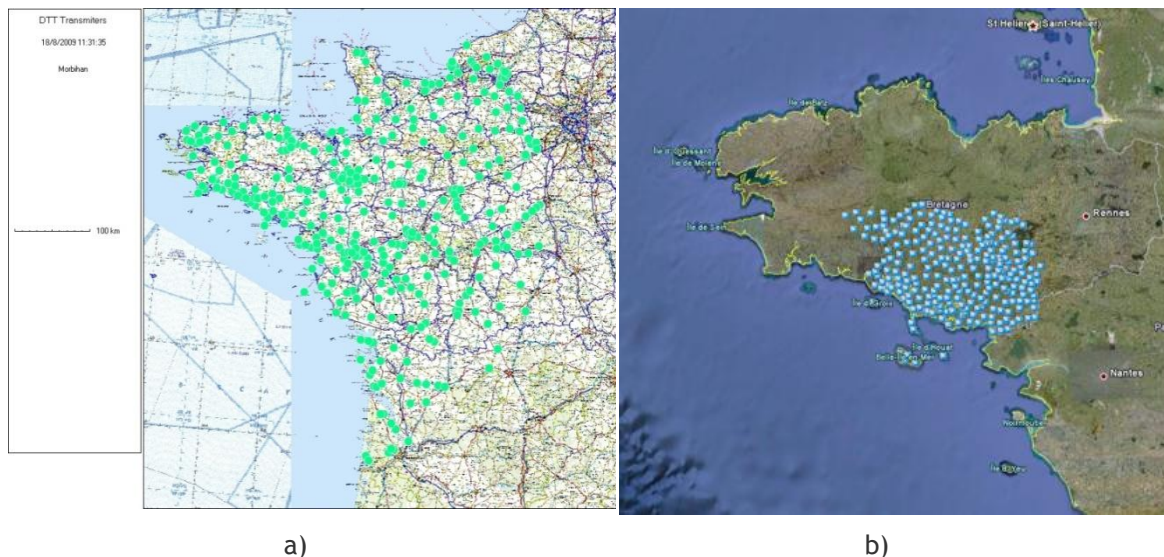


Figura 13 : a) Estações TDT consideradas para a zona de Morbihan, representadas por pontos verdes, b) pontos de teste para TVWS, representados por pontos a azul

Detalhes sobre as estações TDT e da localização dos pontos de teste para as áreas Creuse e Vosges podem ser encontrados na referência [17]. Segundo o plano "France Numérique 2012", especialmente no ponto n° 20, 13 *multiplexes* são destinados a serem utilizados na França depois da DSO (11 para recepção fixa e 2 para a recepção móveis). As características detalhadas da TDT neste estudo estão listados em [17]. O mesmo relatório considera ainda que WSD estão equipados com uma antena omnidireccional (0 dBi) com as seguintes alturas: 1.5 m, 3 m e 10 m. Os resultados para a área 1, 2 e 3 são agregados para obter os gráficos da Figura 14 e Figura 15 para a disponibilidade em função dos números de canais disponíveis. O máximo WSD EIRP considerados são: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 dBm. O cenário apresentado tem

11 + 2 *multiplex* no TDT e a altura da antena é de 1.5 m no dispositivo WSD. Na referência [17] também descreve outros cenários. O estudo dá uma estimativa da probabilidade de se ter um determinado número (1 ou 2) canais contíguos para WSD.

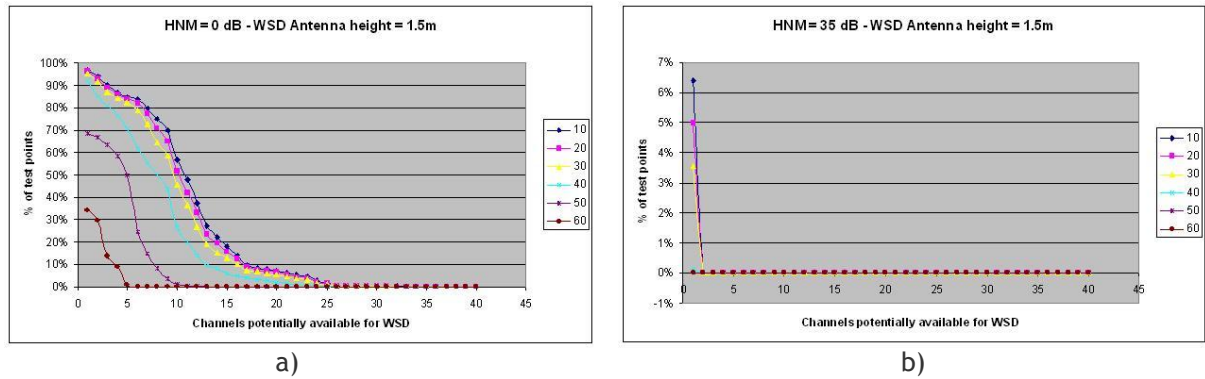


Figura 14 : Canais 1 x 8 MHz:
a) *Sensing + geolocation database*; b) *Só usando Sensing*

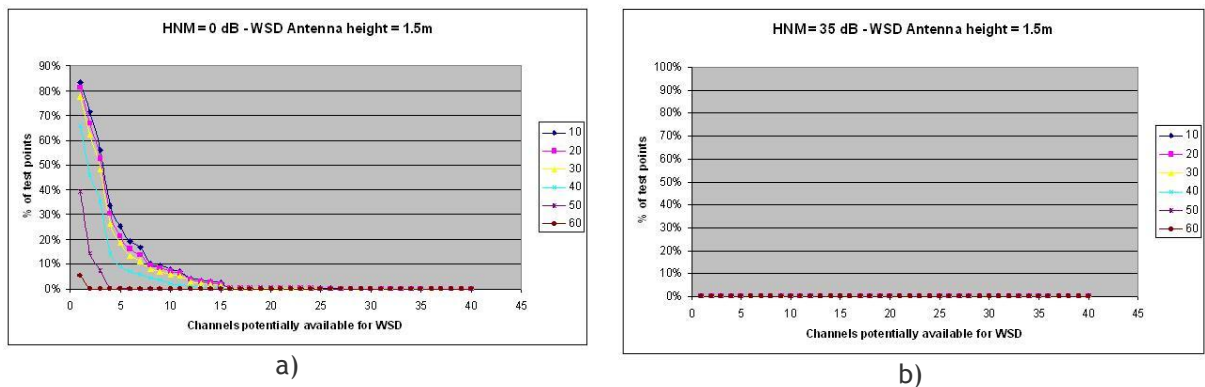


Figura 15: Canais 2 x 8 MHz (dois canais contíguos):
a) *Sensing + geolocation database*; b) *Só usando Sensing*

Como pode ser visto a partir dos resultados, dado que os TVWS são fragmentados e a probabilidade de encontrar dois canais contíguos é inferior. Também se pode concluir que os métodos de geolocalização são mais eficientes para a detecção de canais de televisão do que técnicas de *sensing-alone*. O número de canais potencialmente disponível diminui à medida do aumento da potência dos WSD, isto porque, com o aumento da potência dos WSD, reduz-se a viabilidade de não se interferir com os utilizadores primários.

Itália

No Relatório CEPT 24 [13], faz-se uma estimativa do espectro potencialmente disponível, como *espaços vazios* fornecido na região oeste do Piemonte, com um *Detection Threshold (DT)* determinado. Figura 16 a) e b) apresentam resultados para o número de canais

disponíveis por *pixel* na região Oeste do Piemonte em Itália, para os dois *Detection Threshold* (*DT*), -120 dBm e -114 dBm, respectivamente.

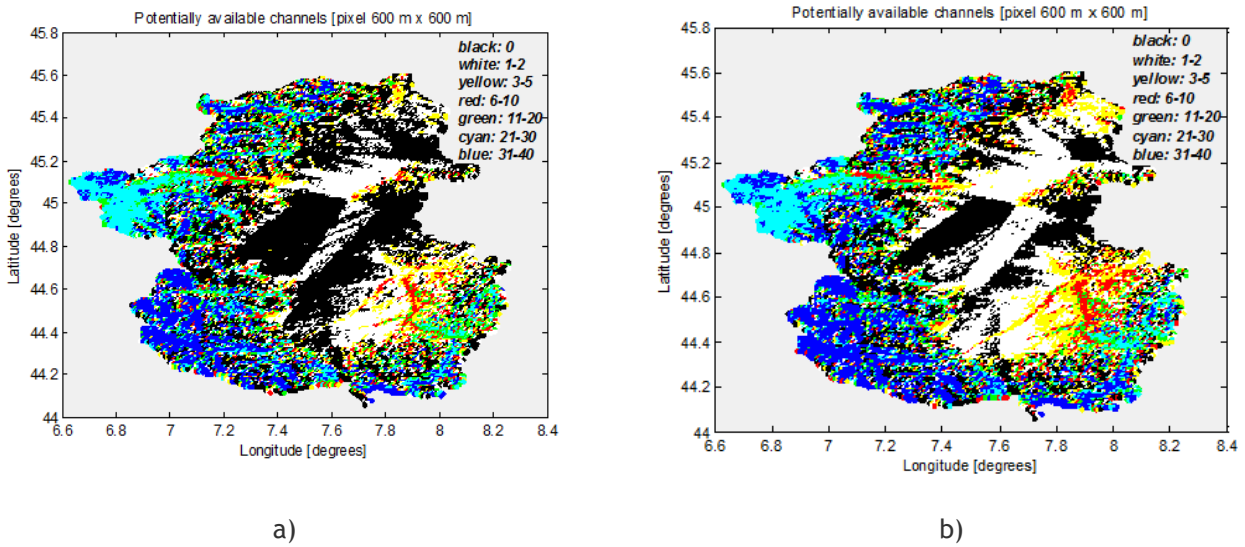


Figura 16 : Número de TVWS disponível em West Piemonte. a) *DT* = -120 dBm e b) *DT* = -114 dBm. A altura da antena é de 1.5 m para os dois resultados

A quantidade do espectro disponível como *espaços vazios* é fortemente dependente do limite de *threshold* utilizado pelos WSD.

As Figura 17 e 18 apresentam a *Complementary Cumulative Distribution Function* (CCDF) do valor estimado do espectro disponível como *espaços vazios* para a mesma região geográfica, por localização e população, respectivamente.

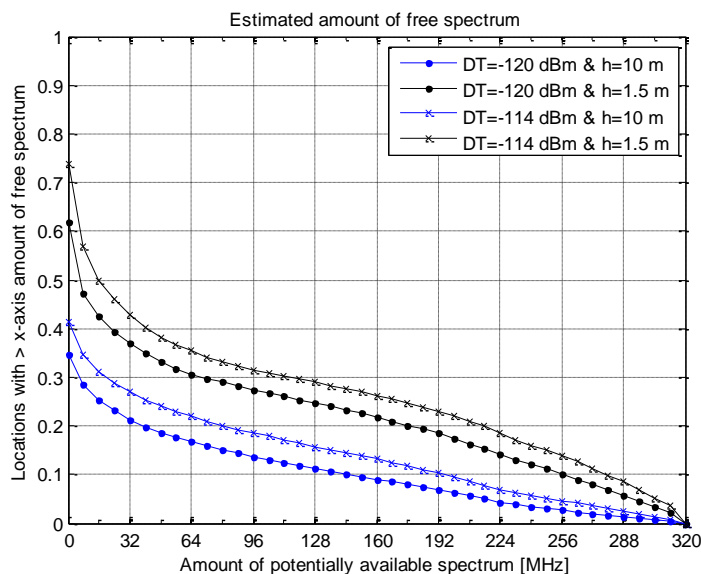


Figura 17 : CCDF da quantidade de *espaços vazios* por localização

Por exemplo, na Figura 17, para o $DT = -120$ dBm e $h = 1.5$ m a percentagem de se encontrar pelo menos um canal de 8 MHz disponível é 47.19%. Quanto o *detection threshold* aumenta para -114 dBm (e se mantém $h = 1.5$ m) essa percentagem sobe para 56.99% [17].

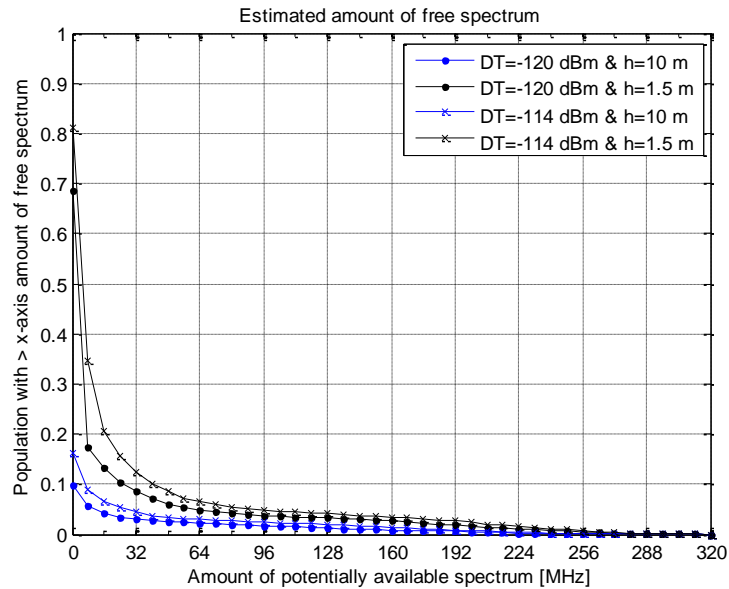


Figura 18 : CCDF da quantidade de espaços vazios por população

Os resultados da Figura 18 mostram que quase 20% nas regiões geográficas com mais de 64 MHz de espectro disponível com o $DT = -120$ dBm e $h = 10$ m, apenas 2% da população está realmente nestas áreas [17].

Podemos concluir que, na Figura 18, os valores de percentagem da população que têm um valor da largura de banda disponível superior ao valor do eixo do XX passa rapidamente para valores inferiores a 10% (com um declive acentuado). Na Figura 17, os valores da percentagem da localização têm, no entanto, uma declive mais gradual. Estes valores confirmam que as áreas onde há mais canais disponíveis são nas zonas com menos população.

Desafios técnicos para o acesso cognitivo ao TVWS na Europa

Este capítulo descreve algumas das questões desafiantes, que Rádios Cognitivos têm de enfrentar para a atribuição dos espaços vazios da TV. Estes desafios resultam das características nas bandas TVWS para os cenários de aplicação do LTE. Os desafios técnicos têm impacto directo do preço dos dispositivos e do potencial do mercado.

Mecanismos de detecção (*sensing*)

Os dispositivos de Rádios Cognitivos têm a necessidade de detectar sinais TDT ao nível do solo (1.5 m) com antenas de baixo ganho. A recepção TDT normalmente é planeada com base de

antenas de ganho elevado, com cerca de 10 m. A diferença de força de sinal entre as duas antenas é referida como a *hidden terminal margin* (*margem do terminal escondido*). Esta margem determina a sensibilidade da detecção e impõe um encargo adicional para os dispositivos com Rádios Cognitivos (*Cognitive Radio-CR*). Esta margem difere em configurações com aplicações diferentes, como se representa na Tabela 7.

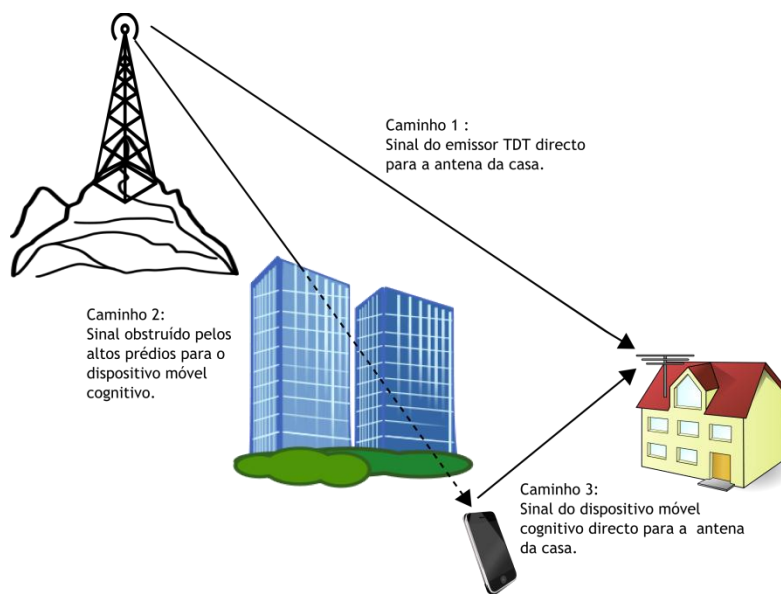


Figura 19 : O problema do terminal escondido

A Figura 19 ilustra os problemas do terminal escondido. Em casa, recebe-se um sinal TDT com uma antena direccional montada no telhado livre de edifícios circundantes (caminho 1). Perto existe um dispositivo móvel cognitivo que tenta detectar o mesmo sinal ao nível da rua, mas é bloqueado pelos edifícios circundantes (caminho 2), o dispositivo cognitivo pode erradamente concluir que não há transmissão. Portanto, não existem receptores activos de TDT nas proximidades, assim o terminal ao transmitir vai provocar interferências prejudiciais à antena que recebe o TDT (caminho 3). Uma situação similar pode ser prevista em relação a aplicações PMSE, incluindo microfones sem fios.

Tabela 7 : Margem do nó escondido para diferentes áreas [15]

Ambiente	Margem do nó escondido (dB) por % da localização		
	90%	95%	99%
Alta densidade Urbana	18.5	22.4	29.2
Urbano	28.1	30.2	32.5
Suburbano	30.5	31.4	32.9
Rural	14.9	15.6	16.6

A Tabela 8 apresenta um conjunto de níveis de sensibilidade que os dispositivos cognitivos devem assegurar para que interferências prejudiciais não ocorram e deve ser atingida em cenário real. Em particular, os dispositivos devem ser capazes de detectar a presença de sinais em canais adjacentes e ser também capaz de não utilizar os canais que estão ser ocupados. Eles também devem ser capazes de sentir adequadamente na presença de outros dispositivos cognitivos que usam canais próximos.

Tabela 8 : Parâmetros chave para a detecção [15]

Parâmetro Cognitivo	Valor
Sensibilidade assumindo para antena com 0 dBi	-120 dBm em um canal (TDT) de 8 MHz -126 dBm em um canal 200 kHz (microfones sem fios)
Potência de emissão	4 dBm (canal adjacentes) para 17 dBm
Controlo da potência de emissão	Exigido
Largura de Banda	Ilimitado
Performance <i>Out-of-band</i>	<-46 dBm
Tempo de intervalo para detecção (<i>sensing</i>)	<1 Segundo

Com estes níveis de sensibilidade e de margem, os dispositivos cognitivos terão de detectar uma transmissão com níveis de potência reduzidos, como também a presença de sinais em canais adjacentes e as variações do sinal que podem ocorrer. Esta é uma tarefa extremamente difícil e provavelmente vai exigir ao dispositivo cognitivo processos repetitivos de detecção, a fim de encontrar dispositivos que esteja abaixo do ruído branco. Assim, ainda falta muito trabalho de investigação, para permitir a detecção e definir o *threshold* do que é considerado ruído ou sinal; caso contrário, precisam de se considerar abordagens alternativas.

Base de dados de geolocalização

Uma alternativa para detecção (*sensing*) é ter disponível uma base de dados com as frequências que estão a ser usados por zonas geográficas, bem como as regras a ser aplicáveis (por exemplo a potência de emissão), apresentado na Figura 20. O dispositivo cognitivo também pode enviar as medidas de detecção e os parâmetros de vários dispositivos. Para usar a base de dados, o dispositivo cognitivo precisa de saber a sua própria localização. Tal conceito, também conhecido como conceito base de dados de geolocalização, poderia assim ajudar a superar a maioria dos problemas associados com a detecção (*sensing*).

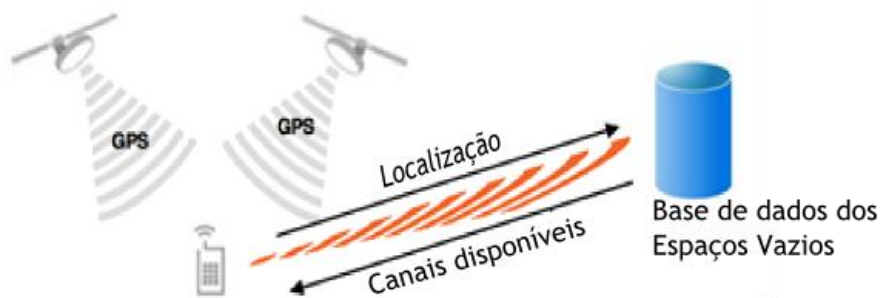


Figura 20 : Base de dados de geolocalização

Na discussão do documento [16], a OFCOM sugere que existem cinco questões chave a serem abordadas no desenvolvimento uma base de dados de geolocalização:

- A informação a ser fornecida pelo dispositivo à base de dados;
- As informações enviadas da base de dados para o dispositivo. Uma base de dados inteligente poderia enviar ao dispositivo cognitivo não apenas o espectro que podia usar, mas também as potências de transmissão que poderiam usar em cada canal, diminuindo a complexidade no lado do terminal;
- A frequência de actualização da base de dados e, portanto, a periodicidade com que os dispositivos terão de actualizar a base de dados;
- Os algoritmos de modelação e os parâmetros do dispositivo a serem utilizados para preencherem a base de dados;
- A manutenção da base de dados.

A Tabela 9 define os parâmetros chave para geolocalização que são recomendados pelos órgãos reguladores.

Tabela 9: Parâmetros chaves para a geolocalização [15]

Parâmetro Cognitivo	Valor
Localização actual	Nominalmente 100 metros
Potência de emissão	Conforme especificado pela base de dados
Controlo da potência de emissão	Exigido
Largura de Banda	Ilimitada
Desempenho <i>Out-of-band</i>	<-46 dBm

Contudo, as bases de dados para microfones sem fios não estão disponíveis em muitos países da UE. Além disso, a base de dados de geolocalização é improvável que seja actualizada com rapidez suficiente para todos os utilizadores PMSE (por exemplo, aplicações de jornalismo).

Sumário e Conclusões

Devido à eficiência de utilização do espectro do TDT e à atribuição de faixas de frequências de televisão por zonas geográficas, de modo a não causar interferência co-canal ou de canal adjacente as faixas de espectro são geograficamente intercaladas (*interleaving*). As bandas disponíveis e não utilizadas nas zonas geográficas do espectro intercalados proporcionam uma oportunidade para a implantação de novos serviços sem fios. Essas bandas disponíveis são chamadas espaços vazios da TV (TVWS). Este capítulo apresenta os principais resultados da estimativa da disponibilidade TVWS em três países europeus: Reino Unido, França e Itália. Os resultados mostram que os espaços vazios estão presentes e fragmentados, e que, normalmente, são mais abundantes nas zonas rurais, com maiores blocos contíguos de canais disponíveis não utilizados. Além disso, a coordenação da base de dados dos espaços vazios combinado com o *sensing* é uma técnica mais promissora, quando comparada com o espectro de *sensing-alone*.

Em Portugal, onde se utiliza uma rede de única frequência (*Single Frequency networks - SFN*), está previsto que os espaços vazios podem ser encontrados fora dos limites do SFN. Além disso, os requisitos de diferentes regiões e países significam que estas redes têm de ser particionadas lacunas adequadas entre os que utilizam a mesma frequência.

Mesmo com a introdução de novos serviços pelas empresas de radiodifusão, os TVWS não irão desaparecer. Esta persistência é devido ao planeamento do TDT ser inflexível na localização das torres de transmissão de alta potência das redes de distribuição de TV. Embora a implantação e despesas de operação podem ser inferiores, impõem um custo em termos de eficiência de espectro que pode ser usado como uma oportunidade para dispositivos TVWS.

Para definir o contexto em que as novas tecnologias como o LTE funcionam, é importante concentrarmo-nos em áreas com potencial utilização de TVWS (urbano, suburbano e rural), um dos focos no próximo capítulo.

Os desafios técnicos específicos enfrentados no cenário TVWS colocam questões relacionados com o problema do nó escondido, da protecção dos utilizadores primários, da fragmentação do TVWS e das variações espaço-temporais na disponibilidade de espectro. O objectivo do dimensionamento é atingir o QoS desejado num sistema de rádio cognitivo utilizando o LTE sobre TVWS, com a detecção e/ou utilização de uma base de dados da geolocalização dos utilizadores primários (que vai sendo actualizada ao longo do tempo), de forma a garantir a protecção para os operadores históricos.

Capítulo 4

LTE sobre TVWS

Introdução

Na *Release 8* do 3GPP, especifica-se a evolução da tecnologia HSPA para o LTE, cujo acesso rádio é denominado como *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN). O E-UTRAN utiliza *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e suporta *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) nas suas antenas, proporcionando maiores taxas de transmissão, melhorando a eficiência espectral e reduzindo latência. O LTE disponibiliza entre outras coisas a prestação de serviços de elevada qualidade para os utilizadores fixos e móveis, devido à sua largura de banda escalável e às utilizações de esquemas de modulação adaptativa.

Assim no suporte da interface de rádio E-UTRAN, o 3GPP definiu um novo núcleo de rede, a arquitectura *Evolved Packet Core* (EPC) - através do *System Architecture Evolution* (SAE). A combinação de LTE e SAE proporciona a visão 3GPP para o paradigma do 4G, uma arquitectura totalmente baseada em IP, oferecendo ritmos de transmissão de dados elevados, com suporte à mobilidade total.

A utilização de LTE na banda TVWS é visto como um desafio e uma solução rentável, as baixas frequências de operação significam antenas maiores, correspondendo também a elevadas áreas de cobertura. Isto significa que, por um lado, a mesma área pode ser coberta com menos BSs levando a custos reduzidos e, por outro lado, se a frequência é inferior o comprimento de onda é superior, levando a melhores características de propagação em cenários *indoor*. Neste sentido, o LTE mais TVWS pode trazer melhorias para maior cobertura nas áreas LTE, sem comprometer as receitas do operador. Possíveis casos de utilização serão descritos mais adiante.

As capacidades de tirar proveito de novas atribuições de espectro e na oportunidade das retribuições do espectro são duas áreas chave que irão permitir implementações do padrão LTE. Reforçar as capacidades na rede celular representa oportunidades de novas implantações, economias de escala e abertura de novos mercados que anteriormente eram inacessíveis.

A transição da televisão analógica para o TDT vai libertar grandes quantidades de espectro que potencialmente podem ser implementadas de banda larga móvel - o chamado dividendo digital (DD). Alguns países já confirmaram a disponibilidade da banda de 790-862 MHz (sujeito a processos de atribuição através de leilões, por exemplo), incluindo a Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Suécia, Portugal e Suíça. A Alemanha planeou um pacote de um leilão de espectro, incluindo 3 x 20 MHz de espectro DD em 2010.

Nos próximos anos, este cenário de desenvolvimento irá mudar significativamente o espectro (Figura 21). Os leilões de espectro que se aproxima nas frequências (700 MHz e 2.6 GHz) terão uma influência directa sobre o ecossistema do LTE, como os de qualquer banda onde o LTE possa vir ser implantado. Além disso, o *International Mobile Telecommunications (IMT)* identificou novas faixas (450-470 MHz, 698-862 MHz, 2300-2400 MHz e 3400-3600 MHz) para as comunicações móveis na *World Radiocommunication Conference 2007 (WRC-07)* de forma a ajudar a responder à necessidade de projectar a banda a ser implementada, bem como facilitar o *roaming* global.

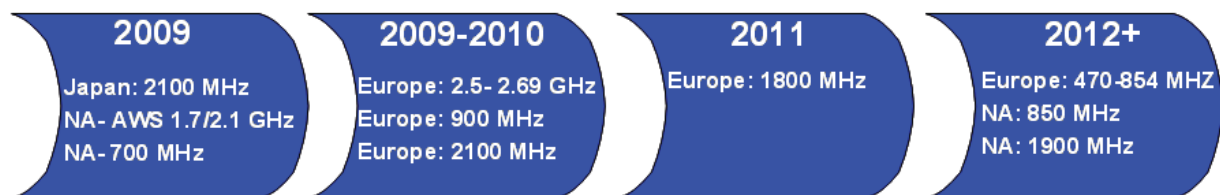


Figura 21 : Cenário de Desenvolvimento do LTE [18]

Uma característica importante da tecnologia LTE é a sua aptidão para utilizar uma largura de banda flexível, variando entre os 1.4 MHz a 20 MHz. Além disso, o 3GPP afirma que se pode operar em várias faixas de frequência em modo em emparelhado (FDD) e não em emparelhado (TDD). Em termos práticos, o desempenho real obtido com a LTE depende da largura de banda atribuída para os serviços, e não a escolha da banda do espectro em si. Este facto dá aos operadores uma flexibilidade considerável nas suas estratégias comerciais e tecnológicas. Desenvolvida em frequências mais altas, o LTE é atraente para as estratégias focadas na capacidade da rede, enquanto, em frequências mais baixas, pode fornecer uma cobertura superior e uma relação custo-benefício mais interessante.

A flexibilidade do LTE para operar numa largura de banda escalável também permite que as operadoras desenvolvam o LTE nas suas bandas já obtidas anteriormente. Os ganhos podem ser conseguidos através de reutilização da maior parte da cadeia de valor das telecomunicações móveis, uma opção mais eficiente em termos de custo, para responder ao aumento da procura em termos de tráfego.

Características do cenário e a viabilidade técnica

Terminal

O LTE, 2G/3G e WSD podem operar com o mesmo equipamento, mas este equipamento têm que estar em conformidade com um dispositivo WSD com capacidade cognitiva que permita minimizar a interferência com o DVB-T (ou TDT), o que deverá ser garantido através de um processo de certificação. Os desafios tecnológicos alvos de investigação incluem aspectos desde o nível do dispositivo até à arquitectura da rede. A natureza do espectro partilhado

levanta novos desafios técnicos para fornecer QoS e mobilidade do utilizador em aplicações exigentes. O objectivo no futuro será definir novas metodologias para certificação de equipamentos WSD que garantam a coexistência com o sistema DVB-T.

Área de cobertura

Os cenários de baixas frequências (inferiores a 1 GHz) são ideais para a cobertura rural (Figura 22) e para a cobertura de zonas urbanas com a penetração *indoor* (Figura 23). É dada particular importância para as áreas rurais, onde a implantação de sistemas móveis é feita para oferecer uma cobertura adequada. Assim, a redução no número de BS corresponde directamente a uma redução no custo dos serviços que o operador pode oferecer.

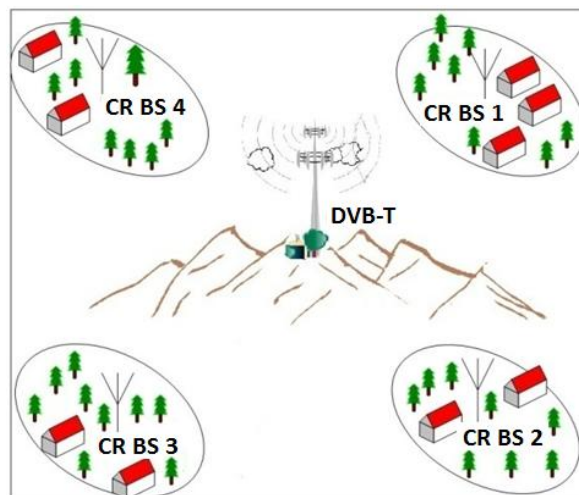


Figura 22 : Área de cobertura Rural

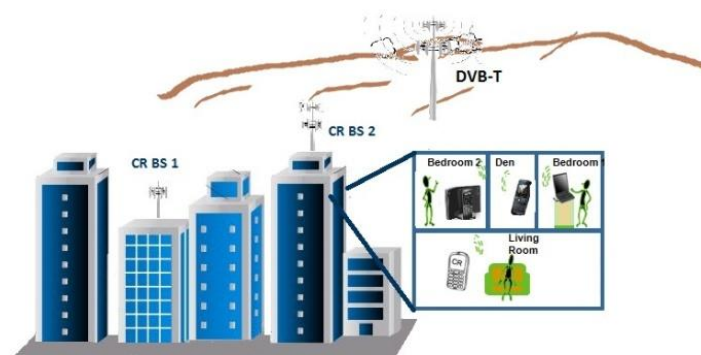


Figura 23 : Área de cobertura urbana (*indoor*)

Da mesma forma em áreas urbanas, onde as baixas frequências beneficiam da existência de refração em torno dos cantos. As ondas electromagnéticas podem assim atravessar mais facilmente as paredes, obtendo-se assim uma melhor cobertura *indoor*, com a possibilidade de se utilizarem dispositivos de telecomunicações em casa, sem a necessidade de uma antena externa.

As bandas de frequência de TVWS podem também ser utilizadas em situações de apoio para o tráfego de pico, isto é, situações de falta de capacidade. Assim poderá usar-se um esquema para a obtenção ou partilha de canais em regime temporário (de curto ou médio prazo) para proporcionar alívio nas redes sobrecarregadas.

Frequências de operação

A Figura 24 apresenta a relação entre as distâncias de cobertura típicas e a banda de frequências. Para a mesma potência de emissão e largura de banda, se a frequência utilizada é o dobro, a atenuação é quatro vezes superior e o número de BS que precisam ser instalados quase que duplica (dependendo do expoente de propagação). Como exemplo, pode-se afirmar que o número de BS necessário a 700 MHz ou 900 MHz (comparado com os 2.6 GHz) é reduzido em quase 65% (para a mesma taxa de transmissão e para a mesma distancia de cobertura).

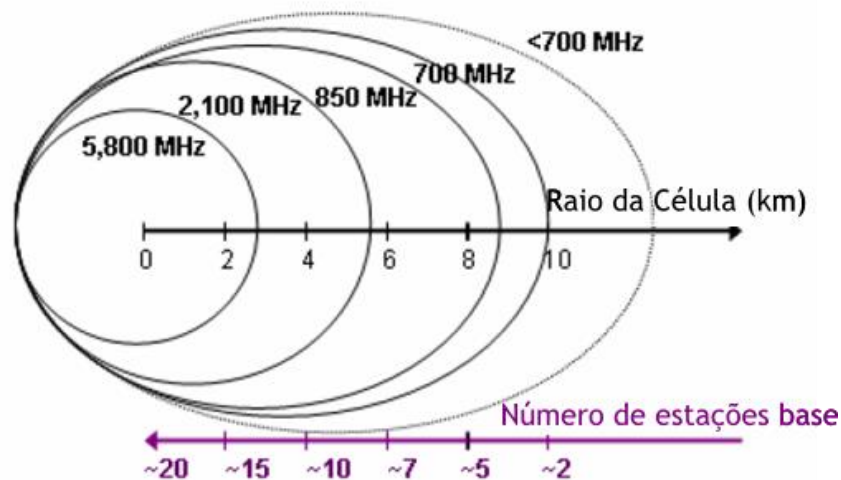


Figura 24 : As características de propagação das diversas bandas de frequência do espectro electromagnético [19]

As excelentes características de propagação da faixa de UHF da radiodifusão (470-790 MHz) permitem aos operadores móveis cobrir vastas áreas geográficas com menos BS e, portanto, com menor custo, permitindo-lhes oferecer serviços de banda larga móvel mais baratos e a um maior número de consumidores, especialmente nas áreas rurais. A Tabela 10 apresenta a variação do raio de célula com o número aproximado de BSs necessários para cobrir a área para a tecnologia UMTS e LTE. O anexo A apresenta os detalhes anunciados.

Tabela 10 : Raio das células versus número de BS necessárias

Tecnologia	Frequência	Raio da célula	Número de BS
UMTS	2.1 GHz	~6 km	~8
LTE	2.6 GHz	~5 km	~10
LTE	700 MHz	~10 km	~2

Se a área rural abrange uma área de 624 km² então, a 700 MHz, serão suficiente apenas 2 estações de base LTE para servir toda a região. No entanto, para LTE a 2.6 GHz, serão necessárias 10 estações base, enquanto para o UMTS a 2.1 GHz serão necessárias 8 estações base para cobrir a mesma área. A redução significativa no número de estações base necessárias para cobrir uma determinada área leva à redução dos custos de infra-estrutura (CAPEX) e dos custos manutenção (OPEX) do operador.

Este exemplo ilustra que, em frequências mais baixas, a cobertura de radioelétrica melhora. Por outro lado, devemos também levar em consideração que a capacidade da célula é suficiente para garantir que todos os utilizadores sejam servidos. No entanto, se optarmos por usar a mesma distância de cobertura (da frequência de 2.6 GHz) na frequência 700 MHz e se aplicarmos *Adaptive Modulation Coding* (AMC) é possível obter ritmos de transmissão mais elevados, pois utilizamos modulações de ordem superior, devido a existirem valores da relação sinal-ruído mais elevados a 700 MHz.

Além disso, a flexibilidade na escolha da largura de banda fornecida pelo LTE (1.4, 3, 5, 10, 15 a 20 MHz) é uma grande evolução, permitindo fornecer serviços de dados de alta qualidade (por exemplo, *streaming* de vídeo HD) ou serviços mais exigentes (por exemplo, serviços de tempo real). Através dum dimensionamento que considere a capacidade e a cobertura em conjunto, é possível esperar melhorias significativas da qualidade de serviço (QoS), se o LTE estiver a operar na banda TVWS. Estes melhoramentos permitem aumentar a capacidade de sistema e otimizar custos/proveitos.

A Figura 25 ilustra a importância da banda UHF na transmissão pelo LTE numa área urbana/suburbana. Uma aplicação prática deste conceito é a utilização da extensão do LTE sobre TVWS nas áreas periféricas das cidades, onde é possível obter um aumento na cobertura, sem perder QoS (mesmo com menos BS), porque o quociente entre número de utilizadores por BS não é muito elevado.

O factor-chave para o sucesso de um operador celular é a capacidade de satisfazer as expectativas dos assinantes, em termos de cobertura. Para além disso com o aumento do número de telefones móveis, o operador deve ser capaz de fornecer capacidade suficiente para fornecer os serviços solicitados, com o intuito de manter ou aumentar a sua posição no mercado.

Assim, é muito importante existir uma cobertura *indoor* adequada nas baixas frequências. A utilização de baixas frequências permite reduzir a potência de emissão das BS e, assim, reduzir a interferência inter-celular, crucial em cenários urbanos.

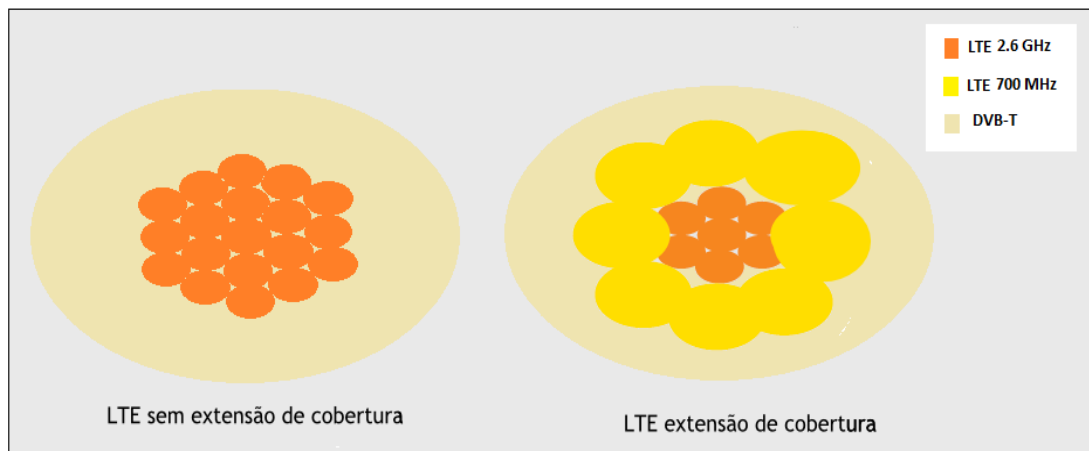


Figura 25 : Área de cobertura do LTE para diferentes frequências na periferia da área Urbana/suburbana

Existem uma série de desafios para uma utilização eficiente dos TVWS para uma extensão celular. Por exemplo, os TVWS disponíveis serão fragmentados, especialmente nas regiões metropolitanas. A disponibilidade de espaços vazios é temporal e depende da localização geográfica (problemas de mobilidade). Assim, um dos principais desafios no dimensionamento de Rádios Cognitivos móveis é a atribuição dinâmica de espaços vazios para diferentes rádios na rede. A eficiência da atribuição do espectro determina QoS das redes celulares, bem como a utilização do espectro. O *Secondary Spectrum Market* é adequado para garantir a QoS. Um aspecto interessante, que ainda não se explorou em trabalhos anteriores, e que é investigado nesta dissertação, é a avaliação do impacto da extensão com TVWS no planeamento global de redes celulares 3G e LTE.

Viabilidade técnica do LTE

De forma a se compreender como é que se podem proteger o sistema de DVB-T relativamente ao LTE a operar em frequências contíguas é importante comparar as duas tecnologias. O DVB-T utiliza o *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (COFDM) e o LTE utiliza o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), ambos com espalhamento (*spreading*) de portadoras ortogonais. A Tabela 11 apresenta as semelhanças e as diferenças entre as duas tecnologias. Com as características do DVB-T e LTE, podemos extrair algumas vantagens em usar o LTE sobre TVWS, por exemplo, o acesso ao meio utiliza uma tecnologia semelhante e LTE suporta a mesma frequência de DVB-T.

Tabela 11 : Comparação entre a transmissão DVB-T e LTE

Sistema	DVB-T	LTE
Frequência	Entre 470 e 790 MHz	Entre 450 MHz e 2.6 GHz
Intervalo	67 km	5 - 100 km com ligeira degradação após 30km
Largura de banda	8 MHz	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz
Máximo débito	5 até 31.7 Mbps	10 até 300 Mbps
Modulação	QPSK 16 QAM 64 QAM	QPSK 16 QAM 64 QAM

O LTE pode ser implantado facilmente e com ganhos significativos sobre as bandas TVWS, como se realça através das características do LTE a seguir apresentadas:

- Aumento do ritmo de transmissão de dados no *downlink* e *uplink*;
- Larguras de banda escaláveis de 1.4, 3, 5, 10, 15 a 20 MHz em *uplink* e *downlink*;
- Melhoria da eficiência espectral para *downlink* e *uplink*;
- Latência de 5 ms usando o protocolo de internet (IP);
- Optimização e um desempenho superior para velocidade baixa de 0-15 km/h, como também para 15-120 km/h continuando a ter um elevado desempenho;
- A rede è *all-IP*, ou seja, não existe a comutação de circuitos, e as chamadas de voz passam a ser VoIP;
- Possível escolha do espectro de frequências e a flexibilidade de desenvolver com as bandas de GSM, CDMA, UMTS (450, 700, 850, 900, 1700, 1800, 1900, 2100, 2500 MHz), isto significa que possível fazer *roaming* com todas as tecnologias;
- Cobertura celular só com a degradação de sinal a partir de 30 km.

Combinado com TVWS em bandas de baixa frequência e utilizando sistemas de antena avançados (*smart antennas*), as redes LTE irão fornecer aos prestadores de serviços uma melhoria significativa no custo por bit fornecido (devido ao aumento da eficiência espectral, à maior flexibilidade de utilização de recursos e à existência de uma arquitectura de rede simples).

Requisitos Específicos das Estações de Base

A potência de saída (P_{out}) da BS é a potência média de uma portadora entregue à carga com resistência igual à impedância de carga nominal do transmissor. A potência máxima de saída da estação de base (P_{max}), é o nível de potência médio por portadora medida aos terminais da antena durante o período emissão, numa condição especificada de referência. O *Rated output*

power (PRAT) da estação base é o nível de potência média por portadora que o fabricante declara estar disponível aos terminais da antena durante o período de emissão. A Tabela 12 apresenta a potência nominal (PRAT) das estações de base do LTE.

Tabela 12 : PRAT das estações de base do LTE

Classes da estação base	<i>Rated output power</i>
Áreas grandes	(Nota)
Áreas médias	$\leq + 24$ dBm (uma antena de emissão) $\leq + 21$ dBm (duas antenas de emissão) $\leq + 18$ dBm (quatro antenas de emissão)
Áreas pequenas	$\leq + 20$ dBm (uma antena de emissão) $\leq + 17$ dBm (duas antenas de emissão) $\leq + 14$ dBm (quatro antenas de emissão)
Nota: Não há limite superior para a potência nominal de saída da Estação de Base para grandes áreas.	

No *Resource Element* (RE) o controlo potência dinâmico é feita a partir da diferença entre a potência de um RE e a potência média do um RE para a estação base com a potência máxima de saída para uma condição de referência especificada. Os requisitos mínimos para o controlo potência dinâmico do RE apresentam-se na Tabela 13 [35].

Tabela 13 : Intervalo do controlo dinâmico da potência (dB) do RE

Esquema de modulação usada no RE	Intervalo (dB)	
	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
QPSK (PDCCH)	-6	+4
QPSK (PDSCH)	-6	+3
16 QAM (PDSCH)	-3	+3
64 QAM (PDSCH)	0	0
Nota: Potência total (TX) é sempre menor ou igual que a potência máxima da BS.		

Requisitos Específicos do Terminal

As classes de potência nominal do terminal (UE) definem a da potência máxima de saída. A Tabela 14 apresenta as classes de potência do terminal sobre as bandas LTE possíveis para TVWS [35].

Tabela 14 : Classes de Potência dos terminais (UE) de LTE

Banda de operação	Classe de potência 3	
	Potencia (dBm)	Tolerância (dB)
Banda XII	23	+2/-2
Banda XIII	23	+2/-2
Banda XIV	23	+2/-2
Banda XVII	23	+2/-2

A potência de saída mínima é definida como a potência média em cada *sub-frame* (1ms). A potência de saída mínima não deve exceder os valores especificados na Tabela 15.

Tabela 15 : Potência de saída mínima dos terminais (UE) do LTE

	Largura de banda / Potência de saída mínima / Tamanho da largura de banda					
	1.4 MHz	3.0 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Potência de saída mínima	-40 dBm					
Tamanho da largura de banda	1.08 MHz	2.7 MHz	4.5 MHz	9.0 MHz	13.5 MHz	18 MHz

Portadora de Transporte do LTE

Existe no 3GPP um grande número de bandas de frequências ou espectro de rádio que foi reservado para LTE sobre as bandas de TV. A Tabela 16 apresenta as bandas de operação E-UTRA [35]. A escolha dessas bandas no contexto no TVWS varia de país para país, porque cada país da Europa tem a sua escolha de canais para a TDT e também a opção de usar a *Single Frequency Network (SFN)* ou *Multiple Frequency Network (MFN)*.

Além disso, um dos principais parâmetros associados com o uso da LTE é a escolha da largura de banda. A largura de banda disponível influencia uma variedade de decisões, incluindo o número de portadoras que podem ser acomodados no sinal OFDM e por sua vez elementos de influências, incluindo o comprimento do símbolo, e assim por diante. LTE define um número de larguras de banda do canal, obviamente, quanto maior a largura de banda, maior a capacidade do canal.

No entanto, deve-se ter o cuidado de não ocupar as sub-portadoras DVB-T nas bandas adjacentes. Na Tabela 17 apresenta-se a largura disponível para cada banda de frequência.

Tabela 16 : Bandas de operação em E-UTRA

Banda de operação do E-UTRA	Banda de operação do <i>Uplink</i> da estação base e do terminal	Banda de operação do <i>Downlink</i> da estação base e do terminal	Modo Duplex
	$F_{UL_low} - F_{UL_high}$	$F_{DL_low} - F_{DL_high}$	
Banda XII	698 MHz - 716 MHz	728 MHz - 746 MHz	FDD
Banda XIII	777 MHz - 787 MHz	746 MHz - 756 MHz	FDD
Banda XIV	788 MHz - 798 MHz	758 MHz - 768 MHz	FDD
Banda XVII	704 MHz - 716 MHz	734 MHz - 746 MHz	FDD

Tabela 17 : Largura de banda no E-UTRA

Banda E-UTRA - Canal de largura de banda						
Banda E-UTRA	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Banda XII	Sim	Sim	Sim	Sim		
Banda XIII			Sim	Sim		
Banda XIV			Sim	Sim		
Banda XVII			Sim	Sim		

Na Tabela 17, observa-se que a utilização de banda XII tem vantagens adicionais quando comparada com a das outras bandas, devido a ter uma maior flexibilidade. Essa flexibilidade é conseguida devida à existência de três valores para a largura de banda possível (1.4, 3 e 5 MHz) na portadora (8 MHz) em DVB-T. No caso das outras bandas só é possível utilizar a largura de banda de 5 MHz. Isto significa que, nas restantes bandas, apenas pode ser colocado um canal LTE. No entanto, por exemplo, se o mecanismo da procura de espectro livre (TVWS) detectar dois canais de TDT juntos, podem-se atribuir larguras de banda de 10 MHz.

Emissão fora de banda no LTE

A máscara de emissão do espectro do UE aplica-se às frequências (Δf_{OOB}), no valor superior e inferior da fronteira da largura de banda atribuída no canal E-UTRA. A potência de emissão no UE não deve exceder os níveis fixados na Tabela 18 para a largura de banda do canal especificado [35].

Tabela 18 : Máscara de emissão do espectro do E-UTRA

Limite de emissão (dBm) do espectro / Canal de largura de Banda							
Δf_{OOB} (MHz)	1.4 MHz	3.0 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Largura de Banda
$\pm 0-1$	-10	-13	-15	-18	-20	-21	30 KHz
$\pm 1-2.5$	-10	-10	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 2.5-2.8$	-25	-10	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 2.8-5$		-10	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 5-6$		-25	-13	-13	-13	-13	1 MHz
$\pm 6-10$			-25	-13	-13	-13	1 MHz
$\pm 10-15$				-25	-13	-13	1 MHz
$\pm 15-20$					-25	-13	1 MHz
$\pm 20-25$						-25	1 MHz

O *Electronic Communications Committee* (ECC) adoptou, em [36], a decisão que define a exigência de requisitos mínimos *Out-of-block* da *Block Edge Mask* (BEM) para as redes de comunicação móvel/fixo (*Mobile/Fixed Communication Networks - MFCN*). Nas estações de base dentro do espectro reservado à radiodifusão de serviços (TDT), existem três maneiras diferentes (A, B e C) para proteger os canais de transmissão de TDT. As protecções podem ser aplicadas para um canal e/ou para uma região, ou seja, para o mesmo canal com diferentes protecções a ser aplicados em diferentes áreas geográficas (área relacionada à cobertura TDT). Podem-se aplicar diversas protecções a diferentes canais na mesma área geográfica.

A Tabela 19 apresenta os requisitos *out-of-block BEM* com base nos requerimentos para as BS-MFCN dentro do espectro atribuído ao serviço de transmissão (TDT). A exigência de regulamentação limita o nível de *Equivalent Isotropic Radiated Power* (EIRP) para o nível máximo de protecção, caso definidos no regulamento [36].

Tabela 19 : Limite do EIRP para a protecção do TDT

Caso	Intervalo de frequências do <i>out-of-block emissions</i>	Potência (P) em dBm da estação base	Media máxima do out-of-block do EIRP	Largura de banda
A	Para as frequências TDT em que radiodifusão é protegida	$P \geq 59$	0 dBm	8 MHz
		$36 \leq P < 59$	(P-59) dBm	8 MHz
		$P < 36$	-23 dBm	8 MHz
B	Para as frequências TDT em que transmissão está sujeito a um nível intermédio de protecção	$P \geq 59$	10 dBm	8 MHz
		$36 \leq P < 59$	(P-49) dBm	8 MHz
		$P < 36$	-13 dBm	8 MHz
C	Para as frequências TDT em que a radiodifusão não é protegida	Sem condições	22 dBm	8 MHz

Mercado Potencial

O mundo está a tornar-se cada vez mais móvel, impulsionando a procura por um acesso mais fácil aos conteúdos e serviços a partir de qualquer parte, com qualquer dispositivo, em qualquer momento. Assinatura de banda larga deve chegar a 1.8 mil milhões até 2012 (Figura 26), e cerca de dois terços dos consumidores vão usar a banda larga móvel. O Tráfego de dados móveis deve ultrapassar o tráfego de voz em 2011, que vai colocar hoje e no futuro exigências elevadas nas redes móveis.

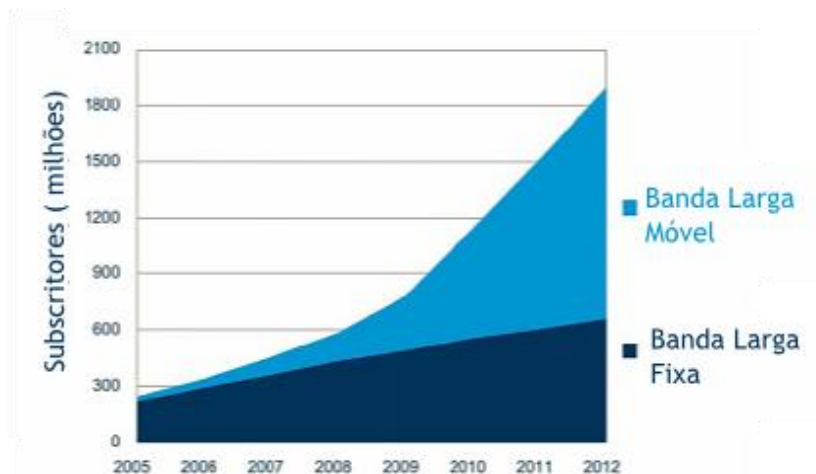


Figura 26 : Crescimento da banda larga de 2005 - 2012 [20]

Para aliviar a forte procura de espectro existe a oportunidade de utilização dos recursos disponíveis libertados pelas bandas de TV (TVWS) usando a tecnologia LTE. Com LTE permite

maior capacidade e menor custos de utilização do espectro, devido ao aumento da sua eficiência espectral. Assim, os operadores podem oferecer mais serviços aos seus clientes com menos espectro e com uma viabilidade económica aceitável.

Os seguintes países europeus já tomaram algumas medidas para o uso da banda larga nas faixas que antes eram ocupadas pela televisão analógica:

- Portugal, Dinamarca, Finlândia, França, Noruega, Alemanha, Suécia e Suíça confirmaram que irão atribuir 790-862 MHz para serviços móveis de banda larga;
- O Governo britânico propõe a entrega de algum espectro do dividendo digital para os Operadores 3G, assim receberão um aumento das suas licenças 3G, no entanto serão obrigados a aumentar a sua cobertura para 80% da população;
- Na Alemanha, em alguns locais de Mecklenburg-Vorpommern estão a ser realizados testes de utilização nas frequências do dividendo digital para fornecer serviços de HSPA e LTE para as comunidades onde não tem banda larga;
- Na Itália, o sub-secretário das Comunicações, anunciou que as frequências desocupadas durante o fim das transmissões analógicas serão leiloadas;
- Em Espanha, o Ministério da Indústria emitiu recentemente um comunicado à imprensa, indicando que o espectro do dividendo digital provavelmente seria reservado para o 3G, especialmente para a internet de banda larga móvel a partir de Janeiro de 2015.

Segundo a *Global Mobile Suppliers Association (GSA)*, 180 operadores de 70 países comprometeram-se a implantar 3GPP *Long Term Evolution (LTE)*, e existem 52 operadores com pré-acordo (Figura 27).

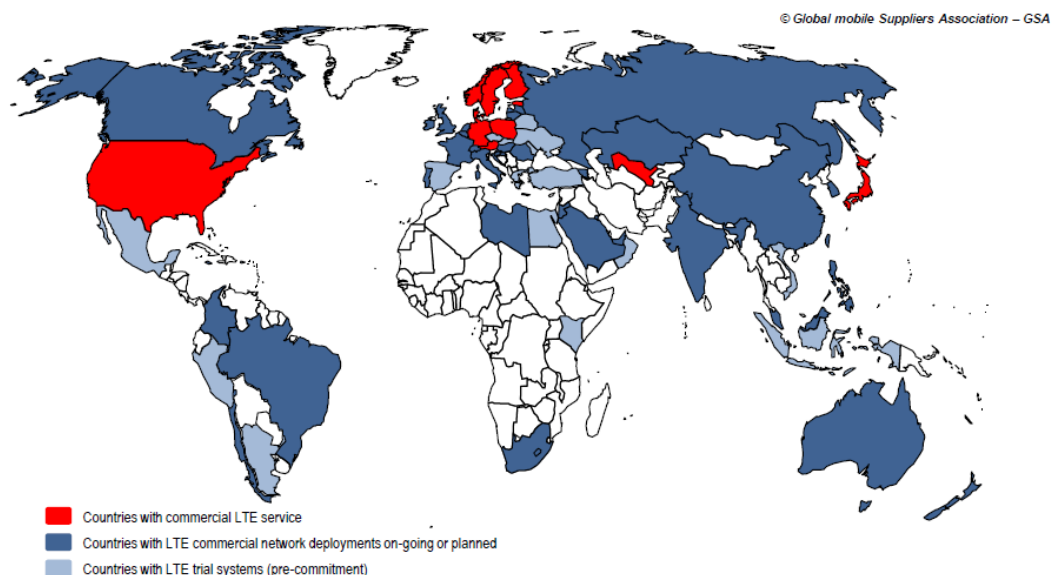


Figura 27 : Situação mundial do LTE [21]

Em 2010, sete operadores europeus lançaram os serviços comerciais LTE. A Nokia, um dos maiores fabricantes do mundo de telemóveis, comprometeu-se que LTE seria a sua rede preferida para dispositivos e lançou já dispositivos móveis com LTE.

O LTE é totalmente apoiado e reconhecido pelo *International Telecommunication Union* (ITU), permitindo assim o *roaming* global com as redes GSM e UMTS. Assim, os terminais LTE são compatíveis com as redes GSM e UMTS na fase inicial de implementação, o que traduz que os utilizadores serão capazes de andar por todo o mundo independentemente do país em que estão com o mesmo equipamento. Hoje em dia, existem mais de 85% dos utilizadores nas redes 3GPP a nível mundial, e é de esperar que com a introdução LTE, esse valor aumente e que o preço dos equipamentos diminua para valores semelhantes aos das tecnologias tradicionais, beneficiando do aumento da procura de equipamentos nos mercados desenvolvidos e emergentes. No entanto, o aumento do número de utilizadores pode originar falta de capacidade (saturação) das estações de base, enquanto que a utilização de frequências mais elevadas pode originar dificuldades de cobertura na fronteira das células. Assim, a utilização da TVWS pode possibilitar que os operadores possam continuar a disponibilizar os mesmos serviços, ou mesmo aumentar a oferta para novos serviços, tal como descrito nos próximos capítulos.

Aumento de capacidade através da TVWS

Pode-se fazer uma breve descrição dum caso de utilização com restrições de capacidade. Por exemplo, na cidade de Aveiro organiza-se todos os anos, no primeiro domingo de Maio, o festival de musical. Neste festival os concertos musicais incluem diferentes tipos de música e organizam-se por toda a cidade. Quando os TVWS estiverem disponíveis as autoridades locais juntamente com um operador telecomunicações, introduzirão uma novidade: todos os concertos são transmitidos por *streaming* de vídeo. A “Maria” que caminha pela cidade de Aveiro com intuito de ir a um dos concertos não sabia de qual deles gostava mais. Com o conhecimento da oferta do seu operador, a cliente “Maria” tentará aceder ao serviço de *streaming* de vídeo para escolher a qual concerto iria. Assim, com seu terminal 3G (cognitivo), ela acederá ao serviço do operador, mas se naquele preciso momento todas as estações de base estiverem “sem capacidade” e o serviço não pudera ser prestado normalmente. Essa capacidade varia de acordo com os parâmetros da célula em cada momento. E são vários factores que influenciam a capacidade total da célula: o número de utilizadores activos na célula, a sua velocidade, o tipo de tráfego e os níveis de interferência na célula. Com base nestes factores, é possível estimar a capacidade da célula e decidir se os novos utilizadores podem ou não ser aceites. Felizmente, nessa área, a banda de TVWS está disponível (informação confirmada pelo operador com as coordenadas GPS enviadas pelo terminal). Assim, quando o serviço é solicitado e as situações de congestionamentos são detectadas nas bandas Legacy, o operador de telecomunicações solicita ao Broker espectro livre (TVWS). Quando o broker disponibiliza o espectro livre (ou seja, bandas que não são utilizados pelos operadores históricos), o operador admite a cliente “Maria” e é estabelecida

a ligação utilizando o espectro TVWS. Com este exemplo, verificamos a importância na utilização das bandas de TVWS. Além disso, as exigências das aplicações que são utilizadas pelos utilizadores, fazem aumentar o tráfego e influenciam fortemente a capacidade de uma rede móvel, um desafio para as operadoras.

O projecto COGEU propõe a utilização de TVWS para resolver este problema, disponibilizando aos operadores de telecomunicações recursos adicionais de rádio que podem ser utilizados nas seguintes situações:

- Na situação de falta de capacidade ou de saturação da rede, é detectada quando novos utilizadores tentam aceder a recursos. Nesta situação, o operador pode usar o espectro secundário na banda de TV para acomodar os novos utilizadores;
- Na situação em que os utilizadores já estão admitidos na célula mas, devido à velocidade de cada utilizador, a interferência pode aumentar e atinge um estado onde as comunicações não sejam possíveis. Neste caso, a solução pode ser a migração de alguns utilizadores para a TVWS, para garantir o funcionamento adequado do sistema.

Assim, os utilizadores que são transferidos para as bandas de TV (TVWS) têm a oportunidade de obter recursos de telecomunicações e, também, aqueles que não foram migrados, beneficiarem do aumento de recursos disponíveis nas estações base *Legacy*.

Aumento de cobertura com TVWS

Para descrever um caso de aumento de cobertura, podemos considerar um operador móvel (TMN) por exemplo, que vai começar implantar a rede de LTE. Como de costume, inicialmente a nova tecnologia irá estar disponível nas cidades principais: Lisboa, Porto, Cascais, Coimbra, Braga e Aveiro, correspondendo a quase 80% dos utilizadores. A implantação de novas infra-estruturas será feita instalando o equipamento rádio nas estações de base existentes das redes UMTS e GSM, a fim de minimizar os custos. A frequência de operação é de 2.6 GHz, superior à utilizada neste momento pelas redes GSM e UMTS. A operação nesta frequência pode comprometer o desempenho do LTE, na medida em que existem limitações de cobertura, especialmente na fronteira das células, devido a se utilizar em frequências mais altas.

No GSM\UMTS, o planeamento de rede e a localização das BS não oferecem uma cobertura adequada para o uso LTE em frequências mais altas. Assim o operador pode adoptar a solução de usar o TVWS em conjunto com o LTE para ultrapassar estas dificuldades sem os custos adicionais para a implantação de novas BS. Mantendo as mesmas estações de base, o custo do desenvolvimento da nova rede será menor (CAPEX inferior), assim como o custo de manutenção (OPEX inferior). Normalmente os locais onde são instaladas as estações de base não são da propriedade do operador da rede o que envolve o pagamento de rendas que representam 30-40% dos custos.

Utilização por cenário

Áreas Urbanas

Em áreas urbanas, a penetração do sinal de rádio no interior é difícil, especialmente agora com os novos equipamentos, como “*Tablet 3G*”, onde se pretende levar para dentro dos edifícios o acesso sem fios em banda larga. O LTE em TVWS pode fornecer muito boa cobertura *indoor*, devido a essas frequências terem uma penetração mais eficiente nos edifícios. As frequências mais baixas são assim adequadas para este tipo de ambiente. Os serviços de TVWS por LTE poderiam ser fornecidos por dois meios o *spectrum commons* e o *spectrum secondary market*, dependendo do QoS que o utilizador quer. Por exemplo: para acesso à internet pode-se utilizar o *spectrum commons*, o espectro será livre. No entanto para serviços em tempo real, como voz ou vídeo, o *spectrum commons* não disponibiliza QoS, necessária. Portanto, terá que ser utilizado o *spectrum secondary market*, a fim de se garantir a qualidade do serviço.

Áreas Suburbanas

As áreas suburbanas têm as mesmas características das áreas urbanas.

Áreas Rurais

Como explicado anteriormente, para a garantia da mesma área de cobertura, para a mesma potência de emissão e largura de banda, se a frequência utilizada é o dobro, a atenuação é quatro vezes superior e o número de BS que precisam ser instalados quase que duplica. Por outras palavras, o número de estações base necessárias para as frequências 700 MHz ou 900 MHz, em comparação com a banda 2.6 GHz, é reduzida em quase 65% para a mesma taxa de transmissão de dados e para a mesma cobertura. Em áreas rurais, onde a densidade de utilizadores é baixa, a estação base necessita fundamentalmente de disponibilizar uma cobertura adequada. Através da utilização das bandas TVWS é possível reduzir o número de estações de base e ainda fornecer valores similares para o débito (ou mesmo superiores), o que é muito importante para o operador de rede, permitindo a redução do CAPEX e do OPEX e oferecer melhores serviços ao utilizador.

Pode-se concluir que o LTE, em conjunto com os TVWS poderá disponibilizar acesso a banda larga móvel nas áreas rurais e remotas, com o desempenho comparável às tecnologias actuais de acesso fixo (por exemplo, o ADSL).

Sumários e Conclusões

A disponibilidade de novo espectro, particularmente em bandas do dividendo digital, é um factor crucial para o desenvolvimento do LTE em muitos países, em função das condições regulamentares, e vai determinar directamente as datas da implantação e lançamento nos mercados. Há também agora o grande interesse na oportunidade de desenvolver redes móveis

nas frequências do espectro libertado pelo *refarming*, isto é, na banda GSM 900 MHz, este interesse pelos reguladores na Europa vai permitir que os serviços de banda larga móvel sejam suportados por outras tecnologias, como o LTE. Há grandes expectativas na Europa e noutras zonas do globo, ao acesso adicional nas bandas do dividendo digital (bandas UHF), para possibilitar que o LTE seja desenvolvido globalmente, de forma eficiente nas grandes áreas geográficas rurais, melhorando-se a cobertura, e garantindo o aumento do tráfego suportado em áreas urbanas e suburbanas.

Apesar dos benefícios da utilização das bandas TVWS no contexto do (por exemplo, na cobertura de rádio e aumento da capacidade) não há restrições impostas pelo *Service Level Agreement* (SLA) entre a rede de operadores/fornecedores de serviços e o utilizador acerca do QoS mínimo que deve ser fornecido. Neste sentido, a gestão do espectro deve garantir a exclusividade do uso do espectro e limitar o nível de interferência, de forma garantir o nível de QoS a ser fornecido ao utilizador. Neste contexto, o mercado *spectrum secondary market* proposto é um regime adequado para garantir a QoS.

A rede LTE pode ser desenvolvida nas larguras de banda 1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz, que oferecem flexibilidade no desenvolvimento do LTE sobre TVWS. O LTE, em princípio, será implantado em Portugal este ano nas frequências mais altas (2.6 GHz), usando principalmente a infra-estrutura do UMTS, a fim de reduzir custos (até que seja possível o *refarming* das bandas GSM e UMTS). Desenvolvendo das células LTE na infra-estrutura UMTS poderá verificar-se que o LTE (Tabela 10) mesmo com taxa de transferência muito mais elevadas do que o UMTS na *Release 99*, mesmo HSDPA+, pode não ser o suficiente devido a perda de cobertura nas frequências superiores. Tais circunstâncias podem significar que o LTE possa ser muito decepcionante, especialmente em cenários *indoor*. Assim, a extensão LTE sobre TVWS deve ser realmente considerada.

A extensão LTE sobre TVWS também deve levar em consideração as características específicas da rádio LTE, particularmente quando se refere à faixa de emissão fora de banda (*out of band*), terminal do utilizador e as características da BS a fim de evitar interferência com os operadores incumbentes. O oposto também é verdadeiro: a atribuição de TVWS para os serviços LTE deve também levar em consideração a interferência dos operadores incumbentes e em particular nas emissões fora de banda.

Capítulo 5

Simulador de LTE com partilha eficiente de TVWS

Introdução

O simulador de LTE representa o comportamento de rádio do LTE, principalmente, no que diz respeito à cobertura de rádio e de capacidade da rede e as suas estatísticas associadas (por exemplo, a probabilidade de bloqueio de sessão (CBR) e a probabilidade de cobertura), com base na definição dum cenário. O ponto de partida é então a definição do cenário de simulação: características da estação base, as estações móveis, as redes e ambientes. Em cada cenário, os dados de entrada do simulador agrupam-se nas seguintes categorias:

- **Estação Base** - o número de sectores, diagrama de radiação da antena, a altura da antena, o ganho da antena, a potência de emissão, o *scheduling* (escalonamento de pacotes) do *uplink* e *downlink*, largura de banda e a frequência.
- **Estação Móvel** - o diagrama de radiação da antena, a altura da antena, o ganho da antena, as potências de emissão e os ritmos de transmissão do *uplink* e *downlink*.
- **Meio Ambiente** - modelo de propagação em cenário urbano, suburbano e rural.

A inovação principal deste trabalho contempla na utilização de algoritmos de partilha eficazes dos espaços vazios da TV (TVWS) no contexto de LTE através de técnicas baseadas em Rádios Cognitivos.

Este capítulo aborda a descrição e as suas funcionalidades do simulador de LTE. Apresentam-se uma breve descrição nos dois algoritmos na atribuição dinâmica dos TVWS usados do simulador de LTE.

Contextualização

As ferramentas para *Radio Network Planning* (RNP) têm um papel importante no trabalho diário dos operadores de rede. Quando os requisitos de negócios para a procura de serviços são especificados com base nos planos de negócios, a tarefa dos engenheiros de planeamento de rádio e de rede será cumprir os critérios de investimento com a aplicação reduzida de capital. Geralmente, os parâmetros de entrada incluem requisitos relativos à qualidade da capacidade de sistema e aspectos de cobertura.

A maioria das redes 2G existentes só oferece serviços de voz e de mensagens curtas (SMS). Em redes 3G, existem vários tipos de serviço (voz, dados e multimédia) diferentes, cada um deles

correspondendo a necessidades de utilização diferentes. Assim, as ferramentas de planeamento da rede móvel 3G desempenham um papel ainda mais importante nas fases de planeamento e execução do que no caso das redes 2G. É necessário encontrar um equilíbrio óptimo entre a capacidade, qualidade e critérios de cobertura para todos os serviços do portfólio do operador. Normalmente, uma ferramenta única, por si só, não pode suportar todas as fases do processo de planeamento. Em vez disso, uma parte da ferramenta é dedicada ao dimensionamento, outra ao planeamento da rede, e uma terceira à optimização. No futuro, em aplicações modernas, todas as ferramentas necessárias serão perfeitamente integradas num único pacote. Se esta integração for feita correctamente, o engenheiro de planeamento de rádio tem o total conhecimento de todos os aspectos de desenvolvimento e optimização através de várias ferramentas [30]. Existem várias ferramentas LTE-RNP profissionais disponíveis no mercado que oferecem aos operadores móveis todas as características necessárias para o planeamento e optimização das redes de rádio. Essas ferramentas suportam milhares de estações base, uma parameterização muito detalhada de cada elemento da rede, cartas, modelos de propagação pré-definidos, etc. No entanto, e apesar das suas possibilidades de configuração extensa, elas são projectadas em sistemas normalizados e "fechados", não permitindo modificações. Portanto, não são adequadas para actividades de investigação. Assim, nesta dissertação, foi desenvolvido um simulador de LTE em MATLAB™ que modela os aspectos rádio em detalhe e os de capacidade de forma simplificada. Utilizou-se a ferramenta (GUI) para apoiar o desenvolvimento da interface gráfica do utilizador e uma linguagem orientada a objectos de *script* fornecida pelo MATLAB™. Este simulador inclui a inovação de apresentar a aplicação de algoritmos para a atribuição dinâmica dos espaços vazios de TV através da utilização de conceitos de Rádios Cognitivos.

Descrição do Funcionamento

O simulador de LTE é desenvolvido em Matlab™, em linguagem orientado para objectos. É importante apresentar os seguintes conceitos para descrever as diferentes classes na programação orientada por objectos e conceitos relacionados:

- Classe - Descrição do que é comum a todas as instâncias de uma classe;
- Propriedades - O armazenamento de dados para instâncias de classe;
- Métodos - As funções especiais que implementam as operações que normalmente são realizados apenas em instâncias da classe;
- Eventos - As mensagens que são definidos por classes e transmitido por instâncias de classe, quando ocorre alguma acção específica;
- Atributos - Valores que modificam o comportamento das propriedades, métodos, eventos e classes;
- Ouvintes (*Listeners*) - Objectos que responde a um evento específico, executando uma função de *callback* quando o aviso de evento é transmitido;

- Objectos - Instâncias de classes, que contêm valores de dados reais armazenados nas propriedades dos objectos;
- Subclasses - As classes que são derivadas de outras classes e que herdam os métodos, propriedades e eventos das classes (as subclasses facilitam a reutilização de código definido na super-classe a partir da qual são derivados);
- Super-classes - As classes que são usadas como base para a criação de classes mais especificamente definidas (ou seja, subclasses);
- Pacotes - Pastas que define um contexto para a classe e função nomeada.

Assim uma classe descreve um conjunto de objectos com características comuns. Objectos são instâncias específicas de uma classe. Os valores contidos nas propriedades de um objecto são os que tornam um objecto diferente de outros objectos da mesma classe. As funções definidas pela classe (chamados de métodos) são o objecto implementar comportamentos que são comuns a todos os objectos de uma classe.

No MATLAB™ as classes são definidas em blocos de código, com sub-blocos de delinear as definições de vários membros da classe. O código a seguir define a estrutura da classe:

```
classdef classname
    properties
        PropName
    end
    methods
        methodName
    end
    events
        EventName
    end
    enumeration
        EnumName (arg)
    end
end
```

Para uma melhor apresentação do simulador de LTE na relação entre as várias classes, o Anexo B apresenta o *Unified Modeling Language* (UML), uma linguagem que auxilia a visualizar do desenho e a comunicação entre os objectos. Com o UML é possível visualizar as classes usadas, bem como as propriedades e métodos usados no simulador de LTE.

Contudo, a Figura 28 apresenta a estrutura simplificada do simulador de LTE, que incluem as seguintes classes; GUI, BS, MS, RRM e *Results*. Assim, a seguir é feita a uma descrição de cada uma das classes de forma a compreender o funcionamento do simulador LTE.

A classe GUI apresenta todas as visualizações obtidas no simulador LTE a seguir referidas:

- **Menus:** Visualização do "*Display users*", "*Propagation Model*", "*Coverage*", "*Results*", "*Exit*", etc;
- **Janelas:** Visualização do "*SNIR*", "*All User*", "*User served*", "*not served user*", "*Link Losses*", "*Throughput*", "*BS Capacity*", etc;

- **Parâmetros:** Visualização dos parâmetros usados na simulação e a posição em que se encontra o simulador de LTE;
- **Carta:** representação do local onde as estações base e terminais são colocados. De dimensão $xSize$ e $ySize$, com o valor da escala (*scale*);
- **Formato da Carta:** matriz com $xSize$ pontos no eixo horizontal e $ySize$ pontos no eixo vertical;
- **Referência do mapa:** o ponto de referência do mapa é o seu centro. As coordenadas do centro são calculadas de seguinte forma:

$$xCenter = round\left(\frac{xSize}{2}\right); \quad yCenter = round\left(\frac{ySize}{2}\right)$$

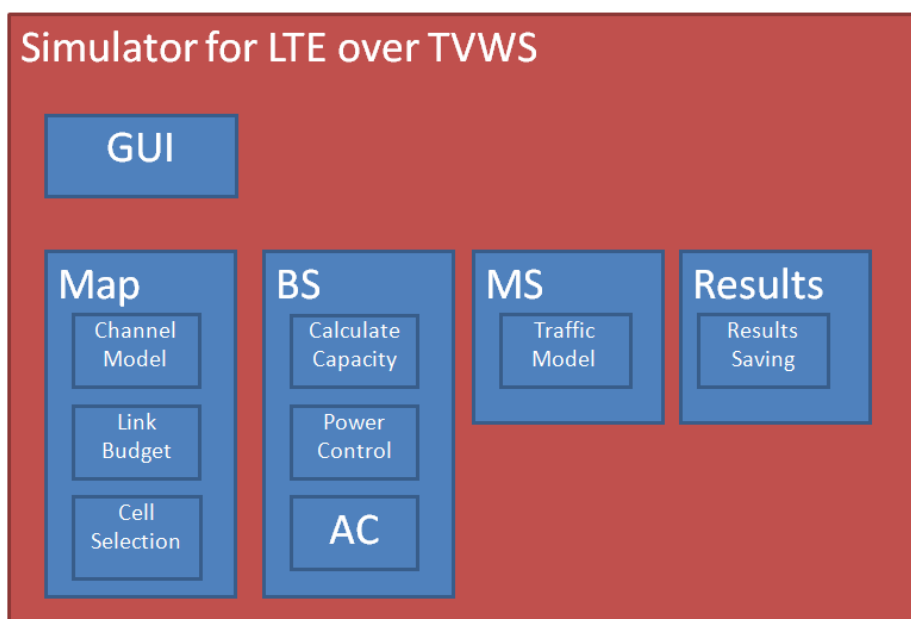


Figura 28 : Estrutura das *classes* do simulador LTE

A *classe* Map do simulador LTE apresenta os vários métodos a seguir descrita:

- **Cálculo do modelo de propagação (*Channel Model*):**
 - Parâmetros:
 - Tamanho da carta;
 - Escala da carta;
 - Modelo a aplicar;
 - Frequência;
 - Altura da BS;
 - Posição na carta.
 - Matriz com o *path loss* para cada ponto.

- **Cálculo do *Link budget*:**
 - Para todas as BS;
 - Parâmetros da BS;
 - Diagrama de radiação;
 - Tilt da antena;
 - Perdas na emissão;
 - Frequência central;
 - Largura de banda;
 - Potência de emissão;
 - *Path loss*;
 - Saída: matriz com a potência recebida do canal na carta.

- ***Cell Selection*:**
 - Para o ponto da MS, verificam qual a BS que tem o valor de SNR do CPICH maior;
 - Fazer o *Admission Control* (AC) na célula escolhida.

A classe BS do simulador LTE apresenta os vários métodos a seguir descrita:

- ***Calculate Capacity***
 - *Cyclic prefix* utilizado;
 - Largura de banda;
 - Número de *resource block*;
 - Saída: Número máximo de *resouce block* por segundo.

- ***Power Control*:**
 - Para todas as MS ligadas a uma BS, verificar qual o SNR mínimo necessário para o QoS definido no AC.

- ***Admission Control* (AC):**
 - Verificar-se qual o nível de modulação a atribuir;
 - R_{nec} = Estimar os recursos necessários para fornecer o débito requerido pela MS;
 - Verificar se os recursos existem;
 - $R_{max} > R_{nec} + R_{util}$; R_{util} são os recursos já reservados na BS;
 - Se positivo, reservar recursos para a MS. Actualizando o valor de R_{util} .

A classe MS do simulador LTE apresenta os vários métodos a seguir descrita:

- **Traffic Model**
 - Taxa de transmissão (serviço);
 - Potência do terminal;
 - Tipo de antena;
 - Velocidade.

Por último, a classe *Results* que tem como funcionalidade da recolha de todos os valores da simulação em que queremos visualizar no simulador LTE através da classe GUI. O Anexo B apresenta os detalhes da especificação destas classes.

Depois de apresentadas as classes para a implementação do simulador LTE. A Figura 29 apresenta a arquitectura do simulador de LTE. Os dois blocos superiores representam as estações de base com as suas principais características, tais como a potência de emissão, a localização e o tipo de antena. Os dois do lado esquerdo representam o terminal com as suas principais características, o débito, a potência de emissão e o tipo de antena. Estes quatro blocos representem os parâmetros de entrada no planeamento de rádio.

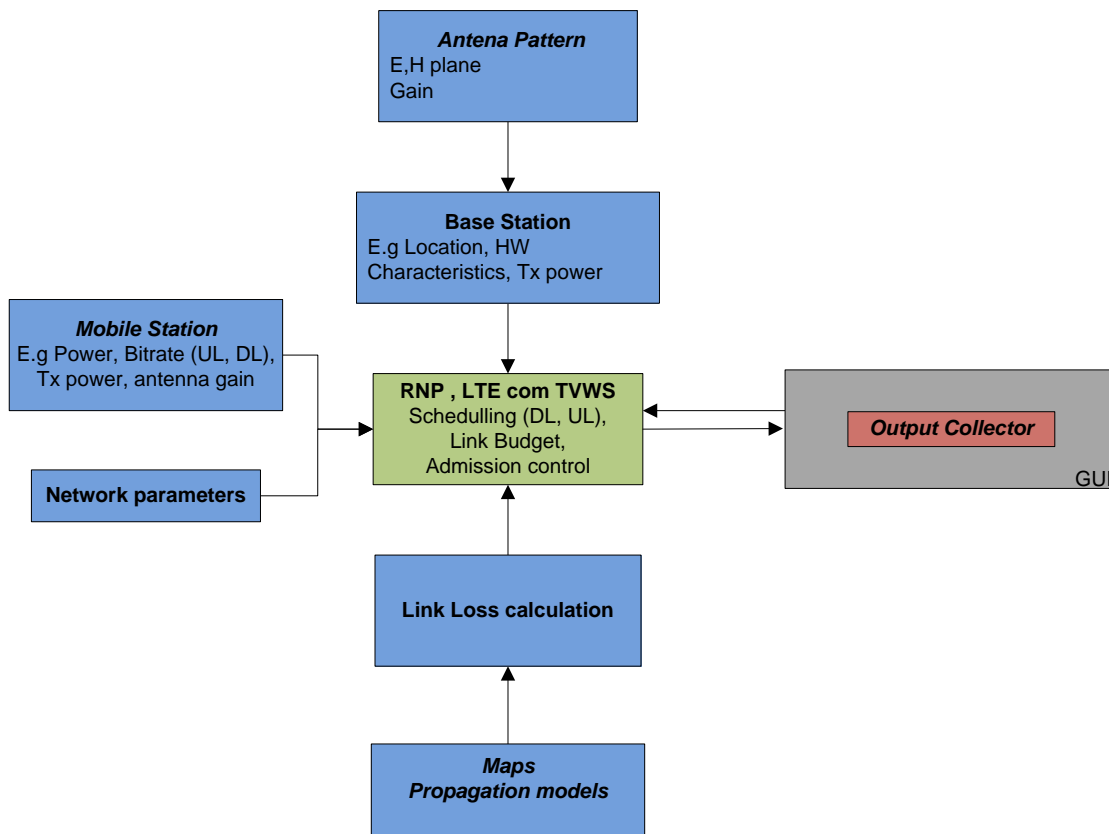


Figura 29 : Arquitectura do simulador LTE sobre TVWS

Os dois blocos azuis inferiores fazem o cálculo da atenuação entre a estação base e o terminal, através do modelo de propagação escolhido. A selecção do modelo de propagação

depende do cenário que se quer simular (que pode ser urbano, suburbano e rural) e da frequência de utilização pela estação base. As simulações foram feitas nas frequências *Legacy* e *TVWS*. Existem alguns parâmetros importantes que influenciam fortemente o *link budget*, por exemplo, a sensibilidade e ganho da antena do terminal e da estação base, a atenuação do cabo, a margem de desvanecimento, entre outros. Com base no mapa digital e no *link budget*, as simulações avaliam as diferentes possibilidades para construir parte de uma rede de rádio usando algoritmos de otimização. O bloco central (bloco verde), o bloco de *Radio Network Planning* (RNP), processa todos os parâmetros da estação de base, do terminal, assim como o cálculo do *link loss*, sendo os resultados exibidos na GUI (bloco cinza). É neste bloco que se fazem as decisões de utilização do algoritmo de partilha eficiente dos *TVWS* no contexto de Rádios Cognitivos.

A Figura 30 apresenta o bloco GUI (interface gráfica do simulador LTE). O retângulo a vermelho apresenta os parâmetros iniciais, por exemplo, a definição da escala da carta, a criação dos menus e toda a parte de visualização gráfica. Inclui também o carregamento dos parâmetros das estações base e a sua visualização gráfica na carta de simulação (os parâmetros estão num ficheiro texto que se pode editar). Na Figura 30 também se observam as coordenadas *XX* e *YY* (retângulo a azul) para saber as posições das estações de base e a área de cobertura. Na área de simulação existem 19 *sites* de três sectores (estações de bases com 120° de ângulo de abertura), o que perfaz no total, 57 estações de base.

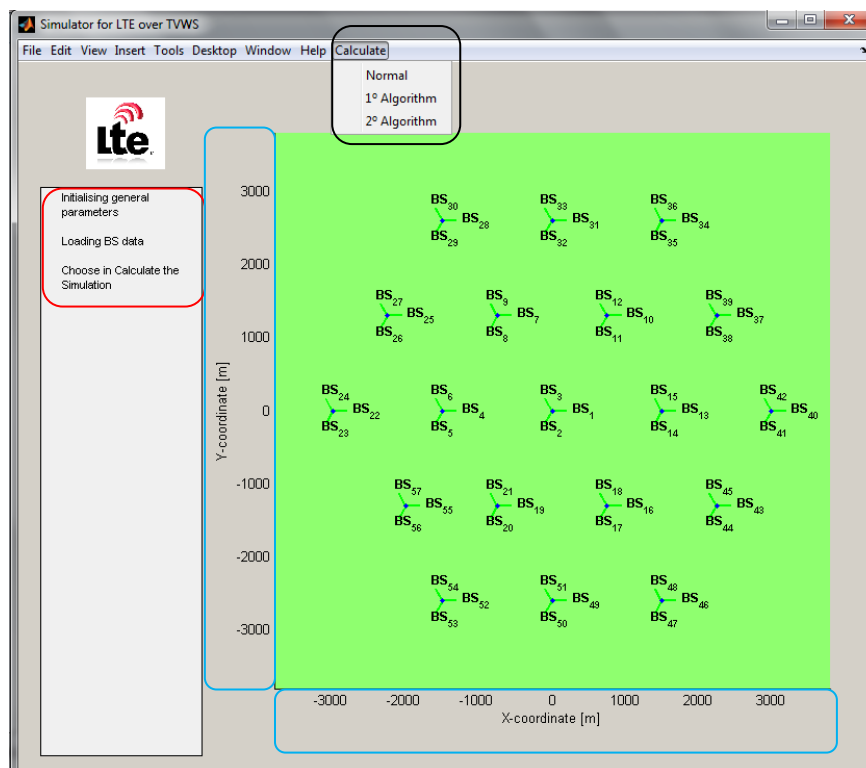


Figura 30 : Interface GUI do simulador LTE sobre TVWS

A Figura 30 apresenta o final de todo o processo de preparação para a simulação. No menu "Calculate" temos de escolher qual das opções vamos optar (realçados no rectângulo preto): *Normal*, "Algorithm 1" ou o "Algorithm 2".

A opção *Normal* funciona como uma ferramenta de planeamento de rede em que podemos analisar a cobertura e de capacidade de uma rede LTE. No caso da opção "Algorithm 1", para além de se fazer o planeamento de rede, faz também um simples RRM das duas portadoras (700 MHz e a 2.6 GHz). O objectivo é aumentar a capacidade por parte do operador *Legacy*, na oferta aos seus clientes. Assim, de forma abreviada, pode-se afirmar que, quando a portadora 2.6 GHz estiver totalmente ocupada, é feita uma migração dos recursos que ficaram bloqueados na portadora *Legacy* para a portadora TVWS sem se fazer uma análise prévia nas duas portadoras.

No caso do "Algorithm 2", já é feita uma análise prévia. Assim, em vez de se atribuir uma portadora a um terminal sem analisar a qualidade de ligação entre as duas portadoras, analisam-se as duas portadoras, o que melhora a eficiência e origina uma poupança na atribuição dos blocos de recursos do LTE. A desvantagem é o aumento do processamento para analisar as duas portadoras, como se tratasse de um *Multi-RAT (Multiple - Radio Access Technology)*. No entanto, como se utiliza a mesma tecnologia de acesso rádio podemos designar como Multi-banda.

Depois de termos seleccionado a opção de cálculo pretendida (*Normal*, "Algorithm 1" ou o "Algorithm 2"), o simulador executa em seguida os carregamentos dos dados restantes para a simulação apresentada Figura 31 tais como:

- *Loading antenna data*;
- *Loading MS data*.

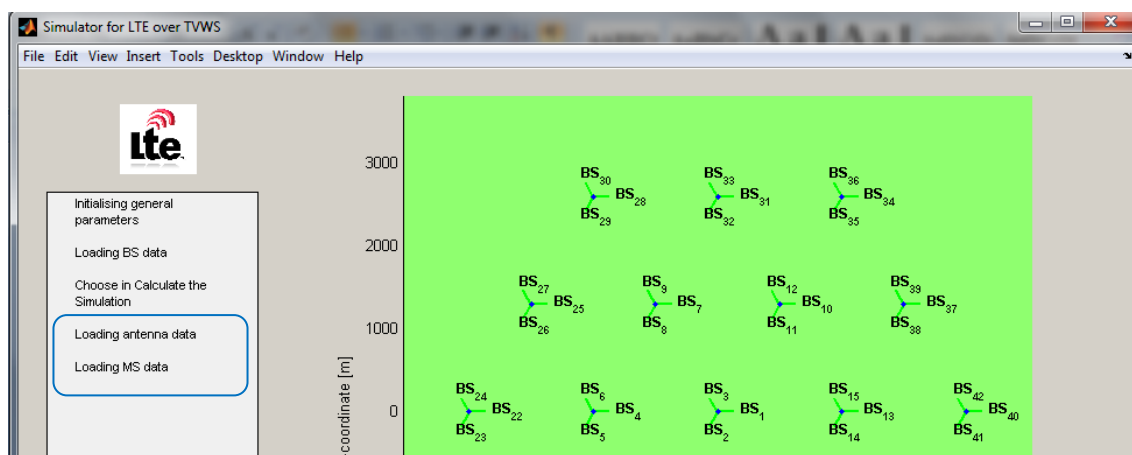


Figura 31 : Carregar os parâmetros de entrada

Após de se carregarem todos os parâmetros de entrada, o simulador inicializa as funções para obtenção dos valores que queremos obter em toda a área de simulação.

As funções do *downlink* e *uplink* referentes a opção *Normal* são apresentados no rectângulo vermelho da Figura 32.

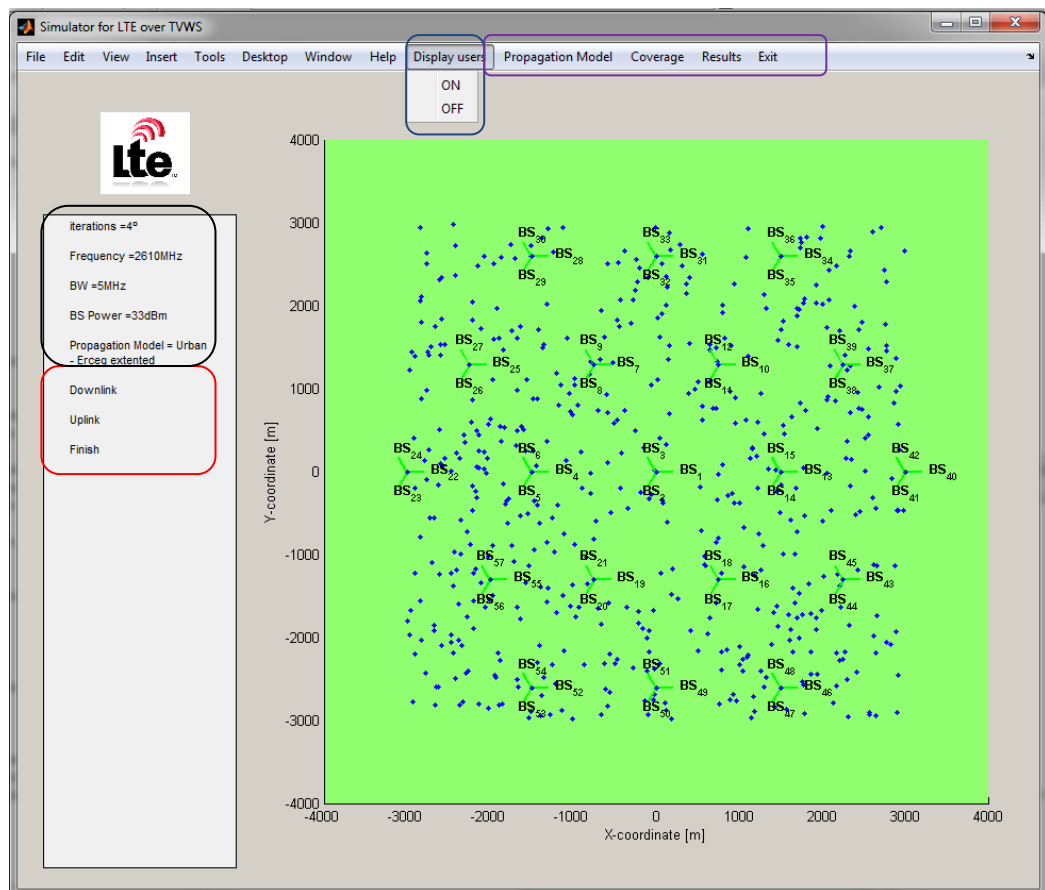


Figura 32 : Visualização dos vários menus do Simulador de LTE

A Figura 32 apresenta também o menu *Display user* (rectângulo azul). Com opção *ON* pode-se fazer a visualização das posições dos terminais, como se apresentem na figura na área de simulação. Também podemos visualizar outros menus, como o *Propagation Model* para a visualização gráfica do modelo de propagação usado, o *Coverage*, para visualizar a linha de vista de cada BS, o menu *Results* para visualizar os vários sub-menus de resultados de simulação, e por último a opção do menu *Exit*, para sair do programa, Estas opções são todas apresentadas no rectângulo a roxo da Figura 32.

Para além disso, podemos visualizar o número das iterações em que o simulador se encontra, a frequência de operação, a largura de banda e a potência de emissão da estação de base, apresentados no rectângulo a negro da Figura 32.

O interesse de haver várias iterações no simulador é possibilitar a aproximação dos valores obtidos a um cenário real. Para tal, em cada iteração a localização dos utilizadores é alterada. No final, obtém-se uma média de todos os resultados. O número de iterações necessárias depende dos valores obtidos da última simulação (e se estão a convergir para os valores médios).

A simulação é realizada em toda a área considerada. No exemplo na Figura 32 observam-se 19 *sites* com 3 sectores. No entanto, a fim de evitar medições incorrectas na fronteira (por

exemplo, áreas de cobertura nos cantos da carta) são só consideradas as medições no centro da área de simulação (círculo a azul na Figura 33).

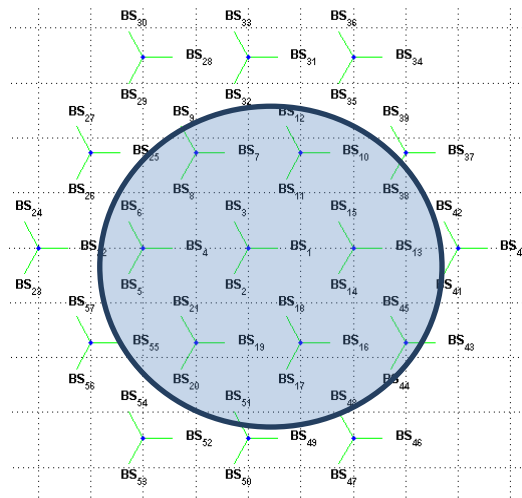


Figura 33 : Área de simulação

A visualização do menu *Results* depende da opção seleccionada (*Normal*, “*Algorithm 1*” ou o “*Algorithm 2*”).

A opção *Normal* apresentada na Figura 34 (apresentado a rectângulo azul) tem o sub-menu *BS_LEGACY* que se refere aos parâmetros e funcionalidades relacionais com a frequência *Legacy* (2.6 GHz).

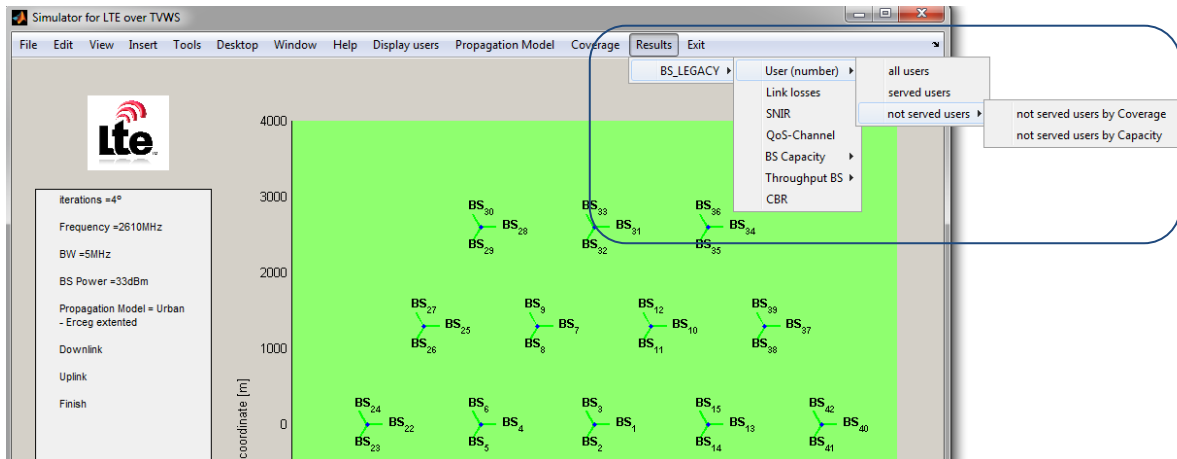


Figura 34 : Visualização dos menus do modo “Normal”

Nesse sub-menu temos como a primeira opção o *User (number)* que inclui o *all User*, relativa ao obtemos o número de utilizadores na área de simulação definida na Figura 33, o *served users*, relativa ao número de utilizadores que foram servidos pelo operador, assim como a opção *Not served users by Coverage*, representando os utilizadores que não foram servidos por falta de cobertura, e a opção *Not served users by Capacity*, que corresponde aos

utilizadores que não foram ligados por falta de capacidade. Na Figura 35 apresenta-se a visualização dos vários resultados referentes ao sub-menu User (number).



Figura 35: Visualização das janelas pop up dos resultados do sub-menu User (Number)

No segundo sub-menu do menu *Results* visualiza-se a opção *Link losses*, que permite mostra, em forma gráfica a atenuação do sinal. O terceiro sub-Menu refere-se ao *SNIR*, e permite visualizar, de forma gráfica, a relação sinal-ruído-interferência em toda a carta (Figura 36). Neste exemplo utiliza-se o modelo Urban-Erceg extended. No quarto sub-menu tem o *QoS-Channel* podemos visualizar a modulação e codificação usada em cada ponto da carta. A Figura 37 apresenta a visualização do *Modulation and Coding Schemes* (MCS) em toda a carta.

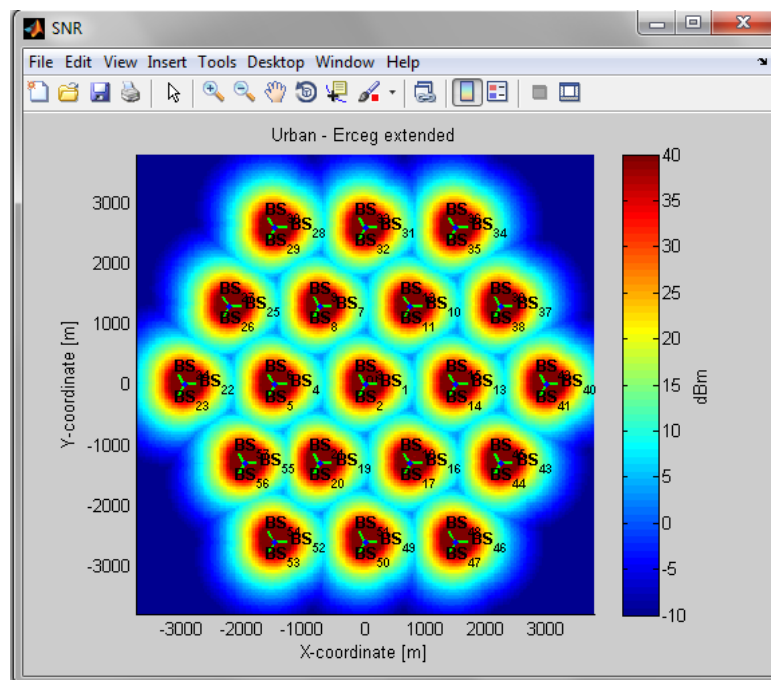


Figura 36 : Representação gráfica do SNIR

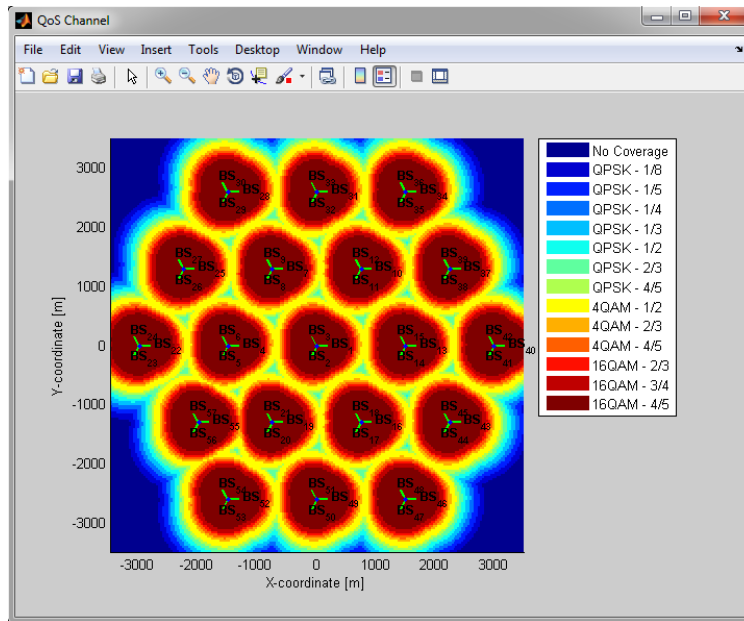


Figura 37: Visualização do MCS em todos os pontos da carta

A seguir, existe a opção *BS Capacity* para visualização da capacidade das estações de base de cada sector apresentado na Figura 38 (para o *downlink*). Esta funcionalidade serve para analisar quais das estações base têm problemas de falta de capacidade.

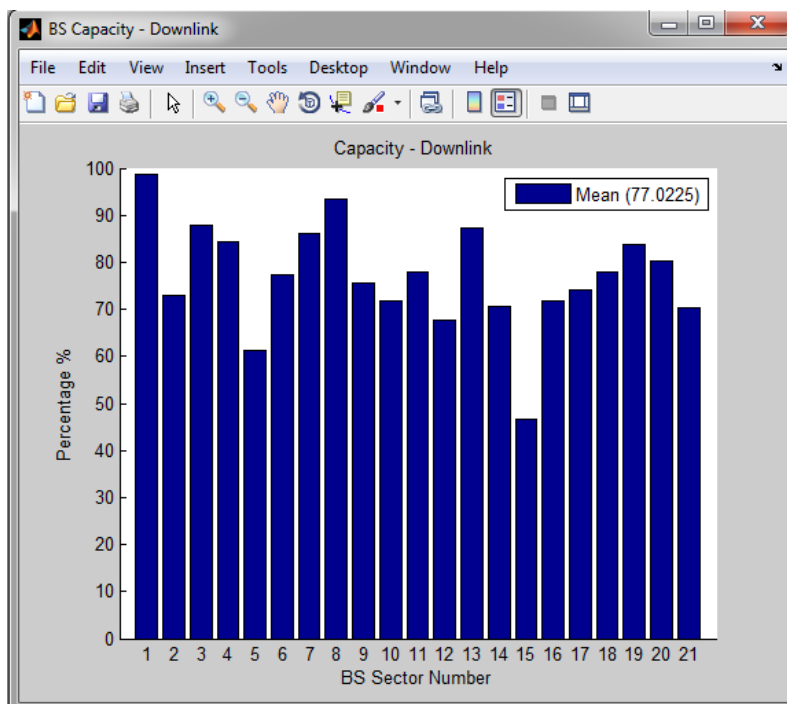


Figura 38 : Capacidade das estações de base de cada sector

A seguir existe o sub-menu *Throughput BS*, para a visualização dos ritmos de transmissão de cada estação de base (para o *downlink* e *uplink*). No capítulo 6 faz-se a análise do débito (e a

sua representação gráfica) apenas para o *downlink*. Nesse capítulo, também se faz a análise dos resultados entre a diferença de usar a frequência 2.6 GHz e os 700 MHz. Na última opção do sub-menu *BS_LEGACY*, existe a opção CBR, que serve para visualizar, em cada estação base a percentagem de sessões bloqueadas, como se apresentado na Figura 39.

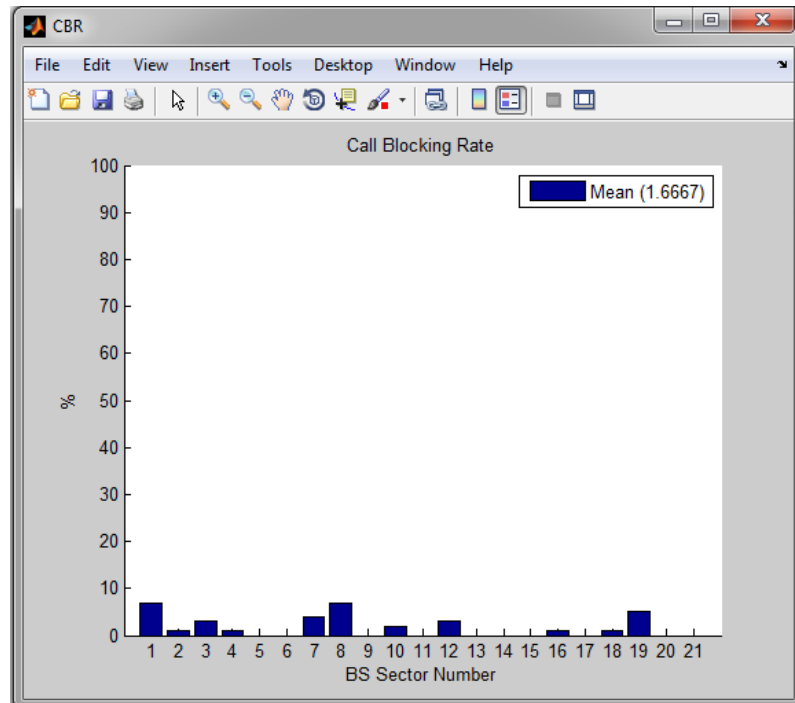


Figura 39 : Call Blocking Rate

A opção “*Algorithm 1*” apresentada na Figura 40 (realçado pelo rectângulo azul) contém as opções *BS_LEGACY*, *BS_TVWS* e *Total RB Alg1*.

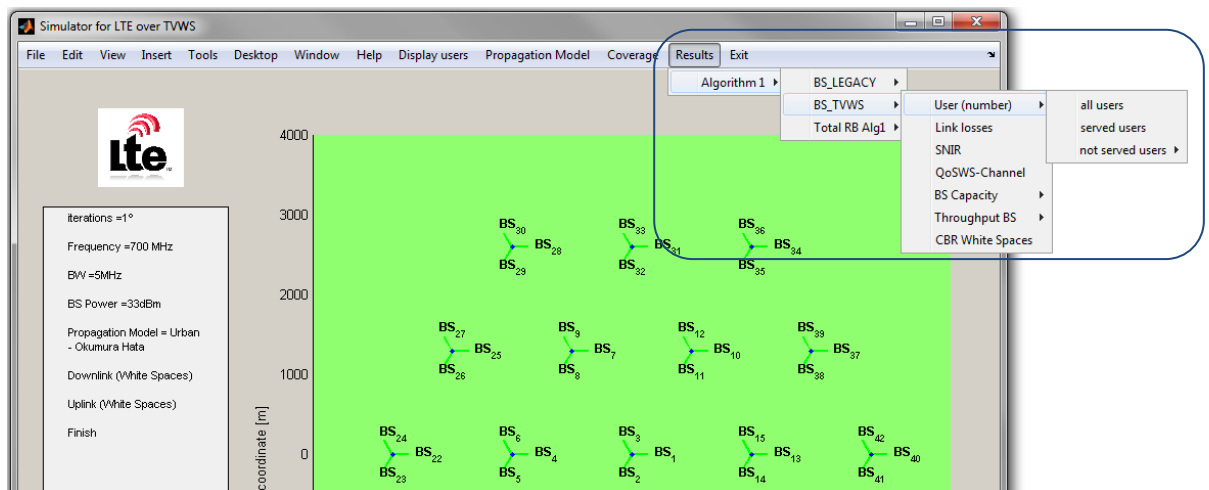


Figura 40 : Visualização dos menus do modo “*Algorithm 1*”

Os vários sub-menus para o menu *BS_LEGACY* são idênticos à opção *Normal* da Figura 34. No entanto, para o menu *BS_TVWS* a estrutura dos sub-menus pode ser a mesma, mas os

resultados obtidos têm como base do número de utilizadores que ficaram bloqueados na *BS_LEGACY*. Só com esses utilizadores é feita uma nova simulação com a Portadora TVWS (e são mostrado os resultados obtidos).

A opção *Total RB Alg1* permite visualizar-se o total dos blocos de recursos ocupados na portadora *Legacy* mais a portadora TVWS, para cada estação base (no *downlink* e *uplink*).

A opção “*Algorithm 2*” apresentada na Figura 41 (realçado pelo rectângulo azul) tem a mesma estrutura do *Algorithm 1*. No entanto, aqui a portadora TVWS e *Legacy* são previamente analisadas, sendo preferencialmente atribuída a portadora que utiliza menos recursos.

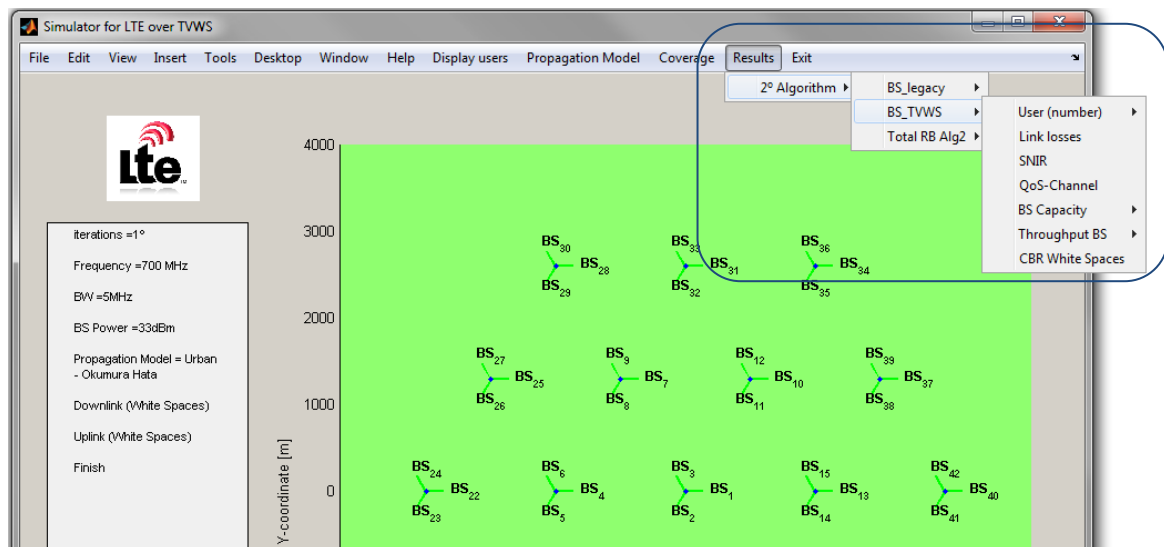


Figura 41 : Visualização dos menus do modo “*Algorithm 2*”

Nas três opções, tem-se como objectivo atingir a maior cobertura possível, com a capacidade ideal, reduzindo os custos, aspectos de importância essencial em todo o planeamento de rádio e de rede. O planeamento de cobertura define a distância entre células, o número de estações base a ser utilizados e os limites de cobertura. O planeamento de capacidade determina as suas respectivas capacidades e determina a gama de serviços.

Passos da Simulação

A primeira janela que aparece no simulador de LTE é apresentada na Figura 42, no qual se pode visualizar uma janela *pop up* com a escolha dos três cenários que se podem simular:

- Urbano;
- Suburbano;
- Rural.

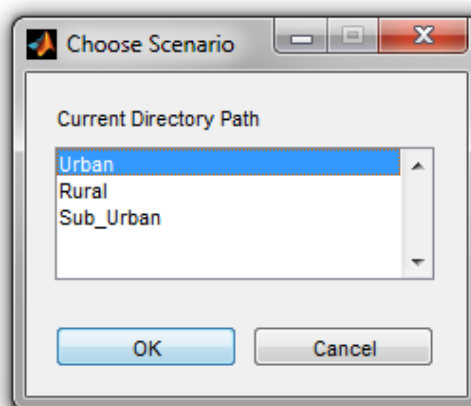


Figura 42 : Escolha do Cenário

Na Tabela 20, apresentam-se as características principais dos três cenários. Os parâmetros de entrada dependem do cenário escolhido.

Tabela 20 : Parâmetros principais dos três cenários

	Urbano	Suburbano	Rural
<i>BS TxPower</i>	33 dBm	34 dBm	36 dBm
<i>BS antHeight</i>	35 m	35 m	56 m
<i>PropModel</i>	ErCeg, Okumura-Hata, COST231	ErCeg, Okumura-Hata, COST231	ErCeg, Okumura-Hata, COST231
<i>Cell Radius</i>	0.75 km	1.125 km	3.5 km
<i>Tilt</i>	9.5°	8°	0°
<i>Antenna Gain</i>	12 dBi	12 dBi	14.5 dBi

Na janela de *pop up* da Figura 43 selecciona-se a frequência de operação de entre as três à escolha: 700 MHz, 2 GHz e 2.6 GHz. Esta escolha é importante para se decidir qual o modelo de propagação que se vai utilizar (Okumura Hata a 700 MHz, COST231 a 2GHz e Erceg Extended a 2.6 GHz).

Como não existe um modelo de propagação genérico para todos os tipos de ambientes, frequências e parâmetros, são utilizados modelos híbridos que contemplam as características dos modelos empíricos e teóricos. Na Figura 44 podem-se observar todos os modelos de propagação introduzidos no simulador de LTE. Na legenda, os índices U, S, e R referem-se a Urbano, Suburbano e Rural.

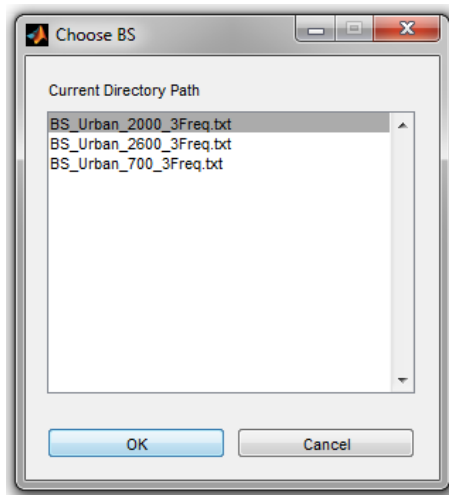


Figura 43 : Escolha da frequência de operação

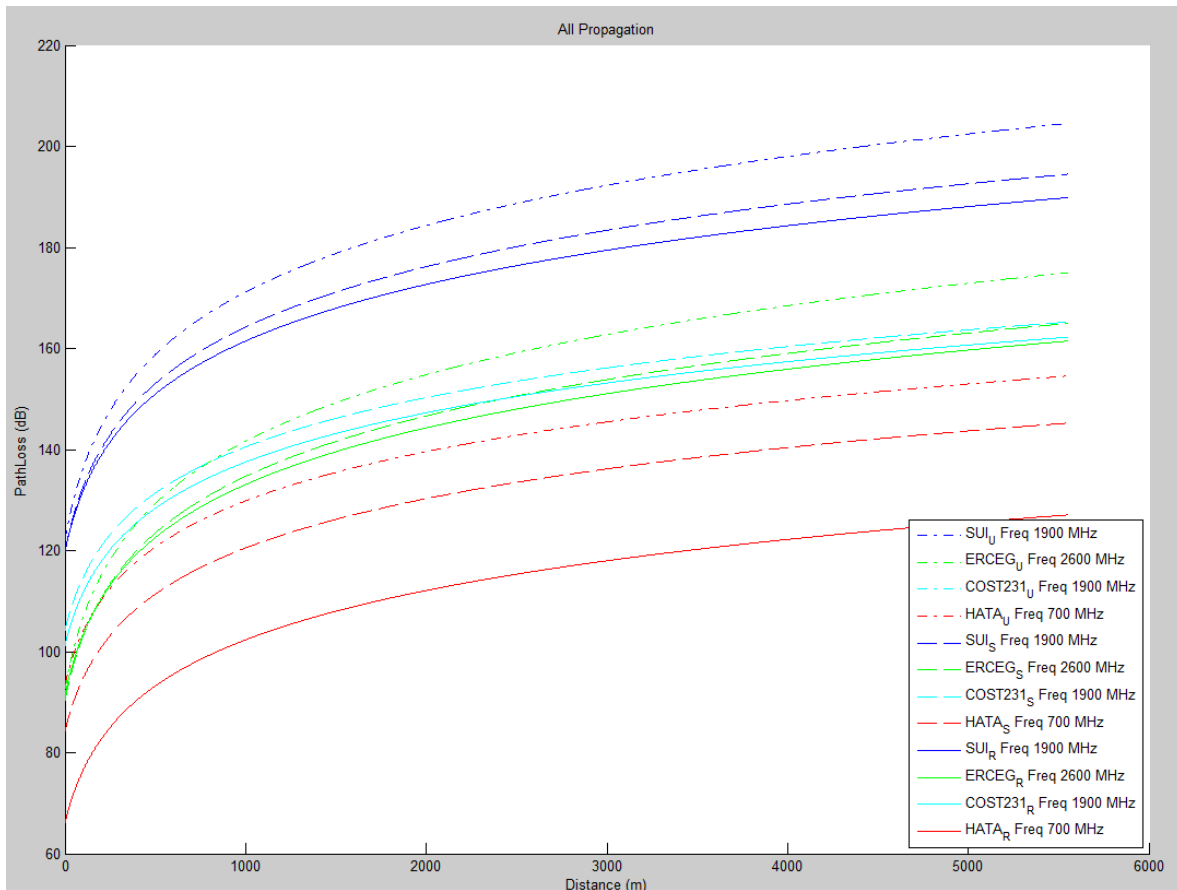


Figura 44 : Visualização gráfica dos modelos de propagação

A utilização destes modelos tem uma certa flexibilidade. A sua aplicabilidade pode ser aferida com medidas reais, realizadas nos ambientes de propagação específicos onde são utilizados. Desta forma, minimiza-se o erro entre o sinal estimado e o previsto. Porém, é

importante realçar que a aplicação de modelos com uma componente empírica requer a classificação de ambientes (urbano, suburbano e rural). Neste trabalho utilizaram-se os modelos mais comuns existentes na literatura e os mais apropriados para a nova geração de redes móveis, tendo sido escolhidos o modelo de Okumura-Hata, o COST231, o SUI e o Erceg Extended.

No fim do processo de escolha da frequência temos a opção do relevo da zona que queremos simular. Essa opção é apresentada na Figura 45. Nas simulações que foram realizadas o relevo escolhido é plano em toda a área, mas em trabalhos futuros é possível considerar relevo que não seja plano para uma melhor aproximação do real.

Depois das três opções seleccionadas anteriormente nas janelas *pop up*, o simulador fica em modo *standby*, como à espera que o utilizador escolha umas das três opções (*Normal*, *Algorithm 1* ou o *Algorithm 2*), como apresentado na Figura 30.

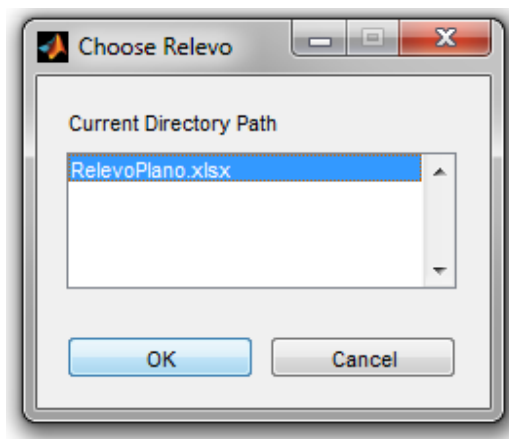


Figura 45 : Escolha do relevo

A primeira inicialização é realizada a partir das opções seleccionadas para o cenário e a frequência. Com estes dois parâmetros, é obtido o modelo de propagação correspondente para o cálculo da atenuação do sinal (*Path Loss*) em toda a área de simulação. A Figura 46 apresenta o cálculo do *PathLoss* em código MATLAB™ com os modelos de propagação *ERCEG-URBAN*. O *Path loss* também permite calcular o raio máximo das células com um modelo de propagação adequado, tais como: Okumura-Hata, Erceg, etc. A partir do raio das células pode-se calcular o número de estações de base necessárias para cobrir a zona geográfica pretendida. Portanto, depois de se de saber qual é o raio das células que permite obter uma cobertura otimizada, passamos ao cálculo dos *Link Losses*. O código em MATLAB™ que permite realizar esse cálculo é apresentado na Figura 47. A Figura 48 apresenta a representação gráfica do *Link Losses* no *downlink* em toda a área de simulação.

```

% Erceg Extended

% Limitations to Erceg Extended

% Frequency = 1900 MHz to 3000 MHz
% Mobile Station Antenna Height = 2 to 10 meters
% Base Station Antenna height = 10 to 80 meters
% Link Distance = 0.1 to 8 Km

% Urban
function [maploss distance] = ERCEG_URBAN(BSposX, BSposY, BSHeight, BSgroundHeight, MSHeight, MSgroundHeight, frequency, mapa)
% Inicialize
a =4.6;
b=0.0075;
c=12.6;
maploss = zeros(mapa.xPixels, mapa.yPixels);
distance = zeros(mapa.xPixels, mapa.yPixels);
lambda= 3*10^8/(frequency*10^6);
for x=1:mapa.xPixels
    for y=1:mapa.yPixels
        distance(x,y) = sqrt((BSposX-(mapa.xx(x,y)))^2 + (BSposY-(mapa.yy(x,y)))^2 + ...
            ((BSHeight+BSgroundHeight) - (MSHeight+MSgroundHeight))^2);
    endfor
endfor
% frequency in (MHz) and Height in (meters)
dzero=100;
A =20*log10((4*pi*dzero)/lambda);
gamma = a - b*BSHeight+ c/BSHeight;
Xf = 6.0*log10(frequency/2600);
Xh = -10.8*log10(MSHeight/2) ;
S = 10.6; %factor de atenuation 8,2 - 10.6 in Urban is 10.6
maploss= A +10*gamma*log10(distance/dzero)+ Xf + Xh + S ; % para d>dzero
end%ERCEG_URBAN

```

Figura 46 : Exemplo do código MATLAB™ para o cálculo do *Path loss* com o modelo de propagação *ERCEG-URBAN*

```

for k = 1:numBSs

%calculate antenna gain
antFile = [obj.BSList(k).antType '.ant'];
[obj.BSList(k).antennaGain obj.BSList(k).antenna1] = AntRead(antFile);
obj.BSList(k).antloss = [AntPattern(obj.BSList(k),obj.MSList(1), obj.xx, obj.yy, obj.BSList(k).antenna1)]];
%Calculation of Downlink linkloss
obj.BSList(k).linklossDL = obj.BSList(k).pathlossDL + obj.MSList(1).bodyLosses + obj.MSList(1).noiseFig + ...
    obj.BSList(k).cableLosses + obj.BSList(k).antloss
end%for

```

Figura 47 : Cálculo do *Link Loss* no *downlink*

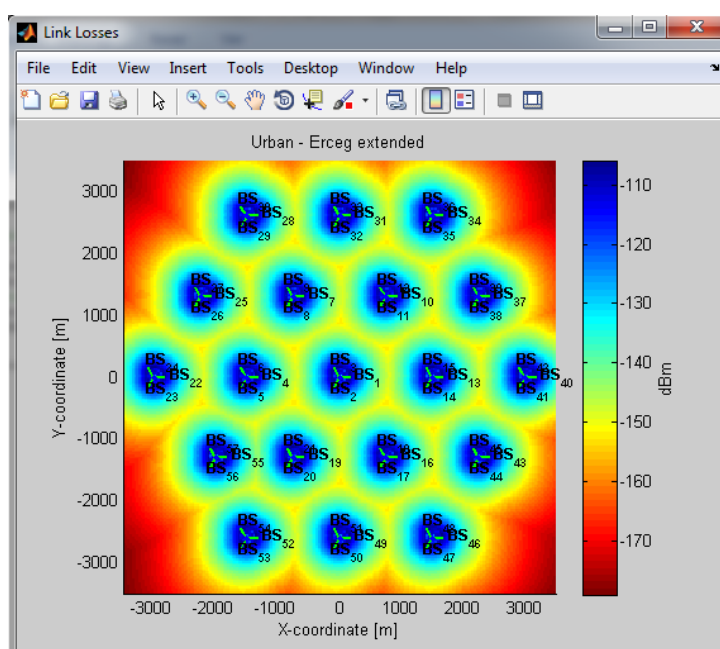


Figura 48 : Visualização do *Link Losses* na área de simulação

O *Link loss* é a soma de todas as atenuações a partir do emissor, através do meio (espaço livre, cabo, fibra de guia de onda, etc.) para o receptor.

O próximo parâmetro a calcular é o *Link budget*, que depende da atenuação do sinal emitido, devido à propagação, bem como dos ganhos das antenas e das perdas. A expressão do *Link budget* pode ser representado na seguinte equação:

$$\text{Potência recebida (dBm)} = \text{Potência Transmissão (dBm)} + \text{Ganhos (dB)} - \text{Perdas (dB)}$$

A Figura 49 apresenta a função do *signalLevDL* para o cálculo do *Link budget*. O cálculo do *Link budget* também pode ser usado para comparar a cobertura em relação aos diferentes sistemas. Essa relação indica as vantagens ou desvantagens existentes no LTE com as que foram já projectadas para o GSM e o WCDMA.

```
function signalLevDL(obj)

    numBSs= size(obj.BSList,2);
    for k = 1:numBSs
        % P_R=P_E+G_E+G_R-L
        obj.BSList(k).PowerLev = obj.BSList(k).txPowerPerSubCarrier + obj.BSList(k).antennaGain + ...
            obj.MSList(1).antGain - obj.BSList(k).linklossDL ;
    end%for
end%signalLevDL
```

Figura 49 : Cálculo do *Link budget* do *downlink*

O parâmetro *SNRCalcDL* permite obter o SNIR e o código para o seu cálculo é apresentado na Figura 50. Como o nome indica, esta relação estabelece a diferença entre o nível da potência do sinal recebido e potência do ruído presente no canal utilizado (interferências co-canal e ruído térmico). Na Figura 36 apresenta-se graficamente o SNIR em toda a área de cobertura. Neste exemplo observa-se o modelo *URBAN - Erceg extended*.

```
function SNRCalcDL(obj,interactions)
    % SINR = received power (dBm) - Interference from other BS to issue the same frequency (dBm) - Thermal Noise (dBm)
    % Thermal noise
    % Constant Boltzman(Kb = 1,38*10^-23 [J/K]),
    % T in Kelvin , 293K = 20°C
    % Bw= bandwidth
    % n0 = Kb*T*Bw
    Kb= 1.38e-23;
    T=293;
    No=10*log10(Kb*T)+30;%dBm
    I= zeros(obj.xPixels, obj.yPixels);
    powerAux = zeros(size(obj.BSList,2), obj.xPixels, obj.yPixels);
    for i = 1:size(obj.BSList,2)
        powerAux(i, :, :) = obj.BSList(i).PowerLev;
    end
    powerAux = db2pow(powerAux);
    for k=1:size(obj.BSList,2)
        N = No+10*log10(obj.BSList(k).SubCarrierBW); %to dBm
        N= db2pow(N);
        ind = find(obj.BSList(k).CFreqDL == [obj.BSList(:).CFreqDL]);
        ind(k == ind) = [];
        I = I + squeeze(sum(powerAux(ind, :, :)));
        % carrier-to-noise-and-interference ratio, C/(N+I)
        obj.BSList(k).snr = pow2db(db2pow(obj.BSList(k).PowerLev)./(N+I));
        obj.BSList(k).noise =pow2db(I);
        I= zeros(obj.xPixels, obj.yPixels);
    end%for
end% SNRCalcDL
```

Figura 50 : Cálculo do SNIR no *downlink*

A função *cellSelectionDL* determina a qual estação base o terminal se deve ligar, Figura 51. A selecção é feita no seguinte modo; cada terminal determina em todas as estações de base o valor de SNIR (na sua posição) e selecciona o que tiver o valor mais elevado.

```
function cellSelectionDL(obj,interactions)
obj.results(1,interactions).selection = [];
SnrBS= zeros(1,size(obj.BSList,2));
for k=1:size(obj.MSList,2)
yy = round((obj.MSList(k).xPos/obj.scale)+obj.xPixels/2);
xx = round((obj.MSList(k).yPos/obj.scale)+obj.yPixels/2);
if (xx < 1 || xx > obj.xPixels*2) || (yy<1 || yy>obj.yPixels*2)
error('Mobile Station is not correct position out of map');
end
for i=1:size(obj.BSList,2)
SnrBS(i) = obj.BSList(i).snr(xx,yy);
end%for
[SnrMS SelectBS]= max(SnrBS);
obj.results(interactions).selection = [obj.results(interactions).selection ; k SelectBS SnrMS];
end%for
```

Figura 51 : Selecção da estação de base para cada terminal

Todas as funções que foram descritas anteriormente foram desenvolvidas tanto para o *downlink* como para o *uplink*. Na Figura 52 observam-se o final de todas as funções e os parâmetros considerando na simulação para a realização dos cálculos.

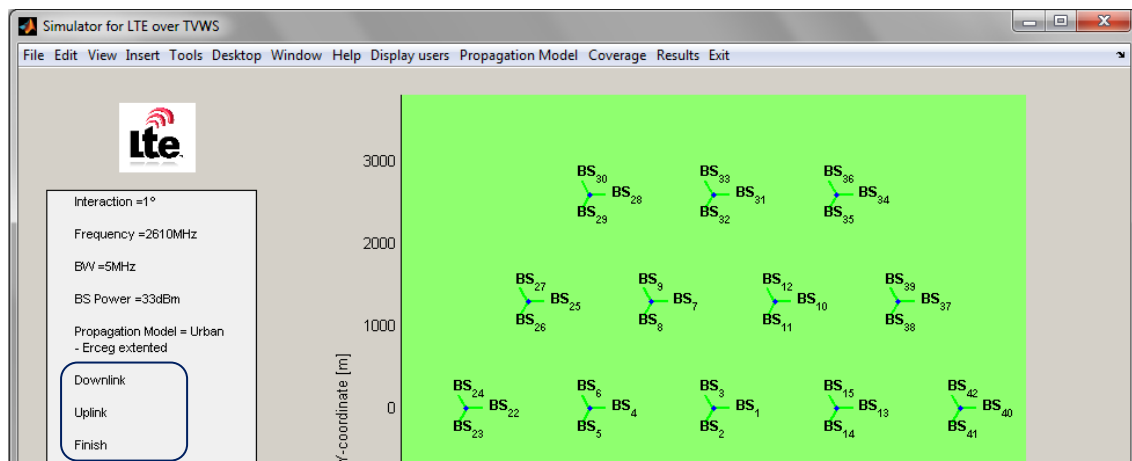


Figura 52 : Cálculo do *Downlink* e *Uplink*

O simulador de LTE pode ter várias configurações como já foi referida anteriormente. O simulador de LTE pode-se ser configurado de modo *Normal*. Neste caso, a simulação é só para uma frequência e obtêm-se os resultados só para essa frequência, ou seja, só se faz o planeamento de rádio.

Para poder replicar os conceitos inovadores de rádio cognitivos desenvolvidas neste trabalho, o simulador apresenta dois algoritmos de partilha eficiente das bandas de TVWS, que são utilizadas de forma complementar à banda *Legacy* no “Algorithm 1” e de forma dinâmica partilhada no “Algorithm 2”.

Com o “Algorithm 1”, primeiro faz-se a simulação para a frequência na banda *Legacy* (2.6GHz), atribuindo os recursos de rádio *Legacy* aos terminais. Aos terminais que não ficarem ligados por falta de capacidade na portadora *Legacy* é feita uma nova atribuição na banda TVWS (700 MHz). Essa atribuição é feita para as estações de base para os quais o *Call Blocking Rate* (CBR) é maior do que 2%. Assim, nem todas as estações base precisam de usar a portadora extra de TVWS. Na nova iteração para atribuição da portadora TVWS é preciso fazer o planeamento de rede tendo em consideração as posições das estações de base, para não haver interferências. Uma das soluções é usar um algoritmo para a atribuição de cada frequência TVWS baseado na vizinhança das estações de base, isto é, verifica-se se atribuição anterior a uma estação base é “vizinha”. Se for, é atribuído uma nova frequência, caso contrário, atribui-se essa frequência. Consideram-se “não vizinhas” se estações de base têm uma separação de um anel, ou se no anel superior as direcções das antenas evitem a interferência. A Figura 39 apresenta a percentagem de chamadas/sessões bloqueadas por estação base.

No “Algorithm 2 a qualidade da ligação de rádio em cada banda são periodicamente monitorizadas e avaliadas em termos de quantidade de recursos de rádio que são necessários para prestar o serviço solicitado, pois o serviço é prestado pela banda que consome menos recursos de rádio. Neste caso são feitas duas simulações prévias para as duas portadoras (*Legacy* e TVWS). Com os resultados obtidos nessas duas simulações, em termos da qualidade de sinal (SNIR), é seleccionada a portadora que precisa menos recursos, sendo uma abordagem de *Multi-Band Access* (MBA).

Sumários e Conclusões

O desenvolvimento de um Simulador LTE, elaborado em MATLABTM, usa uma ferramenta GUIDE para apoiar o desenvolvimento do interface gráfico (GUI) e uma linguagem script orientada a objectos fornecida pelo MATLABTM, obtendo-se assim os resultados do simulador nas frequências actuais *Legacy* e nas frequências libertadas pela televisão analógica.

O simulador de LTE considera 3 modos de operação (*Normal*, “Algorithm 1” e “Algorithm 2”). No modo normal podemos visualizar estatísticas úteis ao engenheiro de planeamento de rede, por exemplo o SNIR em todo o mapa, o valor das interferências, para além de todos os dados estatísticos que o programa calcula e que podem ser visualizados.

Com os algoritmos 1 e 2, para além de todos os processos do modo *Normal* e da visualização de estatísticas, também se consideram os algoritmos de RRM para a atribuição dinâmica de portadoras. O que diferencia o “Algorithm 1” do “Algorithm 2” é forma como é feita a atribuição. No primeiro caso, a atribuição é feita sem avaliação das duas bandas e com ordem de atribuição definida, isto é, em primeiro lugar é atribuída á portadora *Legacy* e só quando esta tiver sem capacidade disponível é que se atribuem portadoras TVWS. Este algoritmo tem a vantagens de não estar totalmente dependente das portadoras TVWS. Digamos, só em casos pontuais de excesso de procura em determinadas zonas é que o operador de telecomunicações

as utiliza. Assim, o operador de telecomunicações tem mais liberdade para utilizar (ou não utilizar) as portadoras TVWS.

No caso do "Algorithm 2", o operador de telecomunicações já é obrigado a ter sempre portadoras TVWS e de ter um sistema de Multi-banda que analisa as duas portadoras (*Legacy* e TVWS). Pode-se pensar que este procedimento é uma desvantagem, devido a uma maior complexidade e um possível aumento do equipamento. Mas com os resultados obtidos no simulador de LTE, essa desvantagem é compensada com aumento de capacidade e da eficiência espectral, isto é, a soma das portadoras usadas para o mesmo serviço oferecido nos dois algoritmos é menor no "Algorithm 2". Para o operador este aumento da eficiência na utilização do espectro (por ter licenciamento de frequências dinâmico) é uma vantagem em relação à sua concorrência, pois pode oferecer mais serviços a os seus clientes, com menor custos de obtenção de frequências. Isso é devido a ter uma maior eficiência espectral e de ter licenciamento de frequências dinâmico.

Capítulo 6

Arquitectura da Gestão Simples de Recursos de Rádio

Introdução

Num contexto geral, a Gestão de Recursos de Rádio (*Radio Resource Management* - RRM), possibilita a utilização dos recursos limitados do espectro radioeléctrico e das suas infra-estruturas da rede da forma o mais eficientemente possível. O RRM também lida com aspectos de gestão dos multi-utilizadores e multi-células, tentando maximizar a capacidade da rede móvel. O RRM é especialmente importante em sistemas limitados pela interferência co-canal (e não por ruído), por exemplo, nos sistemas celulares, assim como nas redes sem fios constituídas por diversos pontos e onde é possível reutilizar o mesmo canal. O RRM dinâmico permite adaptar e ajustar os parâmetros da rede de rádio para a carga do tráfego, as posições do utilizador e os requisitos de QoS a considerar no projecto do sistema sem fios, com vista a minimizar os custos associados ao desenvolvimento da rede, resultando assim numa melhor eficiência.

No relatório D4.1 [32] do projecto COGEU chegou-se à conclusão que, mesmo em áreas urbanas, como as de Munique, existem canais de TV subutilizados no espectro das faixas UHF. Estes canais podem ser utilizados no contexto da partilha eficiente de TVWS proposto no projecto COGEU [1], para a possível utilização, tendo em conta os métodos de atribuição óptima incorporados no sistema aí proposto. Num contexto geral, a noção de partilha do espectro [22] representa basicamente a ideia de juntar intervalos de espectro de diferentes proprietários, num único conjunto, com um interesse comum. Este facto representa uma maneira completamente nova de atribuição do espectro, como proposto em [23], [24]. Neste contexto, a partir de um espaço comum de espectro num sistema de partilha, tem-se um sistema público de aluguer temporário de bandas de frequências. De acordo com este conceito de aluguer, o utilizador obtém acesso a intervalos espectrais cujo utilização ainda não foi autorizada. Assim, os proprietários do espectro podem obter novas fontes de receita. No contexto dos TVWS, o projecto COGEU adopta um conceito de partilha do espectro, que faz uso de uma base de dados de geolocalização para armazenar informações sobre a disponibilidade de TVWS (para utilização no comércio secundário de espectro). A Figura 53 apresenta um exemplo de canais disponíveis para TVWS e indica a potência máxima permitida para transmitir num local específico.

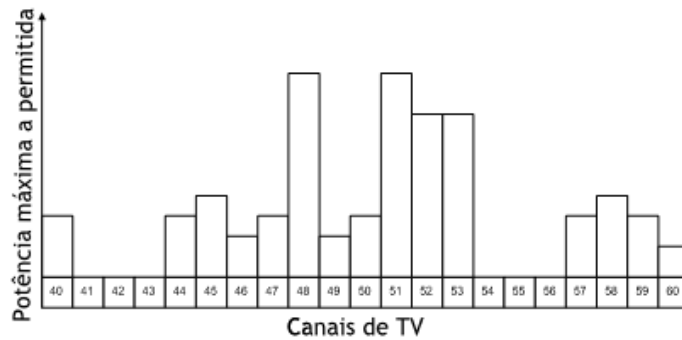


Figura 53 : Exemplo da disponibilidade dos recursos TVWS numa zona específica

O projecto COGEU propõe um processo de atribuição de frequências TVWS centralizada numa entidade chamada *broker*, apresentada na referência [32]. Para validar a abordagem da proposta, investigam-se os algoritmos de atribuição dinâmica de TVWS, avaliando-se o seu desempenho através de simulações, a fim de garantir o fornecimento de uma solução óptima na atribuição de canais disponíveis num sistema de mercado secundário. O objectivo é fornecer QoS num mercado de secundários sobre TVWS, maximizar a atribuição do espectro e evitar interferências com sistemas dos utilizadores primários (isto é, DVB-T e *Programme Making and Special Events* - PMSE). Mais especificamente, o algoritmo de atribuição é essencial para a estabilidade da arquitectura de rede global do COGEU, reduzindo os custos gerais do sistema de atribuição de espectro e minimizando o risco de perda do espectro no futuro, como a necessidade de negociações adicionais e atrasos de reconfiguração. Além disso, no contexto de processo global de atribuição, o COGEU investiga os procedimentos de gestão de recursos provenientes da exploração de *broker*. De acordo com este processo, a rede LTE aproveita as portadoras extras TVWS, adquiridas através do mecanismo de atribuição TVWS implementado pelo *broker*. Nesta dissertação investigam-se algoritmos simples de RRM para combinar entre aéreas tradicionais do LTE com as portadoras extras TVWS.

Neste capítulo, abordam-se os objectivos e exemplos da atribuição dinâmica dos TVWS. Apresenta-se o módulo Player-RRM e descreve-se as suas funcionalidades. O módulo monitoriza e configura a rede rádio, avalia e otimiza os recursos LTE para os dois algoritmos na atribuição de espectro de LTE sobre TVWS. Finalmente, é feita uma avaliação do seu desempenho.

Atribuição dos TVWS

Serão utilizados diferentes regimes do espectro para apoiar a partilha e/ou negociação de recursos de espectro. Mais especificamente, os regimes do espectro têm como finalidade promover a partilha de bens comuns, mas não proporcionam uma QoS adequada para algumas aplicações. Para aplicações que requerem acesso esporádico e para os quais as garantias de QoS são importantes, com licenciamento espectro em tempo real, os mercados *Secondary*

Spectrum Market são a melhor solução. A negociação também permite um comércio de espectro com um sistema de legal (de “direitos”), estabelecendo assim um mercado de secundário de empréstimo (*leasing*) de espectro e ou de leilão de espectro. Este modelo tem o potencial para permitir que as pequenas empresas se insiram no mercado de espectro, tendo acesso a TVWS. O acesso é cobrado com base na utilização do espectro. Assim, aumenta-se a concorrência e a inovação no sector das telecomunicações.

Ao contrário das bandas de frequências não licenciadas que temos actualmente, o sistema primário e secundário coordenam-se directamente entre si, fazendo o possível para proteger o QoS dos utilizadores primários e secundários. Nesta coordenação explícita, o titular da licença executa um algoritmo de controlo de admissão, que só permite que os utilizadores secundários se liguem se a QoS de ambos (primário e secundário) for adequada. O titular da licença também utiliza um algoritmo inteligente de atribuição de frequências para determinar a frequência de operação autorizado para o sistema secundário, uma vez que os aspectos económicos associados a estas transacções prevêm incentivos para maximizar a utilização do espectro. Os utilizadores secundários fazem o pedido de acesso ao espectro dinamicamente, somente quando o espectro é necessário.

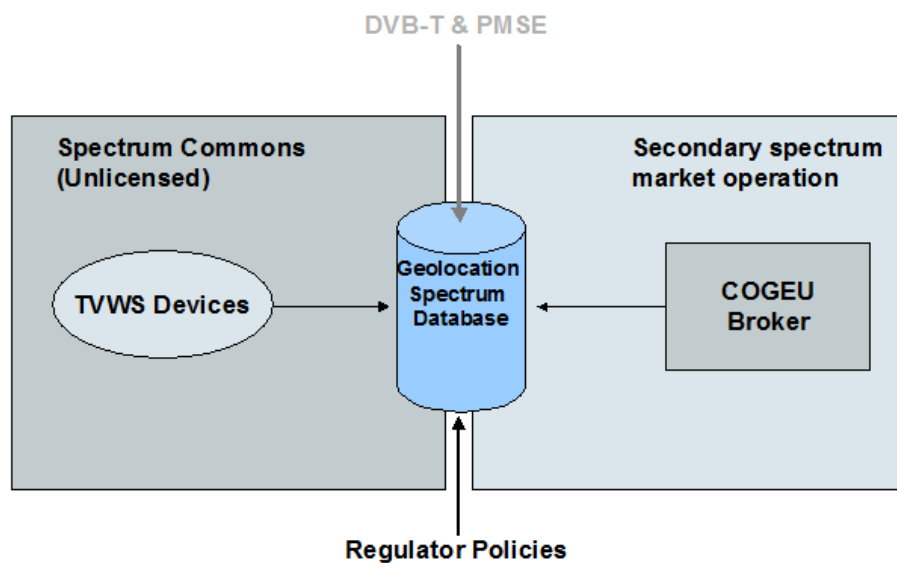


Figura 54 : Arquitectura de rede do projecto COGEU

O modelo de referência da arquitectura COGEU foi proposto em [32] e é apresentado na Figura 54. A arquitectura é dividida entre o *Spectrum Commons* e o *Secondary Spectrum Market*. O *Spectrum Commons* é baseado no espectro livre sem garantia de QoS (como no WiFi), sendo obrigatório usar o *sensing* e a geolocalização. O *Secondary Spectrum Market* é baseado na venda dinâmica e temporária do espectro, com garantia de QoS (como no UMTS), e na atribuição de espectro com priorização para as identidades de emergência pública. Sendo centralizado no *broker* utilizando a base de dados de geolocalização e sem a utilização do *sensing*. Entretanto, a não utilização do *sensing* só é garantida se todos os utilizadores primários (PSME e microfones sem fios) estarem protegidos num canal (“*safe harbor*”).

A base de dados geolocalização inclui informações sobre o número de canais TVWS disponíveis e as suas características em termos de níveis de potência de emissão. A base de dados de geolocalização também inclui registos referentes a canais utilizados pelos sistemas tradicionais, como o DVB-T e o PMSE, que devem ser protegidos através de um sistema de transmissão por parte dos utilizadores secundários. Diferentes sistemas secundários operam com prioridades diferentes em termos de acesso aos TVWS. Por exemplo, sistemas secundários podem oportunisticamente utilizar os canais disponíveis TVWS definidos na base de dados de geolocalização. Estes sistemas são tratados como sistemas de baixa prioridade sem suporte de garantia de QoS através do regime *spectrum commons*. Prevê-se que uma parte do espectro seja designada para o *spectrum commons*, onde o *broker* não será necessário. Por outro lado, se o comércio de *Secondary Spectrum Market* ocorrerá por meio de intermediários (como o *broker*). O *broker* de espectro, como proposto pelo projecto COGEU, é responsável pela atribuição de acesso ao espectro TVWS sob regime de mercado *Secondary Spectrum Market*. Ele incorpora um processo de atribuição de espectro ideal para sistemas secundários, tendo em conta os métodos de optimização, os preços do espectro e métodos de leilão de espectro. Este objectivo centra-se especificamente sobre esta atribuição de recursos de rádio administrada pelo *broker*.

Como é antecipado por COGEU, adopta-se uma topologia centralizada com um *broker* de negociação com os sistemas de *Secondary Spectrum Market*. A Figura 55 apresenta a configuração de rede do projecto COGEU adoptando o modelo de mercado do espectro com um *broker* centralizado.

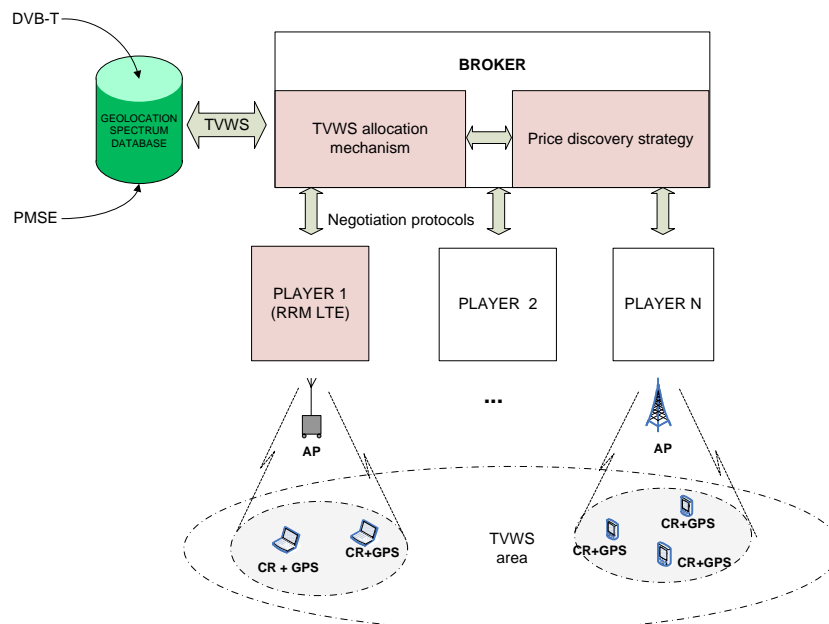


Figura 55 : Visão geral da configuração da arquitectura do *Secondary Spectrum Market* do projecto COGEU [33]

Na Figura 55 apresenta-se, a "rosa", os blocos que têm contribuição para o RRM. Mais especificamente, o bloco *TVWS allocation mechanism* incorpora o algoritmo de correspondência entre os TVWS fornecidos pela base de dados de localização geográfica e a procura de *players*. O bloco *Price discovery strategy* está associado com os métodos de descoberta de preços nos leilões de espectro. Finalmente, o bloco *Player 1 (RRM-LTE)* faz a gestão dos recursos de rádio, que são externos ao funcionamento do *broker*. Estes procedimentos visam o RRM, o fornecimento de QoS garantido para os utilizadores móveis (através de LTE sobre TVWS). Neste caso, o operador LTE actua como um cliente do *broker*.

Objectivos da atribuição dos TVWS

Os primeiros objectivos gerais da atribuição do espectro são a maximização da utilização TVWS e a minimização da fragmentação do espectro. No comércio secundário, os *players* entram e saem do mercado ao longo do tempo, e obtêm os canais TVWS disponíveis numa colecção de fragmentos discretos de espectro. Esta "fragmentação do espectro" significa que uma parcela significativa do espectro, enquanto livre, é efectivamente utilizável. No entanto se houver muita fragmentação, pode ocorrer, de não haver o mínimo exigido de forma obter uma faixa contínua de espectro. Este problema deve ser considerado e se deve investigar técnicas de atribuição aos utilizadores secundários de forma eficiente.

No modelo do *broker*, uma questão importante que deve ser considerada é a manutenção da QoS nos sistemas secundários, evitando interferências entre os sistemas secundários usando o TVWS, facilitando a coexistência pacífica entre os utilizadores. Neste contexto, o RRM é responsável pela utilização eficiente dos recursos e pela garantia do QoS. Um objectivo adicional de atribuição do espectro é a maximização da eficiência económica da operação de venda de espectro, através da adopção de algoritmos capazes de oferecer resultados otimizados em termos de comércio de espectro. A garantia de QoS para sistemas secundários sobre o TVWS e a rentabilidade do *broker* são duas condições importantes para o modelo viável de negócios preconizado nesta dissertação pelo projecto COGEU.

Há uma série de parâmetros/factores que influenciam a atribuição do espectro no contexto do caso de utilização do LTE. Estes factores têm que ser tomados em consideração durante o processo de atribuição do TVWS, a fim de alcançar a eficiência máxima na utilização do espectro secundário. Além disso, estes factores reflectem as necessidades dos diferentes utilizadores para o acesso sem fios. Eles incluem (mas não limitado a):

- Potência emitida (influencia a radiação electromagnética) - quanto maior for a potência, mais elevada será a radiação electromagnética emitida fora da sua banda nominal e, conseqüentemente, existirá maior interferência com outros utilizadores nas bandas adjacentes;
- Requisitos do sistema de largura de banda;
- Preço do espectro;
- Propriedades RF da frequência de operação;

- Factor de popularidade da banda de frequência (a mais utilizada);
- O nível de tolerância do congestionamento do sistema - se ele pode partilhar recursos ou usá-las exclusivamente;
- Factor de localização - se o sistema está em áreas urbanas, suburbanas ou rurais;
- Condições da utilização da licença;
- Prioridade durante o período de emergência;
- Incentivos para encorajar ou desencorajar a utilização de banda de frequência, etc, [25].

Os factores acima citados serão considerados na atribuição do espectro dinâmico aos utilizadores secundários. Estes factores têm em consideração a região pretendida e o período de tempo em que são atribuídas as portadoras TVWS. A Tabela 21 apresenta uma lista de parâmetros ou factores que influenciam os casos de utilização em relação aos requisitos dos serviços na procura de espectro.

Tabela 21 : Parâmetros ou factores que influencia os casos de uso do COGEU em TVWS

Parâmetro/ Factor	LTE
Potência Mínima	4W
Largura de banda	10 MHz
Duração do acesso	2 Horas/dias
Preço do espectro	Preço X
Área de cobertura	Médio a Larga
Tolerância ao congestionamento	Flexível
Factor de localização	Flexível
Termos de licença	<i>Leasing</i> de longo prazo ou um contrato de arrendamento de curto prazo
Prioridade (ajustamentos adicionais)	Sempre ligada

Exemplos de atribuição de TVWS

Este capítulo apresenta um exemplo para ilustrar o processo geral de atribuição de TVWS. Este processo inclui três fases, conforme se descreve a seguir:

- Na primeira fase, o *broker* recebe informações de disponibilidade TVWS da base de dados geolocalização externa. A Figura 56 apresenta um espaço TVWS válido numa área geográfica específica. As possibilidades de espaços vazios são os blocos “não pretos”. Cada bloco na Figura 56 define um nível de potência permitida a transmitir

representado pela sua cor. Os "blocos vermelhos" são aqueles onde é permitido transmitir maior potência. Note-se que, neste exemplo, os canais 44, 45 e 46 são reservados pelo regulador para a utilização não licenciada (*spectrum commons* - acesso livre), portanto, estão fora do mercado. Os "blocos negros" não são permitidos para *White Space Devices* (WSD), porque estão ocupados por sistemas tradicionais como a DVB-T e sistemas PMSE.

- A segunda fase consiste na análise da procura de espectro. Consideram-se seguintes *market players* que exigem o acesso temporário a canais exclusivos de TVWS:
 - Telemetria (medição inteligente) durante o período nocturno (1 MHz);
 - Uma portadora FDD LTE (2x5 MHz) durante o período diurno, com cobertura macro;
 - Uma portadora FDD LTE (2x10 MHz) de forma contínua, com cobertura micro.

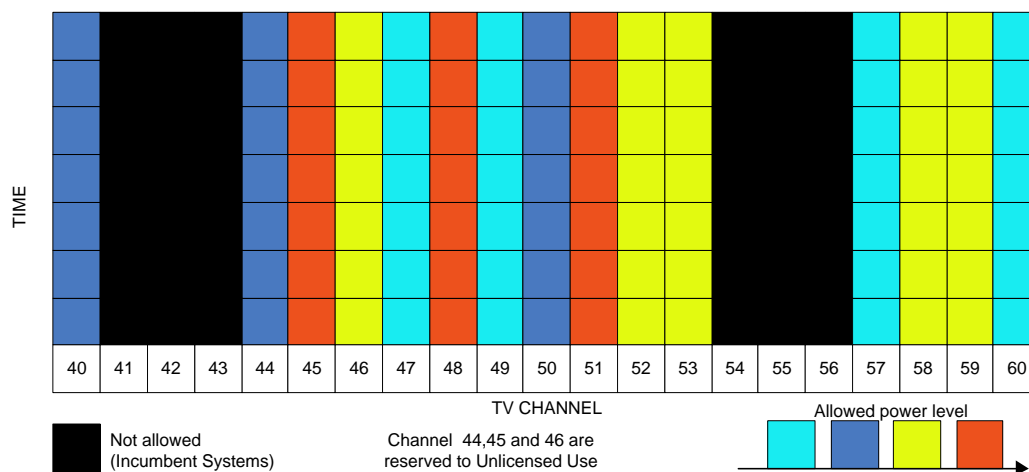


Figura 56 : Oferta válida de TVWS numa zona geográfica específica

- A terceira fase consiste no processo de atribuição de TVWS baseado em algoritmos de correspondência e de estratégias na descoberta do preço. Durante o processo de atribuição TVWS é necessário ter em conta as seguintes variáveis; o tempo, a frequência e a potência de emissão. A Figura 57 apresenta um perfil de atribuição de TVWS como uma possível solução para este problema de optimização. Neste exemplo são considerados canais de TV (8 MHz). Os critérios de protecção são levados em consideração, a fim de minimizar as interferências entre utilizadores secundários no (*uplink* do LTE) com os utilizadores primários nos receptores de DVB-T. As frequências usadas nas redes móveis devem ser atribuídas de forma que estejam os mais distantes possíveis dos canais DVB-T ("blocos negros"). Os restantes "blocos brancos" podem ser reservados para utilizações de emergência (identidade de emergência publica) ou o *broker* pode atribuir a novas aplicações que se podem surgir no futuro.

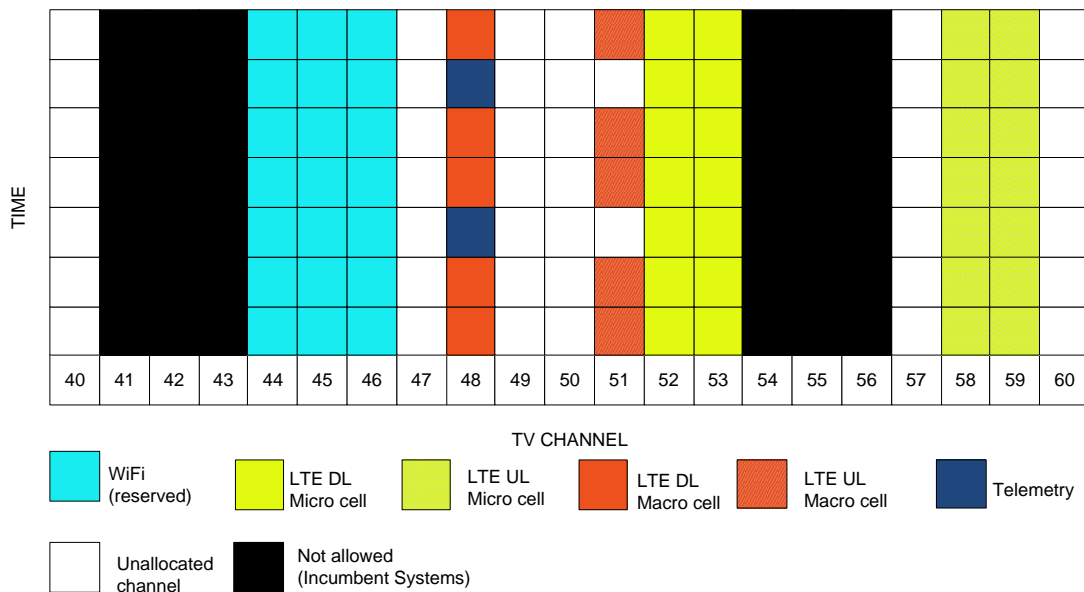


Figura 57 : Perfil de atribuição de blocos de TVWS

Em resumo, a atribuição dos blocos é feita pelas variáveis; tempo, frequência, potência de emissão e espaço no sistema *Secondary Spectrum Market*. Devem-se considerar os requisitos técnicos assim como aspectos económicos da comercialização do espectro. Num contexto geral, a atribuição dinâmica de espectro pode ser considerada como uma entrega dinâmica dos blocos de espectro em quatro dimensões, consistindo entre tempo, frequência, potência de emissão e espaço.

Gestão recursos do LTE sobre TVWS

Uma característica fundamental da tecnologia LTE é a sua capacidade de operar em diferentes larguras de banda, variando de 1.4 MHz a 20 MHz. Esta flexibilidade dá uma certa margem de liberdade para os operadores, podendo implementar várias soluções escaláveis de largura de banda na ocupação do espectro. No entanto, o desempenho está estreitamente relacionado com a largura de banda disponível, porque significa menos largura de banda menos sub-portadoras e consequentemente menos *Radio Resources* (RRs). Por outro lado mais largura de banda significa mais sub-portadoras e, portanto, mais RRs para realizar o serviço. Em termos práticos, o desempenho real obtido pelo LTE depende da atribuição das sub-portadoras na largura de banda, mas também na escolha da banda do espectro, dando aos operadores flexibilidade nas suas estratégias comerciais e técnicas.

O desenvolvimento de LTE nas frequências mais altas (poucos GHz) pode ser atraente para as estratégias focalizadas na capacidade da rede. No entanto, o LTE em frequências mais baixas (700 MHz) pode fornecer uma cobertura superior, mantendo uma capacidade adequada, que claramente vêm beneficiar a utilização de LTE sobre TVWS. Entretanto a qualidade de serviço (QoS) mínima deve ser considerado quando chega o momento de decidir quais os serviços a

utilizar nas frequências TVWS (ou nas frequências dos operadores telecomunicações tradicionais). Além disso, o *Service Level Agreement* (SLA) entre o operador e o utilizador deve também ser respeitado. Por conseguinte, a atribuição das portadoras TVWS assegurará a exclusividade da utilização do espectro e níveis baixos de interferência, para garantir a QoS. Nesse aspecto, o mercado secundário de espectro proposto pelo projecto COGEU é um regime adequado para a garantia de QoS em sistemas LTE que estendem os seus serviços ao longo das frequências TVWS. Pode-se assim adoptar a nova RRM e os novos procedimentos. Estes procedimentos devem ser vistos como um RRM comum que aproveita a novas parcelas do espectro (TVWS) que podem ser atribuídos aos utilizadores secundários. Estes procedimentos RRM são implementados na rede do operador (e não no sistema COGEU) e têm como objectivo optimizar os *resource Blocks* (RRs) LTE disponíveis fornecidos por operadoras de telecomunicações tradicionais e as portadoras TVWS (admitindo que a operadora já adquiriu os canais TVWS) e, portanto, a cobertura e capacidade, sem comprometer a qualidade de serviço.

Na Figura 58, o bloco *player 1* representa o operador LTE e a entidade RRM. Este bloco tem a responsabilidade de fornecer a QoS desejada, capacidade de sistemas e outros parâmetros para cada terminal. Além disso, a rede deve ter a capacidade de calcular quantas portadoras TVWS é necessário solicitar ao *broker*. O protocolo de negociação é feito com base em medições, quer fornecidas pelo terminal, quer pelo eNodeB (ou ambos).

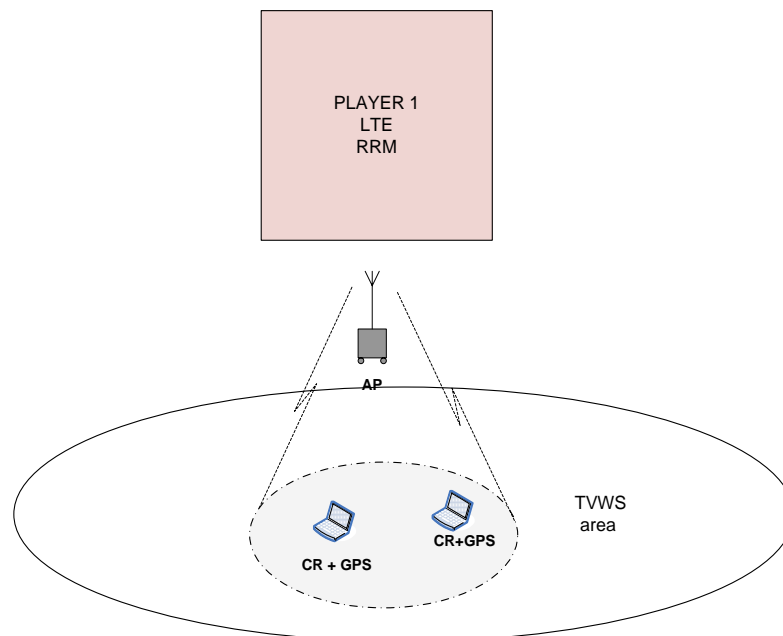


Figura 58 : Modulo LTE-RRM que integra na arquitectura do COGEU

Formulação do Problema de Gestão de Recursos

O 3GPP LTE é uma nova tecnologia de acesso de rádio que começará a ser implementado em grande parte em 2011. O LTE é um sistema de ruptura no sentido de que já não se utiliza mais a interface rádio baseado na tecnologia WCDMA, adoptando-se uma nova abordagem baseada na *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), caracterizado pela sua flexibilidade e pelos dois modos de duplex, TDD e FDD. A existência de várias larguras de banda possíveis e mecanismos de coordenação da interferência inter-celular são características importantes para garantir o sucesso do sistema num espectro de radiofrequências sobrelotado. É o primeiro sistema celular que depende principalmente de bandas já utilizadas para a sua implantação, o que significa que a o desenvolvimento do LTE será feita sobre o espectro libertado dos outros sistemas. O espectro de TV e, em particular, o TVWS, pode ser uma oportunidade não só para implementar o LTE, mas também para fazê-lo de uma forma inovadora, no âmbito de um novo paradigma de gestão do espectro (proposto pela COGEU) e preconizado nesta dissertação.

O TVWS aumentará o conjunto de *Radio Resources* (RR) disponível, que é capaz de fornecer serviços LTE. No entanto, a fim de tirar melhor partido destes novos recursos é necessário que o RRM seja inserido num contexto geral que junta as portadoras *Legacy* e as novas portadoras TVWS. Basicamente, o RRM deverá em cada momento garantir a QoS (por exemplo, *débito, atraso, jitter*), o *Key Performance Indicators* (KPIs) da rede e, ao mesmo tempo, permite obter maior capacidade no sistema de LTE. Para alcançar esse fim, a entidade RRM deve ser capaz de atribuir RRs de TVWS ou *Legacy*. Só com esta abordagem é possível otimizar a utilização dos RRs. Além disso, a fase de planeamentos do sistema deve agora considerar as novas portadoras fornecidas pela TVWS.

Assim, é possível melhorar a RRM em sistemas de LTE com características cognitivas (Rádios Cognitivos), usando algoritmos de RRM de forma a melhorar atribuição de sub-portadoras com potência e modulação adaptativa adequada. Além disso, explorando as capacidades da tecnologia OFDMA de acesso à rede o sistema adequa-se melhor as condições do ambiente. Por outro lado, as características cognitivas podem ser usadas para fornecer o sistema com o conhecimento que deriva de interacções passadas com o meio ambiente. Como resultado, o sistema será capaz de aplicar as soluções já conhecidas em tempo útil ao identificar um problema que já foi tratado no passado [27]. No entanto, apesar dos ganhos de optimização que é possível alcançar com esse trabalho, esses algoritmos de RRM são genéricos e não levam em consideração um aspecto fundamental da TVWS no contexto COGEU: um espectro compartilhado (utilizadores primários e secundárias) utilizadas na procura, sendo necessário um novo quadro de trabalho.

A extensão de LTE sobre o TVWS é particularmente adequada para fornecer capacidade adicional em redes de rádio próximo da saturação. O tráfego de rede não é constante e, normalmente varia de acordo com um padrão diurno: mais volume de tráfego durante a manhã, tarde e final da tarde, e diminuindo ao longo da noite (Figura 59). Estas variações de

tráfego podem até mesmo exibir padrões mensais e estão fortemente relacionados com o ambiente local (urbano, suburbano ou rural).

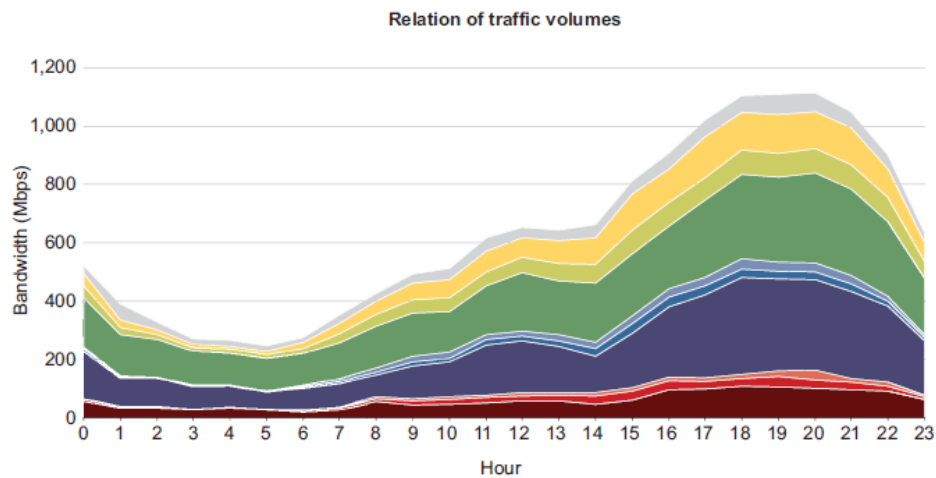


Figura 59 : Flutuações típicas do tráfego ao longo de um dia, extraído de [26]

Durante os picos de tráfego, a possibilidade de utilizar portadoras extras LTE sobre TVWS é uma mais-valia (a fim de fornecer uma capacidade extra e manter a QoS acima do valor mínimo). A operadora de telecomunicações tem um SLA que deve ser considerado e que define a qualidade mínima que o operador deve fornecer aos seus clientes. Mas para além da QoS mínimas, hoje os clientes e as entidades reguladoras têm que contabilizar a informação da qualidade prestada por cada operador de rede. Considerando essa informação, os utilizadores podem escolher o melhor prestador de serviços. Assim, os operadores que não querem perder os seus clientes devem ter, cada vez mais, a preocupação de prestar os seus clientes o melhor serviço.

Portanto, os operadores devem considerar várias opções para aumentar a qualidade do seu serviço. Uma das soluções é a utilização das portadoras TVWS atribuídas de forma permanente (como portadoras *Legacy*). Neste caso é importante determinar que existem ganhos relevantes em termos de capacidade e cobertura, se a operadora optar por desenvolver a sua rede com base apenas nas portadoras TVWS. Contudo, tem a desvantagens dos custos iniciais muito elevados para implementação dessa nova rede. Assim, este estudo é baseado numa solução híbrida, realizando-se simulações para as frequências de 2.6 GHz e 700 MHz (frequências *Legacy* e TVWS). Existem duas opções para analisar as vantagens da frequência TVWS: reduzir o número de estações base ou então usar o mesmo número de estações base já ocupadas para a frequência *Legacy*. A primeira opção aplica-se mais para um cenário de um novo operador de telecomunicações que deseja entrar no mercado, e que precisa de fazer o planeamento de rede desde o início. Na segunda opção podemos comparar o desempenho em termos de débitos binários e o aumento da capacidade entre as duas frequências (TVWS e *Legacy*). Esta opção é adequada para um operador telecomunicações já existente, que só pretende aumentar o desempenho dos serviços prestados aos seus clientes.

Os resultados obtidos para os três cenários (urbano, suburbano e rural) tiveram como escolha a segunda opção. Neste exercício, é sempre considerado o mesmo ambiente (urbano suburbano ou Rural), assim como a mesma configuração da rede e parametrização (em ambas as avaliações), com largura de banda de 5 MHz.

Nestas simulações são consideradas as nove classes de serviço do LTE (QClIs da Tabela 5), a distribuição dos utilizadores por classes de serviço é aleatória e a percentagem de utilizadores por classe de serviço são iguais (cada classe de serviço tem 11.1% dos utilizadores). Os parâmetros como, as distâncias entre as estações de base, a potência de emissão, a altura das estações de base, o ganho e o *tilt* das antenas são idênticos nas duas frequências, mas em conformidade para cada cenário.

Cenário Urbano

No cenário urbano, os resultados da simulação (Figura 60 e Figura 61) mostram que os TVWS podem fornecer uma capacidade de sistema superior relativamente aos operadores tradicionais, e assim disponibilizar uma maior eficiência espectral. A 2.6 GHz a probabilidade de cobertura de rádio é 94% e o débito binário médio é 11.6 Mbps. A 700 MHz, a probabilidade de cobertura sobe para 100% e o débito binário médio atinja o valor de 15.1 Mbps, o que representa um aumento significativo na capacidade do sistema, superior a 3.5 Mbps em média.

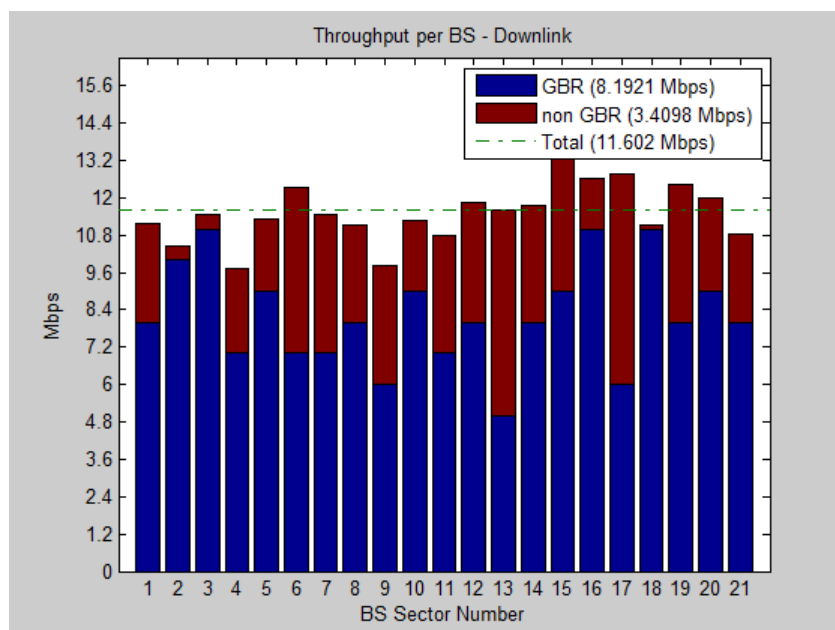


Figura 60 : Resultados para o débito binário em LTE na banda de 2.6 GHz, cenário urbano

O número de utilizadores nas duas simulações é baseado para que todas as estações de base fiquem sem capacidade, portanto todas as estações de base estão próximas da saturação. A partir dos valores obtidos para o débito binário médio das estações base, verifica-se que existe um ganho significativo na frequência de 700 MHz, devido principalmente ao facto de existir uma melhor eficiência espectral.

Os resultados obtidos para o número de utilizadores na frequência 700 MHz são superior e em relação aos da frequência 2.6 GHz. A 700 MHz obtêm-se 407 utilizadores enquanto que na frequência 2.6 GHz se obtêm 387 utilizadores, para os 21 sectores. Assim, conclui-se que na frequência 700 MHz é possível o operador disponibilizar capacidade superior, disponibilizando débito binário superior ou um aumento do número de utilizadores servidos.

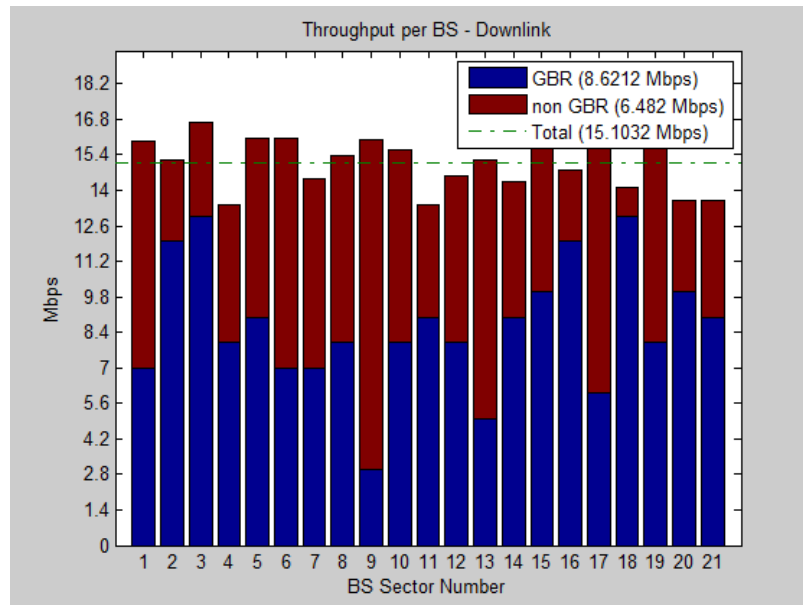


Figura 61 : Resultados para o débito binário em LTE na banda de 700 MHz, cenário urbano

Cenário suburbano

Os resultados da simulação (Figura 62 e Figura 63) mostram um aumento de capacidade de sistema ao utilizar-se os TVWS. Assim, a 2.6 GHz a probabilidade de cobertura de rádio é de 98% enquanto que o débito binários médio é 11.06 Mbps. A 700 MHz, a probabilidade de cobertura aumenta para 100% e o débito binário médio atinge 13.89 Mbps, mais de 2.83 Mbps, em média, o que representa um aumento significativo na capacidade do sistema. Os resultados no cenário suburbano revelam que os valores obtidos do para o débito binário médio das estações base tem uma ligeira diminuição, em relação ao cenário urbano. Tal deve-se à diminuição da eficiência espectral, o que resulta do aumento de *resource block* por cada utilizador. Portanto, o número de utilizadores servidos também diminuiram no caso dos 2.6 GHz, sendo de 377 utilizadores, enquanto que a 700 MHz o número de utilizadores é 390. Em conclusão, os ganhos dos 700 MHz em relação dos 2.6 GHz mantêm-se também no cenário de suburbano, mas com uma ligeira diminuição do débito binário médio das estações base em relação ao cenário urbano, pois a área a cobrir é mais vasta.

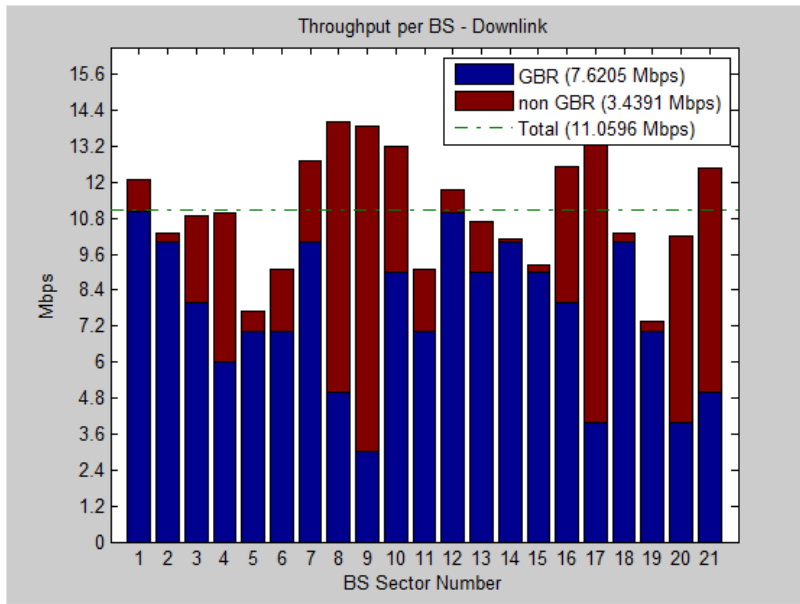


Figura 62 : Resultados para o débito binário em LTE na banda de 2.6 GHz, cenário suburbano

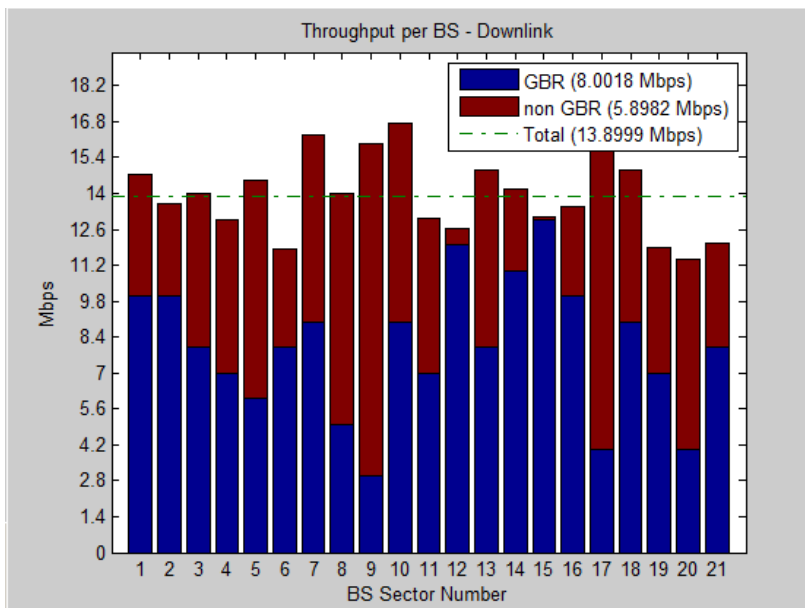


Figura 63 : Resultados para o débito binário em LTE na banda de 700 MHz, cenário suburbano

Cenário rural

Os resultados de simulação (Figura 64 e Figura 65) mostram que, no cenário Rural, a utilização da frequência TVWS também pode disponibilizar uma cobertura de rádio superior, podendo-se assim servir mais utilizadores. Portanto, o número de utilizadores servidos nos 2.6 GHz é de 307, enquanto que a 700 MHz o número de utilizadores é 500. Portanto, confirma-se que na frequência 700 MHz, no cenário rural, o número de utilizadores servidos tem um

aumento significativo. Assim, o operador telecomunicações em zonas rurais e remotas pode prestar serviço aos seus clientes, com o número de estação base bastante inferior em relação à frequência de 2.6 GHz. A 2.6 GHz, a probabilidade de cobertura de rádio é 79%, enquanto que a 700 MHz, a probabilidade de cobertura aumenta, e é de 100%. Este aumento do nível de cobertura representa aumento significativo na oferta de serviço. No entanto, em termos de débito binário o ganho não é tão significativo como nos outros cenários (um aumento de 1.55 Mbps em média, de 9.00 Mbps para 10.55 Mbps).

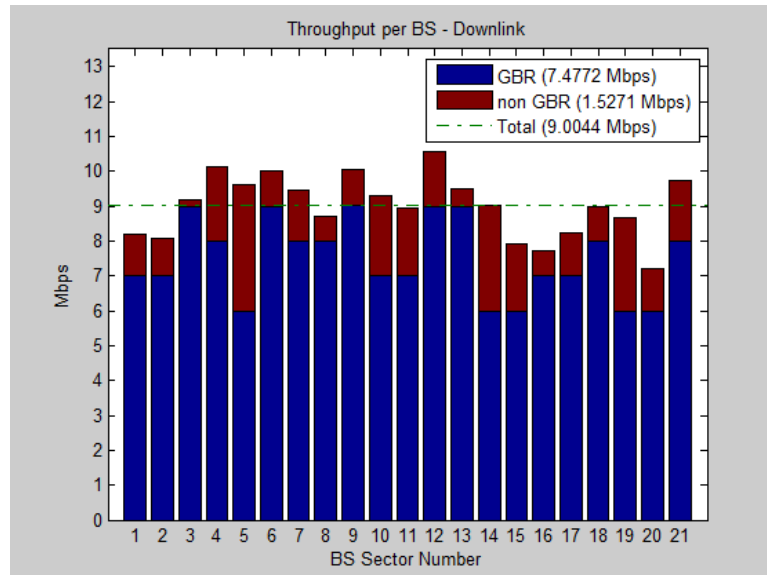


Figura 64 : Resultados para o débito binário em LTE na banda de 2.6 GHz, cenário rural

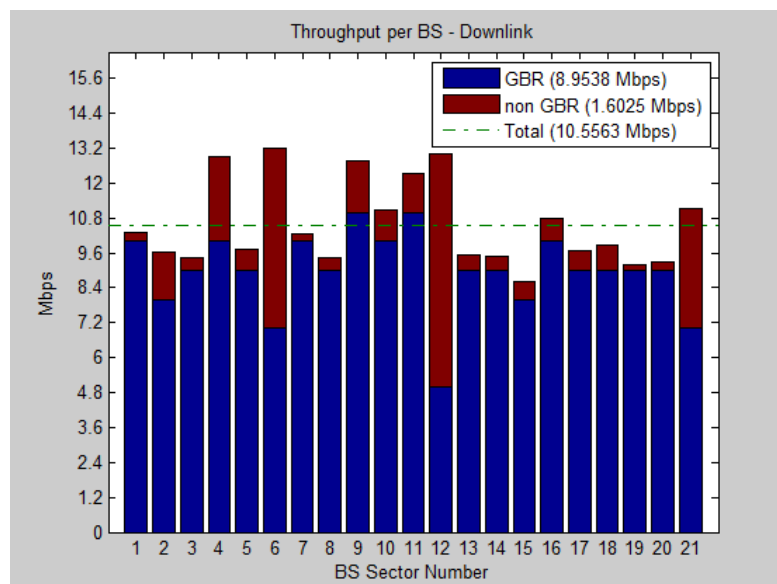


Figura 65 : Resultados para o débito binário em LTE na banda de 700 MHz, cenário rural

A partir dos resultados nos três cenários estudados, podemos concluir que a utilização da frequência TVWS é claramente vantajosa em termos de aumento da capacidade do sistema em cenários urbanos e suburbanos. Este facto deve-se principalmente aos valores superior de SNIR que se alcançam. A baixas frequências, a propagação do sinal em ambientes com edifícios é melhorada em relação ao que ocorre nas frequências Legacy. No caso do cenário Rural, o aumento de capacidade não é relevante, mas, em termos de cobertura, verificou-se um ganho elevado. Assim, no caso do cenário Rural pode-se servir a mesma região com menos estações base (reduzindo o CAPEX e o OPEX). Por outro lado, no cenário urbano e suburbano, podemos ter as mesmas estações base e aumentar o serviço disponível (obtendo maior eficiência espectral).

Descrição do Bloco RRM na atribuição dos TVWS

Como a atribuição de portadoras TVWS pelo *broker* trabalha numa base temporal, devem ser adicionadas novas funcionalidades ao sistema celular, para o suporte ao comportamento dinâmico preconizado pelo COGEU. Isto significa que, de acordo com o modelo COGEU, os TVWS são partilhados no domínio do tempo por *players* diferentes que competem por espectro. Esta abordagem inovadora para a gestão do espectro exige a definição das seguintes funcionalidades: monitorização de rede, avaliação da portadora TVWS, assim como a parametrização da rede e configuração, e o RRM.

- **Monitorização de rede** - A monitorização de rede é uma funcionalidade básica fornecida por qualquer sistema móvel que basicamente informa o operador sobre o estado da rede: o mau funcionamento do equipamento, o volume de tráfego, a qualidade do serviço, etc. No contexto particular do projecto COGEU, a monitorização será desencadeada a pedido de uma nova portadora (TVWS), se alguns requisitos de qualidade não foram atendidos. Basicamente, a rede define um conjunto de *Key Performance Indicators* (KPIs), que incluem normalmente a *Call Blocked Rate* (CBR) ou o débito mínimo para serviços de *best effort* (que são sempre controlados). Se alguns destes parâmetros não estão preenchidos (de acordo com o *threshold* definido) deverá solicitar-se uma portadora TVWS para resolver a situação de falta de capacidade;
- **Avaliação da portadora TVWS** - Através dos KPIs podemos calcular quantas portadoras serão necessárias para fornecer a QoS. Dado que várias portadoras podem ser necessárias em diferentes células no mesmo intervalo de tempo, existe a possibilidade de uma das portadoras já utilizadas poder ser reutilizada em várias células. Por isso, devemos ter o cuidado de estimar o número de portadoras realmente necessárias (pedidas ao *broker*). Essa avaliação requer um processo dinâmico no planeamento de rede. O pedido do operador ao *broker* deve incluir vários parâmetros, para além do número de portadoras e de largura de banda, como, por exemplo, o tempo e o local onde se presta o serviço. Cada portadora é "alugada" para um local específico. No entanto se a rede já tem uma portadora TVWS pode reutilizar

essa portadora num outro local distinto, evitando um novo pedido ao “*broker*”. Mas o operador deve sempre verificar se no novo local é ainda possível utilizar essa portadora reutilizável, através da consulta da base de dados de geolocalização disponibilizada pelo broker;

- **Parametrização da rede e configuração** - A portadora fornecida sobre TVWS é atribuída aos eNodeBs pelos operadores tradicionais. Cada portadora pode ser entregue a um ou a vários eNodeBs de acordo com o planeamento de rede, de forma a minimizar as interferências. Se o número de portadoras TVWS que são entregues é inferior ao solicitado, a rede deve decidir se apenas usa as portadoras TVWS entregues ou solicitar por mais portadoras;
- **RRM** - um RRM otimizado deve levar em consideração a disponibilidade dos TVWS e decidir particularmente qual é a melhor portadora (ou a quantidade de sub-portadoras) para prestar o serviço em cada utilização; o que significa garantir a QoS e a otimização da capacidade do sistema.

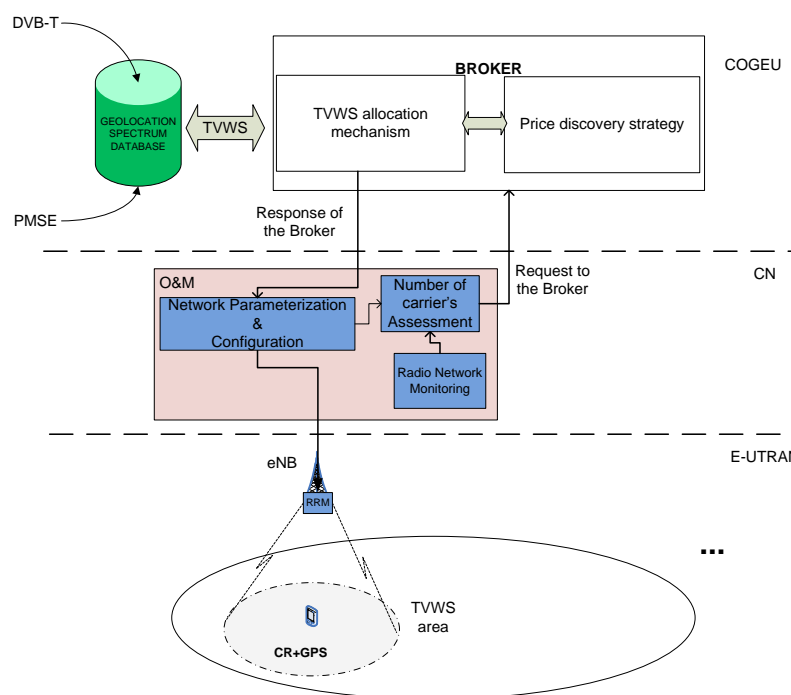


Figura 66 : Atribuição de Portadoras de LTE sobre TVWS e o RRM

A Figura 66 apresenta o bloco de operação e manutenção (O&M) que processa o controlo e atribuição das portadoras TVWS e das *Legacy*. Resumindo, a "Monitorização de rede" recebe as medições dos terminais (*Channel Quality Information - CQI*) e dos eNodeBs e envia essas informações para o módulo "Número de Avaliação da portadora TVWS", para se processar o número de TVWS que são necessárias (e fazer a solicitação ao *broker*). Em resposta, o *broker*

entrega as portadoras TVWS ao módulo "Parametrização da rede e configuração". Este módulo processa a atribuição de portadoras e verifica se existe a necessidade de disponibilizarem mais portadoras. Finalmente, as portadoras são entregues ao RRM de cada eNodeB. Na próxima subsecção elabora questões sobre RRM na arquitectura proposto para o COGEU, onde o principal objectivo é a partilha de portadoras *Legacy* com as portadoras TVWS, baseado em dois algoritmos.

Formulação do algoritmo

Tal como proposto no capítulo anterior, o uso do LTE no contexto de TVWS envolve quatro etapas:

- Monitorização de rede;
- Avaliação da portadora TVWS;
- Parametrização da rede e configuração;
- RRM.

Para implementar esta solução, somente a última etapa (onde ocorre a atribuição da portadora ou o escalonamento) deve ser dinâmica e automática. As outras etapas podem ser realizadas manualmente. Todo este processo é cognitivo para melhor utilização do espectro disponível.

O WWRF-WG6 [27] propõe uma arquitectura funcional para a gestão do espectro e para os recursos de rádio adaptativos e de sistemas reconfiguráveis, ou seja, a *Dynamic Network Planning and Management* (DNMP). A DNMP avalia o número de portadoras necessárias e atribui nas diferentes células/sectores, a fim de minimizar as interferências e maximizar a capacidade e a cobertura. Está fora do objectivo desta dissertação investigar qualquer solução DNMP. No entanto, para fins de simulação aplica-se um algoritmo simples para identificar as portadoras TVWS (número e localização), a fim de se evitarem situações de interferência elevada.

Em [28], é proposto um algoritmo que atribui portadoras com maior *Channel Quality Indicator* (CQI) nas frequências mais elevadas, atribuindo-se as restantes portadoras em frequências mais baixas. No nosso caso, essas portadoras são os TVWS. Outras abordagens têm sido estudadas [29], como agregação de portadoras LTE e coordenação da transmissão multi-ponto (Coordinated multi-point transmission - CoMP) baseado em MIMO, o que pode aumentar a relevância da utilização dos TVWS.

Os capítulos seguintes descrevem a fase de atribuição do utilizador, em particular os algoritmos responsáveis pelo RRM. O algoritmo deve levar em consideração a disponibilidade TVWS e decidir qual é a melhor portadora, Legacy ou TVWS, o que significa garantir a QoS e ter a capacidade de otimizar o sistema. A banda *Legacy* usa frequência mais elevada (2.6 GHz) e enquanto que a banda TVWS utiliza a frequências inferior (700 MHz). Assim, propõem-se e avaliam-se dois algoritmos:

Algorithm 1

O “*Algorithm 1*” é mais simples: as operadoras tradicionais atribuem portadoras TVWS aos terminais quando as portadoras *Legacy* estão totalmente ocupadas. Nessa atribuição não é feita uma avaliação específica baseada no QoS. Supõe-se que já foi feita uma avaliação prévia para a cobertura TVWS. O “*Algorithm 1*” é uma solução mais simples (comparativamente ao segundo algoritmo) do ponto de vista na implementação da rede celular. O utilizador, neste caso, solicita sempre o serviço a uma portadora *Legacy*; só nos casos em que a portadora *Legacy* estiver totalmente ocupada é que a rede informa o utilizador que será atribuído uma portadora TVWS.

```
IF (Clegacy_usedRRB + Clegacy_needRRB <= Clegacy_RRBmax) THEN
  Allocate Legacy carrier to user
ELSE IF (Ctvws_usedRRB + Utvws_needRRB < Ctvws_RRBmax) THEN
  Allocate TVWS carrier to user
ELSE
  User blocked
END
```

Algorithm 1: Pseudo-código para o “*Algorithm 1*” para a atribuição de LTE sobre TVWS

No pseudo-código do “*Algorithm 1*” que é apresentado verifica-se que a soma dos números de *Radio Resource Blocks* (RRBs) requeridos mais o número de RRBs que já foram atribuídos não é maior do que a capacidade máxima da respectiva portadora (TVWS ou *Legacy*); caso os dois RRBs estejam totalmente ocupados o terminal é bloqueado.

Algorithm 2

O “*Algorithm 2*” apresentado diz respeito à fase de atribuição das portadoras. Pretende-se proporcionar ao utilizador a QoS contratada ao operador de rede. Assim, o operador deve otimizar a capacidade do sistema e obter uma solução simples e eficaz de atribuição de portadoras (*Legacy* ou TVWS). A atribuição dos *radio resources* (RR) necessários para prestar um serviço depende da qualidade do sinal de rádio, particularmente do valor de SNR na recepção. Assim, em geral quando o SNR diminui o número de *radio resources* aumenta, o que corresponde à disponibilização significa que menos recursos para os utilizadores. Assim com o aumento de utilizadores o operador fica com menos capacidade de resposta (de fornecimento de serviço) e, no limite, os utilizadores ficam bloqueados.

O “*Algorithm 2*” permite que estes utilizadores não ficam bloqueados e que o operador continue a fornecer o serviço. Assim, com o “*Algorithm 2*”, o terminal tem que fornecer os parâmetros sobre a qualidade do sinal recebido (CQI) em ambas as portadoras (*Legacy* e TVWS) e enviar essa informação para o núcleo da rede (*Core Network*), que avalia qual das portadoras ocupa menos recursos de rádio para prestar o serviço solicitado. A portadora

utiliza menos recursos é seleccionada, aumentando a capacidade do operador fornecer o serviço. No caso de os RRBs serem os mesmos para ambas portadoras, é atribuída ao utilizador a portadora *Legacy*. Se não existirem portadoras *Legacy* para atribuir são utilizados, como último recurso, os RRBs na portadora TVWS.

A atribuição de *radio resources* para o utilizador não é um processo linear é feita, mas sim por escalões, que dependem da *Modulation and Coding Schemes (MCS)* atribuído a cada portadora. A cada valor de SNR é atribuído um MCS, ou seja, no caso de o SNR ser baixo é necessário um maior número de RRBs. No caso de o SNR ser elevado requerem-se menos RRBs. Mas se o SNR já oferece o MCS de ordem superior, obtendo-se já um mínimo de RRBs, o aumento do SNR será inútil. O conhecimento do SNR e/ou CQI constituem uma informação valiosa para a atribuição dos RRBs a cada utilizador, permitindo decidir sobre quais bandas de frequência que se devem atribuir os recursos.

Resumindo, o utilizador é atribuído a uma portadora *Legacy* se o número de RRBs necessários para fornecer o serviço solicitado é o mesmo ou menor do que as portadoras TVWS. Neste caso, o algoritmo ainda verifica se há capacidade disponível nas bandas *Legacy*. Se existir essa capacidade disponível o utilizador é atribuído à portadora *Legacy*; caso contrário, é atribuído à portadora TVWS. Por outro lado, se o tamanho dos RRBs necessários em TVWS é inferior em relação aos da banda *Legacy*, será seleccionada a portadora TVWS, caso se verifique que há capacidade disponível nas bandas TVWS. Senão, os RRBs são atribuídos à portadora *Legacy*. No fim, se verificar que as portadoras TVWS e *Legacy* não foram atribuídas o utilizador é bloqueado. A seguir, apresenta o pseudo-código do "*Algorithm 2*":

```
IF Ulegacy_needRRB ≤ Utvws_needRRB THEN
  IF Clegacy_usedRRB + Ulegacy_needRRB ≤ Clegacy_RRBmax THEN
    Allocate Legacy carrier to user
  ELSE IF Ctvs_usedRRB + Utvws_needRRB ≤ Ctvs_RRBmax THEN
    Allocate TVWS carrier to user
  ELSE
    Block user
  END
ELSE
  IF Ctvs_usedRRB + Utvws_needRRB ≤ Ctvs_RRBmax THEN
    Allocate TVWS carrier to user
  ELSE IF Clegacy_usedRRB + Ulegacy_needRRB ≤ Clegacy_RRBmax THEN
    Allocate Legacy carrier to user
  ELSE
    Block user
  END
END
```

Algorithm 2: Pseudo-código para o "*Algorithm 2*" para atribuição da portadora LTE ou TVWS

Estes algoritmos são implementados no simulador descrito no capítulo 5. O simulador implementa os “Algorithm 1” e “Algorithm 2” descritos neste capítulo. A Figura 67 apresenta a interface gráfica utilizada nos cálculos relativamente aos dois algoritmos.

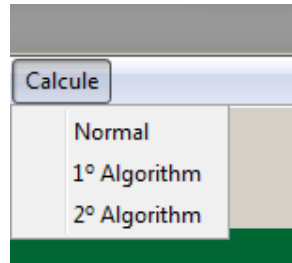


Figura 67 : Interface gráfica do simulador LTE (“Algorithm 1” e “Algorithm 2”)

Avaliação de desempenho inicial

A fim de obter os resultados da avaliação, foram simulados os dois algoritmos (“Algorithm 1” e “Algorithm 2”) de acordo com um cenário urbano, suburbano e rural. O cenário é composto por 19 BS de 3 sectores e uma distribuição de utilizadores aleatória. A Tabela 22 apresenta mais detalhes sobre os parâmetros de simulação.

Tabela 22 : Parâmetros das simulações do LTE com o “Algorithm 1” e “Algorithm 2”

	Urban	Sub - Urban	Rural
BS TxPower	33 dBm	34 dBm	36 dBm
Antenna Gain	12 dBi	12 dBi	14.5 dBi
BS antHeight	35 m	35 m	56 m
BS antType	120 deg	120 deg	120 deg
Tilt	9.5°	8°	0°
BS Cable Losses	2 dB	2 dB	2 dB
Duplex mode	FDD	FDD	FDD
CarrFreqDL (Legacy)	2110-2115-2120 MHz	2110-2115-2120 MHz	2110-2115-2120 MHz
CarrFreqUL (Legacy)	1920-1925-1930 MHz	1920-1925-1930 MHz	1920-1925-1930 MHz
TVWS carriers	630, 635, 640 MHz	630, 635, 640 MHz	630, 635, 640 MHz
BW	5 MHz	5 MHz	5 MHz
PropModel	Erceg, Okumura-Hata	Erceg, Okumura-Hata	Erceg, Okumura-Hata
Cell Radius	0.75 Km	1.125 Km	3.5 Km
Sectors/site	3	3	3
UE txMaxPower	23 dBm	23 dBm	23 dBm
UE antHeight	1.5 m	1.5 m	1.5 m
UE antType	Omnidireccional	Omnidireccional	Omnidireccional
RbDL	1 Mbps	1 Mbps	1 Mbps
RbUL	256 Kbps	256 Kbps	256 Kbps

A primeira simulação foi realizada somente na banda de 2.6 GHz, a fim de se identificarem os sectores (monitorizar a rede) com *Call Bloked Rate* (CBR) superior a 2%. Depois, foram avaliados o número de portadoras necessárias no *network monitoring* (NM). Neste processo, foi utilizada uma regra muito simples para minimizar a interferência e avaliar o número de portadoras necessárias: se uma portadora TVWS é atribuída a um sector, a portadora não pode ser usada em sectores vizinhos. Esta é uma solução bastante conservadora, mas garante um baixo nível de interferência co-canal. Os resultados foram obtidos assumindo que as portadoras são fornecidas pelo *broker* (no contexto do plano de atribuição de TVWS) com base na avaliação da rede (parametrização e configuração de rede), a fim de se garantir o "melhor serviço possível" com as portadoras TVWS disponíveis.

Depois de se atribuírem as portadoras TVWS a sectores com um CBR superior a 2%, são avaliados o "*Algorithm 1*" e "*Algorithm 2*" na medição de desempenho, através do número de *Radio Resource Blocks* (RRBs) necessários para prestar o serviço a cada utilizador.

Como o LTE usa o OFDMA, as portadoras são atribuídas através um número específico de subportadoras por uma quantidade de tempo pré-indeterminado. Nas especificações LTE, os RRBs são distribuídos em duas dimensões, pela frequência e pelo tempo. A atribuição de RRBs é tratada pelas BS (eNodeBs). Um RRB é definido como um conjunto de 12 subportadoras consecutivos para um *slot* com (0.5 ms) de duração. Mas o menor elemento de repartição dos recursos atribuídos pelo escalonador do eNodeB são dois RRBs, ou seja, são 12 subportadoras consecutivas por uma *sub-frame* (1 ms).

Resultados obtidos nas simulações

As simulações são realizadas para todos os cenários (urbano, suburbano e rural) considerando os 21 sectores, zona central da área de simulação. Nas simulações foram consideradas uma classe de serviço *Guaranteed Bit Rate* (GBR) (DL: 1 Mbps UL 256 kbps) onde os TVWS são utilizados pelo LTE sem alterações significativas na arquitectura LTE e nos protocolos.

Cenário urbano

A Figura 68 apresenta a quantidade de RRBs utilizada por sector nas frequências *Legacy* (2.6 GHz) e TVWS (700 MHz) com o "*Algorithm 1*" e "*Algorithm 2*", no cenário urbano.

Os números de utilizadores servidos para o "*Algorithm 1*" é de 202, no caso do "*Algorithm 2*" o número de utilizadores é de 198. Sendo o número de utilizadores praticamente o mesmo. Contudo, o número médio de RRBs por utilizador é 4692, com o "*Algorithm 1*" e 4096 com o "*Algorithm 2*", menos 596 RRBs. Em conclusão, com o "*Algorithm 2*" é possível otimizar a utilização de RRBs e alcançar maior capacidade (utilizando os mesmos RRBs). Assim sendo, os resultados destas simulações indicam que os TVWS podem fornecer uma capacidade extra para as células LTE com falta de capacidade.

Urban

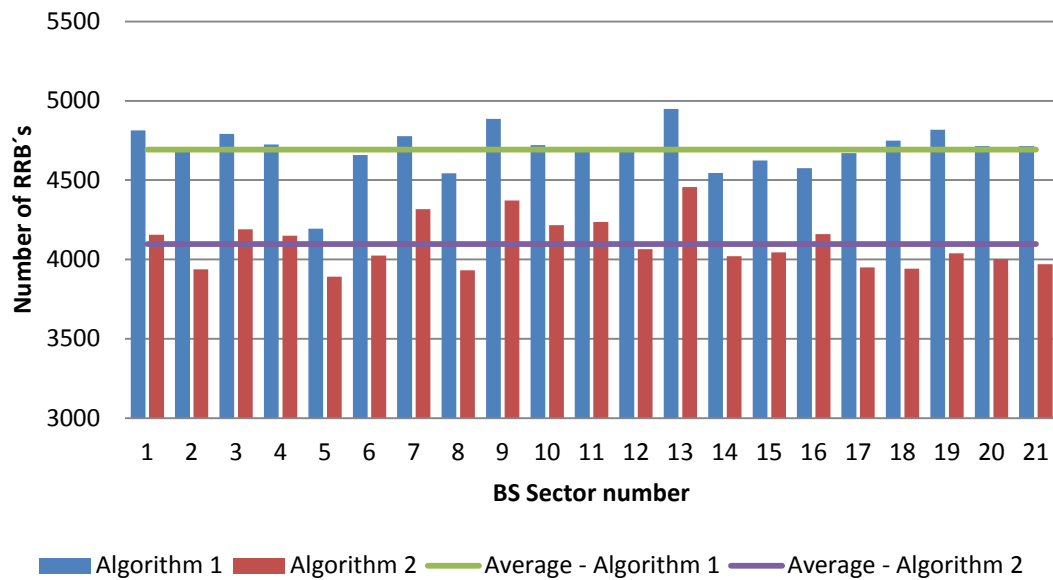


Figura 68 : RRB necessários por sector usando *Algorithm1/Algorithm2* no cenário Urbano

Cenário suburbano

A Figura 69 apresenta a quantidade de RRBs por sector utilizada nas frequências *Legacy* (2.6 GHz) e *TVWS* (700 MHz) com o “*Algorithm 1*” e “*Algorithm 2*”, no cenário Suburbano.

Sub-Urban

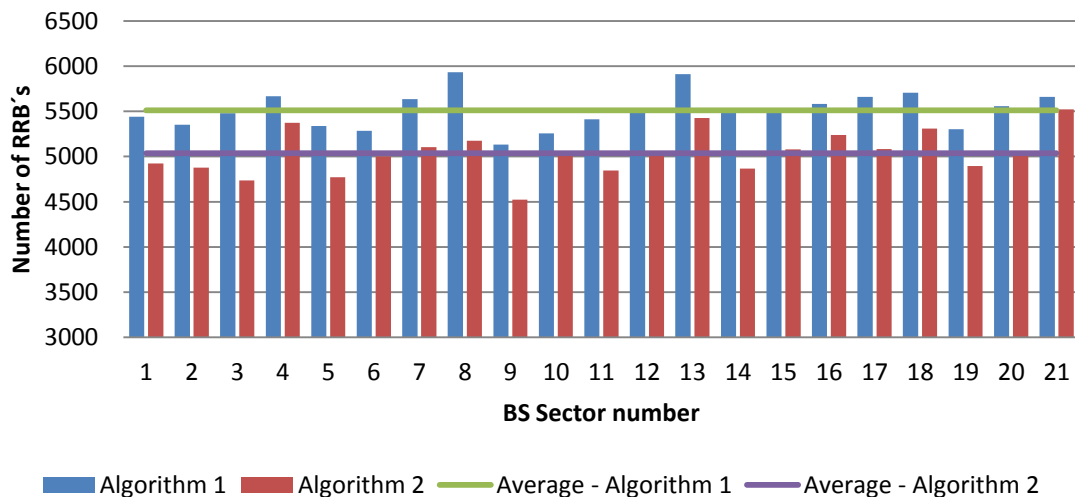


Figura 69 : RRB necessários por sector usando *Algorithm1/Algorithm2* no cenário Suburbano

No cenário suburbano, o número de utilizadores servidos é de 228 para o “Algorithm 1” e 230 para o “Algorithm 2”. No cenário suburbano, o número de utilizadores servidos aumenta em relação ao urbano. Este facto é devido ao aumento de eficiência espectral no “Algorithm 2”. Contudo, o número médio de RRBs por utilizador no cenário suburbano é 5512, com o “Algorithm 1” e 5037 com o “Algorithm 2”, menos 475 RRBs. Em conclusão, se utilizar o mesmo número de RRBs com o “Algorithm 2” é possível otimizar a utilização de RRBs e alcançar maior capacidade. Assim sendo, os resultados destas simulações indicam que os TVWS podem fornecer uma capacidade extra para as células LTE com falta de capacidade, como acontece no cenário urbano.

Cénario rural

A Figura 70 apresenta a quantidade de RRBs por sector utilizada nas frequências Legacy (2.6 GHz) e TVWS (700 MHz) com o “Algorithm 1” e “Algorithm 2” no cenário Rural.

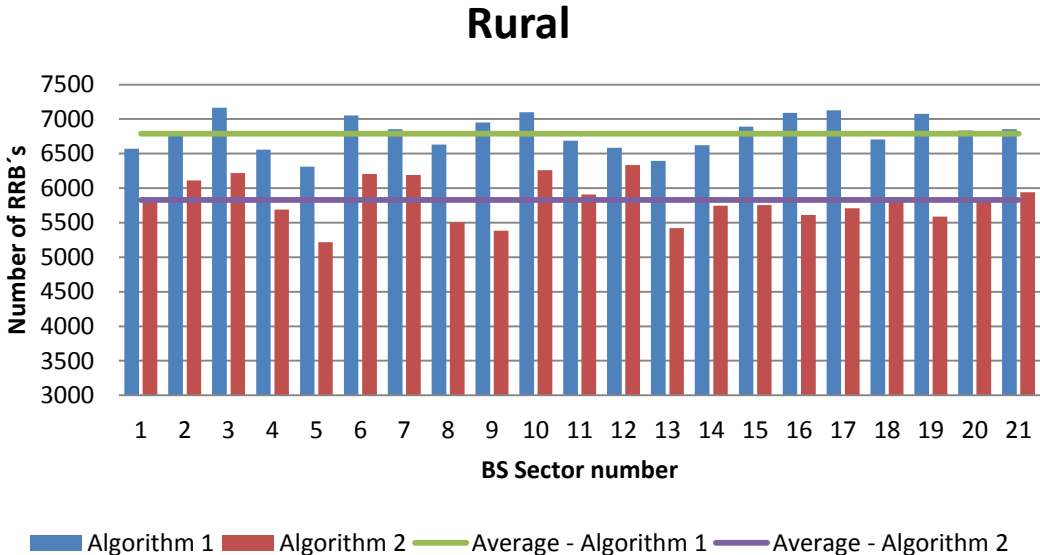


Figura 70 : RRB necessários por sector usando Algorithm1/Algorithm2 no cenário Rural

No cenário rural, o número de utilizadores servidos é de 230 para o “Algorithm 1” e 333 para o “Algorithm 2”. No cenário rural, o número de utilizadores servidos aumenta consideravelmente em relação aos cenários urbano e ou suburbano. Este aumento é devido, a uma cobertura mais vasta. No cenário rural, número médio de RRBs por utilizador é 6789, com o “Algorithm 1” e 5828 com o “Algorithm 2”, menos 960 RRBs. Esta diferença no número de RRBs é superior à dos outros cenários, tal como se apresenta na Tabela 23, onde se comparam os números de utilizadores e de RRBs entre os dois algoritmos utilizados para os três cenários considerados. Enquanto que nos cenários urbanos e suburbanos a diferença do numero de RRBs com o “Algorithm 2” não corresponde a um aumento significativo do número de utilizadores, no cenário rural suporta-se mais 103 utilizadores com o “Algorithm 2”.

A explicação da diferença é seguinte. Enquanto que o modelo de propagação Okumura Hata aplica-se à banda dos 700 MHz, para modelar a propagação a 2.6 GHz recorre-se ao modelo de propagação Erceg Extended, cujo comportamento em função da distância está representado na Figura 44. Nessa figura observa-se que a atenuação (*Path Loss*) é superior a 2.6 GHz (modelo Erceg Extended). Observa-se também que a diferença entre os resultados para os dois modelos é superior no cenário rural (relativamente aos cenários urbano e suburbano). É essa diferença superior no cenário rural que justifica a melhoria significativa do desempenho do “*Algorithm 2*” neste cenário. Em conclusão, é no cenário rural que se ocupam mais RRBs, sendo portanto, o cenário com pior desempenho a nível de eficiência espectral (com utilização de modulações/codificações de ordem superior). Em contrapartida a utilização do “*Algorithm 2*” leva a uma diminuição importante do número de RRBs e a um aumento do número de utilizadores servidos.

Assim sendo, os resultados destas simulações indicam que os TVWS podem fornecer uma cobertura vasta nas zonas rurais ou mais remotas.

Tabela 23 : Comparação dos números de utilizadores e RRBs entre os dois algoritmos nos cenários considerados

Cenários	Nº de utilizadores		Nº de RRBs		Diferença entre os “ <i>Algorithm 1</i> ” e “ <i>Algorithm 2</i> ”	
	<i>Alg. 1</i>	<i>Alg. 2</i>	<i>Alg. 1</i>	<i>Alg. 2</i>	Nº de utilizadores	Nº de RRBs
Urbano	202	198	4692	4096	+4	596
Suburbano	228	230	5512	5037	-2	475
Rural	230	333	6788	5828	+103	960

Avaliação dos resultados

Apesar do ganho de capacidade do “*Algorithm 2*”, existem alguns problemas de execução que devem ser aqui analisados com algum detalhe. Com o “*Algorithm 1*”, os operadores TVWS ou Legacy são atribuídos ao utilizador apenas considerando a disponibilidade de capacidade da portadora, não se tendo como avaliar periodicamente o número de RRBs necessário com base no *Channel Quality Information* (CQI). No entanto, como se apresenta na Figura 71 cada terminal reporta uma estimativa da qualidade instantânea do canal (CQI) para a estação de base, o *Scheduling* do *downlink* pode atribuir recursos aos utilizadores, tendo em conta a qualidade de canal. Em princípio, o *Scheduling* do terminal é atribuído numa combinação arbitrária de blocos de recurso com uma largura de 180 kHz em cada 1 ms de intervalo [30]. O

relatório periódico de CQIs implica que o utilizador deve decidir entre a banda TVWS ou *Legacy*, o que pode ser um inconveniente, a nível de processamento, para o uso do “*Algorithm 2*” sobre uma aplicação em tempo real. Esta limitação da tecnologia precisa ser cuidadosamente analisada.

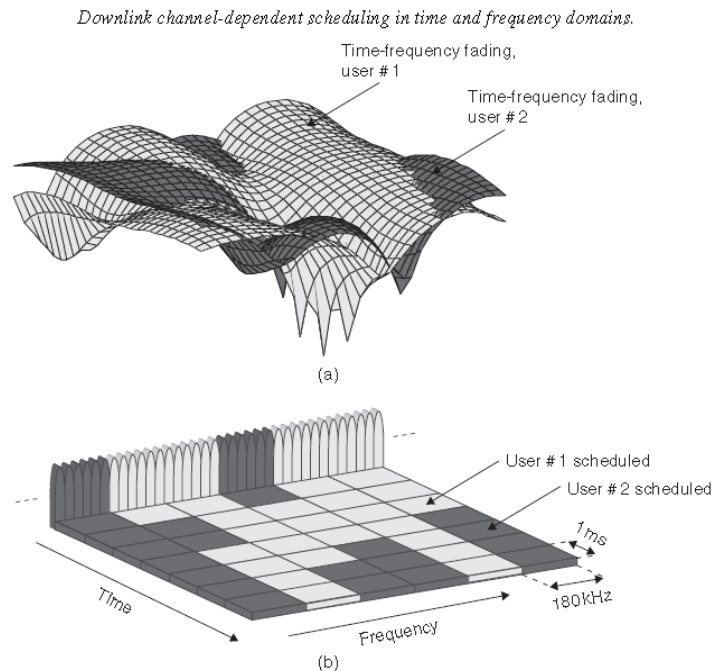


Figura 71 : Downlink scheduling resources per user [30]

A avaliação dos resultados relativamente aos dois algoritmos de gestão conjunta dos recursos de rádio mostra uma vantagem clara de seguir a abordagem, do “*Algorithm 2*”. Nos cenários urbano e suburbano ocorre o aumento da capacidade na prestação de serviços. No caso do cenário rural, ocorre o aumento de cobertura e do número de utilizadores servidos.

Sumários e Conclusões

O bloco de *Radio Resource Management (RRM)*, tem funcionamento separado do *broker*, ou seja, após o processo da atribuição temporária dos direitos exclusivos do TVWS ao operador de telecomunicações, ele é responsável pela atribuição de portadoras TVWS aos utilizadores secundários. O operador de telecomunicações de usar uma optimização conjunta dos recursos de rádio das portadoras TVWS (adquiridas a partir do *broker*) e das operadoras tradicionais (compradas a ao órgão regulador), sendo assim possível reduzir o número de estações base, disponibilizando-se o mesmo ou até maior rendimento. Esta atribuição conjunta é importante tanto para o operador de telecomunicações como para os utilizadores. Desta forma, o operador de telecomunicações pode diminuir o investimento e as despesas de operação. Os utilizadores podem experimentar melhores serviços em área de cobertura superiores. Como a atribuição das portadoras TVWS são de base temporal e local pelo *broker*, devem ser

adicionadas aos sistemas celulares novas funcionalidades, a fim de apoiar esse comportamento dinâmico: monitorização da rede, avaliação da portadora TVWS, parametrização da rede e configuração, e o RRM.

Basicamente, no “*Algorithm 1*” os recursos de rádio TVWS só são atribuídas se não houver capacidade disponível nas bandas *Legacy*. Por outro lado, o “*Algorithm 2*” avalia periodicamente a qualidade de ligação de rádio em cada banda (TVWS e *Legacy*). Com base nessa avaliação, quantificam-se os recursos de rádio que são necessários para prestar o serviço solicitado. O serviço é prestado a partir da banda frequências que consome menos recursos de rádio.

Apesar do melhor desempenho do “*Algorithm 2*”, a sua aplicação pode ser mais complexa porque em ambas as bandas é necessário o acompanhamento simultâneo e avaliar a qualidade da ligação de rádio. Para calcular a quantidade de recursos de rádio necessários para prestar o serviço é usado o *Channel Quality Information (CQI)*.

Neste sentido, para implementar uma solução baseada no “*Algorithm 2*”, a nova interface de rádio é dedicada exclusivamente à TVWS, ou é considerada uma solução híbrida. Uma solução híbrida utiliza uma interface diferente, com níveis físicos compartilhados (usando o mesmo MAC) chamado de *Multi-Radio Access (MRA)*. O MRA é geralmente considerado no contexto de diferentes tecnologias de acesso via rádio (*Radio Access Technologies - RATs*), por exemplo, HSDPA e Wi-Fi, mas aqui é apenas utilizado o LTE. Neste caso, pode-se designar *Multi-Band Access (MBA)*. A solução MBA pode fornecer todas as funcionalidades para implementar o “*Algorithm 2*” e disponibilizar o benefício adicional de suportar atribuições simultâneas de recursos de rádio em duas bandas de frequências, o que nos foi feita neste trabalho.

Os procedimentos do RRM provenientes da exploração dos TVWS são de direitos temporários na utilização dos TVWS. O RRM associado a uma extensão de LTE sobre TVWS tem como objectivo o fornecimento de QoS aos seus clientes do operador de telecomunicações de LTE. Utiliza-se uma optimização conjunta dos recursos de rádio das portadoras TVWS (adquiridos pelo broker) e dos operadores tradicionais utilizando o sistema LTE na frequência *Legacy*, de forma que os utilizadores utilizem serviços de melhor qualidade.

As simulações consideram uma classe de serviço *Guaranteed Bit Rate (GBR)* (DL: 1 Mbps UL 256 kbps) sendo os TVWS utilizados pelo LTE sem alterações significativas na sua arquitectura e protocolos. No cenário urbano, o número médio de RRBs por utilizador é 4692, com o “*Algorithm 1*”, e 4096 com o “*Algorithm 2*”, menos 596 RRBs. Com o serviço a 1 Mbps, no “*Algorithm 1*” utiliza-se em média a modulação e codificação de 16 QAM_{2/3}, enquanto que, no caso do “*Algorithm 2*”, tem-se em média 16 QAM_{4/5}. No caso do cenário suburbano, o número médio de RRBs por utilizador é 5512 com o “*Algorithm 1*”, e 5037 com o “*Algorithm 2*”, menos 475 RRBs. Com o serviço a 1 Mbps, no “*Algorithm 1*”, tem-se em média 16 QAM_{1/2} para o esquema de modulação e codificação, enquanto que, no caso do “*Algorithm 2*”, tem-se em média 16 QAM_{2/3}. No cenário rural, o número médio de RRBs por utilizador é 6789, com o “*Algorithm 1*”, e 5828 com o “*Algorithm 2*”, menos 960 RRBs. Com o serviço a 1 Mbps, no

“Algorithm 1”, tem em média QPSK_{4/5}, enquanto que, no caso do “Algorithm 2”, tem-se em média 16 QAM_{1/2}.

Os resultados das simulações indicam que os TVWS podem fornecer uma capacidade extra para as células LTE, superando a com falta de capacidade nos cenários urbano e suburbano. No caso do cenário rural, como a ordem de modulação e codificação é inferior a utilização de TVWS não permite aumentar o valor do débito binário. No entanto, com o “Algorithm 2”, o número de utilizadores servidos é muito superior em relação ao número de utilizadores suportados nos outros cenários. Assim sendo, os resultados indicam que com o “Algorithm 2”, pode-se fornecer uma cobertura vasta nas zonas rurais ou mais remotas.

Em conclusão, com o “Algorithm 2” é possível otimizar a utilização de RRBs e alcançar maior capacidade (utilizando os mesmos RRBs) nos cenários urbano e suburbano, ou alcançar maior cobertura (utilizando também os mesmos RRBs) no cenário rural.

Capítulo 7

Conclusões

A disponibilização de novo espectro, particularmente nas bandas do dividendo digital, é um factor crucial para implementações do LTE em muitos países, em linha com as condições regulamentares, e vai directamente determinar as datas da implantação e lançamento desta tecnologia nos mercados. Na Europa e noutras zonas do globo, existe uma expectativa elevada no acesso adicional às bandas do dividendo digital (no UHF), que permitirá que o LTE seja globalmente implantado de forma eficiente, em vastas áreas geográficas rurais, melhorando a cobertura e sustentando tráfego elevado em áreas urbanas e suburbanas. Apesar dos benefícios da utilização das bandas TVWS em 3G-LTE (por exemplo, na cobertura de rádio e aumento da capacidade) não há restrições impostas pelo *Service Level Agreement* (SLA) entre a rede de fornecedores operadores de serviços e o utilizador, acerca do nível do QoS mínimo. Neste sentido, a gestão do espectro deve garantir a exclusividade da utilização do espectro e o nível de interferência adequado para garantir o nível de QoS a ser fornecido ao utilizador.

A rede LTE pode ser desenvolvida com larguras de banda 1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz, o que oferece flexibilidade adicional na implementação da LTE sobre TVWS. O LTE, em princípio será implantado em 2012 nas frequências mais elevadas (2.6 GHz), usando principalmente as células UMTS, a fim de reduzir custos, até que seja possível o *refarming* das bandas GSM e UMTS. Um operador pode introduzir LTE em faixas novas de espectro (com largura de banda flexível) ou nas já existentes, utilizando os modos FDD ou TDD. A introdução de uma nova arquitectura SAE-LTE é projectada para otimizar o desempenho de rede, reduzir os custos e facilitar a captura de serviços baseados em IP.

O LTE utiliza OFDMA para o *downlink*, da estação base para o terminal. O OFDMA corresponde ao requisito do LTE quanto à flexibilidade de espectro e possibilita soluções eficientes e económicas para portadoras de banda larga com taxas de pico elevadas. Para o *uplink*, utiliza o SC-FDMA de forma a reduzir o PAPR, e assim, o consumo ser mínimo na parte do terminal. Foram apresentadas as vantagens e desvantagens do TDD e FDD, sendo o segundo mais generalizado. O primeiro possui uma série de vantagens significativas, especialmente em termos de maior eficiência de espectro, podendo ser utilizado por muitos operadores.

O LTE oferece um alto nível de flexibilidade e pode ser implantado em muitos ambientes, cenários e topologias, em especial na extensão LTE sobre o TVWS o que facilita o seu desenvolvimento. No entanto, é necessário estudar o impacto das exigências do *sensing*, para proteger os operadores históricos (exemplo: operadores de telecomunicações e TDT), resolver os desafios colocados pela questão do problema do nó escondido, da fragmentação do TVWS e das variações espaço-temporais na disponibilidade de espectro. Foram investigadas soluções para que a co-existência entre serviços LTE sobre TVWS. O objectivo do dimensionamento é atingir a QoS desejada num sistema de rádio cognitivo utilizando o LTE sobre TVWS, com a

detecção e/ou utilização de uma base de dados da geolocalização dos utilizadores primários (que vai sendo actualizada ao longo do tempo), de forma a garantir a protecção para os operadores históricos. A utilização de técnicas de *rendezvous* e de *cyclostationary* para o *sensing* de frequências são estudadas no projecto COGEU podem solucionar o problema do nó escondido para o uso das Rádios Cognitvos.

Com a utilização do LTE, também se pode tirar vantagens do uso de multi-antenas avançadas para atingir maiores débitos. Por exemplo, ritmos de transmissão elevadas podem ser alcançadas com soluções de antenas MIMO com esquemas de 2x2 ou 4x4, enquanto que o aumento de cobertura pode ser atingida com *beam-forming*. No LTE, também é importante a diferenciação no tratamento de diferentes tipos de tráfego de acordo com os requisitos de cada um (diferentes QCI). Por exemplo, a latência é muito mais crítica para um pacote de voz do que para um pacote de dados. Então, pode-se dar prioridade nos pacotes de voz em detrimento dos de dados. Para além disso, existem dois tipos de recursos (*Guaranteed Bit Rate* ou *non-Guaranteed Bit Rate*). Com o *non-GBR* os recursos (para os fluxos IP) não são garantidos pelo eNodeB e não possuem controlo de admissão. Os recursos GBR têm uma taxa de transmissão garantida e um *Maximum Bit Rate* (MBR), ou seja, uma taxa de transmissão máxima dedicada a este canal de transporte. Os canais de transporte *non-GBR*, têm um *Aggregate Maximum Bit Rate* (AMBR) que é compartilhado por todos os canais de transporte *non-GBR* pertencentes a um terminal (EU). Assim, os canais de transportes *non-GBR* correspondentes estão sujeitos a perda de pacotes em caso de congestionamento, enquanto os canais de transporte GBR são imunes a tais perdas.

Tirando partido do *Radio Resource Management* (RRM) do LTE, o operador pode usar uma optimização conjunta dos recursos de rádio das portadoras TVWS (adquiridos a partir do *broker*) e das operadoras tradicionais (comprados a partir do órgão regulador). É assim possível, reduzir o número de estações base, oferecendo o mesmo desempenho ou até maior rendimento. Isto é importante tanto para a rede do operador como para os utilizadores. O operador de rede diminui o investimento e as despesas de operação, e os utilizadores obtêm uma experiência melhorada, uma vez que podem experimentar a utilização de melhores serviços numa área de cobertura mais vasta.

Como a atribuição das portadoras TVWS pelo *broker* é de base temporal e local, devem ser adicionadas novas funcionalidades aos sistemas celulares, a fim de apoiar este comportamento dinâmico: monitorização da rede, avaliação da portadora TVWS, parametrização da rede e configuração, e o RRM. Os procedimentos do RRM provenientes da exploração dos TVWS correspondem a direitos temporários na utilização dos TVWS. O RRM associado com a extensão LTE sobre TVWS tem como objectivo possibilitar que o operador móvel de LTE forneça QoS para os utilizadores. Considerando-se uma optimização conjunta dos recursos de rádio das portadoras TVWS-LTE (adquiridos pelo *broker*) e das operadoras tradicionais, usando LTE na frequência *Legacy*, de forma que os utilizadores utilizem serviços de melhor qualidade.

São propostos dois algoritmos, onde a qualidade da ligação de rádio nas duas bandas (TVWS e *Legacy*) é periodicamente monitorizada, obtendo-se a quantidade da *Radio Resource Blocks* (RRB) necessários para fornecer o serviço. Os algoritmos têm que decidir sobre qual portador será atribuído. Os resultados das simulações indicam que TVWS pode fornecer uma capacidade extra para as células de LTE próximas da saturação. As simulações são realizadas para todos os cenários (urbano, suburbano e rural) considerando os 21 sectores, zona central da área de simulação. Nas simulações foram consideradas uma classe de serviço *Guaranteed Bit Rate* (GBR) (DL: 1 Mbps UL 256 kbps) onde os TVWS são utilizados pelo LTE sem alterações significativas na arquitectura LTE e nos protocolos.

Basicamente, no “*Algorithm 1*” os recursos de rádio TVWS só são atribuídas se não houver capacidade das bandas *Legacy*. Na outra solução, o “*Algorithm 2*” avalia a qualidade de ligação de rádio em cada banda (TVWS e *Legacy*) que são periodicamente monitorizados e avaliados. Com base nisso, quantificam-se os recursos de rádio que são necessários para prestar o serviço solicitado. O serviço é prestado através da banda de frequências que consome menos recursos de rádio.

Apesar do melhor desempenho do “*Algorithm 2*”, a sua aplicação pode ser mais complexa porque em ambas as bandas é necessário o acompanhamento simultâneo e avaliar a qualidade da ligação de rádio. Para calcular a quantidade de recursos de rádio necessários para prestar o serviço é usado o *Channel Quality Information* (CQI).

Neste sentido, para implementar uma solução baseada no “*Algorithm 2*”, a nova interface de rádio é dedicada exclusivamente à TVWS, ou é considerada uma solução híbrida. Uma solução híbrida utiliza uma interface diferente, com níveis físicos compartilhados (usando o mesmo MAC) chamado de *Multi-Radio Access* (MRA). O MRA é geralmente considerado no contexto de diferentes tecnologias de acesso via rádio (*Radio Access Technologies* - RATs), por exemplo, HSDPA e Wi-Fi, mas aqui é apenas utilizado o LTE. Neste caso, pode-se designar *Multi-Band Access* (MBA). A solução MBA pode fornecer todas as funcionalidades para implementar o “*Algorithm 2*” e disponibilizar o benefício adicional de suportar atribuições simultâneas de recursos de rádio em duas bandas de frequências, o que nos foi feita neste trabalho.

Os procedimentos do RRM provenientes da exploração dos TVWS são de direitos temporários na utilização dos TVWS. O RRM associado a uma extensão de LTE sobre TVWS tem como objectivo o fornecimento de QoS aos seus clientes do operador de telecomunicações de LTE. Utiliza-se uma optimização conjunta dos recursos de rádio das portadoras TVWS (adquiridos pelo broker) e dos operadores tradicionais utilizando o sistema LTE na frequência *Legacy*, de forma que os utilizadores utilizem serviços de melhor qualidade.

As simulações consideram uma classe de serviço *Guaranteed Bit Rate* (GBR) (DL: 1 Mbps UL 256 kbps) sendo os TVWS utilizados pelo LTE sem alterações significativas na sua arquitectura e protocolos. No cenário urbano, o número médio de RRBs por utilizador é 4692, com o “*Algorithm 1*”, e 4096 com o “*Algorithm 2*”, menos 596 RRBs. Com o serviço a 1 Mbps, no “*Algorithm 1*” utiliza-se em média a modulação e codificação de 16 QAM_{2/3}, enquanto que, no caso do “*Algorithm 2*”, tem-se em média 16 QAM_{4/5}. No caso do cenário suburbano, o número

médio de RRBs por utilizador é 5512 com o “*Algorithm 1*”, e 5037 com o “*Algorithm 2*”, menos 475 RRBs. Com o serviço a 1 Mbps, no “*Algorithm 1*”, tem-se em média 16 QAM_{1/2} para o esquema de modulação e codificação, enquanto que, no caso do “*Algorithm 2*”, tem-se em média 16 QAM_{2/3}. No cenário rural, o número médio de RRBs por utilizador é 6789, com o “*Algorithm 1*”, e 5828 com o “*Algorithm 2*”, menos 960 RRBs. Com o serviço a 1 Mbps, no “*Algorithm 1*”, tem em média QPSK_{4/5}, enquanto que, no caso do “*Algorithm 2*”, tem-se em média 16 QAM_{1/2}.

Os resultados das simulações indicam que os TVWS podem fornecer uma capacidade extra para as células LTE, superando a falta de capacidade nos cenários urbano e suburbano. No caso do cenário rural, como a ordem de modulação e codificação é inferior a utilização de TVWS não permite aumentar o valor do débito binário. No entanto, com o “*Algorithm 2*”, o número de utilizadores servidos é muito superior em relação ao número de utilizadores suportados nos outros cenários. Assim sendo, os resultados indicam que com o “*Algorithm 2*”, pode-se fornecer uma cobertura vasta nas zonas rurais ou mais remotas. Em conclusão, com o “*Algorithm 2*” é possível otimizar a utilização de RRBs e alcançar maior capacidade (utilizando os mesmos RRBs) nos cenários urbano e suburbano, ou alcançar maior cobertura (utilizando também os mesmos RRBs) no cenário rural.

Assim usando uma optimização conjunta dos recursos de rádio das portadoras TVWS-LTE (adquiridos a partir do *broker*) e dos operadores tradicionais LTE, é possível reduzir o número de BS, fornecendo o mesmo rendimento ou até superior. Isto é importante tanto para a rede do operador porque diminui o CAPEX e OPEX, como para os utilizadores, que podem experimentar serviços de melhor qualidade.

As atribuições das portadoras TVWS pelo *broker* são temporárias e com base do local onde estiver o terminal, e para isso foram adicionadas novas funcionalidades devem ser adicionadas ao sistema de redes celulares, para suporte a esse comportamento dinâmico, tais como: monitorização de rede, avaliação da portadora TVWS, o pedido para o *broker*, a atribuição da portadora e atribuição do utilizador. As alterações propostas incorporam funcionalidades específicas necessárias para usar as portadoras TVWS com pequenas alterações da arquitectura do padrão 3GPP LTE.

Trabalho Futuro

Como sugestão para trabalho futuro poderão ser incluídas no simulador as novas funcionalidades introduzidas na *release 11* (LTE-Advanced), como a *Carrier Aggregation* (CA). O *Carrier Aggregation* é uma característica fundamental do LTE-Advanced que permite a expansão de largura de banda efectiva entregue a um terminal, através da utilização simultânea de recursos de rádio a partir de várias portadoras. As múltiplas portadoras componentes (*Component Carriers*) são agregadas para formar uma banda de transmissão mais larga. Esta funcionalidade tem a vantagem de permitir que o terminal esteja ligado simultaneamente às duas portadoras. No contexto da investigação desta dissertação o

terminal apenas pode ter uma ligação a uma das portadoras (*Legacy* ou TVWS). Portanto, aqui não se considera *Carrier Aggregation*.

A *Carrier Aggregation* pode ser classificada em três tipos, de acordo com a maneira pela qual as *Component Carriers* (CC) de frequência são organizadas (Figura 72):

- ***Intra-Band Contiguous CA*** - Neste tipo de combinações de frequências, pode-se obter uma largura de banda contígua maior do que 20 MHz. Este cenário pode ser aplicado, por exemplo, na atribuição de banda larga na frequência de 3.5 GHz. No entanto, neste contexto os TVWS não são utilizáveis porque o espectro *Intra-Band Contiguous CA* é altamente fragmentado, com sub-bandas parcialmente disponíveis no tempo e no espaço.
- ***Intra-band Non-contiguous CA*** - A comunicação é realizada utilizando portadoras múltiplas na mesma banda de frequência. Este cenário pode ser aplicado para a TVWS onde existe fragmentação, como na Europa e nos Estados Unidos.
- ***Inter-band Non-contiguous CA*** - As comunicações são realizadas em diferentes banda de frequência, tais como a banda IMT e a banda de UHF. Neste caso específico, o simulador de LTE utiliza as bandas de 2.6 GHz e 700 MHz. O uso de duas portadoras em simultâneo pode melhorar o rendimento na comunicação, e o uso de múltiplas sub-portadoras em diferentes ambientes de propagação pode melhorar a estabilidade do sistema. Este caso é muito importante, no contexto do projecto COGEU e desta dissertação. Assim, as frequências na banda IMT e na banda UHF podem funcionar como uma multi-banda.

Para a extensão do LTE sobre TVWS na atribuição simultânea de utilizadores nas duas bandas de frequência (ou seja, 2.6 GHz e 700 MHz) para um cenário de um único operador, considerando-se o mesmo tipo de RAT (LTE) é considerado para ambas as frequências. Supõe-se que o operador ganha o acesso a frequências com uma certa porção do espectro disponível. O operador tem acesso a uma faixa de 2.6 GHz e de parte (ou todo) da banda de frequência de 700 MHz. O ganho no desempenho será analisado em termos de uma transmissão de dados, atrasos e a menor probabilidade de bloqueio. O desempenho é fortemente dependente da qualidade de canal para cada utilizador nas bandas consideradas. Na modulação do ambiente de propagação e da interferência a função do *path loss* não depende apenas da frequência de operação, mas também a distância da estação base. Na referência [28] considera-se agregação de espectro aplicado a dois sistemas HSPDA, num cenário *IMT-Advanced*, não se tendo considerando portanto o LTE. A Figura 73 considera a interface Multi-banda que é a evolução do "Algorithm 2" utilizando a banda *Legacy* (2.6 GHz) e TVWS (700 MHz) com o sistema LTE.

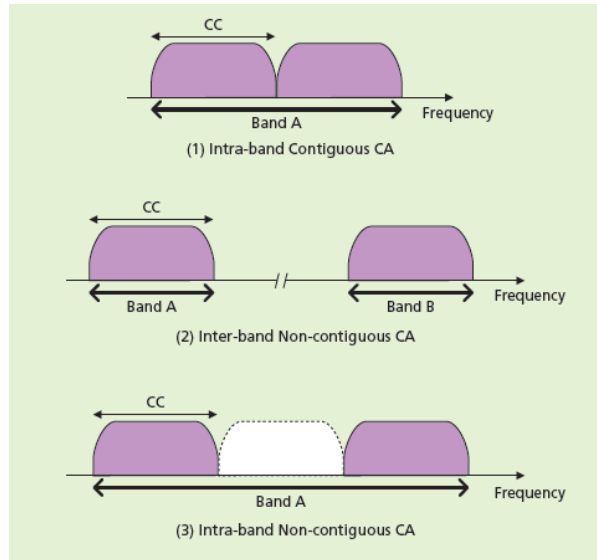


Figura 72 : Combinação de frequências para CCs

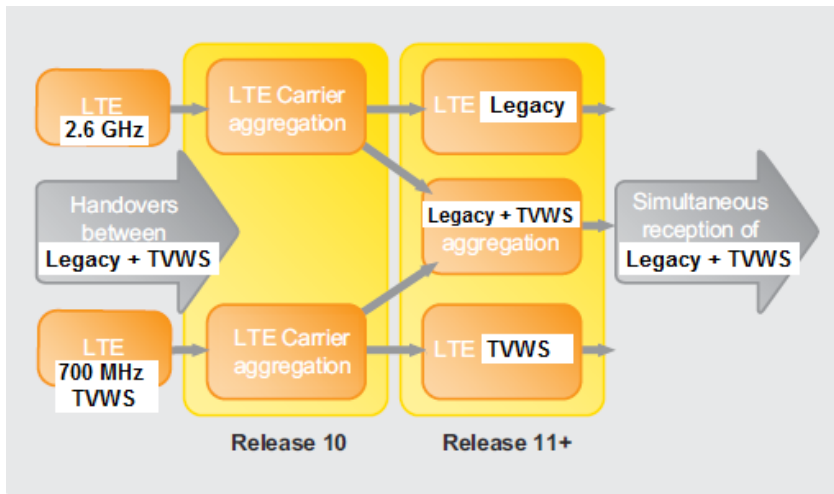


Figura 73 : Interface de Multi-Band do IMT-Advanced

Anexo A

Frequência versus Distância

Para a verificação da relação da frequência com o raio de cobertura é usado o modelo de propagação *Friis*, válido em condições de propagação em espaço livre:

$$\frac{1}{L} = \frac{P_r}{P_e G_e G_r} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

onde L é a atenuação, P_r é a potência recebida, P_e é a potência transmitida, G_e é o ganho da antena de emissão, G_r é o ganho da antena de recepção, λ é o comprimento de onda e d é a distância.

A fórmula de *Friis* usa diferentes valores para o expoente de propagação (γ). O valor de γ varia entre 2 e 4 em sistemas com cobertura celular. Em espaço livre considera-se $\gamma = 2$, em zonas urbanas, considera-se $\gamma = 3$, $\gamma = 3.5$ e $\gamma = 4$, de forma a distinguir os diferentes níveis de densidade da área edificada.

Deste modo, usando $\gamma = 2$ a relação da frequência e a distância é dado por:

$$d = \sqrt{\frac{c^2}{(4\pi f)^2} \times \frac{P_e G_e G_r}{P_r}} \quad (2)$$

Neste trabalho, adopta-mos a forma hexagonal, para que os cálculos se possam encaixar com perfeição, pois uma célula precisa de ser projectada para servir aos utilizadores móveis mais fracos numa área geográfica, e estes estão localizados tipicamente na extremidade de uma célula.

A utilização da geometria hexagonal permite também a utilização do menor número possível de células para cobrir uma determinada região geográfica onde se deseja fazer o planeamento de uma rede. Para além disso, o hexágono aproxima da forma mais adequada do padrão de radiação circular que ocorreria para uma antena omnidireccional de uma estação base em condição de propagação em espaço livre. É importante salientar que a forma hexagonal apenas aproxima a área de cobertura de uma estação base. A área do hexágono é dada pela seguinte expressão.

$$A_h = \frac{3\sqrt{3}\pi r^2}{2} = 2.598R^2 \quad (3)$$

onde R é o raio da célula.

Pela formula (2) podemos concluir que:

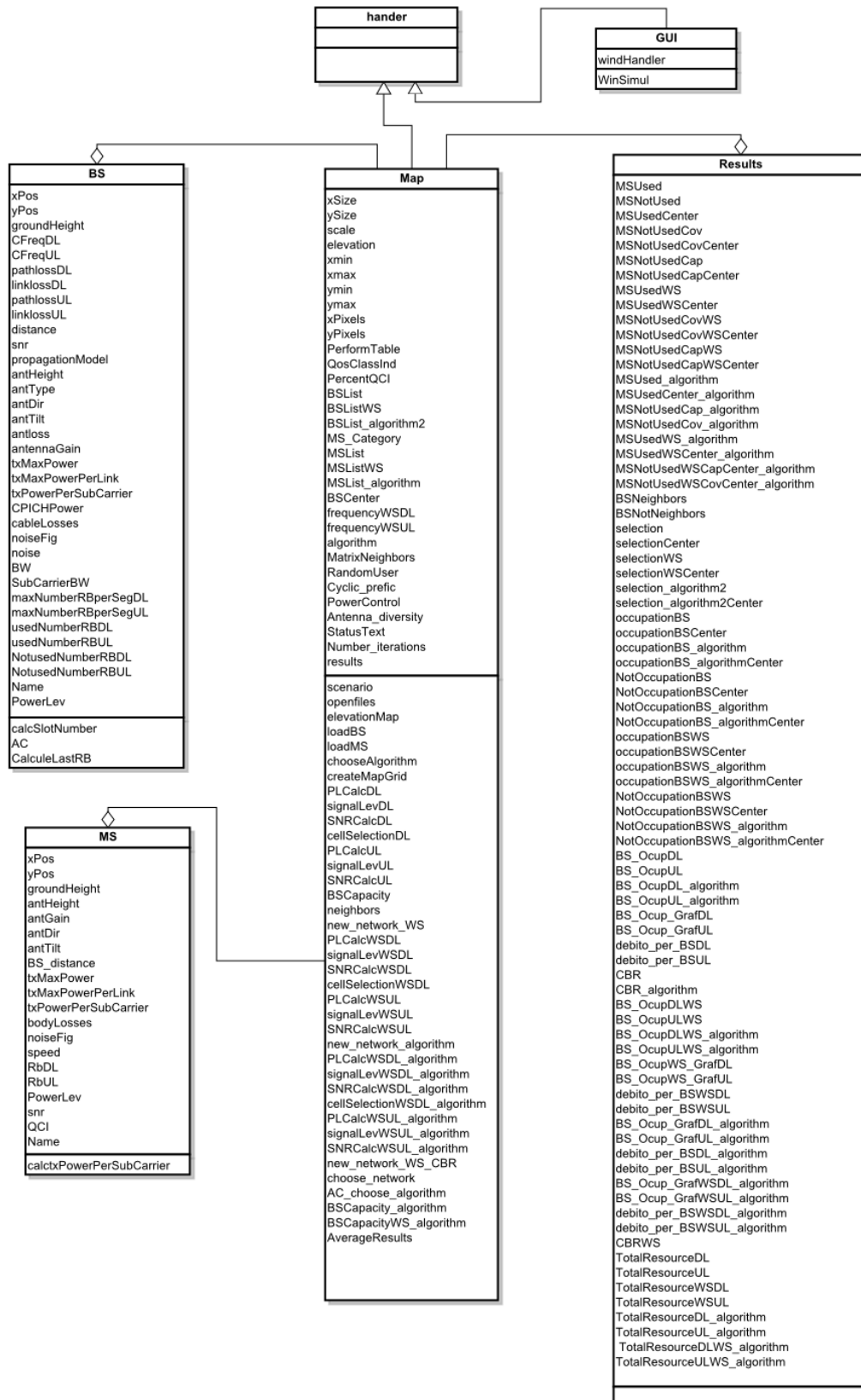
$$d \propto \sqrt{\frac{1}{f^2}} \propto \frac{1}{f} \quad (4)$$

Relacionando as fórmulas (2) é (3) também concluimos que:

$$A_h \propto \frac{1}{f^2} \quad (5)$$

Anexo B

Neste anexo, apresenta-se o simulador de LTE na relação entre as várias classes, no contexto da programação orientada a objectos.



A classe BS

A classe BS tem como propriedades descritas a seguir:

- xPos: coordenada do eixo horizontal dos *xx*, em metros;
- yPos: coordenada do eixo vertical dos *yy*, em metros;
- groundHeight: altura da base da antena em relação ao nível do mar;
- CFreqDL: frequência central do canal de downlink, em GHz;
- CFreqUL: frequência central do canal de uplink, em GHz;
- PathlossDL: valor da atenuação do modelo de propagação sentida pela BS, para toda a carta;
- LinklossDL: valor de todas atenuações sentidas pela BS, para toda a carta;
- PathlossUL: valor da atenuação do modelo de propagação sentida pelo MS;
- LinklossUL: valor de todas atenuações sentidas pelo MS, para toda a carta;
- distance: valor da distância de todos os pontos da carta a cada BS;
- snr: valor do SNR para toda a carta (do canal);
- propagationModel: modelo do canal de propagação;
- antHeight: altura da antena da estação base, em metros;
- antType: tipo de antenas da estação base, cujo tipo são apresentados na Tabela 24;
- antDir: direção da antena da estação base. O valor 0° corresponde ao sentido positivo dos *yy*. Terá que ser positivo, com valores entre [0 360 [, medido no sentido anti-horário;
- antTilt: inclinação da antena em graus, com 0° a indicar que a antena está apontada paralelamente ao solo. Os valores possíveis são [-90 90], com ângulos positivos a indicar que a antena está orientada para o solo;
- antLoss: perdas da antena;
- antennaGain: ganho da antena;
- txMaxPower: valor máximo de transmissão da antena;
- txMaxPowerPerLink: valor máximo de potência de emissão da antena, por sub-canal;
- CPICHPower: potência de emissão do canal Piloto;
- cableLosses: perdas nos cabos;
- noiseFig: factor de ruído do receptor da estação base;
- noise: ruído mais interferência, para toda a carta;
- BW: largura de banda;
- SubCarrierBW: largura de banda da sub-portadora;
- maxNumberRBperSegDL: número máximo de RB na estação base durante um segundo no *downlink*;
- maxNumberRBperSegUL: número máximo de RB na estação base durante um segundo no *uplink*;
- usedNumberRBDL: carga da estação base no *downlink*;
- usedNumberRBUL: carga da estação base no *uplink*;
- NotusedNumberRBDL: número de RB não utilizadas na estação base no *downlink*;

- NotusedNumberRBUL: número de RB não utilizadas na estação base no *uplink*;
- Name: nome da estação base;
- PowerLev: valor de potência recebida para toda a carta;

A classe BS tem como métodos a seguir descritos:

- calcRBNumber: Cálculo do número de RB de cada estação base;
- AC: O *Admission Control* do terminal na ligação à estação base;
- CalculeLastRB: Cálculo do número de RB disponíveis de cada estação base.

A classe MS

As propriedades da classe MS são a seguir apresentadas juntamente com o significado de cada uma delas:

- xPos: coordenada do eixo horizontal dos *xx*, em metros;
- yPos: coordenada do eixo vertical dos *yy*, em metros;
- groundHeight: altura da base da antena em relação ao nível do mar;
- antHeight: altura da antena da estação base, em metros;
- antGain: ganho da antena;
- antDir: direcção da antena da estação base. O valor 0° corresponde ao sentido positivo dos *yy*. Terá que ser positivo, com valores entre [0;360 [; medido no sentido anti-horário;
- antTilt: inclinação da antena em graus, com 0° a indicar que a antena está apontada paralelamente ao solo. Os valores possíveis são [-90; 90]; com ângulos positivos a indicar que a antena está orientada para o solo.
- BS_distance: distancia do terminal à estação base que se ligou;
- txMaxPower: valor máximo de transmissão da antena;
- txMaxPowerPerLink: valor máximo de transmissão da antena, por sub-canal;
- bodyLosses: perdas (atenuação) de sombreamento;
- noiseFig: factor de ruído da estação base (à recepção);
- speed: velocidade do terminal;
- RbDL: taxa de transmissão no *downlink*;
- RbUL: taxa de transmissão no *uplink*;
- PowerLev: potência recebida no terminal;
- Snr: valor do SNR no *uplink* (no terminal);e
- QCI: Identificador da classe de QoS para o terminal;
- Name: nome do terminal.

A classe MS tem como métodos os a seguir descritos:

- calcTxPowerPerSubCarrier: Cálculo da potência de emissão de cada sub-portadora.

Tabela 24 : Tipos de antenas

Nome	Sigla utilizada
Antena com 33° de abertura.	33deg
Antena com 45° de abertura.	45deg
Antena com 65° de abertura.	65deg
Antena com 90° de abertura.	90deg
Antena com 120° de abertura.	120deg
Isotrópica.	<i>isotropic</i>

A classe Results

As propriedades da classe Results são a seguir apresentadas com o seu significado a cada um deles:

- MSUsed: número de utilizadores servidos pelas BSs;
- MSNotUsed: número de utilizadores não servidos pelas BSs;
- MSUsedCenter: número de utilizadores servidos pelas BSs na zona central da carta;
- MSNotUsedCov: número de utilizadores não servidos pelas BSs por falta de cobertura;
- MSNotUsedCovCenter: número de utilizadores não servidos pelas BS por falta de cobertura na zona central da carta;
- MSNotUsedCap: número de utilizadores não servidos pelas BSs por falta de capacidade;
- MSNotUsedCapCenter: número de utilizadores não servidos pelas BSs por falta de capacidade na zona central da carta;
- MSUsedWS: número de utilizadores servidos pelas BSs (BSWS);
- MSUsedWSCenter: número de utilizadores servidos pelas BSs (BSWS) na zona central da carta;
- MSNotUsedCovWS: número de utilizadores não servidos pelas BSs (BSWS) por falta de cobertura;
- MSNotUsedCovWSCenter: número de utilizadores não servidos pelas BSs (BSWS) por falta de cobertura;
- MSNotUsedCapWS: número de utilizadores não servidos pelas BSs (BSWS) por falta de capacidade;
- MSNotUsedCapWSCenter: número de utilizadores não servidos pelas BSs (BSWS) por falta de capacidade na zona central da carta;
- MSUsed_algorithm: número de utilizadores servidos pelas BSs (BS_algorithm);

- MSUsedCenter_algorithm: número de utilizadores servidos pelas BSs (BS_algorithm) na zona central da carta;
- MSNotUsedCap_algorithm: número de utilizadores não servidos pelas BSs (BS_algorithm) por falta de capacidade;
- MSNotUsedCov_algorithm: número de utilizadores não servidos pela BSs (BS_algorithm) por falta de cobertura na zona central da carta;
- MSUsedWS_algorithm: número de utilizadores servidos pelas BSs (BS_algorithm2);
- MSUsedWSCenter_algorithm: número de utilizadores servidos pelas BSs (BS_algorithm2) na zona central da carta;
- MSNotUsedWSCapCenter_algorithm: número de utilizadores não servidos pelas BSs (BS_algorithm2) por falta de capacidade;
- MSNotUsedWSCovCenter_algorithm: número de utilizadores não servidos pelas BSs (BS_algorithm2) por falta de cobertura na zona central da carta;
- BSNeighbors: tabelas das BSs que são vizinhas;
- BSNotNeighbors: tabelas das BSs que não são vizinhas;
- selection: tabela com a selecção de cada MS à BS com melhor cobertura;
- selectionCenter: tabela com a selecção de cada MS à BS com melhor cobertura, na zona central da carta;
- selectionWS: tabela com a selecção de cada MS à BS (BSWS) com melhor cobertura;
- selectionWSCenter: tabela com a selecção de cada MS à BS (BSWS) com melhor cobertura, na zona central da carta;
- selection_algorithm2: tabela com a selecção de cada MS à BS (BS_algorithm2) com melhor cobertura;
- selection_algorithm2Center: tabela com a selecção de cada MS à BS (BS_algorithm2) com melhor cobertura, na zona central da carta;
- occupationBS: tabela com o número de utilizadores por cada BS;
- occupationBSCenter: tabela com o número de utilizadores por cada BS, na zona central da carta;
- occupationBS_algorithm: tabela com o número de utilizadores por cada BS (BS_algorithm);
- occupationBS_algorithmCenter: tabela com o número de utilizadores por cada BS (BS_algorithm), na zona central da carta;
- NotOccupationBS: tabela com o número de utilizadores que não estão ligados por cada BS;
- NotOccupationBSCenter: tabela com o número de utilizadores que não estão ligados por cada BS, na zona central da carta;
- NotOccupationBS_algorithm: tabela com o número de utilizadores que não estão ligados por cada BS (BS_algorithm);
- NotOccupationBS_algorithmCenter: tabela com o número de utilizadores que não estão ligados por cada BS (BS_algorithm), na zona central da carta;

- occupationBSWS: tabela com o número de utilizadores por cada BS (BSWS);
- occupationBSWSCenter: tabela com o número de utilizadores por cada BS (BSWS);
- occupationBSWS_algorithm: tabela com o número de utilizadores por cada BS (BSWS_algorithm);
- occupationBSWS_algorithmCenter: tabela com o número de utilizadores por cada BS (BSWS_algorithm), na zona central da carta;
- NotOccupationBSWS: tabela com o número de utilizadores que não estão ligados por cada BS (BSWS);
- NotOccupationBSWSCenter: tabela com o número de utilizadores que não estão ligados por cada BS (BSWS), na zona central da carta;
- NotOccupationBSWS_algorithm: tabela com o número de utilizadores que não estão ligados por cada BS (BSWS_algorithm);
- NotOccupationBSWS_algorithmCenter: tabela com o número de utilizadores que não estão ligados por cada BS (BSWS_algorithm), na zona central da carta;
- BS_OcupDL: número de RB ocupados em cada BS no *downlink*;
- BS_OcupUL: número de RB ocupados em cada BS no *uplink*;
- BS_OcupDL_algorithm: valores do número de RB ocupados em cada BS (BS_algorithm) no *downlink*;
- BS_OcupUL_algorithm: valores do número de RB ocupados em cada BS (BS_algorithm) no *uplink*;
- BS_Ocup_GrafDL: valores, em percentagem, dos RB ocupados em cada BS no *downlink*;
- BS_Ocup_GrafUL: valores, em percentagem, dos RB ocupados em cada BS no *uplink*;
- debito_per_BSDL: débito obtido em cada BS no *downlink*;
- debito_per_BSUL: débito obtido em cada BS no *uplink*;
- CBR: sessões bloqueadas, em percentagem, de cada BS;
- CBR_algorithm: sessão bloqueadas, em percentagem, de cada BS (BS_algorithm);
- BS_OcupDLWS: número de RB ocupados em cada BS (BSWS) no *downlink*;
- BS_OcupULWS: número de RB ocupados em cada BS (BSWS) no *uplink*;
- BS_OcupDLWS_algorithm: valores do número de RB ocupados em cada BS (BSWS_algorithm) no *downlink*;
- BS_OcupULWS_algorithm: número de RB ocupados em cada BS (BSWS_algorithm) no *uplink*;
- BS_OcupWS_GrafDL: valores, em percentagem, dos RB ocupados em cada BS (BSWS) no *downlink*;
- BS_OcupWS_GrafUL: valores, em percentagem, dos RB ocupados em cada BS (BSWS) no *uplink*;
- debito_per_BSWSDL: débito obtido em cada BS (BSWS) no *downlink*;
- debito_per_BSWSUL: débito obtido em cada BS (BSWS) no *uplink*;

- BS_Ocup_GrafDL_algorithm: valores, em percentagem, dos RB ocupados em cada BS (BS_algorithm) no *Downlink*;
- BS_Ocup_GrafUL_algorithm: valores, em percentagem, dos RB ocupados em cada BS (BS_algorithm) no *uplink*;
- debito_per_BSDL_algorithm: débito obtido em cada BS (BS_algorithm) no *downlink*;
- debito_per_BSUL_algorithm: débito obtido em cada BS (BS_algorithm) no *uplink*;
- BS_Ocup_GrafWSDL_algorithm: valores, em percentagem, dos RB ocupados em cada BS (BSWS_algorithm) no *downlink*;
- BS_Ocup_GrafWSUL_algorithm: valores, em percentagem, dos RB ocupados em cada BS (BSWS_algorithm) no *uplink*;
- debito_per_BSWSDL_algorithm: débito obtido em cada BS (BSWS_algorithm) no *downlink*;
- debito_per_BSWSUL_algorithm: débito obtido em cada BS (BSWS_algorithm) no *uplink*;
- CBRWS: sessões bloqueadas, em percentagem, de cada BS (BSWS);
- TotalResourceDL: total de RB utilizados por cada BS no *downlink*;
- TotalResourceUL: total de RB utilizados por cada BS no *uplink*;
- TotalResourceWSDL: total de RB utilizados por cada BS (BSWS) no *downlink*;
- TotalResourceWSUL: total de RB utilizados por cada BS (BSWS) no *uplink*;
- TotalResourceDL_algorithm: total de RB utilizados por cada BS (BS_algorithm) no *downlink*;
- TotalResourceUL_algorithm: total de RB utilizados por cada BS (BS_algorithm) no *uplink*;
- TotalResourceDLWS_algorithm: total de RB utilizados por BS (BSWS_algorithm) no *downlink*;
- TotalResourceULWS_algorithm: total de RB utilizados por BS (BSWS_algorithm) no *uplink*.

As propriedades da classe maps são a seguir apresentadas com o seu significado a cada um deles:

- xSize: tamanho do mapa dos eixos dos *xx*;
- ySize: tamanho do mapa dos eixos dos *yy*;
- scale: escala utilizado na carta;
- elevation: relevo em todos os pontos da carta;
- xmin: valor mínimo dos eixos do *xx*;
- xmax: valor máximo dos eixos do *xx*;
- ymin: valor mínimo dos eixos do *yy*;
- ymax: valor máximo dos eixos do *yy*;
- xPixels: número de pixéis do eixo do *xx*;
- yPixels: número de pixéis do eixo do *yy*;

- PerformTable: tabela de performance da relação SNR com *Modulation Coding Schemes* (MCS) utilizado no simulador de LTE;
- QoSClassInd: indicador das classes de QoS;
- PercentQCI: percentagens de cada uma das QCI utilizadas;
- BSList: lista das estações de base com portadora *Legacy*;
- BSListWS: lista das estações de base com portadora TVWS para algoritmo 1;
- BSList_algorithm2: lista das estações de base com portadora TVWS para algoritmo 2;
- MS_Category: tabela com as cinco categorias dos terminais LTE;
- MSList: lista dos terminais para a portadora *Legacy*;
- MSListWS: lista dos terminais para a portadora TVWS para algoritmo 1;
- MSList_algorithm: Lista dos terminais para a portadora TVWS para algoritmo 2;
- BSCenter: número de BS na zona central da carta;
- frequencyWSDL: listas das frequências disponíveis para usar nas portadoras TVWS no downlink (por exemplo, disponibilizadas base de dados do *broker*);
- frequencyWSUL: listas das frequências disponíveis para usar nas portadoras TVWS no uplink (por exemplo, disponibilizadas base de dados do *broker*);
- algorithm: variável que selecciona qual o algoritmo a ser utilizado no simulador de LTE.
- MatrixNeighbors: matriz das BS vizinhas, para saber de deve (ou não) atribuir outra portadora TVWS.
- RandomUser: variável que no caso for “1”, a posição dos utilizadores são obtido aleatoriamente, caso “0” é feita manualmente no ficheiro de texto da configuração dos MS;
- cyclic_prefix: variável que selecciona o tipo de *cyclic prefix*, se é normal ou estendido.
- PowerControl: variável que selecciona se o controlo de potência é feito (ou não) no uplink;
- Antenna_diversity: selecção da diversidade utilizada nas BS (MIMO). Pode ser 1×1, 2×2 ou 4×4, na configuração das antenas;
- statusText: variável de texto que guarda informação para ser visualizado na janela GUI;
- Number_iterations: número máximo de iterações do simulador de LTE;
- results: sub classe que guarda todos os valores que se quer apresentar na classe GUI.

Os métodos da classe maps são a seguir apresentados com o seu significado a cada um deles:

- Choose_scenario: criação de uma janela *pop up* para a selecção do cenário (urbano, suburbano ou rural);
- openfiles: abertura de ficheiros correspondentes ao cenário escolhido;
- elevationMap: selecção da carta onde é feita a simulação;
- loadBS: carregamento das BSs;

- loadMS: carregamento das MSs;
- chooseAlgorithm: selecção do algoritmo a ser utilizado para a simulação;
- createMapGrid: criação da carta para a simulação;
- PLCalcDL: cálculo do *path loss* em todos os pontos da carta para o *downlink*;
- signalLevDL: cálculo da potência recebida em todos os pontos da carta no *downlink*;
- SNRCalcDL: cálculo do SNR em todos dos pontos do mapa no *downlink*;
- cellSelectionDL: selecção de cada terminal à BS com o valor de SNR mais alto no *downlink*;
- PLCalcUL: cálculo do *path loss* no *uplink*;
- signalLevUL: cálculo da potência recebida no *uplink*;
- SNRCalcUL: cálculo do SNR no *uplink*;
- BSCapacity: Cálculo da capacidade de cada BS para a simulação com a opção “Normal”;
- neighbors: função que calcula automaticamente as BSs vizinhas;
- new_network_WS: novo planeamento de rede para a portadora TVWS. Contudo, só a BSs que tem o CBR superior a 2% é que entram no novo planeamento;
- PLCalcWSDL: para as estações base TVWS no algoritmo 1, o cálculo do *path loss* em todos os pontos da carta no *downlink*;
- signalLevWSDL: para as estações base TVWS no algoritmo 1, a potência recebida no *downlink*;
- SNRCalcWSDL: para as estações base TVWS no algoritmo 1, cálculo do SNR em todos dos pontos do mapa no *downlink*;
- cellSelectionWSDL: para as estações base TVWS no algoritmo 1, a selecção de cada terminal á BS TVWS com o valor de SNR mais alto no *downlink*;
- PLCalcWSUL: para as estações base TVWS no algoritmo 1, o cálculo do *path loss* no *uplink*;
- signalLevWSUL: para as estações base TVWS no algoritmo 1, o cálculo da potência recebida no *uplink*;
- SNRCalcWSUL: para as estações base TVWS no algoritmo 1, o cálculo do SNR no *uplink*;
- new_network_algorithm: Criação de um novo planeamento de rede para a portadora TVWS. Entretanto, todas BS entram no novo planeamento;
- PLCalcWSDL_algorithm: para as estações base TVWS no algoritmo 2, o cálculo do *path loss* em todos os pontos da carta no *downlink*;
- signalLevWSDL_algorithm: para as estações base TVWS no algoritmo 2, a potência recebida no *downlink*;
- SNRCalcWSDL_algorithm: para as estações base TVWS no algoritmo 2, cálculo do SNR em todos dos pontos do mapa no *downlink*;
- cellSelectionWSDL_algorithm: para as estações base TVWS no algoritmo 2, a selecção de cada terminal à BS TVWS com o valor de SNR mais alto *downlink*;

- PLCalcWSUL_algorithm: para as estações base TVWS no algoritmo 2, o cálculo do *path loss* no *uplink*;
- signalLevWSUL_algorithm: para as estações base TVWS no algoritmo 2, o cálculo da potência recebida no *uplink*;
- SNRCalcWSUL_algorithm: para as estações base TVWS no algoritmo 2, o cálculo do SNR no *uplink*;
- choose_network: selecção da portadora que vai ser atribuído ao terminal (entre a portadora *Legacy* ou a portadora TVWS), aquela que usa menos RB é a seleccionada;
- AC_choose_algorithm: o *admission control* dos terminais para a portadora Legacy ou portadora TVWS;
- BSCapacity_algorithm: cálculo da capacidade de cada uma das BS da portadora Legacy;
- BSCapacityWS_algorithm: cálculo da capacidade de cada uma das BS da portadora TVWS;
- AverageResults: obtenção dos resultados médios de cada iteração.

A classe GUI

As propriedades da classe GUI são a seguir apresentadas, juntamente com o seu significado:

- windHandler: variável da visualização de todo o GUI.

Só existe um método para a classe GUI, a seguir apresentado:

- WinSimul: função que configura toda a visualização do GUI.

Referências

- [1] COGEU, "ICT FP7 project.", (<http://www.ict-cogeu.eu/>).
- [2] Disponível em: (http://pt.wikipedia.org/wiki/Estrat%C3%A9gia_de_Lisboa).
- [3] Harri Holma, Antti Toskala, "LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access", John Wiley & Sons, Ltd , 2009.
- [4] Disponível em: (<http://www.thedeathofanalog.tv>).
- [5] DigiTAG , (<http://www.digitag.org/>).
- [6] DigiTAG, "The Digital Dividend & the Future of Digital Terrestrial Television", Dec. 2009.
- [7] Analysys Mason, DotEcon, HOGAN & HARTSON, 'Exploiting the digital dividend' - a European approach. 14 August 2009. Report to the European Commission.
- [8] STIRLING, ANDREW, "White Spaces -- The New WiFi ? ", *International Journal of Digital Television*, Jan. 2010, Vol. 1.
- [9] RSPG Secretariat, Radio Spectrum Policy Group Report on Cognitive Technologies. Radio Spectrum Policy Group, Electronic Communications Policy. Brussels: European Commission - Information Society and Media Directorate-General, Oct. 2009. pp. 1 -28. RSPG09-299.
- [10] CEPT REPORT 25, Technical Roadmap proposing relevant technical options and scenarios to optimize the Digital Dividend, including steps required during the transition period before analogue switch-off. 1 July 2008. CEPT Report 25.
- [11] Commission of the European Communities, "Transforming the digital dividend into social benefits and economic growth", 28 October 2009, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the committee of Regions.
- [12] OFCOM, "Digital Dividend Review: geographic interleaved awards 470 - 550 MHz and 630 - 790 MHz -- Consultation on detailed award design", June 2008.
- [13] CEPT REPORT 24, Technical considerations regarding harmonization options for the Digital Dividend, July 2008.
- [14] Nekovee, Maziar, "Quantifying the Availability of TV White Spaces for Cognitive Radio Operation in the UK", in Proc. IEEE ICC joint Workshop Cognitive Wireless Networks and Systems, Dresden, Germany, June 2009.
- [15] OFCOM, "Digital dividend: cognitive access ", Statement on license-exempting cognitive devices using interleaved spectrum, July 2009, (<http://www.ofcom.org.uk/consult/condocs/cognitive/statement/statement.pdf>).
- [16] OFCOM, "Digital Dividend: Geolocation for Cognitive Access ", Nov. 2009, (<http://www.ofcom.org.uk/consult/condocs/cogaccess/cogaccess.pdf>).

- [17] CEPT Draft Report (3rd meeting SE43), "Annex B: National Studies on Amount of spectrum in the band 470-790 MHz potentially available for white spaces devices", Jan. 2010.
- [18] Spectrum Analysis for Future LTE Deployments., (<http://www.motorola.com>).
- [19] BBC R&D, (<http://www.bbc.co.uk/rd/publications/>).
- [20] Jeff Travers, Managing Director, Ericsson, "Submission to Digital Strategy 2.0", May 2008.
- [21] GSA -Evolution to LTE report, January 12, 2011, (<http://www.gsacom.com>).
- [22] Mitola, J., I. "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications", proc. (MoMuC '99) 1999 IEEE Int Mobile Multimedia Communications Workshop, San Diego, CA , USA, Nov. 1999, 3-10.
- [23] Eli Noam, "Taking the next step beyond spectrum auctions: Open spectrum access," IEEE Communications Magazine, vol. 33, no. 12, Dec. 1995.
- [24] Demestichas, P.; Papadopoulou, L.; Stavroulaki, V.; Theologou, M.; Vivier, G.; Martinez, G. & Galliano, F. "Wireless beyond 3G: managing services and network resources Computer", 2002, 35, 80-82.
- [25] Phillipa Marks, Brian Williamson, John Burns, Chris Doyle, Martin Cave, "An economic study to review spectrum pricing", Indepen, Aegis Systems and Warwick Business School, February 2004 (http://www.ofcom.org.uk/research/radiocomms/reports/independent_review/spectrum_pricing.pdf).
- [26] R. Brugger (IRT), O. Kluth (WDR), "800 MHz Auctions and Implementation of the DD in Germany", EBU ECS Workshop, "Implementation of the Digital Dividend in European Countries" EBU, Geneva, 7 Oct. 2010.
- [27] Lars Berlemann, George Dimitrakopoulos, Klaus Moessner, Jim Hoffmeyer, "Cognitive Radio and Management of Spectrum and Radio Resources in Reconfigurable Networks", WWRF-WG6.
- [28] Meucci, F.; Cabral, O.; Velez, F. J.; Mihovska, A. & Prasad, N. R. "Spectrum Aggregation with Multi-band User Allocation over Two Frequency Bands", proc. IEEE Mobile WiMAX Symp. MWS '09, 2009, 81-86.
- [29] Parkvall, S.; Dahlman, E.; Furuskar, A.; Jading, Y.; Olsson, M.; Wanstedt, S. & Zangi, K. LTE-Advanced - Evolving LTE towards IMT-Advanced Proc. VTC 2008-Fall Vehicular Technology Conf. IEEE 68th, Sept. 2008, 1-5.
- [30] Jaana Laiho, Achim Wacker and Tomáš Novosad, "Radio Network Planning and Optimisation for UMTS", John Wiley & Sons, Ltd , Apr. 2006.
- [31] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld and Per Beming, "3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband", Published by Elsevier, 2007.
- [32] COGEU, "ICT FP7 project.", D4.1 - "Spectrum measurements and anti-interference spectrum database specification ", Nov. 2010.

- [33] COGEU, "ICT FP7 project.", D6.1 - "Dynamic Radio Resource Management algorithms for an efficient use of TVWS", Jan. 2011.
- [34] 3GPP TS 23.203, "Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and charging control architecture", (Release 9).
- [35] 3GPP TS 36.104 "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception", (Release 9).
- [36] 3GPP TS 36.101, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception", (Release 9).
- [37] CEPT ECC, "Decision on harmonized conditions for Mobile/Fixed Communications Networks operating in the band 790-862 MHz" ECC Decision of 30 Oct. 2009.