Análise do uso de LTE-A em Comunicações de Missão Crítica entre viaturas militares em cenários operacionais

Miguel Borges Falcão Ramos

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Luís Manuel de Jesus Sousa Correia

Júri

Presidente: Prof. José Eduardo Charters da Cunha Sanguino

Orientador: Prof. Luís Manuel de Jesus Sousa Correia

Vogal: Prof. António Manuel Raminhos Cordeiro Grilo

TCor Tm (Eng) José Pereira

Novembro 2017

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os intervenientes na minha formação, desde o inicio da minha formação militar, na Academia Militar até o culminar deste curso no Instituto Superior Técnico.

Agradecer de forma especial ao professor Luís Correia pela colaboração na elaboração desta dissertação, e aos membros da equipa GROW que sempre se mostraram disponíveis para partilhar conhecimento.

Por toda a amizade e presença aos meus amigos mais próximos que sempre me apoiaram muitas vezes estando longe e por grandes períodos de tempo.

Um agradecimento muito especial aos meus pais, Lídia e Pedro por me apoiarem e aconselharem sabiamente nas minhas decisões que tenho feito ao longo da vida. Por colocarem os interesses dos filhos sempre à frente dos seus. Agradeço também às minhas irmãs, Beatriz e Inês por estarem sempre ao meu lado e de uma maneira ou outra me ajudarem no que necessito.

Por último, mas não em último, um agradecimento à Marta por ser uma presença essencial na minha vida.

Resumo

O principal objetivo desta dissertação foi o estudo de cobertura e capacidade de uma rede LTE-Avançado D2D entre viaturas militares. O estudo foi feito considerando as mais recentes viaturas do Exército, PANDUR II e considerando as características inerentes às comunicações militares como a distância entre viaturas ou a altura destas. Foi desenvolvido um modelo para avaliação de cobertura e capacidade destas comunicações. O modelo considera três frequências que estão à disposição do Exército: 65 MHz 896 MHz e 1685 MHz e três modulações: 4-PSK, 16-QAM e 64-QAM. Para estas frequências foram analisados quatro ambientes: Urbano, Suburbano, Rural e Floresta. A frequência que se revelou mais eficaz para realizar todos os serviços foi a frequência 65 MHz. O caso particular do ambiente de floresta é bastante crítico aquando do uso da frequência 1685 MHz. Em termos de cobertura, para o cenário com maior taxa de transferência ($R_{b_{[Mbit/s]}} = 144.166$), a frequência 65 MHz obteve os melhores resultados. No ambiente de Floresta, que é o pior caso, esta frequência permite transmitir até uma distância de 3776 metros. Em termos de capacidade, para a maior distância entre viaturas (600 metros) a frequência 65 MHz conseguiria no pior caso transmitir com uma taxa de transferência de 380 Mbit/s.Os resultados obtidos mostram que a tecnologia se revela bastante satisfatória conseguindo realizar as comunicações de uma forma bastante mais eficaz do que com os meios atuais.

Palavras-chave

LTE-Avançado, D2D, rede Ad hoc, viaturas PANDUR

Abstract

The main objective of this thesis was the study of the coverage and capacity of a D2D LTE-Advanced network among military vehicles. The study was made considering the most recent Portuguese Army vehicles, PANDUR II and considering the characteristics inherent in military communications as distance between vehicles or the vehicle's height. A model was developed to evaluate the coverage and capacity of these communications. The model considers three frequencies that are available to the Portuguese Army: 65 MHz, 896 MHz and 1685 MHz and three modulations: 4-PSK, 16-QAM and 64-QAM. For these frequencies, four environments were analysed: Urban, Suburban, Rural and Forest. The most effective frequency to perform all services was the frequency 65 MHz. The particular case of the forest environment is quite critical when using the 1685 MHz frequency. In terms of coverage, for the scenario with the highest throughput ($R_{b_{[Mbit/s]}} = 144.166$), frequency 65 MHz obtained the best results. In the Forest environment, which is the worst case, this frequency allows comunicate up to a distance of 3776 meters. In terms of capacity, for the greater distance between vehicles (600 meters) the frequency 65 MHz could in the worst case transmit with a throughput of 380 Mbit / s. The results obtained show that the technology proves to be quite satisfactory, being able to carry out the communications much more effectively than with the technology used nowdays.

Keywords

LTE-*Advanced,* D2D, Ad hoc networks, PANDUR vehicles

Índice

Agradecimentos iii

Resumo v

Abstract..... vi

Lista de Figuras ix

Lista de Tabelas..... xi

Lista de Acrónimos.....xiii

Lista de Símbolos..... xv

Lista de Software xvi

1. Introdução 1

1.1 Enquadramento 2

1.2 Motivação e Conteúdos 5

2. Conceitos Fundamentais.....7

2.1 Long Term Evolution - Avançado (LTE-A) 8

2.1.1 Arquitetura de Rede 8

2.1.2 Arquitetura dos Sistema de Comunicações Device-to-Device (D2D)..... 10

2.1.3 Interface Rádio 11

2.2 Comunicações em Modo Direto (D2D)..... 14

2.3 Cobertura e Capacidade 16

2.4 Redes Ad hoc..... 18

2.5. Serviços e Aplicações 20

2.6 Estado da Arte..... 23

3. Modelos 25

3.1 Cenários Operacionais..... 26

3.2 Modelos de Cobertura e Capacidade..... 28

3.2.1 Considerações Iniciais..... 28

3.2.2 Balanço de Potência..... 30

3.2.3 Modelo de Cobertura..... 31

3.2.4 Modelo de Capacidade 36
3.3 Modelo da rede ad hoc 39
4. Análise de Resultados 43
4.1 Cenário: Cidade de Bagdade 44
4.2 Resultados 47
4.2.1 Resultados Modelo de Cobertura 47
4.2.2 Resultados Modelo da Capacidade 50
5. Conclusões 53
Anexo A Composição da Viatura PANDUR II 59
Anexo B COST 231-Walfisch-Ikegami 63
Aneco C Recomendação ITU-R P.1411-8 67
Anexo D Weissberger 71
Anexo E Cálculos Taxas de transferência Maximas 73
Anexo F Análise gráfica dos modelos de propagação 75
Anexo G Número de utilizadores em paralelo 85
Referências 93

Lista de Figuras

Figura 1.1 Tráfego de dados entre 2012-2014 (adaptado de [HotoRe16]).....3
Figura 1.2 Comparação do Data Rate das redes PLMN e PMR (extraído de [MiSi12]).....4
Figura 1.3 Diversos cenários das Forças Nacionais Destacadas (extraído de [Op16]). 5
Figura 2.1 Arquitetura EPS do sistema LTE (adaptado de [HoTo11]).....9
Figura 2.2 Divisão das comunicações D2D segundo o Release 12 (extraído de [LCTH16]).....10
Figura 2.3 Comparação entre a transmissão em OFDMA e SC-FDMA (adaptado de [Agil09]).....13
Figura 2.4 Procedimento de descoberta D2D usando o Modo A (adaptado de [LCTH16]). 15
Figura 2.5 Procedimento de descoberta D2D usando o Modo B (adaptado de [LCTH16]). 16
Figura 2.6 Distâncias entre viaturas em progressão alternada e em progressão sobre apoiada (extraído de [Exe15]).....17
Figura 2.7 Constrangimento causado por edifícios numa zona urbana. 18
Figura 3.1 Antena R&S HK056 e Antena R&S HK055L, retirado de [RoSch14]. 29
Figura 3.2 Fluxograma modelo da cobertura. 32
Figura 3.3 Ângulo de ligação Φ= 0º 33
Figura 3.4 Ângulo de ligação Φ= 90º 33
Figura 3.5 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários em função da frequência (Φ=90º). 34
Figura 3.6 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários em função da distância(Φ=90º). 35
Figura 3.7 Atenuação provocada pela vegetação em função da distância 35
Figura 3.8 Atenuação provocada pela vegetação em função da frequência.....36
Figura 3.9 Fluxograma modelo da capacidade. 37
Figura 3.10 Cenário de transmissão em linha com 4 pelotões de infantaria associados. 39
Figura 3.11 Cálculo da cobertura fixando um $Rb[Mbit/s]viat4$.....40
Figura 3.12 Relação entre a distância e a SNR. 40
Figura 3.13 Cenário de transmissão em malha. 41
Figura 4.1 Vista de Satélite e informação topográfica do centro da cidade de Bagdade [Getty17] 44
Figura 4.2 Centro da cidade de Bagdade [ShStock17]. 44
Figura 4.3 Zona rural nos subúrbios da cidade de Bagdade [ShStock17].....45
Figura 4.4 Margens do rio tigre [Getty17].....46
Figura B.1 Estrutura Urbana [Corr14]……...68
Figura F.1 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio urbano em função da frequência (Φ= 0º)……...80
Figura F.2 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio urbano em função da frequência (Φ= 90º)……80
Figura F.3 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio suburbano em função da frequência (Φ=0º)……81
Figura F.4 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio suburbano em função da frequência (Φ= 90º)……81
Figura F.5 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio rural em função da frequência (Φ= 0º)……82
Figura F.6 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio rural em função da frequência (Φ= 90º)……82
Figura F.7 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio urbano em função da distância

(Φ= 0º)…….83
Figura F.8 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio urbano em função da distância (Φ= 90º)……...…83
Figura F.9 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio suburbano em função da distância (Φ= 0º) ……..84
Figura F.10 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio suburbano em função da distância (Φ= 90º)……..…….84
Figura F.11 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio rural em função da distância (Φ= 90º)……85
Figura F.12 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio rural em função da distância (Φ= 0º)……..85
Figura F.13 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários (Φ=0º)……..…86
Figura F.14 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários em função da distância (Φ=90º)…….86
Figura F.15 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários em função da frequência (Φ=90º)…….87
Figura F.16 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários em função da frequência (Φ=0º)……87
Figura F.17 Atenuação provocada pela vegetação em função da distância……..……..88
Figura F.18 Atenuação provocada pela vegetação em função da frequência……..…...89

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Banda de frequência das antenas da viatura PANDUR (adaptado de [Exe13]). 11
Tabela 2.2. Modulações definidas no Release 12 (adaptado de [HoToRe16]). 12
Tabela 2.3. Relação entre largura de banda, número de portadoras e de RB (adaptado de [Corr14]). 14
Tabela 2.4. Vantagens de uma rede Ad hoc (extraído de [COTS11]). 20
Tabela 2.5. Classes de QoS do sistema UMTS (adaptado de [Corr14]). 21
Tabela 2.6 Taxas de transferência associadas aos serviços (extraído de [Khatibi14]) 21
Tabela 2.7. QCI standard para LTE (extraído de [3GPP15]). 22
Tabela 2.9. Resultados obtidos por [VFS13].....24
Tabela 3.1 Descrição dos ambientes típicos.....27
Tabela 3.2 Frequências em estudo e respetivas larguras de banda. 28
Tabela 3.3 Características e valores das antenas. 29
Tabela 3.4 Cálculo do SNR. 34
Tabela 3.5 Taxa de transferência por RB. 38
Tabela 3.6 Taxa de Transferência associada ao serviço.....38
Tabela 4.1 Parâmetros do modelo CWI para os ambientes Urbano e Suburbano. 45
Tabela 4.2 Parâmetros do modelo ITU-terrain para o ambiente rural. 46
Tabela 4.3 Ambiente e respetivos modelos a aplicar 46
Tabela 4.4 Serviços executados em paralelo. 47
Tabela 4.5 $d[km]$ entre viaturas no cenário A. 48
Tabela 4.6 $d[km]$ entre viaturas no cenário B. 49
Tabela 4.7 $d[km]$ entre viaturas no cenário C. 49
Tabela 4.8 $d[km]$ entre viaturas no cenário D. 49
Tabela 4.9 $Rb[Mbit/s]$entre duas viaturas separadas por 50 metros.....51
Tabela 4.10 $Rb[Mbit/s]$entre duas viaturas separadas por 200 metros. 51
Tabela 4.11 $Rb[Mbit/s]$entre duas viaturas separadas por 600 metros. 51
Tabela 4.12 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de transferência de ficheiros (600 m). 52
Tabela C.1 Valores de LoS e NLoS de acordo com a percentagem de localização……73
Tabela E.1 Taxas de transferência requisitadas associadas aos diversos serviços no sistema com um pelotão de infantaria associado, com as viaturas em coluna……78
Tabela E.2 Taxas de transferência requisitadas associadas aos diversos serviços no sistema com quatro pelotões de infantaria associados, com as viaturas em coluna……78
Tabela G.1 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de voz (50 m)……90
Tabela G.2 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de voz (200 m)……..90
Tabela G.3 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de voz (600 m)……..91
Tabela G.4 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de email (50 m)……91
Tabela G.5 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de email (200 m)..……92
Tabela G.6 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de email (600 m). ……92
Tabela G.7 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de *streaming* de vídeo (50 m)……...93
Tabela G.8 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de *streaming* de vídeo (200 m)……..……93
Tabela G.9 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de *streaming* de vídeo

(600 m)……..94
Tabela G.10 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de transferência de ficheiros (50 m)……94
Tabela G.11 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de transferência de ficheiros (200 m) ……..95
Tabela G.12 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de transferência de ficheiros (600 m)…….....95

Lista de Acrónimos

3GPP	Third Generation Partnership Project
CKTF OIR	Combined Joint Task Force – OPERATION INHERENT RESOLVE
CP	Control Plane
CWI	COST 231 – *Walfish-Ikegami*
D2D	Device to Device
DMR	Digital Mobile Radio
DL	Downlink
eNB	eNodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ET	Equipamento Terminal
EU	Equipamento do Utilizador
EUTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FDD	Frequency Division Duplex
FFT	Fast Fourier Transform
GBR	Guaranteed Bit Rate
GPRS	General Packet Radio Service
HSS	Home Subscriber Server
IFFT	Inverse Fast Fourrier Transform
ISI	Inter Symbol Interference
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE-Avanced
MCC	Mission Critical Communication
MIMO	Multiple Input and Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
ONU	Organização das Nações Unidas
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PCC	Policy and Charging Control
PCEF	Policy Control Enforcement Function
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDR	Peak Data Rate
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
P-GW	PDN Gateway
PLMN	Public Land Mobile Network
PMR	Private Mobile Radio
PRC	Portable Radio Communication
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation

QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
RB	Resource Block
RRM	Radio Resource Management
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USIM	Universal Subscriber Identity Module
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCI	Sidelink Control Information
S-GW	Serving Gateway
SNR	Signal to Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex

Lista de Símbolos

Δf	Largura de banda do sinal
a_{pd}	Decaimento médio
F_N	Figura de ruído
G_t	Ganho na antena de transmissão
G_r	Ganho da antena de receção
G_{MIMO}	Ganho máximo da capacidade associado ao uso de MIMO
L_p	Perdas no caminho
L_c	Perdas nos cabos entre o transmissor e a antena
L_u	Perdas no equipamento do utilizador
L_p^{modelo}	Perdas no caminho calculado consoante o modelo
$L_p^{ambiente}$	Perdas no caminho devido ao ambiente específico
M_{SF}	Margem de desvanecimento lento
M_I	Margem de interferência
N_{simb}^{sub}	Número de sub-portadoras por RB
N_b^{simb}	Número de símbolos por sub-portadora
N_{RB}	Número de RB
N_U	Número de utilizadores a executar o serviço em paralelo
P_t	Potência alimentada na antena de transmissão
P_r	Potência disponível na antena de receção
P_{Tx}	Potência de saída do transmissor
P_r	Potência na antena de receção
R_b^{RB}	Número de bits por símbolo
T_{RB}	Duração da slot do RB

Lista de Software

MatLAB	Simulador matemático
Microsoft Excel	Software de cálculo
Microsoft Word	Software de editor de texto

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo contém uma breve evolução histórica dos sistemas de comunicações móveis. São apresentados os objetivos a atingir com esta dissertação e por fim é explicado sucintamente o conteúdo de cada capítulo.

1.1 Enquadramento

A história da tipologia da guerra pode ser dividida em quatro gerações: A primeira geração é caracterizada pelo número de homens envolvidos, em que quem tinha mais homens tinha uma vantagem clara sobre o adversário. A segunda geração focava-se no poder de fogo, tal como o que aconteceu nas guerras napoleónicas, em que ambas as partes ficavam em linha, disparando mutuamente e o vencedor era quem conseguisse sobreviver. Mais tarde, com a 2ª Guerra Mundial, a ideia de unidades militares altamente móveis que conseguiam infiltrar-se nas linhas inimigas de modo a colapsar o potencial de combate do inimigo marcou a 3ª geração. Na atualidade vive-se a chamada 4ª geração em que não se combatem forças armadas, mas sim guerrilhas e terroristas, e em que não se consegue separar claramente tempo de paz de tempo de guerra. Esta última geração é caracterizada por um inimigo difícil de identificar e de combater de forma justa, uma vez que não respeita convenções mundiais. Esta geração é marcada essencialmente pela posse de informação em tempo real suportada por todos os tipos de tecnologia. E os ataques aos meios de transmissão das informações são cada vez mais uma preocupação para as chefias militares. É, portanto, essencial que um exército nos dias de hoje possua meios de transmissão altamente eficientes e capazes de responder à quantidade de informação que é obtida no campo de batalha. Só com uma atualização permanente da tecnologia se consegue obter a superioridade perante o inimigo [DSAD13].

As comunicações móveis desde o seu início já mudaram muito o seu paradigma. Apesar de na sua génesis terem sido criadas para suportar serviços de voz, a verdade é que na atualidade o grande desafio das operadoras é garantir um sistema de comunicação de dados eficaz. Segundo relatórios internacionais a taxa de penetração das comunicações móveis tem vindo a crescer exponencialmente bem como a informação que circula nas redes [Eric16]. O tráfego de dados cresceu com um fator de 3.6x durante um período de dois anos, o que corresponde a um crescimento anual de 90%. Este crescimento é um argumento para o desenvolvimento das redes *Long Term Evolution* (LTE) e da necessidade de expandir o espectro disponível para LTE. Na Figura 1.1. pode-se observar o esse crescimento.

Este crescimento da utilização de dados é também visível no âmbito das comunicações militares embora numa escala mais reduzida, por motivos de não serem usadas pelo mesmo número de utilizadores. Os sistemas de comunicações em missões críticas são necessários com disponibilidade vinte e quatro horas por dia e sete dias por semana, porque são utilizados em emergências, cenários de crise e de catástrofe. Estes sistemas são usados em contextos delicados e em que é necessário tomar decisões muito importantes o mais rápido possível e sob qualquer circunstância. São, portanto, sistemas que têm elevado interesse numa rede militar também.

Uma rede de comunicações móveis comercial não garante o funcionamento aquando destas catástrofes, por exemplo em 2012, no pico da tempestade *Sandy*, nos EUA, 25% da rede comercial esteve fora de serviço, e uma semana depois ainda 9% da rede estava inoperável. Estes sistemas têm de garantir que não falham aquando de catástrofes naturais, ataques terroristas ou outros que ponham em causa o normal funcionamento das redes de comunicações comerciais [MS13].

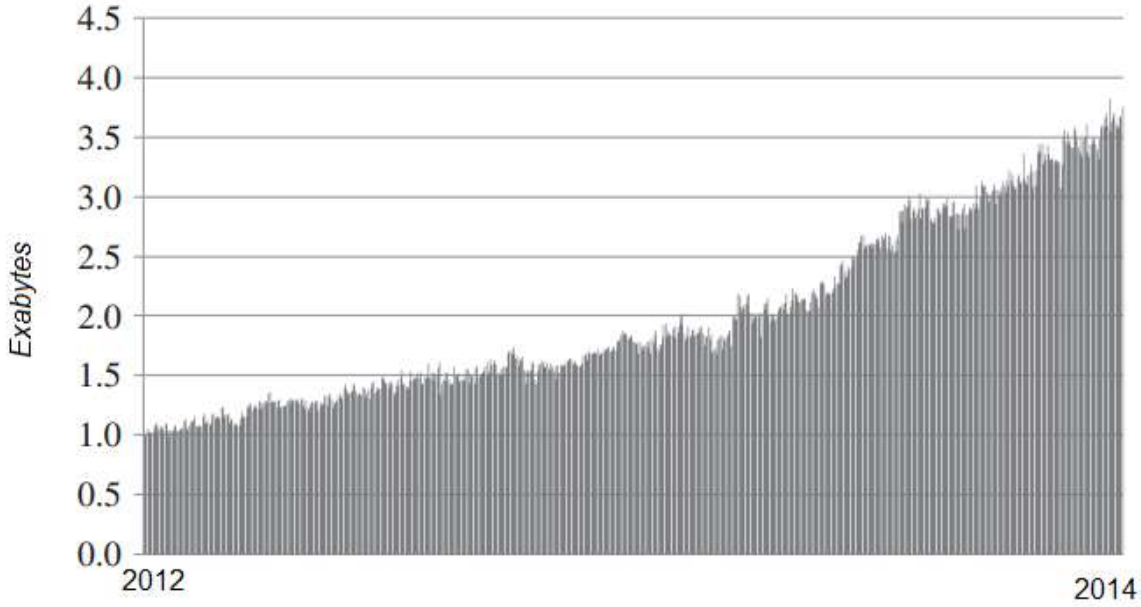

Figura 1.1 Tráfego de dados entre 2012-2014 (adaptado de [HotoRe16]).

Os dispositivos utilizados nestas redes têm de ter requisitos superiores aos dispositivos comerciais. Estes dipositivos necessitam por exemplo de baterias mais duradouras, que cubram turnos de 8 a 10 horas, necessitam também de ser mais robustos e com índices de proteção contra sólidos e líquidos superiores aos equipamentos comerciais. Necessitam de ter supressores de ruído para que os intercomunicadores consigam ouvir e ser ouvidos independentemente das condições climatéricas que os rodeiam. Todas estas características que não são exigidas a um dispositivo de um utilizador comum se devem à natureza crítica dos sistemas de MCC que têm um conjunto de requisitos rigorosos de forma a garantir o cumprimento de tarefas.

Os serviços de comunicações de MC de hoje em dia oferecem sistemas de voz *full-duplex* bastante fiáveis, contudo com a crescente demanda por capacidade das aplicações de dados críticos o desenvolvimento de redes de banda larga sem fio para segurança pública tem vindo a ganhar um grande impulso, fazendo com que apareçam novas tecnologias como o LTE que podem ser adaptadas para este tipo de serviços.

As redes *Private Mobile* Radio são usadas há mais de 70 anos e eram desenhadas com arquiteturas simples, tecnologia analógica e uma quantidade muito pequena de serviços, comparativamente às redes digitais dos dias de hoje. Apesar da evolução destas redes há cinco requisitos que têm de ser mantidos: alta disponibilidade, alta segurança, alta confidencialidade, alta interoperabilidade e comunicação de grupo otimizada. Neste tipo de redes estes requisitos são privilegiados e independentemente do sistema que seja desenhado no futuro, estas redes terão sempre de os cumprir.

Na Europa é usado por excelência o sistema TETRA (*Terrestrial TRunked Radio*), desenhado pela *European Telecommunications Standards Institute*. Este sistema é por excelência o sistema de comunicações de MC mais usado no mundo. A velocidade de transferência de dados é limitada a 7.2 kbps. Com a evolução para o sistema TETRA *Enhanced Data Service* alcança os 150 kbps mas com velocidades desta ordem de grandeza e face ao tamanho dos conteúdos que se pretendem transmitir, nos dias de hoje torna a transmissão muito morosa, agravado pelo facto de em situações de emergência o tempo é um fator essencial e estes sistemas não podem ser agravadores das situações mas sim facilitadores. Para além do TETRA existem outras tecnologias com sistema *Private Mobile Radio* (PMR) como por exemplo o APCO25 usado nos EUA, ou o *Digital Mobile Radio* (DMR) mas são baseados em conceitos semelhantes, portanto possuem a mesma lacuna.

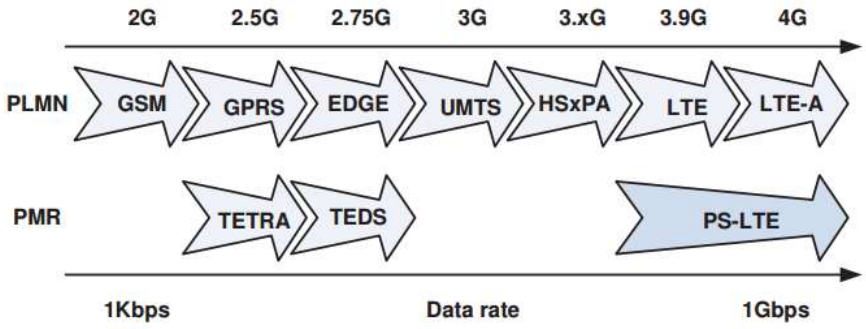

Figura 1.2 Comparação do Data Rate das redes PLMN e PMR (extraído de [MiSi12]).

Por outro lado, existem as *Public Land Mobile Network* (PLMN) que quando comparadas ao nível da taxa de transferência de dados, com as PMR são bastante superiores, como podemos observar na Figura 1.2. A 3GPP aquando do *Release* 8, estabeleceu requisitos para a tecnologia LTE, que eram bastante promissores, como sistemas *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e *Multiple Input* e *Multiple Output* (MIMO) ou antenas inteligentes. Os Estados Unidos da América foi o país que tomou a liderança na banda larga móvel para serviços de emergência e alocou a banda 700 MHz e designou o LTE como solução de banda larga móvel para segurança pública. A tecnologia LTE opera com alto débito binário, em ambientes muito variados como áreas densamente edificadas onde existe multi-percurso, ambientes de floresta ou ambientes de deserto em que é quase nula a atenuação devido a obstáculos. Todos estes cenários são envolventes em que as Forças Armadas podem operar, é, portanto, uma grande vantagem para estas conseguirem de forma segura ter acesso a este tipo de tecnologia.

No que toca ao Exército Português, está atualmente em uso o rádio PRC 525 que tem uma taxa de transferência de dados de 72 kbps usando modulação OFDMA [EID16]. Este valor é substancialmente mais baixo quando comparado com a tecnologia LTE. É então muito clara a vantagem do uso desta tecnologia face às necessidades atuais. O grande desafio na aplicação desta tecnologia em ambiente militar prende-se com os requisitos de segurança e disponibilidade adicionais em relação ao ambiente comercial. No entanto quanto à segurança o Exército possui meios de encriptação independentes do meio de transmissão, pelo que no estudo desta dissertação não serão precisos considerar

procedimentos a nível de segurança da informação. Outro motivo importante é o facto de o meio militar ser um mercado muito mais pequeno comparado com o meio civil o que para as empresas que desenvolvem tecnologia não é lucrativo consequentemente não é feito o investimento que as Forças Armadas assim desejavam.

1.2 Motivação e Conteúdos

A missão do Exército é muito vasta e inclui participar em missões internacionais no âmbito de Organizações Internacionais nomeadamente a Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN) e a Organização das Nações Unidas (ONU), executar ações de cooperação técnico-militar ou cooperar em missões de proteção civil [Exe16]. Até à data, o Exército mantém missões de treino operacional e operações nos seguintes países: Kosovo, Iraque, Mali, República Centro Africana, Somália e Afeganistão. Em todos os cenários independentemente do tipo de operação é necessário estabelecer e manter as comunicações militares para o normal funcionamento da Força destacada. Como é expectável o Exército encontra nestes países cenários completamente diferentes, mas independentemente disso as comunicações têm de funcionar de igual forma, é por isso um grande desafio conseguir uniformizar as tecnologias sabendo que os cenários variam de forma drástica. Os ambientes variam desde estradas e caminhos rurais em que não há impedimento da ligação, locais altamente arborizados ou até zonas urbanas em que a densidade de edifícios pode ser elevada e as viaturas deixam de estar em linha de vista. É por isso um desafio estudar a aplicabilidade do LTE em cenários e condições atmosféricas tão diferentes.

Figura 1.3 Diversos cenários das Forças Nacionais Destacadas (extraído de [Op16]).

Com o evoluir da tecnologia a informação que captamos e partilhamos é cada vez mais completa e pormenorizada. Para acompanhar este nível de pormenorização as capacidades de armazenamento e posterior transferência têm de acompanhar esta evolução. Na atualidade partilham-se informações na ordem dos *Gigabyte* e para fazer face a isto é necessário que a largura de banda aumente, e consequentemente obter tempos de transferência razoáveis. As informações militares não fogem à regra, acompanhando também este crescimento da pormenorização dos conteúdos e neste meio o volume de dados é também cada vez maior. Cada vez mais se obtém informações mais detalhadas

acerca do campo de batalha, através de radares, câmeras térmicas, veículos aéreos não tripulados ou veículos terrestres tripulados ou não tripulados.

Hoje em dia o tempo é um fator essencial, no campo de batalha é indispensável que o Comandante, que se encontra na retaguarda, obtenha as informações da frente de combate o mais rápido possível e que as suas decisões sejam difundidas no mínimo tempo possível. Pelo que, obtendo informação tão pormenorizada é preciso fazê-la chegar em tempo útil [TTG13].

No âmbito desta dissertação vão ser estudadas as comunicações entre as viaturas PANDUR, uma vez que estas são as mais modernas que o Exército Português possui e equipadas com os equipamentos de Transmissões mais recentes. Foram estudadas as questões de cobertura, com o objetivo de obter a distância entre duas viaturas e as questões de capacidade com o objetivo de obter a capacidade entre as mesmas.

Esta dissertação é composta por 5 capítulos e um apêndice formado por 7 anexos. Neste primeiro capítulo está presente um enquadramento e a motivação para a realização da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos fundamentais acerca das redes LTE, detalhes técnicos acerca das redes ad hoc bem como as características presentes para o cálculo da cobertura e capacidade. O estado da arte é também apresentado.

O Capítulo 3 traça os modelos de cobertura e capacidade de forma a obter resultados fazendo variar a frequência ou a distância.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos modelos de cobertura e de capacidade, apresenta também quais as melhores e as piores hipóteses para uso de acordo com os cenários em estudo.

Finalmente o Capítulo 5 apresenta as conclusões e propostas de trabalho futuro.

.

Capítulo 2

Conceitos Fundamentais

Este capitulo fornece a informação fundamental acerca de LTE-A, Comunicação em modo direto, redes Ad hoc, Serviços e Aplicações e acerca do Estado da Arte.

2.1 Long Term Evolution - Avançado (LTE-A)

2.1.1 Arquitetura de Rede

O LTE foi introduzido pela *Third Generation Partnership Project* 3GPP no *Release 8* e desenvolvido no *Release* 9. Segundo a empresa houve várias motivações que levaram ao desenvolvimento desta tecnologia, entre as quais, a exigência do utilizador de taxas de débito binário maiores e melhor Qualidade de Serviço (QoS). [3GPP8]. Estas publicações foram lançadas em 2008 e 2009 respetivamente, pelo que nos últimos anos a evolução da tecnologia teve que acompanhar o crescimento abrupto da utilização de dados. Face a estas exigências, a força motriz que levou a desenvolver o LTE-*Advanced* foi tentar fornecer taxas de débito binário que conseguissem dar resposta às necessidades dos utilizadores. Mais recentemente os objetivos que foram especificados no *Release* 10 foi aumentar o pico da taxa de débito binário em *downlink* (DL) para 3 Gbps e *uplink* (UL) para 1.5 Gbps e aumentar o número de utilizadores ativos em simultâneo.

Esta secção é uma visão geral sobre a arquitetura de rede do LTE-A baseada em [SeTB11], [DPSB08] e [HoTo11].

A rede LTE foi desenhada para suportar serviços de comutação de pacotes, contrariamente às redes anteriores que usam comutação de circuitos. Engloba a evolução do acesso rádio através do *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) e é acompanhado pela evolução dos aspetos não rádio através do *System Architecture Evolution* (SAE) que inclui a rede *Evolved Packet Core* (EPC). O LTE e o SAE formam o *Evolved Packet System* (EPS). A Figura 2.1. mostra a arquitetura geral incluindo os elementos da rede e as interfaces de comunicação entre eles. De seguida são pormenorizados os elementos da rede.

Equipamento do Utilizador (EU): é o dispositivo que o utilizador usa para a comunicação. Tipicamente um *smartphone* ou um cartão de dados para inserir num *tablet* ou computador portátil. O EU também contém o *Universal Subscriber Identity Module* (USIM) usado para autenticar e identificar o usuário e o Equipamento Terminal (ET). Funcionalmente o EU é uma plataforma que comunica com a rede de modo a estabelecer, manter e terminar uma ligação.

E-UTRAN: Nesta camada da arquitetura o único componente é a malha de eNodeB's (eNB), que são basicamente estações base rádio que controlam todas as funções rádio na parte fixa do sistema. Cada eNB está por norma junto à antena. Funcionalmente os eNB's comunicam entre si através da interface X2 e trabalham como ponte entre o EU e o EPC através das interfaces S1-MME e S1-U. O E-UTRAN é o responsável pelas funções de *Control Plane* (CP) como *Radio Resource Management* (RRM) e *Mobility Management* (MM). A função do RRM é controlar o uso da interface rádio, que inclui por exemplo alocar recursos de acordo com as necessidades, priorizar e agendar o tráfego de acordo com a QoS requerida. Por outro lado, o eNodeB tem a responsabilidade de MM, pelo que é aqui que se realiza o controlo e análise de medidas do nível de sinal rádio feitas pelo EU e por ele próprio. Baseado nestas medições o eNodeB toma a decisão de realizar ou não *handover*.

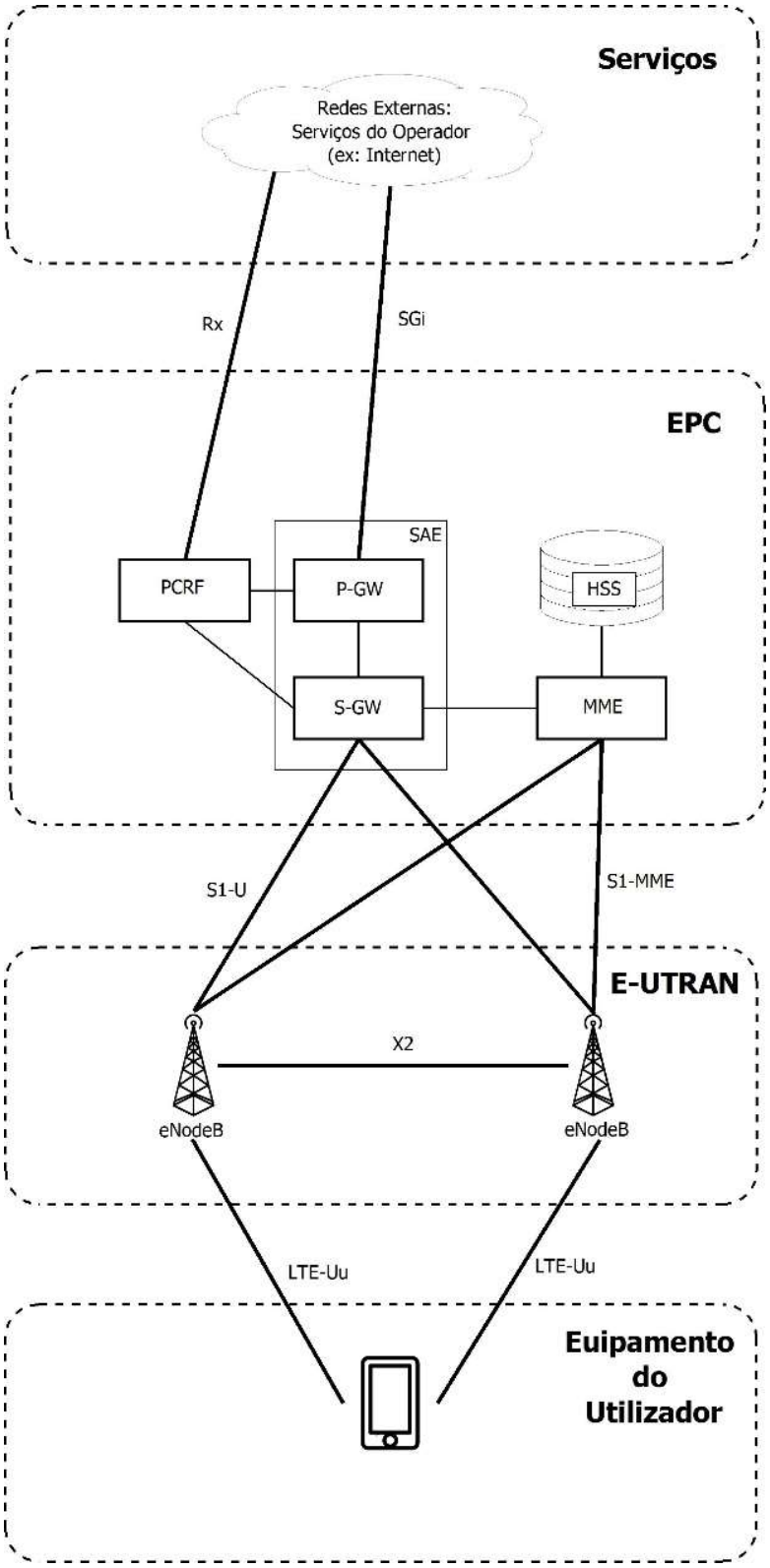

Figura 2.1 Arquitetura EPS do sistema LTE (adaptado de [HoTo11]).

EPC: É o responsável pelo controlo global do EU e pelo estabelecimento das portadoras. É constituída pelos seguintes nós: PDN Gateway (P-GW), Serving GateWay (S-GW) Mobility Management Entity (MME). O EPC é constituído pelos seguintes elementos de rede:

- ***Policy Control and Charging Rules Function* (PCRF)**: é o elemento da rede responsável pelo *Policy and Charging Control* (PCC). Toma decisões de como gerir os serviços em termos de QoS e fornece informação ao *Policy Control Enforcement Function* (PCEF) que está no P-GW. O PCRF fornece a autorização de QoS que decide como um determinado fluxo de dados vai ser tratado no PCEF e garante que está de acordo com o perfil do utilizador.
- ***Home Subscriber Server (HSS)***: O HSS é o repositório que contém toda a informação permanente do utilizador. Aqui são guardadas as localizações que o utilizador visitou, na prática os eNodeB's a que se ligou. Está estabelecido fisicamente como um servidor nas instalações do operador.
- ***Packet Data Network Gateway (P-GW)***: é responsável por alocar o endereço IP correspondente a cada EU, e o EU por sua vez usa essa informação para comunicar com outros IP *hosts* externos por exemplo, a Internet.
- ***Serving Gateway (S-GW)***: A função de alto nível é a gestão e comutação do canal UP. Ou seja, todos os pacotes IP são transferidos através do S-GW que serve de âncora para os portadores locais quando o EU é transferido entre os eNodeB's. O S-GW também inclui a função de Interceção Legal, isto quer dizer, a capacidade de entregar informação acerca da mobilidade de um certo EU às autoridades competentes. Também serve de ponte com outras tecnologias 3GPP como *General Packet Radio Service* (GPRS) ou *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS).
- ***Mobility Management Entity (MME)***:. É o nó de controlo que processa o sinal entre o EU e o EPC, é, portanto, o controlador principal no EPC. Está sempre numa localização segura nas instalações do operador. As funções do MME são, autenticação e segurança, gestão da mobilidade e gestão dos perfis dos utilizadores.

2.1.2 Arquitetura dos Sistema de Comunicações *Device-to-Device* (D2D)

A arquitetura de um sistema de comunicação em modo direto tem algumas especificações que divergem de um sistema LTE convencional. O *Release* 12 enfatiza as comunicações de *public safety* em 3 casos diferentes: **com cobertura**, este cenário indica que o EU considerado está coberto pelos eNB's, **sem cobertura**, este cenário indica que o EU considerado está fora da cobertura dos eNB's, **cobertura parcial**, este cenário indica que alguns EU estão sob cobertura dos eNB's e outros não. Na Figura 2.2. podemos observar um esquema exemplificativo.

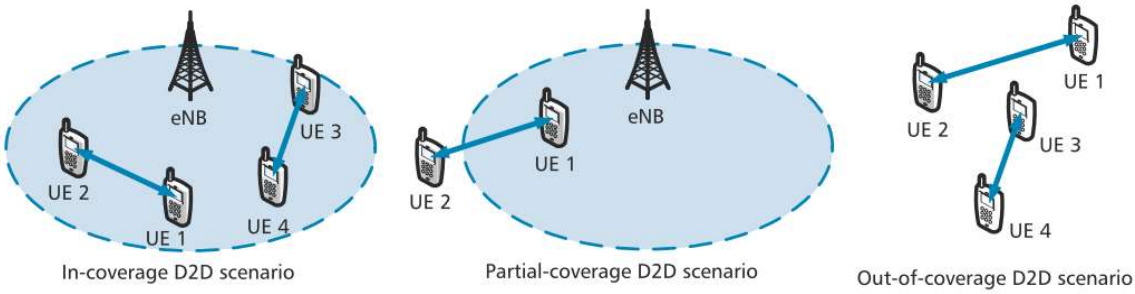

Figura 2.2 Divisão das comunicações D2D segundo o *Release* 12 (extraído de [LCTH16]).

2.1.3 Interface Rádio

É bastante relevante perceber os aspetos de interface que estão na base das comunicações, desde as bandas de frequências possíveis de utilizar até aos pormenores das técnicas de acesso múltiplo. Esta secção visa os aspetos da interface rádio, nomeadamente as bandas de frequência as técnicas de acesso múltiplo, esquemas de modulação, canais de controlo e de informação e MIMO. As fontes em que a secção foi baseada foram [HoTo11], [HoToRe16] e [3GPP13].

No que toca às comunicações comerciais foram definidas 11 bandas de trabalho para *Time Division Duplex* (TDD) e 25 para *Frequency Division Duplex* (FDD). Apesar disso na Europa e em particular em Portugal as bandas utilizadas para fins comerciais são as 800, 900, 1800, 2100 e 2600 MHz. Estas bandas são reguladas por entidades independentes por cada país, em Portugal a entidade reguladora é a ANACOM.

As comunicações militares diferem nas bandas de frequência utilizadas uma vez que estão atribuídas frequências na ordem das dezenas ou poucas centenas de MHz. Uma das principais razões é o facto de com frequências mais baixas se conseguir realizar comunicações a maiores distâncias. Quanto ao equipamento de transmissões já usado pelas viaturas PANDUR, tem-se que estas estão equipadas com várias antenas, que servem diversos sistemas de telecomunicações. O Anexo A possui todas as informações acerca do material da PANDUR e daí se pode obter a informação referente às antenas disponíveis, esplanadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Banda de frequência das antenas da viatura PANDUR (adaptado de [Exe13]).

Antena	**Banda de Frequência [MHz]**
Antena veicular HF	2 – 30
Antena veicular VHF	33 – 108
Antena veicular VHF/UHF	30 – 512
Antena UHF	225 – 450

Quando se fala de comunicações comerciais ou comunicações militares existem sempre algumas problemáticas na transmissão do sinal a ter em conta. O sinal num canal *wireless* chega ao utilizador através de multipercurso, e por assim ser o sinal vai sofrer atenuação, que é chamada de atenuação de multipercurso. Como consequência a duração do símbolo vai estender-se, criando interferência com o próximo símbolo, a este fenómeno é chamado de *Inter Symbol Interference* (ISI) ou *Cross-Talk.* Para solucionar este problema são introduzidos períodos de guarda entre os símbolos.

Outro fator provocador de atenuação surge quando os sinais têm maior largura de banda do que a largura de banda de coerência do canal. Para reduzir esta atenuação são usadas técnicas de equalização do canal. Outra limitação é a interferência entre canais, que acontece quando as

frequências das portadoras se sobrepõem umas às outras dando origem à interferência inter canal. Contorna-se este problema guardando larguras de banda de guarda (*Guard Band*). Todas estas limitações somadas ao facto de o espetro das frequências estar limitado e o seu preço ser muito elevado propulsionou as técnicas de acesso múltiplo.

Com o principio da *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), diferentes utilizadores podem utilizar diferentes portadoras ou sub portadoras para aceder ao sistema simultaneamente, tendo a sua modulação em volta da frequência central. O OFDMA é um caso particular da FDMA, onde os utilizadores são fornecidos com um conjunto de sub portadoras que se sobrepõem no domínio da frequência. Contudo estas sub portadoras são especialmente concebidas para serem ortogonais entre si, o que lhes permite ocupar a mesma largura de banda sem que haja interferência. Isto por sua vez descarta as *Guard Bands.* Em OFDMA, o fluxo de dados de alta velocidade é dividido em paralelo em fluxos menores e de menor velocidade, chamados sub portadoras. Estas sub portadoras são centradas em torno da frequência em múltiplos de 15 KHz ou 66.7μs, este elemento desta divisão é chamado de *Resource Element*. Consequentemente uma sub portadora pode providenciar uma *bit rate* de quinze mil símbolos por segundo.

No domínio do tempo estas sub portadoras vão ser representadas por sinusoidais, contudo para serem transportadas necessitam de ser moduladas. Na Tabela 2.2. pode-se observar as modulações definidas no *Release* 12 lançado no final de 2015. Apesar disto há muitos dispositivos que ainda não têm tecnologia que suporte modulações tão avançadas como 64-QAM ou a 256-QAM [HoToRe16].

Tabela 2.2. Modulações definidas no *Release* 12 (adaptado de [HoToRe16]).

Categoria EU	Classe 11	Classe 12	Classe 13	Classe 14	Classe 15
Modulação DL	64-QAM	64-QAM	64-QAM	256-QAM	256-QAM
Modulação UL	16-QAM	16-QAM	16-QAM	16-QAM	64-QAM

Existe um problema que os períodos de guarda não conseguem resolver, quando existem mudanças abruptas no domínio do tempo durante o período de transição (final do símbolo para o início do *Guard Period*) causa interferência entre as portadoras, isto faz com que a ortogonalidade entre as sub portadoras seja afetada. No OFDMA emprega-se então um tipo mais complexo de *Guard Period*, que é chamado de *Cyclic Prefix*. O *Cyclic Prefix* evita a interferência inter canal e a interferência entre portadoras simultaneamente.

Apesar destas vantagens do OFDMA, a soma das múltiplas sub portadoras em paralelo resulta num *Peak to Average Power Ratio* (PAPR) muito alto, em consequência disto o consumo de energia é elevado, isto faz com que esta tecnologia não possa ser utilizada nos dispositivos móveis em UL, por estes terem energia limitada. Para superar esta desvantagem o LTE usa outra tecnologia para UL, o *Single Carrier Frequency Divison Multiple Access*, SC-FDMA. Ao contrário do OFDMA, em que um símbolo ocupa 15 KHz no SC-FDMA um símbolo é distribuído por 12 sub portadoras.

Para que seja possível processar e analisar o sinal no domínio da frequência e do tempo ao mesmo tempo, ODFMA é implementado usando a *Fast Fourier Transform* (FFT) e a *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT). Alguns dos aspetos que levaram à escolha desta tecnologia para o uso no LTE foi a boa performance em canais de frequência seletiva, a baixa complexidade do recetor de banda base, as boas propriedades espetrais e manuseamento de múltiplas larguras de banda, a adaptação da ligação e agendamento (*scheduling*) da frequência e a compatibilidade com tecnologias avançadas quer do recetor quer da antena.

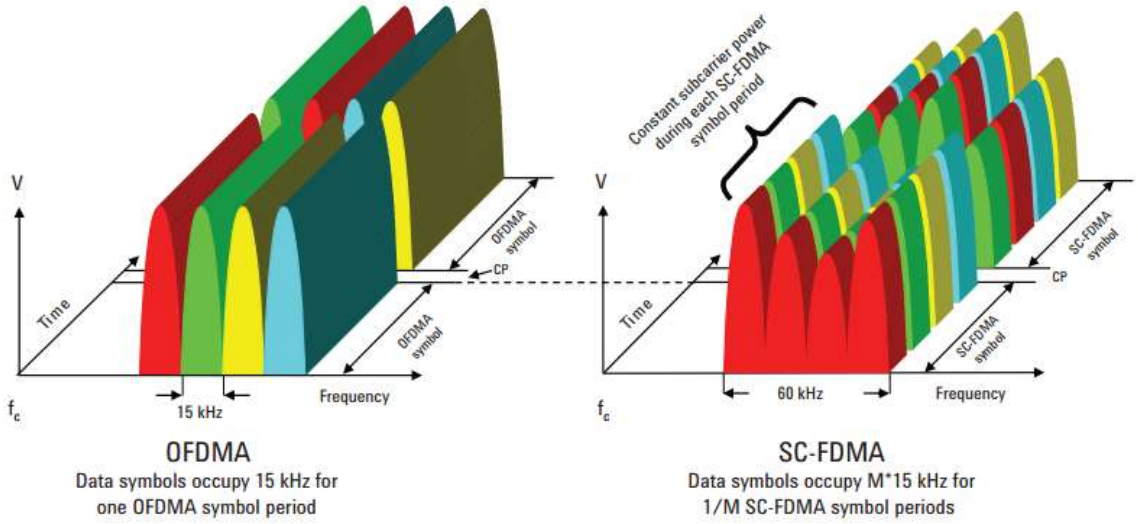

Figura 2.3. Comparação entre a transmissão em OFDMA e SC-FDMA (adaptado de [Agil09]).

A alocação de recursos no LTE-A é feita recorrendo a *Resource Blocks* (RB's) e não em sub portadoras individuais. Estes RB's são compostos de doze sub portadoras, que resultam numa alocação de largura de banda mínima de 180 kHz.

No LTE-A existe heterogeneidade das células com o uso de nós de retransmissão, estes nós são estações base de baixa potência que providenciam cobertura e capacidade às fronteiras das células, também podem ser usadas para conectar áreas remotas sem o recurso a fibra ótica. O nó de retransmissão está ligado ao *Donor* eNB (DeNB) via interface rádio Un, que é basicamente uma modificação da interface Uu, adaptada no sistema LTE-A. Os utilizadores na fronteira da célula estão ligados aos nós de retransmissão via Uu, enquanto que os utilizadores próximos do centro da célula ficam diretamente ligados ao DeNB via interface Uu.

Por último uma das principais características dos sistemas LTE é o MIMO. O principio base na multiplexagem espacial é enviar sinais de dois ou mais antenas com diferentes *streams* de informação aumentado o *Peak Data Rate* (PDR). A maior alteração no que toca ao MIMO com o LTE-A foi a introdução do MIMO 8X8 em DL e 4x4 em UL.

Tabela 2.3. Relação entre largura de banda, número de portadoras e de RB (adaptado de [Corr14]).

Largura de Banda [MHz]	**1.4**	**3**	**5**	**10**	**15**	**20**
Número de sub portadoras	72	180	300	600	900	1200
Número de RB	6	15	25	50	75	100

2.2 Comunicações em Modo Direto (D2D)

Esta secção aborda os procedimentos de descoberta, alocução de recursos *Device To Device* (D2D) e é baseada nas seguintes fontes: [LCTH16] e [HoToRe16].

A 3GPP com o *Release* 12 definiu o ano de 2015 como meta para desenvolver a geração subsequente de uma rede segurança pública. A grande diferença era garantir a cobertura de utilizadores fora do alcance das estações base. O facto dos utilizadores não estarem dependentes de uma BS revelou-se muito atraente porque em caso de catástrofe natural há muitas infraestruturas que colapsam e com elas são também destruídas muitas estações base. Esta tecnologia também chamou muito a atenção das Forças Armadas, uma vez que estas operam regularmente em ambientes urbanos destruídos e sem redes de comunicações ou em meios rurais em que a cobertura é quase inexistente.

As tecnologias D2D já têm sido estudadas há alguns anos, são exemplos o *Bluetooth* ou o *WiFi Direct*. Trabalhar em bandas de frequência livres permite usar larguras de banda mais largas e ter um custo de desenvolvimento muito inferior. Por outro lado, estas tecnologias têm pior eficiência no consumo de energia, distâncias entre dispositivos mais reduzidas e vulnerabilidade à interferência. A 3GPP afirma no *Release* 12 que o LTE/LTE-A deverá ser a primeira rede responsável por providenciar serviço de comunicações.

Uma das particularidades da comunicação D2D é que os dispositivos móveis têm a capacidade de se descobrir uns aos outros. A 3GPP definiu 2 modos para a descoberta direta, Modo A ("*I am here*") Eu estou aqui, e o modo B ("*Are you there*? / *Who is there*?"), Estás aí? Quem está aí?. O modo A tem dois papéis, EU anunciador e EU monitorizado. O EU anunciador espalha por *broadcast* as mensagens de descoberta em intervalos de descoberta predefinidos. Os utilizadores nas proximidades lêem as mensagens e se interessados, podem processá-las e responder. O modo B também possui dois papéis, o EU descobridor e o EU descoberto, o descobridor transmite uma mensagem com o conteúdo do que está interessado em descobrir, o descoberto recebe a mensagem modo B e responde com uma mensagem de descoberta em modo informando da sua existência. Após chegada a notificação de descoberta os dois EU estão prontos para efetuar comunicações D2D. Podemos observar nas Figuras 2.6. e 2.7. as diferenças acima descritas.

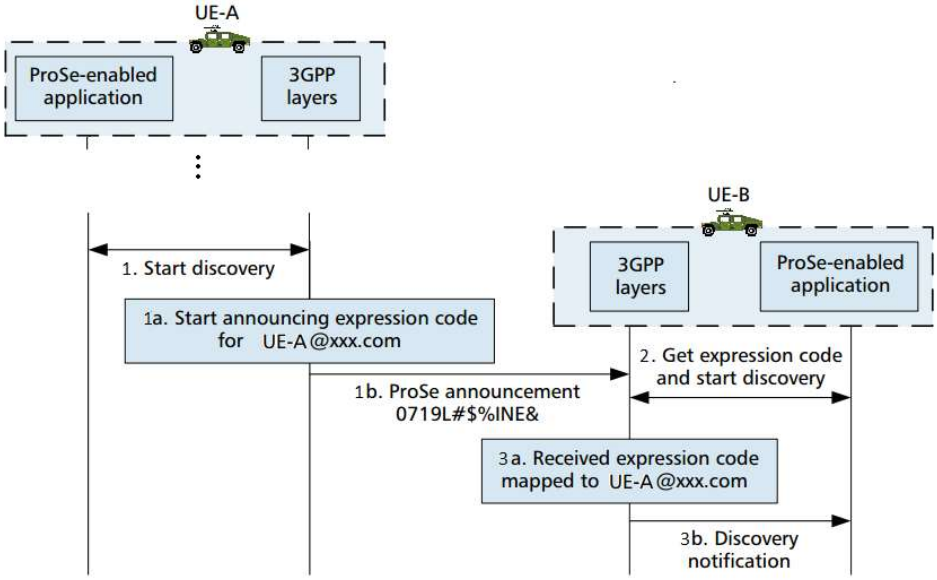

Figura 2.4. Procedimento de descoberta D2D usando o Modo A (adaptado de [LCTH16]).

Para a alocação de recursos foram também definidos dois modos. No modo 1 o eNB calendariza recursos rádio para um determinado EU para transmitir dados diretos e controlá-los. Este modo é suportado por EU dentro da área de cobertura. No modo 2, um EU seleciona por si próprio recursos dos conjuntos já pré-configurados para transmitir dados diretos e controlá-los. Este modo tem a vantagem de ser suportado por EU's com ou sem cobertura. Caso esteja dentro da cobertura do eNB, os recursos vão ser alocados por este. Independentemente do modo como foram alocados os recursos o EU que transmite tem de informar o outro acerca da sua seleção. Esta informação é chamada de *Sidelink Control Information* (SCI). Cada SCI é repetida duas vezes de forma a garantir a confiabilidade da rede.

O canal físico de UL, *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) na ligação convencional Uu (eNB – EU) é usado para as comunicações broadcast D2D. Isto porque no PUSCH os transmissores são EU's e os recetores eNB's, quando um EU está a transmitir dados para o eNB, os outros EU's podem executar comunicações D2D se a interferência dos sinais não for significativa. Por outro lado, se o transmissor for um eNB então o canal físico será o de *downlink*, *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH). Então se dois EU's estiverem a transmitir entre eles com o (PDSCH), o eNB torna-se uma grande fonte de interferência, que vai degradar a qualidade da comunicação entre os EU's. Resumindo, operar as comunicações no canal em PUSCH obtém melhor eficiência espectral.

Cada dispositivo a operar em D2D necessita de saber se vai ser a fonte de sincronização. Se não for a fonte de sincronização necessita então de derivar a referência de tempo. Esta tarefa é facilitada se os EU's estiverem ligados a uma eNB porque podem tomar esta como referência. Caso exista cobertura parcial é expectável que todos os EU's que estão fora da cobertura se referenciem pelo EU que está dentro da cobertura e que se pode referenciar pelo eNB. Caso não exista cobertura de um eNB é necessário garantir que todos os EU's ligados entre si têm a mesma referência temporal. Para atingir estes objetivos o D2D suporta a sincronização *multi-hop*. Isto significa que a sincronização de tempo pode ser gerada por um EU ou um eNB e ser consequentemente encaminhada pelos EU's.

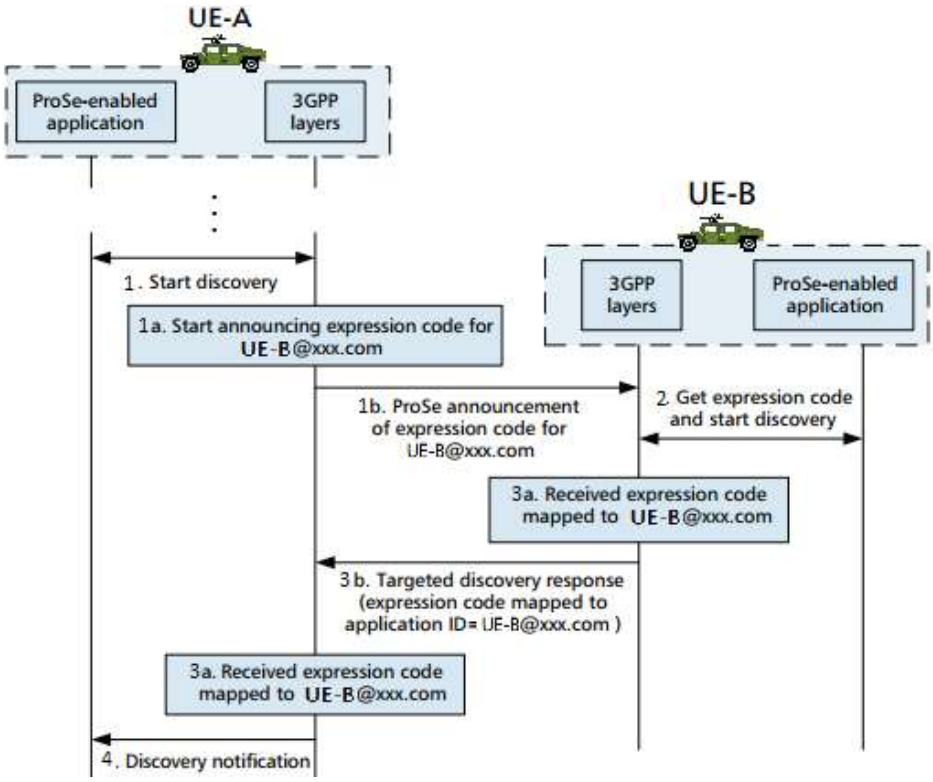

Figura 2.5. Procedimento de descoberta D2D usando o Modo B (adaptado de [LCTH16]).

2.3 Cobertura e Capacidade

Esta seção irá descrever as principais características a ter em conta para o cálculo da cobertura e capacidade de uma rede LTE de acordo com as particularidades das comunicações militares. As fontes consultadas foram: [HoTo11], [Corr14] e [Guita16].

Para melhor perceber a cobertura e a capacidade da rede que seria necessária para dar suporte a uma unidade militar é preciso especificar a orgânica e funcionamento de um pelotão que se desloca montado. O Exército possui várias valências no que diz respeito às viaturas blindadas ou de transporte de pessoal. Os pelotões mecanizados do Exército são maioritariamente compostos por viaturas PANDUR II ou M113. Cada pelotão é composto por 4 viaturas que se distanciam conforme a probabilidade de contato com o inimigo.

Existem três níveis de probabilidade, **improvável**, **provável** e **iminente**. Para cada nível as viaturas distanciam-se de forma diferente para melhor conseguirem reagir a ataques inimigos. Numa situação de contato **improvável**, o pelotão progride continuamente, neste caso a velocidade das viaturas é mais elevada do que nos outros níveis. As viaturas prosseguem alternadas com uma distância lateral de cerca de 50 m e afastadas entre 50 e 100 metros na direção do deslocamento. Quando o contato se torna **provável**, a progressão passa a ser sobre apoiada, neste caso a distância entre as viaturas aumenta para 400 a 600 metros. No último caso, com probabilidade **iminente**, as distâncias reduzem-se porque as viaturas assumem posições de combate. Conclui-se então que num deslocamento sobre

apoiado o pelotão se posiciona de forma mais afastada. Isto é um dado pertinente quando se pretende comunicar entre a primeira e a última viatura. Sendo o pelotão constituído por 4 viaturas, a distância entre a primeira e a última será de cerca de 1800 metros. Na Figura 2.8. podemos visualizar o dispositivo em progressão alternada e em progressão sobre apoiada.

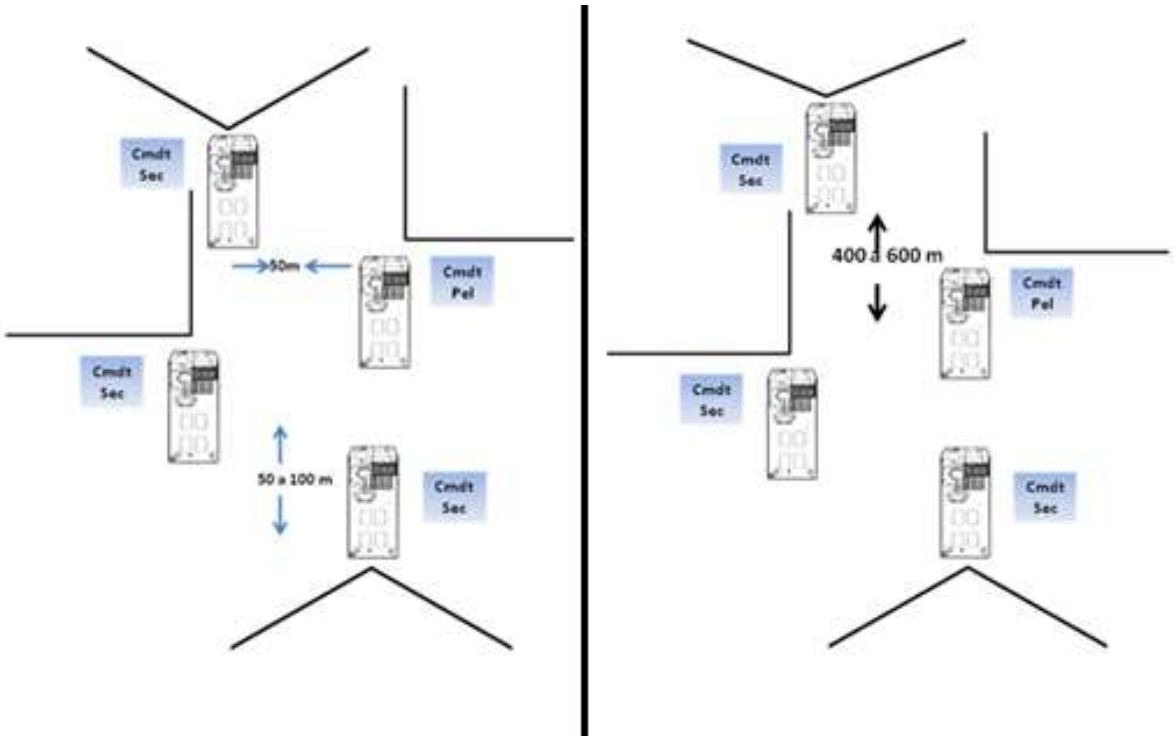

Figura 2.6. Distâncias entre viaturas em progressão alternada e em progressão sobre apoiada (extraído de [Exe15]).

Na Figura 2.9 pode-se observar o constrangimento que uma zona urbana pode causar na comunicação entre as viaturas

Numa rede LTE comum o pico de transferência de dados é atingido usando a largura de banda máxima, 20 MHZ, modulação 64QAM e transmissão MIMO. A modulação 64QAM transporta 6 bit por símbolo e usando antenas MIMO 2x2 aumenta-se o pico de transferência para o dobro, ou seja, 12 bits por símbolo. Então, com estas configurações é possível atingir 12bps/Hz. Com o surgimento do LTE-A e com o lançamento do *Release* 10 pretende-se atingir os 30 bps/Hz. Isto é conseguido com os melhoramentos do LTE-A nomeadamente, o uso de sistemas MIMO 8x8 em DL e MIMO 4x4 em UL, a agregação de portadoras e o recurso a nós retransmissores. A agregação de portadoras tem um papel importante na velocidade de pico, em 2015 com a agregação de três portadoras de 20 MHz atingiu-se 450 Mbps de velocidade de pico de DL.

Os cálculos da ligação estimam a atenuação máxima permitida para que a comunicação se realize, que se concretizam nas perdas no caminho entre a estação base e o recetor. A atenuação máxima permite determinar o alcance máximo da célula através de um modelo de propagação adequado. Como por

exemplo, Espaço Livre*, Walfish-Ikegami, Okumura-Hata, Longley-Rice* entre outros. Sabendo o alcance da estação base sabe-se quantas destas serão necessárias para garantir a cobertura da área em estudo. Para a escolha dos modelos é necessário antes classificar o cenário, os modelos consideram três tipos, urbano, suburbano e rural.

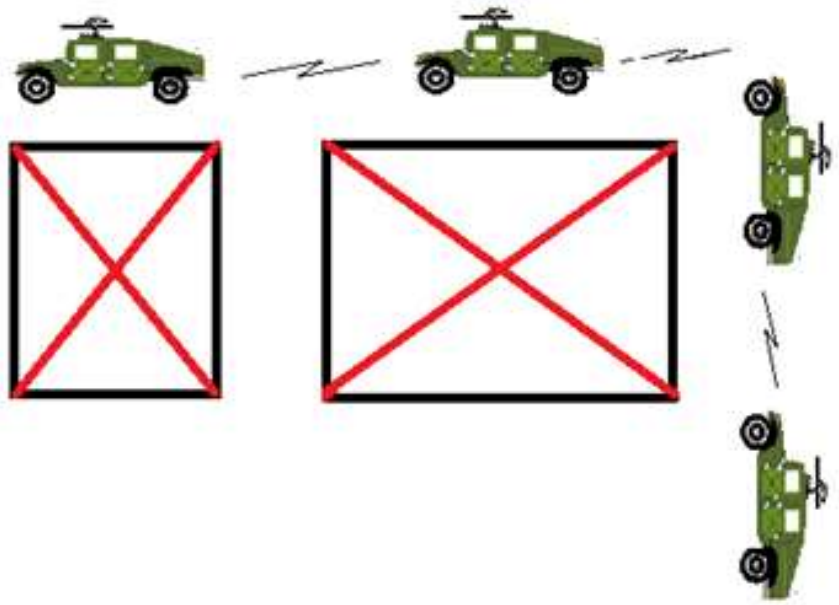

Figura 2.7. Constrangimento causado por edifícios numa zona urbana.

Existem duas famílias de modelos para distâncias superiores a 5 km usa-se modelos da família COST 231 – *Okumura-Hata*, que podem ser aplicados em cenários urbanos, suburbanos ou rurais. Para distâncias inferiores a 5 km usa-se a família COST 231 – *Walfish-Ikegami* (CWI). Quanto à classificação dos ambientes é necessário ter em conta estes parâmetros: ondulação do terreno, densidade da vegetação, densidade de edifícios e altura, densidade de áreas abertas e densidade de áreas aquáticas. Todos os modelos estão definidos para uma certa banda de frequência, distância da ligação e ambiente.

O modelo *Okumura-Hata* compreende ligações com frequência entre [150, 2000] MHz e para distâncias entre [1, 100] km, com a formulação de Hata a frequência varia entre [150, 1500] MHz e a distância diminui para [1, 20] km. O modelo CWI é valido para frequências entre [800, 2000] MHz e distâncias entre [0.02, 5], tem a grande vantagem de ser válido para distâncias muito curtas ao contrário de outros modelos como Espaço Livre*, Walfish-Ikegami, Okumura-Hata ou Longley-Rice*.

2.4 Redes Ad hoc

Esta secção visa detalhar aspetos técnicos acerca das redes Ad hoc. É baseada nas seguintes fontes: [BCGS04] e [CorAgra02].

As comunicações sem fios podem ser divididas em duas categorias no que diz respeito à tipologia da infraestrutura da rede. Nomeadamente as redes baseadas numa infraestrutura e redes sem infraestrutura, também conhecidas como redes Ad hoc. As primeiras são constituídas por nós de rede fixos, e os serviços são tipicamente distribuídos por esta infraestrutura pré-configurada. Por exemplo, as redes de comunicações móveis são redes com uma infraestrutura fixa, cada nó tem uma responsabilidade especifica na rede. Por outro lado, existem as redes sem infraestrutura. Neste caso a rede é formada dinamicamente através da cooperação de um conjunto de nós independentes. Não há um pré arranjo de uma função especifica para cada nó, cada um toma a decisão sozinho baseado na situação da rede. Esta secção vai descrever com mais pormenor as redes Ad hoc.

No geral as redes Ad hoc são formadas dinamicamente por um sistema de nós autónomos que estão conectados por ligações sem fios e que não têm uma estrutura de rede fixa ou administração centralizada. Os factos dos nós se poderem movimentar livremente e organizarem-se de forma independente permite que a topologia da rede mude muito rapidamente e de forma imprevisível. Estas características revelam-se grandes vantagens quando aplicadas em comunicações militares operacionais. Estas redes podem operar de forma autónoma ou conectada a outras redes maiores como por exemplo à Internet. Na grande maioria dos casos a comunicação não consegue ser realizada diretamente entre os dois dispositivos tendo que percorrer a rede executando vários saltos "*hops*", por isso é muito comum chamar a estas, redes Ad hoc *multi-hop*.

As redes Ad hoc são especialmente atrativas para as comunicações militares, uma vez que no campo de batalha a mobilidade é um fator determinante e nesta tipologia os nós podem estar em constante movimento. Na Tabela 2.4. podemos observar as principais vantagens que uma rede Ad hoc e que são especialmente atrativas no âmbito das comunicações militares.

Estas redes podem de uma forma genérica ser constituídas por dispositivos muito diferentes incluindo computadores portáteis, torres fixas ou telemóveis. Cada dispositivo deve conseguir comunicar com todos os outros independentemente de se tratar de um dispositivo de mesmo tipo ou não.

O facto de a rede ser assim tão heterogénea leva a alguns problemas. As redes Ad hoc não possuem uma estrutura física estática e esta carência associada à comunicação ser feita sem fios criam novos desafios até então que eram inexistentes nas redes fixas.

Como os nós se movimentam arbitrariamente a topologia da rede muda frequentemente e imprevisivelmente resultando em mudanças dos caminhos que os pacotes percorrem podendo possivelmente causar a própria perda destes. Sabendo que os nós são fisicamente dispositivos que podem ser muito diferentes entre si, vão surgir problemas relacionados com a restrição de banda, capacidade variável, propensão a erros, e as ligações sem fios continuam a ter capacidades significativamente mais baixas que as ligações com fios causando consequentemente problemas de congestão de tráfego. Esta heterogeneidade dos nós pode resultar em ligações assimétricas em que um dos dipositivos por ter mais alcance consegue transmitir para outro dispositivo de menor alcance, mas este não lhe consegue responder. Uma problemática que é particularmente importante no âmbito desta dissertação é a segurança da rede. As redes sem fio são geralmente mais vulneráveis a ameaças de segurança da informação. O uso de canais sem fio a transmitir em *broadcast* é propenso a ameaças

de segurança que juntamente com a descentralização da rede resulta numa solução de segurança individual nó a nó.

Tabela 2.4. Vantagens de uma rede Ad hoc (extraído de [COTS11]).

Vantagem	Descrição
Auto Formação	Os nós que entram na cobertura da rede podem estabelecer comunicação sem nenhuma pré-configuração ou intervenção manual.
Self healing	Os nós podem juntar-se ou sair da rede sem afetarem as operações dos outros nós.
Sem infraestrutura	Os nós formam a sua própria rede e formam essencialmente a própria estrutura.
Peer-to-peer	Os nós podem trocar informação sem necessitarem de acordo prévio e dependência de recursos centralizados.
Predominantemente sem fios	Estas redes são na maioria dos casos sem fios, mas podem ser estendidas para suportar comunicações por fio.
Mobilidade	Os nós móveis estão em movimento constante, e a topologia da rede está constantemente em mudança.

2.5. Serviços e Aplicações

Esta secção descreve os serviços e aplicações oferecidos pelo LTE-A, é baseada em [SeTB11], [Alme13] e [Corr14].

Num caso típico, um utilizador estará a correr múltiplas aplicações ao mesmo tempo, cada uma com um QoS diferente. Um exemplo de um utilizador comum pode ser, este pode estar a fazer uma chamada VoIP ao mesmo tempo que está a fazer um *download* de um documento. A chamada VoIP tem requisitos mais exigentes em termos de atraso do que o download enquanto este requer uma perda de pacotes muito inferior à chamada. Este exemplo também pode ser tomado para o âmbito da dissertação, uma vez que o é pretendido que a rede suporte chamadas VoIP, envio de dados biométricos, download de cartas topográficas ou documentos com informações relevantes para as operações. Em ordem a suportar múltiplos requisitos de *QoS*, as diferentes portadoras são configuradas dentro do EPS, cada uma associada a um determinado nível *QoS.* É possível analisar os atributos principais das diferentes classes de serviços na Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Classes de QoS do sistema UMTS (adaptado de [Corr14]).

		Classe do Serviço			
		Conversacional	***Streaming***	**Interativo**	**Segundo Plano**
Atributos Principais	**Tempo Real**	Sim	Sim	Não	Não
	Simétrico	Sim	Não	Não	Não
	Taxa Garantida	Sim	Sim	Não	Não
	Atraso	Minimamente fixo	Minimamente variável	Moderadamente variável	Altamente variável
	Buffer	Não	Sim	Sim	Sim
	Bursty	Não	Não	Sim	Sim
	Exemplo	Voz	*Streaming* vídeo	*Web Browser*	SMS

Tabela 2.6 Taxas de transferência associadas aos serviços (extraído de [Khatibi14])

Serviço		**Classe do Serviço**	**Bit Rate [kbit/s]**		
			Mínimo	**Máximo**	**Médio**
Voz		Conversacional	5.3	64	12.2
Partilha ficheiros		Interativo	384	-	1024
Web Browsing		Interativo	30.5	-	500
Email		Segundo Plano	10	-	100
M2M	**Smart Meters**	Segundo Plano	-	-	200
	e-Health	Interativo	-	-	200
	Surveillance	*Streaming*	64	384	200
Video	**Calling**	Conversacional	64	2048	384
	Streaming	*Streaming*	500	13000	5120

Tabela 2.7. QCI standard para LTE (extraído de [3GPP15]).

QCI	Tipo de Recurso	Prioridade	Atraso do pacote [ms]	PELR	Exemplos
1	GBR	2	100	10^{-2}	Voz Conversacional
2		4	150	10^{-3}	Vídeo Conversacional (*Live Streaming*)
3		3	50	10^{-3}	Jogo em tempo real
4		5	300	10^{-6}	Vídeo Não conversacional (*Buffered Streaming)*
65	GBR	0.7	75	10^{-2}	Voz em *Mssion Critical User Plane Push toTalk* (MCPTT)
66		2	100	10^{-2}	Voz em *Non-Mision Critical User Plane Push to Talk*
5	Não-GBR	1	100	10^{-6}	IMS *Signalling*
6		6	300	10^{-6}	Video (*Buffered Streaming)* Baseado em TCP (ex: www, e-mail, chat, p2p, etc)
7		7	300	10^{-3}	Voz, Vídeo (*Live Streaming*), *Gaming Interactive*
8		8	300	10^{-6}	Video (*Buffered Streaming)* Baseado em TCP (ex: www, e-mail, chat, p2p, etc)
9		9			
69	Não-GBR	0.5	60	10^{-6}	*Mission Critical Delay Sensitive Signalling* (MCPTT *signaling*)
70		5.5	200	10^{-6}	Dados MC

Pode-se classificar as portadoras em duas categorias consoante a *QoS* que o serviço providencia, portadoras *Guaranteed Bit Rate* (GBR) ou não GBR.

- As portadoras GBR têm associado um valor mínimo para a taxa de transferência nas quais os recursos de transmissão são permanentemente alocados no estabelecimento da portadora.
- As portadoras não-GBR não garantem um valor mínimo para a taxa de transferência. Para estas portadoras não é alocada uma largura de banda permanente.
- A 3GPP especificou quatro classes para caracterizar o tráfego para a tecnologia UMTS:

Conversacional, *Streaming*, Interativo e Segundo Plano. Para a tecnologia LTE não foram definidas classes, apesar disso a classificação feita para UMTS providencia informação relevante.

- O último nível de priorização é o plano do utilizador. As portadoras são classificadas em diferentes níveis definidas por um identificador, QoS *Class Identifier* (QCI). O QCI é um índice que identifica uma série de valores por prioridade, atraso e rácio de perdas. O QCI sinaliza os três parâmetros juntos, cabendo aos operadores criar ou não classes adicionais consoante a sua rede. A 3GPP definiu nove QCI para as redes comerciais, mas também definiu quatro identificadores especiais para as comunicações de segurança pública (QCIs 65, 66, 69 e 70).

2.6 Estado da Arte

Quando falamos em uso de LTE para comunicação entre viaturas militares, derivado à especificação do tema existem poucas investigações da temática. No entanto o LTE para serviços de segurança pública e em comunicações D2D já tem sido alvo de investigação desde o *Release* 12 em que a 3GPP afirmou que esta vertente deveria ser investigada.

No artigo [DSAD13], os autores fazem uma abordagem do ponto de vista teórico, apresentando vantagens e desvantagens das redes 4G no campo de batalha. É referido que os rádios necessitam de ter tamanhos e capacidades adaptados à realidade da segurança pública. Refere também que deve operar virtualmente uma vez que não existe uma infraestrutura fixa, não podem ser erguidas torres celulares no campo de batalha. O artigo apresenta os requisitos mínimos impostos pela DARPA para os dispositivos. Os autores sugerem serviços de satélite para suportar a rede como *backhaul.* Este artigo aborda também os desafios de energia para as redes, no caso dos nós se tratarem de rádios que são transportados por soldados. No caso desta dissertação não se torna um inconveniente uma vez que os rádios estão acoplados a viaturas logo a fonte de energia não é uma questão crítica.

Em [CiNoLi13] é feita uma análise aos desafios de segurança que uma eventual rede militar com um sistema LTE-A necessita. Este artigo não contempla nós móveis, ou seja, o artigo analisa para uma rede tradicional, com nós instalados no terreno. Começa por descrever os requisitos de segurança para sistemas de comunicações militares nos EUA, e estuda a fragilidade da rede a ataques de *jamming* por parte do inimigo, conclui que há canais que são mais vulneráveis a interferência e que devem ser protegidos através de redundância.

O estudo realizado para a Comissão Europeia [FHB14] examina os requisitos relativamente aos custos de uma possível implementação do sistema LTE como rede de comunicações MC. é referido que em 2020 o LTE pode ser uma alternativa ao TETRA, TETRAPOL ou ASTRO/P25. Este estudo é bastante pormenorizado, examinando os requisitos e os custos relativos das várias tecnologias. Conclui que de entre cinco tecnologias analisadas o LTE comercial é a solução com custo mais baixo e que consegue suportar as necessidades de comunicações MC mas só se certas condições forem conseguidas. Os autores dizem que para o LTE poder substituir o TETRA é necessário que os equipamentos cumpram

todas as funções necessárias a um sistema de segurança pública, e que o desempenho seja adequado, ou seja, que possua extensões com prioridade, suporte consistente de VolTe, o uso de MIMO. Por último exige que a rede seja redundante para suportar eventuais falhas.

[RWLLL15] faz um estudo acerca do uso de LTE – D2D com suporte para comunicação entre viaturas. O modelo é aplicado num cenário típico de uma autoestrada fazendo variar a distância do eNB até à autoestrada. Compara dois modelos de controlo de potência, controlo uniforme e controlo tendo por base a geolocalização, conclui que o modelo baseado na geolocalização fazendo variar a distância do eNB à autoestrada tem sempre melhor desempenho.

No artigo [VFS13] é analisada a melhoria que um sistema D2D traz em termos de cobertura e capacidade em relação a um sistema tradicional. Afirma que o uso dos UE como retransmissores móveis aumenta a cobertura em cerca de 20% uma vez que dessa forma consegue chegar sinal a locais que de outra forma não chegaria. Na Tabela 2.8 observamos a franca melhoria na área coberta que existe com o uso de retransmissores móveis.

Tabela 2.8. Resultados obtidos por [VFS13].

$R_{b[Mbit/s]}$	**Área coberta sem D2D (%)**	**Área coberta com D2D (%)**	**Aumento da área coberta (%)**
0.384	96.29	100	3.71
1.0	93.28	100	6.72
5.0	85.28	100	14.72
10.0	79.5	100	20.50

Capítulo 3

Modelos

Este capítulo apresenta uma avaliação dos modelos CWI-231, Recomendação ITU-R P.1411-8 e modelo de Weisberger, nos ambientes em estudo.

3.1 Cenários Operacionais

O facto de Portugal pertencer a instituições como a NATO ou a ONU implica responsabilidades suplementares no que toca a conflitos internacionais, e por isso é importante que as Forças Armadas, neste caso concreto o Exército, estejam preparadas para atuar em qualquer tipo de ambiente. Implicando que as comunicações operem em qualquer ambiente sob qualquer condição. Dos vários empenhamentos da NATO pode-se retirar alguns cenários típicos:

- Ambiente urbano com alta densidade de edifícios, edifícios altos, ruas estreitas. Este ambiente é cada vez mais comum com a existência de conflitos no centro das cidades. É exemplo o empenhamento da NATO na missão de manutenção de paz em Addis Abada, Etiópia, uma cidade com alta densidade de edifícios.
- Ambiente suburbano com edifícios de 3 ou 4 andares, espaçados entre si, são tipicamente bairros residenciais nas zonas periféricas das grandes cidades.
- Ambiente de túnel ou ponte metálica, em que a comunicação entre ambos os terminais é feita dentro de um túnel ou uma ponte, as atenuações sofridas na ligação derivadas ao metal ou ao solo envolvente são necessárias a ter em conta.
- Ambiente rural onde a densidade de edifícios é muito inferior aos ambientes anteriores com edifícios de 1 ou 2 andares e muitas vezes muito espaçados entre si.
- Ambiente florestal este ambiente caracteriza-se pela presença de árvores, vegetação rasteira e ausência de edifícios. Tomando como exemplo o Pinhal de Leiria com uma densidade a rondar cerca de 250 árvores/hectare, uma densidade superior de árvores não permitiria que as viaturas se deslocassem neste ambiente, logo perderia o interesse do estudo.
- Ambiente de planície, este ambiente caracteriza-se pela ausência de edifícios e de grandes obstáculos à propagação, tipicamente planícies com grandes áreas de vegetação baixa. São exemplo as zonas do interior da Europa como Alemanha ou Polónia.
- Ambiente montanhoso, onde há ausência de edifícios, mas existe obstáculos naturais como grandes rochedos ou formações montanhosas. São exemplo as zonas do interior do Afeganistão ou do Iraque.
- Ambiente desértico, este ambiente é também caracterizado pela ausência de edifícios. O obstáculo às comunicações neste caso serão as formações naturais de dunas por exemplo.
- Ambiente ártico, este ambiente deriva de um ambiente montanhoso ou desértico, mas neste caso é necessário ter em conta as atenuações derivadas à neve e às muito baixas temperaturas. São exemplo regiões do norte de países como a Noruega ou a Suécia.

São de facto muito variados os ambientes em que as Forças Armadas podem atuar. Logo, é importante seriar alguns para serem analisados nesta dissertação. Serão avaliados quatro tipos de cenários diferentes, tendo em conta os ambientes enumerados anteriormente, serão avaliados, um cenário urbano, um cenário suburbano, um cenário rural e um cenário de floresta. A ITU-R propõe uma listagem de ambientes conforme as características que influenciam a propagação [ITUR15].. Na Tabela 3.1. é possível observar a listagem dos ambientes proposta pela ITU-R .

Tabela 3.1 – Descrição dos ambientes típicos.

Ambiente	Descrição
Urbano	• Tipicamente com ruas largas; • Pode ocorrer reflexões e sombras causados pelos veículos que circulam nas vias;
Sub urbano / Residencial	• Moradias com um ou dois andares; • Estradas geralmente de duas faixas com carros estacionados; • Possibilidade baixa ou alta densidade de vegetação;
Rural	• Casas pequenas rodeadas por grandes jardins; • Influência da topografia do terreno; • Possibilidade baixa ou alta densidade de vegetação; • Tráfego automóvel baixo.
Floresta	• Influência da topografia do terreno; • Influência da vegetação;

Estes cenários foram escolhidos de forma a analisar ambientes o mais próximo da realidade possível.

O 1º Cenário seria uma zona urbana, com edifícios de cerca de três andares com ruas largas e distâncias equivalentes entre ruas. O 2º Cenário seria suburbano, este cenário apenas difere do anterior na altura dos edifícios, na distância entre eles e na largura das ruas. Naturalmente se conseguirá atingir coberturas superiores, uma vez que não haverá os mesmos valores de atenuação da propagação. O 3º Cenário é o cenário rural, onde é bastante comum em países em conflito no Médio Oriente e em que a NATO está envolvida. No cenário deste tipo as viaturas estarão mais afastadas umas das outras, por um lado garante mais segurança às viaturas e do ponto de vista da propagação, a atenuação é inferior logo as viaturas podem estar mais afastadas entre si. Por último o cenário de floresta com baixa densidade de vegetação. Este cenário é baseado num ambiente semelhante ao Pinhal de Leiria com árvores espaçadas entre si, onde viaturas conseguem patrulhar. Cenário tipicamente encontrado na em muitos empenhamentos do Exército.

Definidos os cenários é necessário especificar as frequências de trabalho e as respetivas larguras de banda. Existem bandas de frequências alocadas especialmente para os militares e em que só estes podem operar. O Exército forneceu três bandas para estudo e possível uso. Estas três bandas a avaliar situam-se em zonas espetrais muito diferentes implicando coberturas e capacidades distintas. As bandas dividem-se numa banda VHF (61-68 MHz), e em duas UHF (895-898 MHz) e (1675-1695 MHz). Estas bandas têm características específicas que permitem realizar tarefas diferentes. Frequências que

utilizem largura de banda mais estreita serão mais indicadas para serviços que requerem uma baixa taxa de transferência, como por exemplo chamadas de voz para fins de comunicação em grupo por exemplo. Por outro lado, existem serviços que exigem uma largura de banda superior (*streaming* de vídeo, videochamadas de grupo e transferência de ficheiros) que requerem uma maior largura de banda para realizar estes serviços.

Tabela 3.2 - Frequências em estudo e respetivas larguras de banda.

Frequência (f) [MHz]	**Largura de banda (Δf) [MHz]**
65	5
896	3
1685	20

3.2 Modelos de Cobertura e Capacidade

3.2.1 Considerações Iniciais

O cálculo da cobertura abrangida pelo sistema bem como a sua capacidade são fatores essenciais para avaliar a *QoS*. Para avaliar estas características é necessária uma estimativa do sinal. Existem inúmeros fatores, característicos de cada ambiente, que influenciam a estimativa do sinal. Os principais a terem sidos em conta são, a influência das irregularidades do terreno e os obstáculos, a caracterização da área urbana e a penetração do sinal nos edifícios e dentro deles. De forma a avaliar a estimativa do sinal de cada ambiente, o mais rigorosamente possível, é necessário escolher o modelo que melhor se adapta às suas características.

Existem características dos cenários transversais a todos os ambientes e que são necessários para o cálculo da cobertura e capacidade. O número de utilizadores, por exemplo, uma vez que o pelotão é composto por quatro viaturas independentemente do ambiente. Estas viaturas são iguais entre si e possuem os mesmos meios de comunicação. A segunda constante é a altura das antenas (h_b) uma vez que as antenas são colocadas de igual forma em todas as viaturas (2,5 m).

Para conseguir executar a comunicação é necessário ter um meio de transmissão capaz. Foi feita uma pesquisa acerca das antenas que satisfaziam as necessidades. As antenas escolhidas para realizar as simulações são antenas especiais que satisfazem as necessidades a nível tecnológico cobrindo as frequências disponíveis, bem como as necessidades militares, de serem robustas para enfrentarem condições meteorológicas adversas. As antenas em questão são desenhadas para operar em veículos, e nas frequências desejadas [RoSch14]. Estas antenas são desenhadas com os padrões NATO e, portanto, garantem uma grande gama de frequências, design discreto, alta eficiência e capazes de

atuar em ambientes severos com grandes amplitudes térmicas. As antenas são omnidirecionais, o que no caso em estudo é de extrema importância que tenham este padrão uma vez que as viaturas se movimentam. No catálogo do fornecedor pode-se retirar os valores que interessam ao cálculo da cobertura e da capacidade, como a potência de transmissão, os ganhos e as perdas nos cabos.

Figura 3.1 - Antena R&S HK056 e Antena R&S HK055L, retirado de [RoSch14].

A antena HK056 na Figura 3.1 está desenhada para a banda de frequências de 0.6 a 3 GHz sendo essa a escolhida para analisar as duas frequências mais altas (896 e 1685 MHz). A antena HK055L está desenhada para a banda de frequências de 27.5 a 600 MHz logo é a escolhida para analisar a frequência de 65 MHz. A escolha das antenas é essencial porque fornecem valores indispensáveis para o cálculo da cobertura, como por exemplo os ganhos das antenas ou as potências de transmissão máximas. As características das antenas foram retiradas de [RoSch14], constando na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Características e valores das antenas.

Parâmetro	**Valor Padrão**		
Frequência [MHz]	65	896	1685
Largura de Banda [MHz]	5	3	20
RB	25	15	100
Potência de Transmissão [dBm]	50	50	50
Ganho máximo das Antenas [dBi]	1	2	2
Perdas nos cabos [dB]	2	2	2
EIRP [dBm]	47	50	50
Fator de Ruído[dB]	7	7	7
Margem desvanecimento lento [dB]	8.8	8.8	8.8
Decaimento da Potência médio (CWI)	3.8	3.8	3.8
Decaimento da Potência médio (ITUR)	4	4	4
Decaimento da Potência médio (Weissberger)	3.28	3.28	3.28

3.2.2 Balanço de Potência

O cálculo do balanço de potência é necessário para o planeamento da cobertura, e assim aferir até que distâncias as viaturas se podem afastar em cada cenário. O balanço de potência dá uma estimativa da atenuação do sinal entre o transmissor e o recetor, a atenuação no caminho máxima é baseada na relação SNR no recetor, considerando parâmetros relacionados com os ganhos e as perdas quer das antenas quer do ambiente. O procedimento para o cálculo do balanço de potência é baseado em [Corr14].

As perdas no caminho podem ser dadas pela seguinte expressão,

$$L_{p[dB]} = P_{t[dBm]} + G_{t[dBi]} - P_{r[dBm]} + G_{r[dBi]} \tag{3.1}$$

onde:

- L_p: Perdas no caminho;
- P_t: Potência alimentada na antena de transmissão;
- G_t: Ganho da antena de transmissão;
- P_r: Potência disponível na antena de receção;
- G_r: Ganho da antena de receção.

A potência alimentada à antena de transmissão é dada por:

$$P_{t[dBm]} = P_{Tx[dBm]} - L_{c[dB]} \tag{3.2}$$

onde:

- P_{Tx}: Potência de saída do transmissor;
- L_c: Perdas nos cabos entre o transmissor e a antena.

Então a potência no recetor vem,

$$P_{Rx[dBm]} = P_{r[dBm]} - L_{u[dB]} \tag{3.3}$$

onde:

- P_r: potência na antena de receção
- L_u: perdas no equipamento do utilizador.

As perdas no caminho irão depender de cada ambiente especifico e consequentemente de cada modelo especifico, então pode-se tomar como equação para as perdas:

$$L_{p[dB]} = L_{p[dB]}^{modelo} + L_{p[dB]}^{ambiente} + M_{SF[dB]} \tag{3.4}$$

onde:

- L_p^{modelo}: perdas no caminho calculado consoante o modelo;
- $L_p^{ambiente}$: perdas no caminho devido ao ambiente específico;
- M_{SF}: Margem de desvanecimento lento.

A sensibilidade, $P_{r,min}$, depende do serviço e da ligação e segundo [Corr14] pode ser dado por:

$$P_{r,\min[dBm]} = N_{RF[dBm]} + M_{I[dB]} + \rho_{N[dB]} \tag{3.5}$$

onde:

- $M_{I[dB]}$: Margem de Interferência.

A potência de ruído pode ser obtida através de:

$$N_{RF[dBm]} = -174 + 10log_{10}(\Delta f_{[MHz]}) + F_{N[dB]} \tag{3.6}$$

onde:

- Δf : Largura de banda do sinal;
- F_N : Figura de ruído.

O valor do SNR pode ser deduzido, sabendo o número de RB associados a uma certa largura de banda, como mostra a seguinte equação:

$$R_b\left(\rho_{N[dB]}\right)_{[kbit/s]} = \frac{R_{b\,ref\,[kbit/s]}}{A + e^{-C*\rho_N}} \tag{3.7}$$

Por último é importante referir que todos os modelos de propagação (Anexos B, C e D), consideram as perdas derivadas da distância e da frequência(3.8).

$$L_{p[dB]} = L_{pRef[dB]} + 10\, a_{pd} \log\left(d_{[km]}\right) + \log\left(f_{[MHz]}\right) \tag{3.8}$$

onde:

- $L_{p[dB]}$: Perdas no caminho;
- $L_{pRef[dB]}$:Constante de perdas de referência do modelo;
- $a_{pd} \log\left(d_{[km]}\right)$:Perdas derivado da distância;

3.2.3 Modelo de Cobertura

Um dos principais objetivos desta dissertação centra-se na avaliação do uso da tecnologia LTE em ambientes hostis tendo em conta as necessidades de um contingente português empenhado numa missão. Uma das principais características a avaliar é a cobertura, ou seja, até que distâncias estas tecnologias podem ser utilizadas sem que haja falha da comunicação.

Se se analisar o problema numa perspectiva de cobertura o resultado que se obtêm é a distância entre duas viaturas. Sabendo que se quer garantir um dado $R_{b_{[Mbit/s]}}$, começa-se por calcular a $\rho_{N[dB]}$a partir do $R_{b_{[Mbit/s]}}$ recorrendo à equação 3.7 e aos valores de referência correspondentes às modulações, Tabela 3.3. Com o valor da $\rho_{N[dB]}$ calcula-se a sensibilidade com as equações 3.5 e 3.6. Por último recorrendo aos modelos de propagação estudados, Anexos B, C e D, e escolhendo o que melhor se adequa às características do terreno obtêm-se um valor de L_p, este valor permite finalmente alcançar uma distância máxima.

Sabendo as equações genéricas essenciais para o cálculo da cobertura interessa particularizar

algumas caracteristicas especificas de cada modelo.

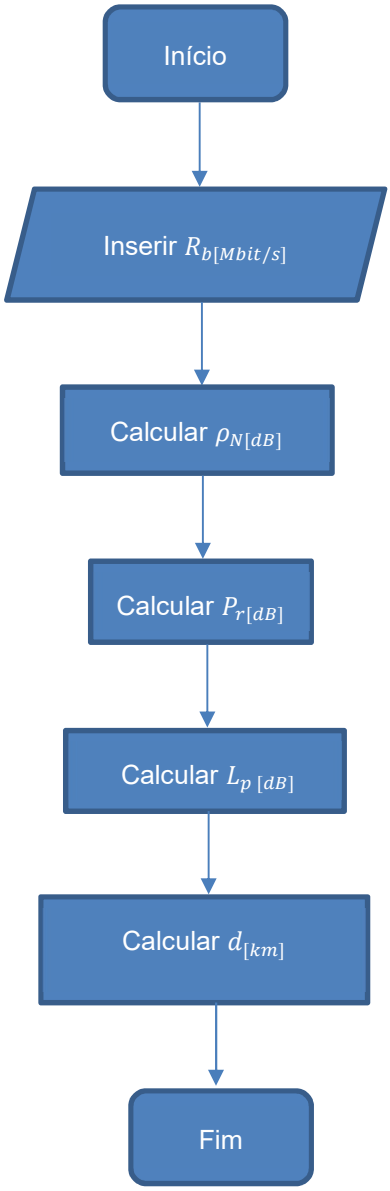

Figura 3.2 Fluxograma modelo da cobertura.

Para poder observar o comportamento de cada modelo foram realizados ensaios em Matlab em condições ideais e com valores de referência [Corr14]. Estes ensaios calculam as perdas no caminho consoante as características típicas dos ambientes a avaliar de forma a serem facilmente comparáveis graficamente. Os ensaios dos modelos CWI e ITU-R contemplam a análise dos ambientes urbano, sub-urbano e rural. Para a análise do ambiente de floresta foi usado o modelo de Weissberger. Os ensaios foram divididos em duas vertentes. Na primeira fixou-se a frequência em 896 MHz e fez-se variar a distância entre os 50 e os 1600 metros, na segunda fixou-se a distância em 400 metros e fez-se variar a frequência entre 50 e 1800 MHz.

Cada modelo exige o conhecimento de alguns parâmetros característicos do ambiente essenciais para o cálculo das atenuações. O modelo CWI, que é detalhadamente explicado no Anexo B, foi

desenvolvido para situações em que existe atenuação de edifícios, e define três equações conforme o ângulo da ligação (L_{ori}), nesta dissertação pode-se observar os resultados para os casos extremos (Φ= 0º e Φ= 90º) que estão representados nas Figura 3.3 e 3.4.

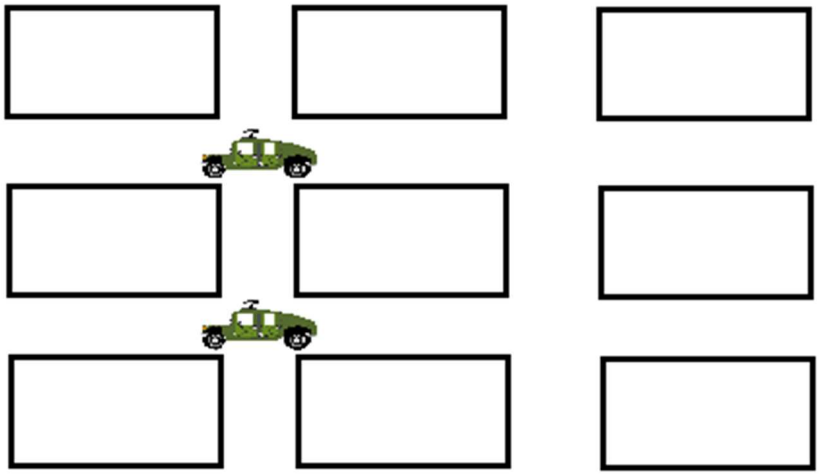

Figura 3.3 Ângulo de ligação Φ= 0º

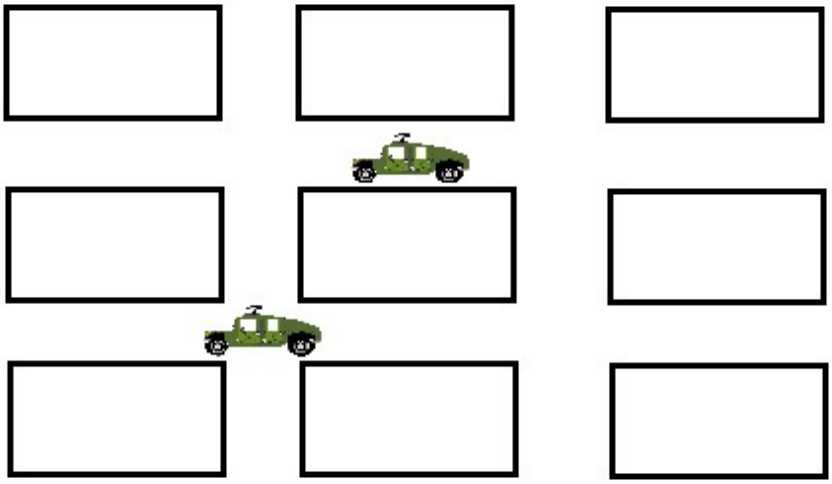

Figura 3.4 - Ângulo de ligação Φ= 90º

Em todos os ensaios existem parâmetros constantes, a altura dos terminais foi fixada em 2.5 m. No caso do modelo CWI, os valores assumidos foram, w_s = 15 m, w_B= 65 m. O modelo ITU-R centra-se na percentagem de localização, onde foi tomado o valor típico de 50%.

Para o cálculo da sensibilidade (3.5), são necessárias fazer algumas considerações e seguiu-se o raciocínio de [Corr14]. Um dos parâmetros necessários é o SNR e para o calcular considera-se (3.7). O raciocínio utilizado para o calcula da sensibilidade é explicado de seguida. Primeiramente calcula-se a taxa de transferência máxima:

$$R_{bMax\,[kb/s]} = \frac{R_{b\,ref[kb/s]}}{A} \tag{3.9}$$

Calculado $R_{bMax\,[kb/s]}$, é considerado como $R_{b\,[kb/s]}$, um valor ligeiramente superior a metade do valor máximo de forma a obter resultados próximos da realidade. Com este valor é então possível calcular o SNR através de (3.7). O segundo parâmetro a ter em conta é a margem de interferência que varia entre 1 a 3 dB, neste caso foi considerado o mínimo, uma vez que o número de utilizadores é reduzido, logo a interferência entre estes também vai ser reduzida. Por último a potência de ruído (3.6) pode ser calculada usando as respetivas larguras de banda e um valor de figura de ruído tradicional de 7 dB [HoTo11].

Tabela 3.4 Cálculo do SNR.

Modulação	**4-PSK**	**16-QAM**	**64-QAM**
$R_{b\,ref[kb/s]}$	173.4	138.7	138.9
A	0.4555	0.1229	0.0926
c	0.3254	0.2586	0.2958
$R_{bMax\,[kb/s]}$	360.680	1128.560	1500.00

No Anexo F é perceptível em todas as curvas que a atenuação cresce de forma logarítmica, em frequências e distâncias inferiores a atenuação cresce muito rapidamente, tendo tendência a estabilizar o crescimento em frequências e distâncias superiores. As Figura 3.5 e Figura 3.6 mostram o ensaio comparativo entre os três modelos nos respetivos ambientes, variando a distância ou variando a frequência, neste caso está representado o pior caso em que o (L_{ori}) é igual a 90º.

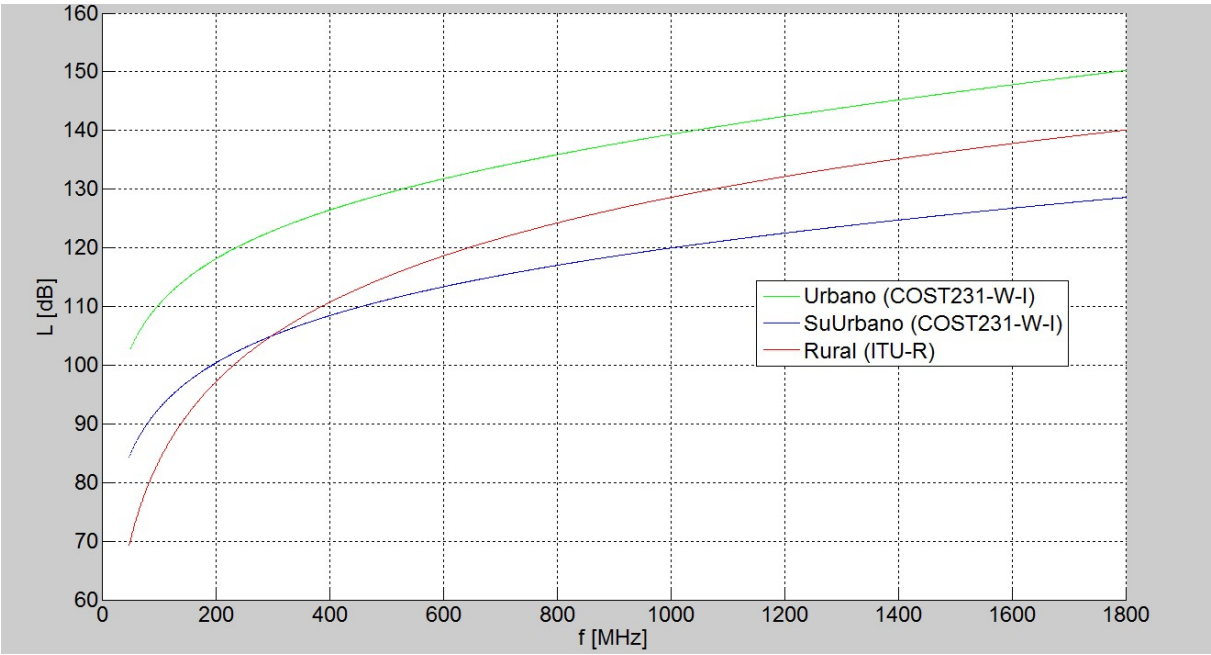

Figura 3.5 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários em função da frequência (Φ=90º).

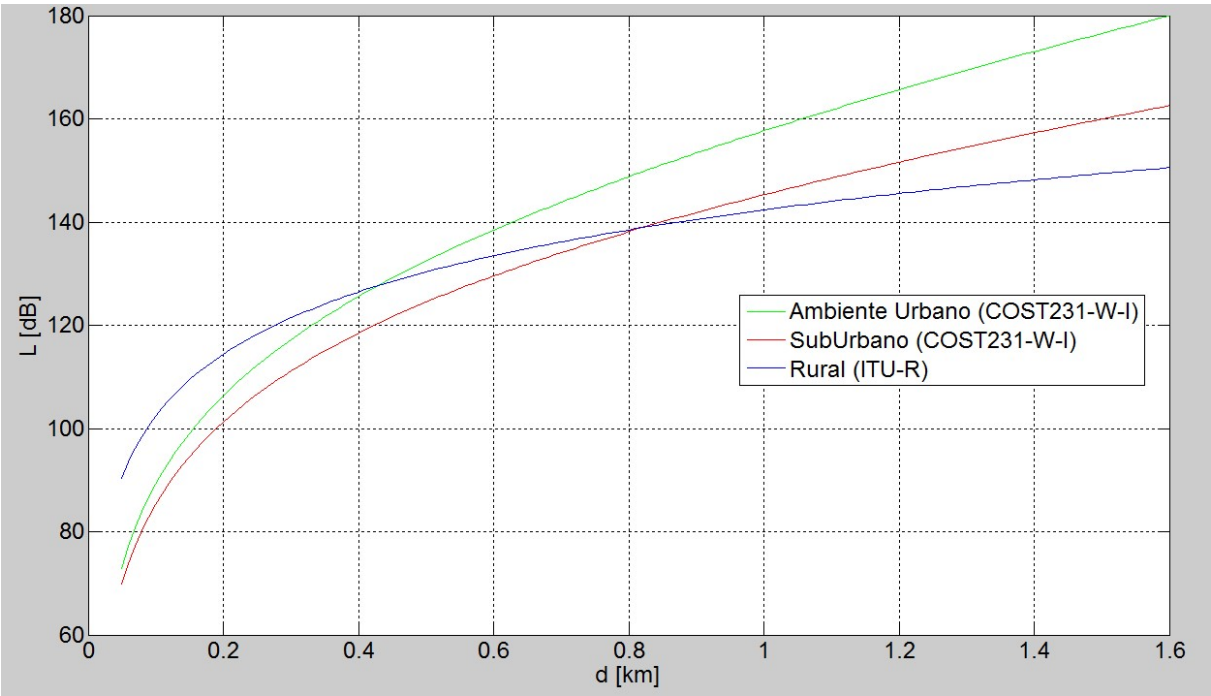

Figura 3.6 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários em função da distância(Φ=90º).

Quanto à atenuação provocada pela vegetação, as Figura 3.7 e Figura 3.8 mostram que esta cresce muito mais rapidamente e para valores que vão tender para infinito, o que prevê que para distâncias elevadas existam mais dificuldades em realizar as comunicações.

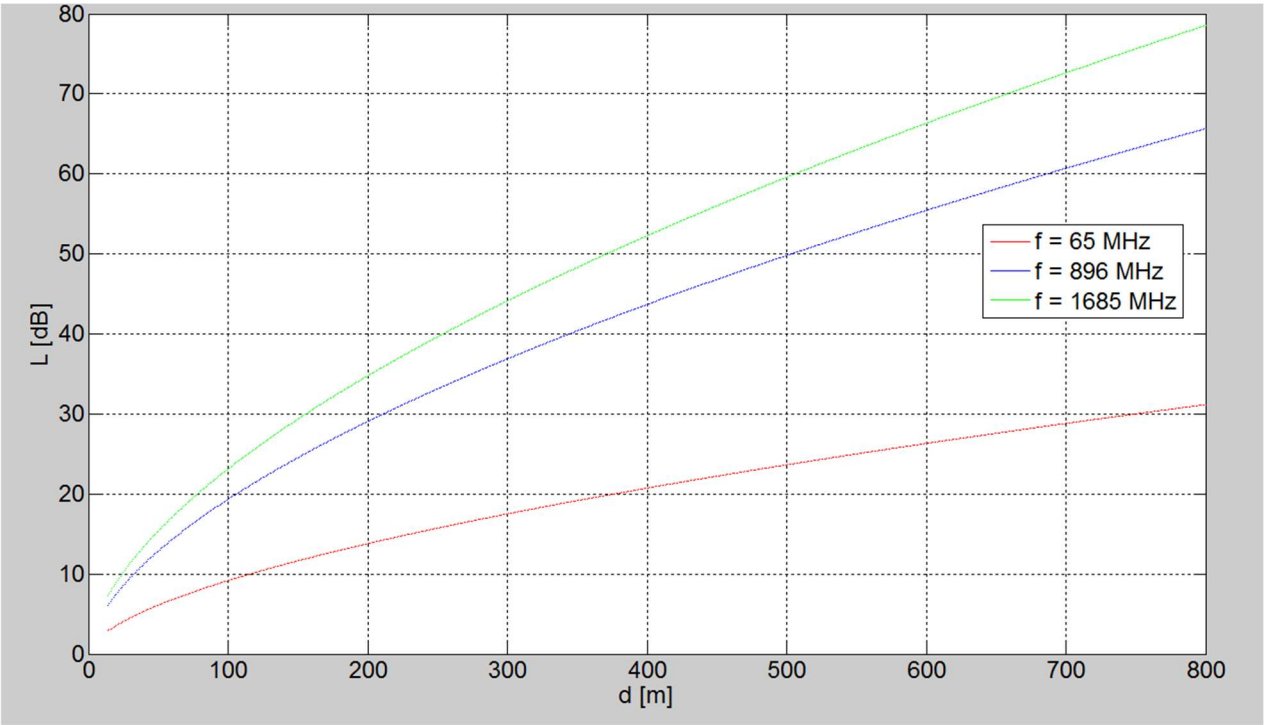

Figura 3.7 Atenuação provocada pela vegetação em função da distância.

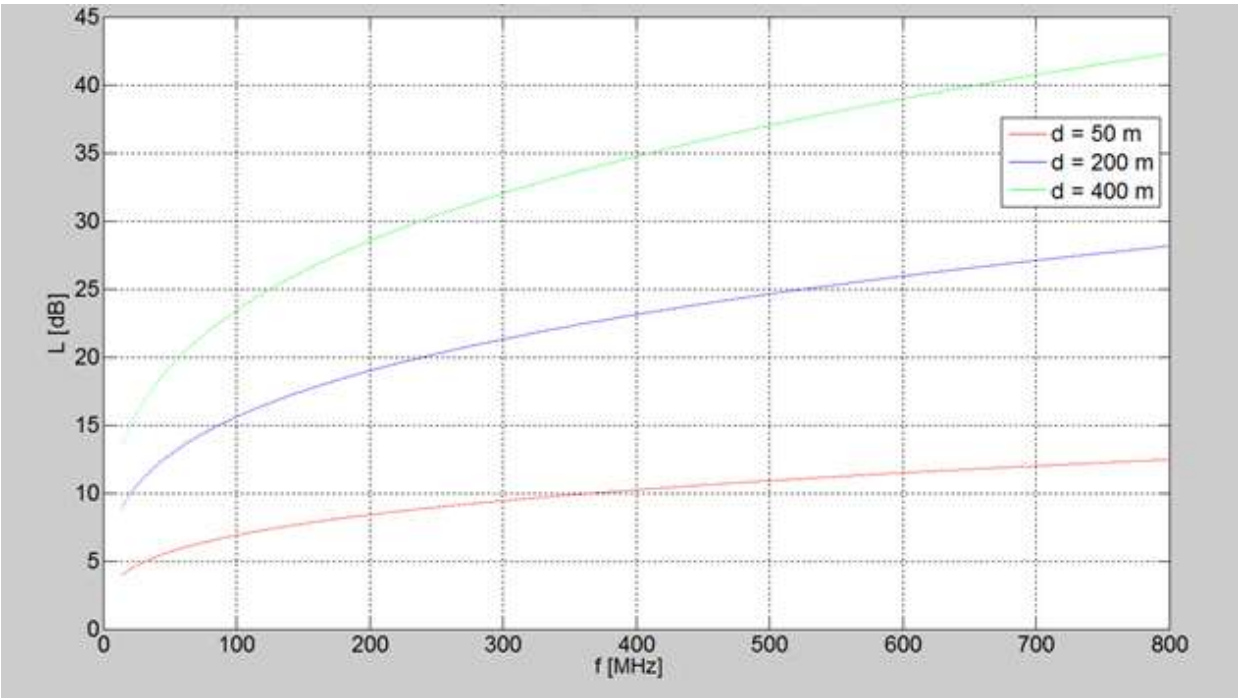

Figura 3.8 Atenuação provocada pela vegetação em função da frequência.

3.2.4 Modelo de Capacidade

Tendo avaliado a cobertura possível consoante as várias frequências e as diferentes modulações, será agora imprescindível avaliar a capacidade do sistema. A determinada distância uma viatura terá acesso a uma determinada taxa de transferência ($R_{b[Mbit/s]}$) e consoante essa taxa consegue executar determinados serviços a um número limitado de utilizadores. É de extrema importância para o Comandante ter a perceção de quais são os serviços que poderá realizar e quais aqueles que estará mais limitado.

O processo inicia-se inserindo uma distância com o primeiro objetivo de calcular as perdas no caminho ($L_{p\,[dB]}$). Para realizar este cálculo é necessário considerar uma frequência e uma modulação. As perdas são calculadas de acordo com o modelo apropriado ao cenário (Anexos B, C e D). O passo seguinte é calcular a sensibilidade. Conhecendo o valor das perdas e tendo em conta os ganhos das antenas e as perdas nos cabos obtêm-se então a potência disponível na antena (equações 3.1 e 3.2). Através da equação 3.6 calcula-se o valor da potência de ruído considerando a largura de banda associada à frequência escolhida e a figura de ruído, que toma um valor padrão de 7 dB. Conhecendo o valor da potência de ruído e considerando uma margem de interferência mínima (1 dB) calcula-se, aplicando a equação 3.5, a $\rho_{N[dB]}$. Por último e tendo em conta os valores de referência das modulações calcula-se o valor de $R_{b[Mbit/s]}$) através da equação 3.7. Todo este processo é graficado no fluxograma da Figura 3.9.

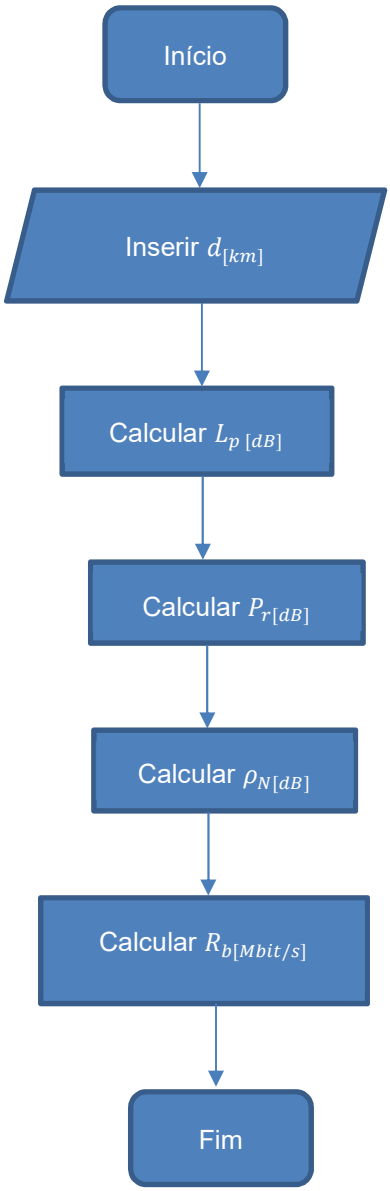

Figura 3.9 Fluxograma modelo da capacidade.

De forma a calcular a taxa de transferência de um utilizador começa-se por calcular a de um só RB, considerando uma frequência de referência, multiplicando depois pelo número total de RB alocados de acordo com:

$$R_{b[Mbit/s]} = N_{RB} R_b^{RB}{}_{[Mbit/s]} \tag{3.8}$$

onde:

- N_{RB}: número de RB;
- R_b^{RB}: taxa de transferência por RB, obtida na frequência atribuída ao utilizador.

A taxa de transferência máxima por RB pode ser obtida através da seguinte equação:

$$R_b^{RB}{}_{[Mbit/s]} = \frac{N_{sub}^{RB} N_{simb}^{sub} N_b^{simb}}{T_{RB[\mu s]}} G_{MIMO} \tag{3.9}$$

onde:

- N_{sub}^{RB}: número de subportadoras por RB;
- N_{simb}^{sub}: número de símbolos por sub-portadora;
- N_b^{simb}: número de bits por símbolo;
- T_{RB}: duração da slot do RB;
- G_{MIMO}: Ganho máximo da capacidade associado ao uso de MIMO.

Sabendo que cada RB possui 12 sub-portadoras (N_{sub}^{RB}), cada sub-portadora possui 7 símbolos (N_{simb}^{sub}), o tempo de duração da *slot* é de 500 µs e usado um sistema MIMO 2x2, pode-se calcular a taxa de transferência máxima tendo em conta a modulação escolhida. Aplicando por fim (3.8) obtêm-se a taxa de transferência máxima por cada frequência associando cada uma das modulações, Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Taxa de transferência por RB.

Modulação	N_b^{simb}	R_b^{RB} $[Mbit/s]$
4-PSK	2	0.672
16-QAM	4	1.344
64-QAM	6	2.016

Por fim, sabendo a taxa de transferência da viatura é necessário que se traduza em serviços concretos que o Comandante possa utilizar. Esse cálculo pode ser facilmente realizado sabendo o valor típico da taxa de transferência necessária para cada serviço. As taxas de transferência típicas estão contempladas na Tabela 3.6.

$$N_u = \frac{R_{b[Mbit/s]}}{R_{bServi\,[Mbit/s]}} \tag{3.10}$$

onde:

- N_u: Número de utilizadores a executar o serviço em paralelo.

Tabela 3.6 Taxa de Transferência associada ao serviço

Serviço	$R_{bServi\,[Mbit/s]}$
Voz	0.0122
Email	0.100
Chamada de vídeo	0.384
Transferência de Ficheiros	1.024

3.3 Modelo da rede *ad hoc*

O passo seguinte é juntar a cobertura e capacidade de uma viatura isolada num sistema mais complexo como um pelotão. Imagine-se dois cenários hipotéticos, um cenário com uma topologia em linha e outro com uma topologia em malha. O primeiro simula o posicionamento das viaturas a deslocarem-se em coluna e culmina na transmissão a um pelotão apeado, ou num caso em que o sistema está mais lotado imagine-se um pelotão de infantaria associado a cada viatura, aumentado assim, significativamente o número de utilizadores. Numa topologia em malha os veículos comunicam todos entre si fazendo com que existam mais caminhos possíveis para a informação circular.

Pode-se definir a soma do tráfego matematicamente, considerando que a taxa de transferência de cada viatura é variável uma vez que cada uma tem de suportar o seu tráfego somado ao da viatura seguinte, a equação 3.10 define como um somatório que inicia em 1 e termina em $n = nº\ viaturas\ do\ sistema$, sendo n o número de viaturas do sistema. Consequentemente os pelotões de infantaria ligados ao sistema vão requerer um tráfego que será suportado pela viatura que estão associados, como se observa na Figura 3.10.

$$\sum_{n=1}^{n=via} R_{b_{[Mbit/s]}}^{n} = R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat1} + R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat} + R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat3} + R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat4} + \cdots + R_{b_{[Mbit/s]}}^{n} \tag{3.10}$$

$$R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat4} = R_{b[próprio]_{[Mbit/s]}}^{viat} + R_{b_{[Mbit/s]}}^{pelInf} \tag{3.11}$$

$$R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat3} = R_{b[próprio]_{[Mbit/s]}}^{vi} + R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat} \tag{3.12}$$

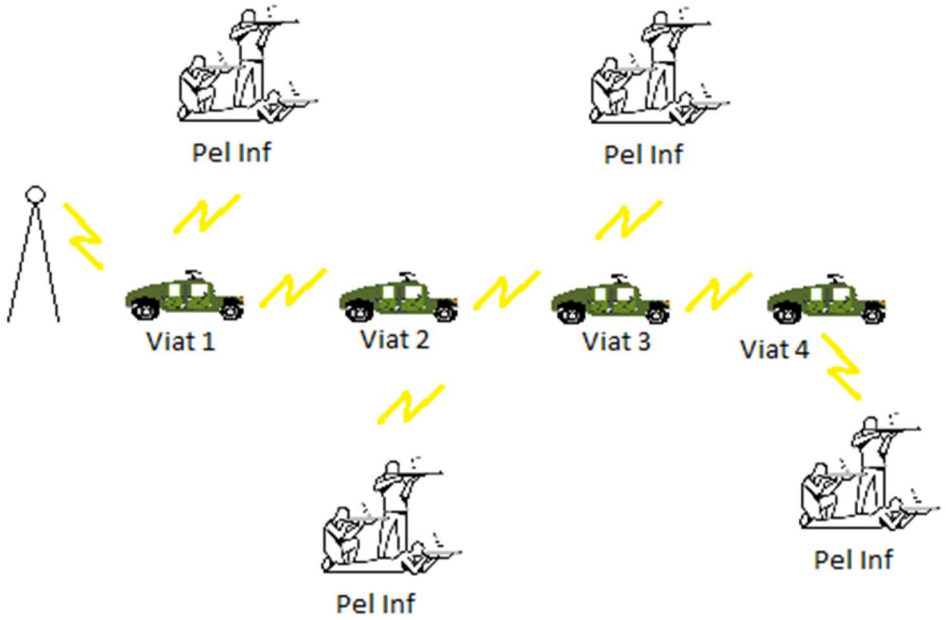

Figura 3.10 Cenário de transmissão em linha com 4 pelotões de infantaria associados.

No caso de se estabelecer como prioridade garantir um determinado serviço a um número de utilizadores a distância entre as viaturas vai ser variável. Uma vez que a SNR diminui com o crescer da distância Fixa-se uma determinada taxa de transferência na última viatura ($R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat}$), esta taxa

corresponderá à soma de do tráfego gerado pelos serviços requisitados, exemplo, se o requisito mínimo for executar cinco serviços de voz e dois de chamada de vídeo seria necessário na última viatura $5\ R_{bVoz\ [Mbit/s]} + 2R_{bChamVid\ [Mbit/s]}$, logo a distância entre as viaturas será dada substituindo este valor em (3.9) e seguindo o raciocínio anteriormente explicado. Assim está calculada a distância entre a última e a penúltima viatura, o raciocínio repete-se até ao cálculo da distância entre a 1ª e a 2ª viaturas.

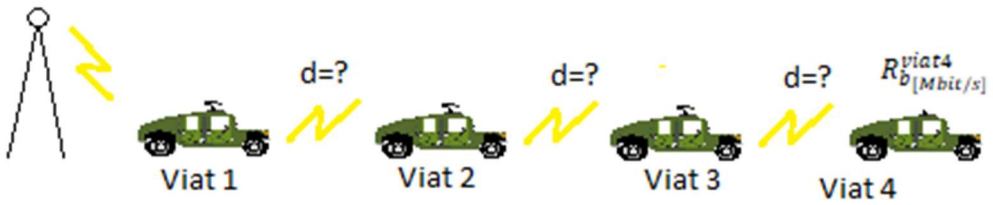

Figura 3.11 Cálculo da cobertura fixando um $R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat}$.

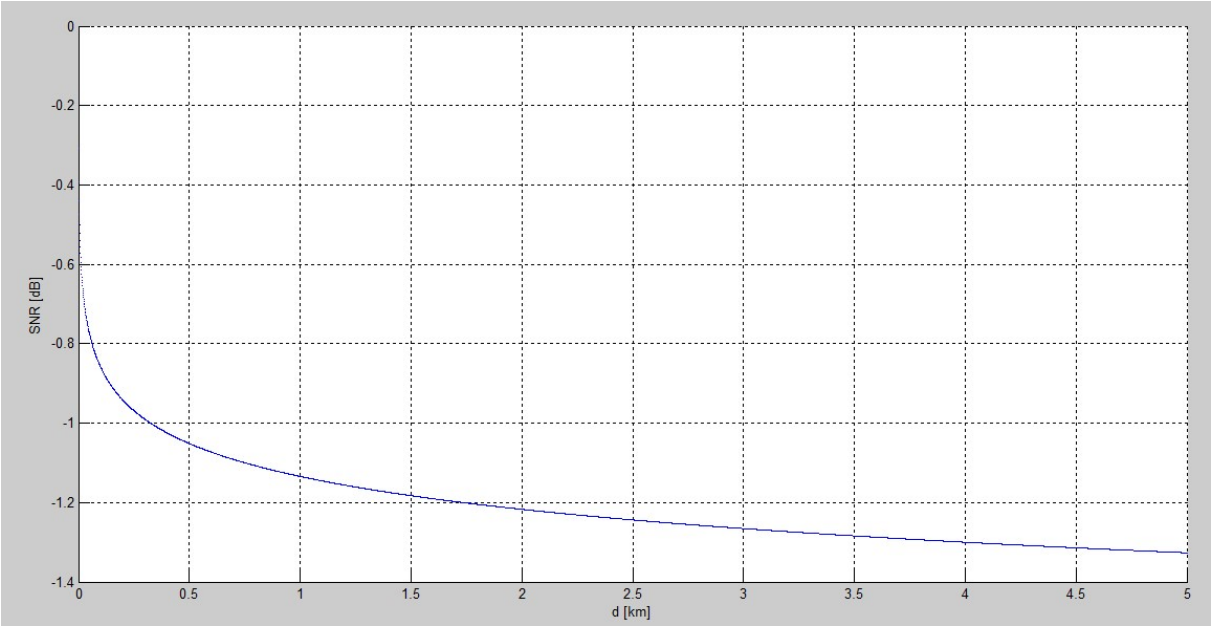

Figura 3.12 Relação entre a distância e a SNR.

Para que o sistema consiga suportar determinados serviços é necessário que a taxa de transferência seja inferior à capacidade de determinada frequência com a modulação (3.13)

$$\sum_{n=1}^{n=via} R_{b_{[Mbit/s]}}^{n} \leq R_{b_{[Mbit/s]}}^{global} \tag{3.13}$$

Esta capacidade varia em função da modulação e do valor do SNR e pode ser representado na forma duma equação (3.7).

Obtendo os valores máximos das capacidades por RB, terá de se associar a uma largura de banda que quanto maior for, maior será a capacidade do sistema (3.14). O passo seguinte é calcular a distância máxima a que as viaturas se poderão afastar garantindo que a comunicação se realize.

$$R_{b_{[Mbit/s]}}^{global} = N_{RB} \ R_b \tag{3.14}$$

No segundo cenário as viaturas estão posicionadas de forma aleatória pelo que as viaturas, ao contrário do primeiro cenário, conectam-se com mais que uma viatura possibilitando assim que em caso de falha de uma das ligações o tráfego flua por uma via alternativa. Pode-se chamar a esta configuração uma típica rede ad hoc com topologia em malha. A rede pode ser configurada com protocolos de encaminhamento vários, mas para tal é necessário definir um critério de decisão como, menor atraso, maior débito, maior capacidade, menor distância ou maior fiabilidade. Como foi analisado anteriormente cada serviço necessita de taxas de transferência diferentes pelo que, nem todas as bandas de frequência suportam todos os serviços.

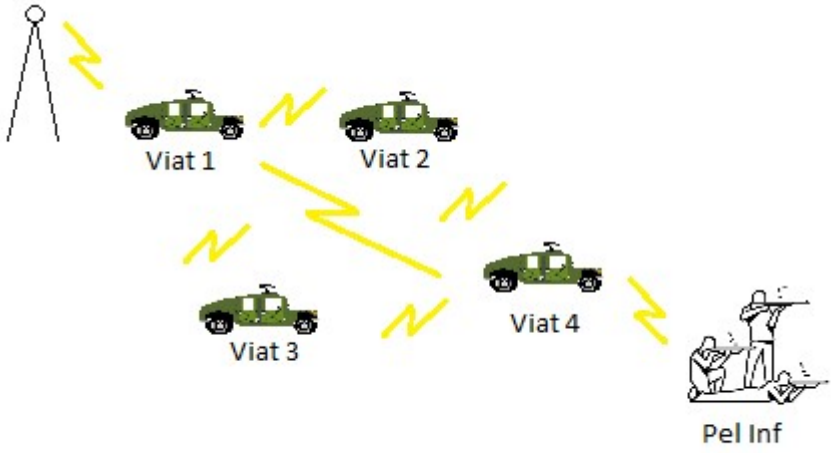

Figura 3.13 Cenário de transmissão em malha.

Num cenário em que cada viatura consegue comunicar com duas ou mais o tráfego é dividido e as ligações estão menos sobrecarregadas permitindo assim que sejam executados mais serviços. As equações seguintes mostram um exemplo, o tráfego a fluir da viatura. A grande vantagem desta configuração é o facto do tráfego estar distribuído, no primeiro cenário a viatura 1 fica sobre carregada com todo o tráfego da rede enquanto no segundo cenário o tráfego da viatura 4 é dividido pelas restantes viaturas, permitindo assim que quando o pelotão atua como uma rede fechada seja possível efetuar serviços que necessitam de taxas de transferência superiores.

$$R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat4} = R_{b[próprio]_{[Mbit/s]}}^{viat} + R_{b_{[Mbit/s]}}^{pelInf} \tag{314.}$$

$$R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat} = R_{b[próprio]_{[Mbit/s]}}^{viat3} + \frac{1}{3} R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat4} \tag{3.15}$$

$$R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat2} = R_{b[próprio]_{[Mbit/s]}}^{viat2} + \frac{1}{3} R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat} \tag{3.16}$$

$$R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat1} = R_{b[próprio]_{[Mbit/s]}}^{viat1} + \frac{1}{3} R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat} + R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat} + R_{b_{[Mbit/s]}}^{viat2} \tag{3.17}$$

.

Capítulo 4

Análise de Resultados

Este capítulo começa por descrever o cenário que vai ser analisado. Depois são apresentados os resultados consoante os parâmetros escolhidos para a análise.

4.1 Cenário: Cidade de Bagdade

O cenário de referência escolhido foi a cidade de Bagdade por ser um teatro de operações atual e em conflito que conta com a presença de militares portugueses nomeadamente militares do Exército Português. Estes militares integram a *Combined Joint Task Force – OPERATION INHERENT RESOLVE* (CKTF OIR), que foi constituída em outubro de 2014 numa uma coligação NATO com o objetivo de eliminar o Estado Islâmico do Iraque.

Figura 4.1 – Vista de Satélite e informação topográfica do centro da cidade de Bagdade [Getty17] .

A cidade de Bagdade situa-se no centro do país às margens do rio tigre, a sua área metropolitana conta com cerca de 9 milhões de habitantes, sendo umas das maiores cidades do sudoeste asiático. Com a ajuda do *Google Maps* (Figura 4.1) rapidamente se percebe que o centro da cidade está organizado em bairros com ruas retas e perpendiculares entre si, assemelhando-se à baixa pombalina numa escala muito superior (Figura 4.2). Derivado às particularidades da cidade de Bagdade, caracteriza-se o centro da cidade como um ambiente urbano.

Figura 4.2 Centro da cidade de Bagdade [ShStock17].

Na periferia da cidade existem bairros residenciais que se assemelham a ambientes suburbanos, com edifícios de menor altura, ruas mais estreitas e com distâncias entre o centro dos edifícios menores. O modelo de propagação mais adequado a aplicar no centro da cidade e às áreas suburbanas é o CWI providenciado no Anexo B e os parâmetros estão mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Parâmetros do modelo CWI para os ambientes Urbano e Suburbano.

Parâmetro	Urbano	Suburbano
Altura dos Utilizadores [m]	2.5	2.5
Altura dos edifícios[m]	25	15
Largura das ruas [m]	15	10
Distância entre o centro dos edifícios [m]	100	50
Ângulo de Incidência [º]	90	90

À medida que a distância aumenta em relação ao centro da cidade existem povoações dispersas que se caracterizam como ambiente rural, com casas esparsas de altura reduzida, a Figura 4.3 representa este tipo de ambiente. Para estudar ambientes como este usou-se o modelo ITU-terrain.

Figura 4.3 Zona rural nos subúrbios da cidade de Bagdade [ShStock17].

Tabela 4.2 Parâmetros do modelo ITU-terrain para o ambiente rural.

Parâmetro	Rural
Altura dos Utilizadores [m]	2.5
p [%]	10
ΔL_{LoS} **[dB]**	-7.9
ΔL_{NLoS} **[dB]**	-9.0

Por último junto às margens do rio Tigre existe uma grande densidade de vegetação principalmente de palmeiras em que se pode caracterizar como ambiente de floresta. Para estudar as atenuações sofridas neste ambiente foi escolhido o modelo de Weissberger.

Figura 4.4 Margens do rio tigre [Getty17].

Os modelos de propagação são específicos em relação aos ambientes em que se devem aplicar e pode-se resumir na (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Ambiente e respetivos modelos a aplicar

Ambiente	Urbano	Suburbano	Rural	Floresta
Modelo	CWI	CWI	ITU-terrain	LOS - Weissberger

4.2 Resultados

Os resultados obtidos são divididos em duas secções, os resultados do modelo de capacidade e os resultados do modelo de cobertura, obtendo a taxa de transferência ou as distâncias entre duas viaturas respetivamente.

4.2.1 Resultados Modelo de Cobertura

De forma a analisar os cenários numa perspetiva de cobertura definiram-se quatro cenários que diferem pela taxa de transferência. É essencial referir que os valores são calculados em relação à distância entre duas viaturas e uma vez que todas as viaturas possuem meios de receção e transmissão, as distâncias calculadas são válidas para todas as ligações entre o pelotão.

Foram definidos quatro cenários que contemplam situações diferentes, logo, taxas de transferência distintas, a

Tabela 4.4 apresenta em detalhe os serviços utilizados em cada cenário. No primeiro cenário simula-se a execução de serviços que acarretam baixo tráfego, como as chamadas de voz e os emails. Os cenários seguintes surgem com um incremento de serviços em paralelo que faz aumentar de forma significativa a taxa de transferência total. Perfazendo um total de:

- A: R_b= 3.366 Mbit/s
- B: R_b = 12.326 Mbit/s.
- C: R_b = 63.526 Mbit/s.
- D: R_b = 144.166 Mbit/s.

Tabela 4.4 Serviços executados em paralelo.

Serviço	Chamada Voz	Email	Chamada Vídeo	Transferência de Ficheiros
A	30	30	-	-
B	30	30	10	5
C	30	30	10	50
D	30	30	100	100

O cenário A requere uma taxa de transferência baixa o que leva a que com a potência das antenas se

consiga emitir o sinal até distâncias na ordem dos quilómetros. A frequência de 65 MHz revela que, embora variando a modulação, esta se mantém uma hipótese seguramente fiável independentemente do ambiente. Uma vez que as viaturas nunca se afastariam mais do que 600 metros, nos ambientes Urbano, Suburbano e Rural é sempre possível realizar as comunicações. As únicas combinações limitativas encontram-se a vermelho na Tabela 4.5 e referem-se à utilização da frequência de 1685 MHz que sofre uma grande atenuação em ambientes de floresta. No entanto se as viaturas se mantiverem a uma distância inferior a 400 metros continuam a conseguir garantir as comunicações. Apesar da distância máxima entre viaturas ser 600 metros na realidade é difícil de controlar se estas não excedem a distância máxima definida. Estão então registadas a amarelo algumas frequências que se aproximam do valor máximo da distância entre viaturas e que apesar de garantirem a ligação não são as mais indicadas para ser utilizadas.

Tabela 4.5 $d_{[km]}$ entre viaturas no cenário A.

$d_{[km]}$	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	19.236	3.793	1.337	19.806	3.905	1.165	22.088	4.355	1.199
Suburbano	23.557	4.646	1.638	24.256	4.783	1.426	27.051	5.334	1.469
Rural	84.213	5.943	2.073	86.585	6.111	1.817	96.036	6.778	1.869
Floresta	4.892	0.954	0.478	4.937	0.964	0.493	5.104	1.005	0.499

O cenário B acrescenta a utilização de chamadas de vídeo e transferência de ficheiros ao somatório da taxa de transferência total. Naquelas frequências que permitiam raios maiores no cenário A vão agora diminuir significativamente, como é exemplo, o uso da frequência 65 MHz no meio rural que desce entre 18 e 19 quilómetros, apesar disso os valores continuam consideravelmente grandes. Com este aumento continuam a poder realizar-se nas mesmas frequências e modulações os mesmos serviços. No ambiente de Floresta as distâncias continuam a ser as mais reduzidas sendo o pior caso a utilização da frequência 1685 MHz com a modulação 4-PSK.

O Cenário C concretiza um aumento significativo da taxa de transferência utilizada, protagonizada pelo aumento substancial do uso da transferência de dados que acarreta alto débito binário, veja-se que se aumentou em dez vezes o número de transferências de ficheiros. Com estas condições aquelas que eram as frequências que já não garantiam as condições de transmissão são agora ainda mais deterioradas, baixando para valores na ordem das três centenas. No ambiente Suburbano a frequência 1685 MHz surge pela primeira vez com valores que se aproximam da distância máxima, cumprindo ainda assim os 600 metros.

Tabela 4.6 $d_{[km]}$ entre viaturas no cenário B.

$d_{[km]}$	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	15.039	2.965	0.911	15.163	2.990	0.918	16.265	3.207	0.985
Suburbano	18.417	3.632	1.115	18.570	3.662	1.124	19.919	3.928	1.206
Rural	66.654	4.704	1.439	67.178	4.741	1.450	71.809	5.068	1.550
Floresta	4.524	0.865	0.436	4.536	0.868	0.438	4.640	0.893	0.454

Tabela 4.7 $d_{[km]}$ entre viaturas no cenário C.

$d_{[km]}$	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	10.759	2.122	0.651	10.777	2.125	0.652	10.955	2.160	0.663
Suburbano	13.177	2.598	0.798	13.198	2.602	0.799	13.416	2.645	0.812
Rural	48.493	3.422	1.047	48.568	3.428	1.048	49.331	3.481	1.065
Floresta	4.043	0.750	0.364	4.045	0.751	0.364	4.061	0.756	0.368

Tabela 4.8 $d_{[km]}$ entre viaturas no cenário D.

$d_{[km]}$	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	8.761	1.727	0.530	8.876	1.750	0.537	8.990	1.773	0.544
Suburbano	10.729	2.116	0.650	10.870	2.143	0.658	11.010	2.171	0.667
Rural	39.984	2.815	0.861	40.391	2.851	0.872	40.884	2.885	0.882
Floresta	3.776	0.683	0.323	3.794	0.687	0.325	3.798	0.691	0.328

.O Cenário D representa o maior aumento da taxa de transferência, e também o maior número de casos com impossibilidade de realizar as comunicações. Com uma taxa de transferência de 144.166 Mbit/s a frequência de 1685 MHz revela-se pouco eficiente uma vez que não permite realizar a comunicação nos ambientes Urbano e de Floresta e aproxima-se do valor máximo nos ambientes Suburbano e Rural.

4.2.2 Resultados Modelo da Capacidade

O estudo da capacidade foi obtido através do raciocínio explicito no capítulo 3, para esta análise foram definidas três padrão (50, 200 e 600 metros) tendo em conta a distância mínima, média e máxima entre viaturas.

Os resultados estão divididos primeiramente pelas três distâncias e para cada distância pelos quatro ambientes, aplicando o modelo de cálculo das perdas adequado. Estes modelos consideram fatores diferentes para o cálculo da atenuação total, como por exemplo distâncias entre as ruas ou altura dos edifícios, que causam valores de atenuação variados, resultando nos valores das taxas de transferência. Para cada distância e ambiente são testadas as três frequências associadas a três modulações.

Para a distância de 50 metros os valores da taxa de transferência rondam os 380 Mbit/s para a modulação 4-PSK, os 1128 Mbit/s em 16-QAM e 1500 Mbit/s em 64-QAM. Independentemente do ambiente e da frequência os valores não alteram significativamente, o que permite afirmar que a curtas distâncias não existem vantagens claras em escolher uma frequência mais alta ou mais baixa. A grande alteração que provoca valores bastante diferentes é neste caso a modulação que faz aumentar significativamente a taxa de transferência à medida que se aumenta o número de símbolos da quadratura.

Quando se analisa a distância de 200 metros verifica-se que os resultados são bastante semelhantes à distância de 50 metros, mantendo-se praticamente inalterados os resultados na modulação de 4-PSK. Nas modulações de 16-QAM e 64-QAM existem pequenas variações na frequência de 1685 MHz não sendo ainda assim uma descida significativa. A esta distância não é ainda possível diferenciar as influências dos ambientes uma vez que os valores das taxas de transferência são muito parecidos.

Por último com uma distância entre viaturas de 600 metros, verifica-se uma queda considerável na frequência de 1685 MHz. Nos ambientes Urbano e Suburbano as taxas de transferência caem para valores na ordem da centena de MHz enquanto que para as frequências mais baixas os valores continuam semelhantes às anteriores. A maior diferença surge na atenuação provocada em ambiente de Floresta para a frequência de 1685 MHz, nestas condições existe uma queda muito grande na taxa de transferência para valores quase nulos, o que torna esta frequência inviável de usar nestas condições.

Tabela 4.9 $R_{b_{[Mbit/s]}}$ entre duas viaturas separadas por 50 metros.

$R_{b_{[Mbit/s]}}$	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	380.680	380.680	380.680	1128.559	1128.559	1128.555	1500.0	1500.0	1500.0
Suburbano	380.680	380.680	380.680	1128.559	1128.559	1128.555	1500.0	1500.0	1500.0
Rural	380.680	380.680	380.680	1128.559	1128.559	1128.555	1500.0	1500.0	1500.0
Floresta	380.680	380.680	380.680	1128.559	1128.559	1128.555	1500.0	1500.0	1500.0

Tabela 4.10 $R_{b_{[Mbit/s]}}$ entre duas viaturas separadas por 200 metros.

$R_{b_{[Mbit/s]}}$	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	380.680	380.680	380.467	1128.559	1128.479	1115.896	1500.0	1500.0	1491.277
Suburbano	380.680	380.680	380.467	1128.559	1128.479	1115.896	1500.0	1500.0	1491.112
Rural	380.680	380.680	380.467	1128.559	1128.5598	1128.559	1500.0	1500.0	1500.0
Floresta	380.680	380.680	380.516	1128.559	1128.491	1118.219	1500.0	1500.0	1493.09

Tabela 4.11 $R_{b_{[Mbit/s]}}$ entre duas viaturas separadas por 600 metros.

$R_{b_{[Mbit/s]}}$	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	380.680	379.707	142.966	1128.513	1082.785	149.988	1500.00	1461.521	159.771
Suburbano	380.680	379.707	155.161	1128.517	1087.256	164.4459	1500.987	1465.849	178.087
Rural	380.680	380.580	313.790	1128.560	1121.580	496.031	1500.0	1495.599	653.204
Floresta	380.980	348.390	1.3585	1128.555	680.744	1.695	1500.0	932.82	2.941

Para um Comandante interessa saber o número de utilizadores que a rede consegue suportar e não a taxa de transferência que é disponibilizada, a equação 3.10 permite calcular o número de utilizadores em paralelo a realizar o mesmo serviço. O Anexo G apresenta os resultados em número de utilizadores em paralelo. Os resultados foram divididos por serviços (chamada de voz, email, chamada de vídeo e transferência de ficheiros) e para cada serviço foi feita a análise nas três distâncias.

Analisando os resultados observa-se que em todas as frequências, independentemente das modulações, consegue garantir um número muito elevado de utilizadores a realizar serviços de voz em simultâneo. O pior caso é usar a frequência 1685 MHz com a modulação 4-PSK que garante 111 chamadas em paralelo. O serviço de partilha de ficheiros é o que exige maior taxa de transferência, para distâncias curtas (50 e 200 metros) este serviço é garantido por todas as frequências na ordem das centenas ou milhares de utilizadores em paralelo. Para distâncias superiores (600 metros) o serviço é garantido ambiente de floresta não é favorável para o uso de frequências altas, sofrendo grandes atenuações que provocam taxas de transferências muito baixas, com isto, não se torna viável utilizar frequências altas neste tipo de ambientes,

Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de transferência de ficheiros (600 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	371	370	139	1102	1057	146	1464	1427	156
Suburbano	371	370	152	1102	1062	161	1464	1431	173
Rural	371	371	306	1102	1095	484	1464	1460	637
Floresta	371	340	1	1102	664	2	1464	910	1

Capítulo 5

Conclusões

Este capítulo concluí a presente dissertação, sumarizando a análise crítica e a discussão de resultados, bem como apresenta alguns aspetos a trabalhar no futuro.

O principal objetivo desta dissertação era estudar o uso do LTE em comunicações militares, nomeadamente entre viaturas militares PANDUR. O estudo deu especial ênfase aos aspetos de cobertura e capacidade.

O Capítulo 2 foca-se em descrever os aspetos fundamentais das redes LTE como a sua arquitetura, a arquitetura dos sistemas D2D e interface radio. Também aborda as principais diferenças entre uma rede ad hoc e uma rede fixa e a sua importância para as comunicações militares, bem como as desvantagens. O primeiro subcapítulo relativo à arquitetura de rede descreve os principais elementos de rede bem como as especificidades do sistema D2D impulsionado no *Release* 12. Ainda dentro desta secção é abordada a interface radio, nomeadamente as bandas de frequência, as técnicas de acesso múltiplo, esquemas de modulação, canais de controlo e de informação MIMO. A segunda secção aborda os procedimentos de descoberta e alocução de recursos. A terceira secção aborda a principal as principais questões de cobertura e capacidade, apresentando em traços gerais quais as características fundamentais para o cálculo destas. A quarta secção aborda os detalhes técnicos das redes ad hoc. São ainda abordados os serviços e aplicações oferecidos pela tecnologia LTE bem como as classes de QoS e as taxas de transferência dos diversos serviços. Finalmente este capítulo termina com uma visão geral de outros autores acerca do uso de D2D em LTE e as suas vantagens.

O Capítulo 3 apresenta os modelos que permitem estudar o uso de LTE em comunicações militares. A primeira secção define uma listagem de cenários possíveis tendo em conta os empenhamentos da NATO por todo o mundo. A segunda secção expõe o modelo em si, inclui as equações fundamentais para o cálculo do balanço de potência, e discrimina todos os passos para o cálculo da cobertura e depois da capacidade. No modelo de cobertura inicia-se com uma taxa de transferência definida e calcula-se até que distâncias as viaturas se poderão afastar garantindo que a comunicação se realize. No modelo de capacidade tem-se como ponto de partida uma distância e o objetivo de calcular um número de utilizadores que consigam realizar certo serviço em paralelo. Por último conjuga-se os resultados num modelo de rede ad hoc em que os meios comunicam entre si.

O Capítulo 4 é dedicado a apresentar os resultados obtidos através dos modelos desenvolvidos no capítulo anterior. As simulações foram realizadas tendo em conta o cenário da cidade de Bagdade que é atualmente um ambiente em que o Exército Português se encontra. Partindo deste pressuposto foram consideradas algumas características necessárias, como largura das ruas, espaçamento entre edifícios ou percentagem de localização. Estas características são essenciais para o cálculo das atenuações sofridas que por sua vez permitem obter os resultados finais de distância ou taxa de transferência.

Quanto ao modelo de cobertura permite concluir que o sistema LTE cumpre, de um modo geral, eficientemente as distâncias necessárias entre as viaturas. Analisando agora caso a caso, é possível retirar conclusões mais detalhadas.

O Cenário A simula uma taxa de transferência bastante baixa (R_b= 3.366 Mbit/s), com o uso da frequência 65 MHz obtêm-se valores que variam entre os 4.892 e os 96.036 quilómetros. Nestas condições o pior caso é o uso da modulação 4-PSK no ambiente de Floresta e o melhor é o uso de 64-QAM no ambiente Rural. A frequência 896 MHz satisfaz também todas as necessidades em todos os

ambientes variando as distâncias entre os 954 metros e os 6 quilómetros. O pior e melhor casos são iguais à frequência 65 MHz. A frequência 1685 MHz apresenta os primeiros resultados que podem não cumprir todas as necessidades do Comandante. Neste caso a distância máxima a manter entre as viaturas é sempre superior a 600 metros nos ambientes Urbano, Suburbano e Rural. A exceção surge no ambiente de Floresta em que a distância máxima é de cerca de 500 metros, não satisfazendo as necessidades.

O Cenário B simula uma taxa de transferência de 12.326 Mbit/s, para a frequência de 65 MHz as distâncias mantêm-se na ordem dos quilómetros, variando entre 4.524 e 71.809 quilómetros, continuando a satisfazer em todos os ambientes e com todas as modulações. A frequência 896 MHz cumpre também em todos os casos, variando entre 865 metros e 5.068 quilómetros. É importante referir que no ambiente de Floresta esta frequência pode comprometer a ligação, uma vez que as distâncias entre viaturas poderão ultrapassar os 600 metros por algum motivo e uma vez que a distância máxima obtida com esta frequência foi 893 metros esta não é a melhor solução. Por último a frequência 1685 MHz cumpre as ligações nos ambientes Urbano, Suburbano e Rural. O ambiente de Floresta volta a ser impeditivo para o uso desta frequência sendo a distância máxima obtida de 454 metros. É importante também referir que no ambiente Urbano a distância máxima obtida foi de 985 metros e que pode mais uma vez ser um problema se as viaturas se afastarem mais do está definido.

O Cenário C simula uma taxa de transferência de 65.526 Mbit/s, para a frequência de 65 MHz as distâncias não voltam a sofrer grandes alterações principalmente no ambiente de Floresta que apresenta uma distância de 4.043 quilómetros no pior caso. O melhor caso repete-se, agora com uma distância máxima de 49.331 quilómetros nas mesmas condições dos cenários anteriores. Esta frequência satisfaz em todos os ambientes e com todas as modulações. Para a frequência de 896 MHz todos os casos são novamente cumpridos, sendo o melhor caso a distância de 3.481 quilómetros no ambiente Rural e usando a modulação 64-QAM. De ressalvar também que no ambiente de Floresta a distância obtida variou entre 750 e 756 metros que se aproxima da distância máxima definida. A frequência 1685 MHz cumpre para os ambientes Suburbano e Rural, mas as distâncias são já muito próximas do limite de 600 metros. O melhor caso, neste cenário, para a frequência de 1685 MHz é o ambiente Rural com cerca de 1065 metros na modulação 64-QAM. É importante também referir que no ambiente Urbano as distâncias obtidas variam entre 651 e 663 metros, valores estes que estão no limiar da cobertura.

O Cenário D simula uma taxa de transferência de 144.166 Mbit/s, que para a frequência de 65 MHz continua a não ser limitativo. Nesta frequência os valores das distâncias variam entre os 3.776 e os 40.884 quilómetros, no ambiente de Floresta e Rural respetivamente e com as mesmas condições dos cenários anteriores. A frequência 896 MHz cumpre todos os casos, sendo o pior caso a distância de 1.727 quilómetros no ambiente Urbano e com a modulação 4-PSK. No ambiente de Floresta as distâncias variam entre 683 e 691 metros o que apesar de cumprir, como referido anteriormente são casos que numa situação real podem ser excedidos comprometendo assim a ligação. Neste último cenário a frequência 1685 MHz não cumpre nos ambientes Urbano e de Floresta. No ambiente Urbano as distâncias obtidas variam entre os 530 e 544 metros que se situam abaixo dos 600 metros exigidos.

No ambiente de Floresta os valores variam entre os 323 e 328 metros. Nos ambientes Suburbano e Rural as distâncias são cumpridas, mas com valores bastante próximos do limite. No ambiente Suburbano as distâncias variam entre 650 e 667 metros e no ambiente Rural variam entre 861 e 882 metros, valores que podem mais uma vez comprometer o cumprimento da ligação.

Em suma, no que diz respeito ao modelo de cobertura, verifica-se que os resultados obtidos relativos à frequência 65 MHz se revelam bastante satisfatórios. Em todos os casos são cumpridas as distâncias entre as viaturas, sempre com uma margem considerável. A frequência 896 MHz é também uma opção para uso e que cumpre sempre as distâncias, ainda assim para taxas de transferência elevadas não é recomendável o uso desta frequência em ambiente de Floresta. Por último a frequência 1685 MHz revelou-se uma opção que pode trazer problemas para o Comandante se este pretender o uso intensivo de serviços que acarreta uma elevada taxa de transferência. Para taxas de transferência mais reduzidas (Cenário A e B) a frequência 1685 MHz é viável em todos os cenários exceto o cenário de Floresta. O mesmo não se pode garantir à medida que a taxa de transferência sobe e a distância entre as viaturas é cada vez mais reduzida, não sendo cumprido o valor de 600 metros estipulado.

Quanto ao modelo de capacidade, esta dissertação permite concluir que o LTE pode ser bastante útil na transmissão de informação, principalmente quando a distância entre viaturas é reduzida. No modelo de capacidade fixou-se três distâncias e avaliou-se para as respetivas frequências e modulações nos variados ambientes.

Aquando das viaturas distanciadas de 50 metros obteve-se resultados bastante semelhantes entre si para todas as frequências e em todos os ambientes (Tabela 4.9), o fator diferenciador é a modulação, que aumenta significativamente à medida que sobem o número de símbolos da quadratura. O melhor caso para esta distância é então o uso da modulação 64-QAM com uma taxa de transferência de 1500 Mbit/s, independentemente do ambiente. As modulações 4-PSK e 16-QAM resultam numa taxa de transferência de 380 Mbit/s 1128 Mbit/s respetivamente, também estas independentemente do ambiente.

Para a distância de 200 metros os resultados permanecem praticamente inalterados. Para a modulação de 4-PSK os valores rondam os 380 Mbit/s e para 16-QAM rodam os 1128 Mbit/s. A frequência 1685 MHz verifica uma ligeira queda da taxa de transferência nas modulações 16-QAM e 64-QAM com valores de 1115 Mbit/s e 1491 Mbit/s respetivamente.

Por fim para a distância de 600 metros permite concluir que para distâncias superiores as taxas de transferência vão ser diferentes consoante as frequências. Para a frequência de 65 MHz os valores das taxas de transferência permanecem semelhantes às anteriores. No caso da frequência 896 MHz é necessário analisar mais detalhadamente. No caso do uso de 4-PSK a taxa de transferência é semelhante aos valores anteriores exceto no ambiente de Floresta em que desce para 348 Mbit/s. No caso de 16-QAM, nos ambientes Urbano e Suburbano os valores descem para 1082 Mbit/s e 1087 Mbit/s respetivamente e no caso do ambiente de Floresta a descida é ainda maior para 680 Mbit/s. No caso de 64-QAM, nos ambientes Urbano e Suburbano os valores descem para 1461 Mbit/s e 1465 Mbit/s respetivamente, no ambiente de Floresta a taxa desce para 932 Mbit/s. Para a frequência de 1685 MHz a descida é bastante acentuada em todas as modulações, nos ambientes Urbano e

Suburbano os valores rondam a centena de Mbit/s, sendo o ambiente Rural o menos afetado pelo aumento da distância para valores de 313 Mbit/s, 496 Mbit/s e 653 Mbit/s nas modulações 4-PSK, 16-QAM e 64-QAM respetivamente. O caso importante a referir é o ambiente de Floresta em que taxa de transferência obtida foi de 1 Mbit/s o que torna esta frequência desprezável quando comparada com as restantes.

Quando analisado em relação ao número de utilizadores em paralelo verifica-se que serviços que exigem baixa taxa de transferência como é o caso de chamadas de voz ou email, consegue-se garantir um número de utilizadores na ordem dos milhares. Exceção feita para o caso isolado do uso da frequência 1685 MHz com a modulação 4-PSK no ambiente de Floresta, neste caso o do serviço de voz consegue-se garantir 111 chamadas em paralelo. O serviço de email à semelhança do serviço de chamadas de voz é também garantido por todas as frequências na ordem dos milhares de utilizadores, o pior caso regista-se nos mesmos moldes do anterior sendo de 14 utilizadores em paralelo. A análise é semelhante no caso das chamadas de vídeo e das transferências de ficheiros. O valor mínimo de chamadas em paralelo é 372, excetuando mais uma vez o ambiente de Floresta onde no máximo 8 utilizadores conseguiriam utilizar em simultâneo. No caso das transferências de ficheiros, o valor mínimo é de 139 transferências em paralelo, excetuando o ambiente de Floresta que permite realizar no máximo duas transferências em paralelo.

Quando o pelotão de viaturas serve de apoio para os pelotões de infantaria apeados, na generalidade dos casos esta tecnologia revela-se uma grande vantagem para a transmissão de informação, sendo bastante eficiente nos mais variados ambientes e nas mais variadas frequências e modulações.

As maiores limitações são em ambientes de Floresta onde o sinal sofre grande atenuação principalmente para altas frequências. A frequência 65 MHz revelou-se bastante útil em todos os casos, variando pouco os seus valores aquando do aumento da distância ou da taxa de transferência. Pode-se também concluir que a frequência 1685 MHz em alguns casos não é uma melhor opção podendo comprometer as comunicações principalmente em distâncias elevadas.

O trabalho futuro deve se concentrar nas limitações da dissertação em ordem a validar os resultados e prolongar o estudo do LTE em comunicações militares. A frequência 65 MHz revelou-se a melhor opção para as comunicações e seria importante estudar a interferência causada entre as viaturas e de que modo iria afetar a comunicação. Seria importante também executar medições reais no terreno usando as viaturas militares para validar a tecnologia para estes fins. Também poderá ser alvo de estudo o aumento de número de antenas, tal como nas redes comerciais, testando assim outras configurações MIMO. Seria também importante o estudo das particularidades do LTE-A no que diz respeito à prioridade de serviços.

Anexo A

Lista de Composição do Material da Viatura PANDUR II

Listagem do equipamento complementar de Comunicações da viatura VBR PANDUR II 8X8.

LISTA DA COMPOSIÇÃO DO MATERIAL

EQUIPAMENTO COMPLEMENTAR DE COMUNICAÇÕES
VBR Pandur II 8X8 VERSÃO POSTO DE COMANDO

Pág 1 de 3

NNA / NAP

5895MD0394770

DMT

LCM Nº

009.1/2013

DATA: 18JUL13

Nº ORD	NNA / NAP	DESIGNAÇÃO DOS ARTIGOS	FIG	ITEM	QT
1	7035263001929	MONTAGEM VEICULAR DUPLA S/AMPLIFICADOR DE POTENCIA VHF 50W MT-525D	1		2
2	5996263001933	AMPLIFICADOR DE POTENCIA VHF 50W COM FILTRO COSITE P/EID AP-525V	2		3
3	5985MD0313911	INTERFACE RF E CONTROLO PARA MT-525 II IA-525	3		1
4	5996123662638	AMPLIFICADOR,RADIO FREQUENCIA AS-525H	4		1
5	5985123662639	AMPLIFICADOR-ACOPLADOR,RADIO FREQUENCIA SA-525H	5		1
6	5895123665843	COLECCAO DE INSTALACAO, EQUIPAMENTO ELECTRICO BR-525HU	6		1
7	5895123665849	COLECCAO DE INSTALACAO, EQUIPAMENTO ELECTRONICO BR-525A	7		1
8	5985251524003	ANTENA VEICULAR DE HF 2 A 30MHZ COM TILT AV-525H	8	Constituido por:	
9	5985251524002	BASE DA ANTENA VEICULAR DE HF A 30 MHZ COM TILT		A	1
10	5985251516014	ANTENA, ELEMENTO INFERIOR		B	1
11	5985251516013	ANTENA, ELEMENTO INTERMEDIO		C	2
12	5985251516012	ANTENA, ELEMENTO SUPERIOR		D	1
13	5985251517859	ANTENA VEICULAR VHF 30-108 MHZ CENTER FED C/ GPS E ESTICADOR AV-525VCFGPS	9	Constituido por:	
14	5985251466408	BASE ANTENA VEICULAR 30 A 108 MHZ CENTER FED COM GPS E ESTICADOR		A	2
15	5985251523998	SECCAO INFERIOR DE ANTENA		B	1
16	5985251427958	ANTENA, ELEMENTO SUPERIOR		C	1
17	5985251510268	ANTENA VEICULAR 30 A 512 MHZ COM ESTICADOR, COMROD A/S AV-525U	10	Constituido por:	
18	5985251510269	ANTENA, BASE DE SUPORTE		A	1
19	5985251510270	ANTENA, ELEMENTO INFERIOR		B	1
20	5985251427958	ANTENA, ELEMENTO SUPERIOR		C	1
21	5985MD0313912	ANTENA FILAR HF PARA VEICULO COM BOLSA	11		1
22	5985251527036	ANTENA WIRELESS VEICULAR	12		1
23	5830MD0330970	SISTEMA SERVIDOR ROBUSTECIDO	13		2
24	7010123783645	COMPUTADOR PORTATIL ROBUSTECIDO GETAC M230	14		2
25	5895263007609	UNIDADE DE SUPORTE P/ FIXACAO DE COMPUTADOR PORTATIL ROBUSTO	15		2
26	5820MD0330929	TRANSMISSOR-RECEPTOR RADIO MOVEL P/ COMUNICACOES TACTICAS MOVEIS	16		1
27	5999MD0330947	INSTALACAO VEICULAR DO ER-HCDR	17		1
28	5825015751881	RECEPTOR GPS C/ CABO DE INTERLIGACAO	18		1
29	5985251515830	ANTENA DE BANDA LARGA, UHF P/ INSTALACAO VEICULAR 225 A 450 MHZ	19		1
30	5985251519584	SECÇÃO DE EXTENSÃO	20		1
31	5895263009726	INTERRUPTOR ROBUSTECIDO COM SHDSL	21		1
32	5340263009731	PLACA DE INTERFACE VEICULAR PARA RSW-202	22		1
33	7025992197242	MONITOR 20,1 POL " MILITARY HEAD LCD MONITOR" PARA PORTÁTIL ROBUSTECIDO	23		2

LISTA DA COMPOSIÇÃO DO MATERIAL (FIGURAS)

Fig 1 - 7035263001929

Fig 2 - 5996263001933

Fig 3 - 5985MD0313911

Fig 4 - 5996123662638

Fig 5 - 5985123662639

Fig 6 - 5895123665843

Fig 7 - 5895123665849

Fig 8 - 5985251524003

Fig 9 - 5985251517859

Fig 10 - 5985251510268

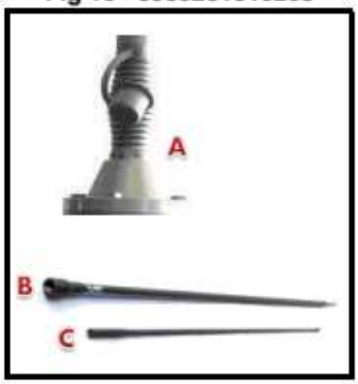

Fig 11 - 5985MD0313912

Fig 12 - 5985251527036

LISTA DA COMPOSIÇÃO DO MATERIAL (FIGURAS)

Fig 13 - 5830MD0330970

Fig 14 - 7010123783645

Fig 15 - 5895263007609

Fig 16 - 5820MD0330929

Fig 17 - 5999MD0330947

Fig 18 - 5825015751881

Fig 19 - 5985251515830

Fig 20 - 5985251519584

Fig 21 - 5930263007536

Fig 22 - 5895263008497

Fig 23 - 7025992197242

Anexo B

COST 231-Walfisch-Ikegami

Este anexo apresenta o modelo de propagação usado para calcular as perdas no caminho.

O modelo COST 231 Walfisch-Ikegami baseia-se numa estrutura urbana como a da Figura B.1.

Este modelo foi desenhado tendo por base a cidade de Manhattan, em que as ruas se intersectam em ângulos retos, edifícios de altura constante e terreno plano. Também foram realizados testes em cidades europeias para aprovar o modelo e foram definidos limites dos parâmetros para qual o modelo é válido,

- $f \in [800, 2000]\ MHz$;
- $d \in [0.02,\ 5]\ km$;
- $h_b \in [4, 50]\ m$;
- $h_m \in [1, 3]\ m$;

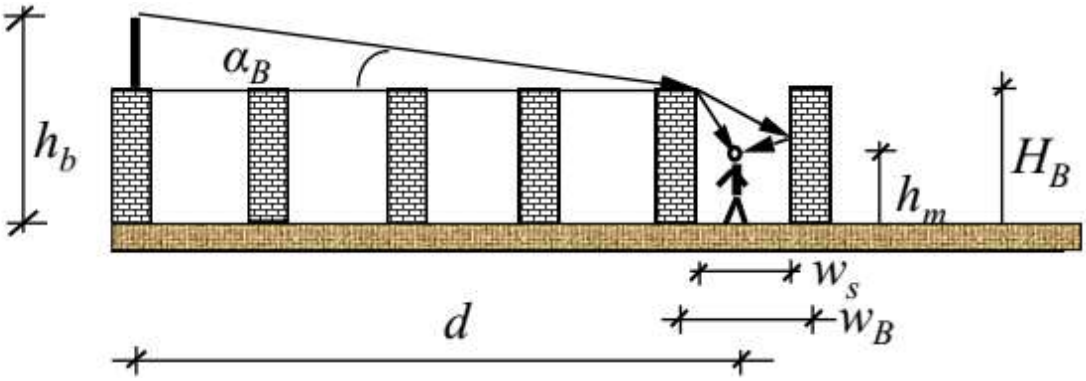

Figura B. 1 Estrutura Urbana [Corr14].

Para a propagação em linha de vista (ϕ = 0) vem,

$$L_{p[dB]} = 42.6 + 26\log\left(d_{[km]}\right) + 20\log\left(f_{[MHz]}\right), d > 0.02\ km \tag{B.1}$$

Onde:

- d : distância horizontal entre os terminais;
- f : frequência da portadora do sinal;
- w_s : largura da rua;
- w_B : distância entre o centro dos edifícios.
- h_b : altura da antena de transmissão;
- h_m : altura da antena de receção.

Em todos os outros casos vem,

$$L_{p[dB]} = \begin{cases} L_{0[dB]} + L_{rt[dB]} + L_{rm[dB]}, & L_{rt} + L_{rm} > 0 \\ L_{0[dB]} & , L_{rt} + L_{rm} < 0 \end{cases} \tag{B.2}$$

Onde

- L_0 : perdas de propagação em espaço livre;
- L_{rt}: perdas entre o útimo telhado e o terminal;

- L_{rm}: perdas entre o terminal emissor e o último telhado.

O valor de L_0 pode ser calculado usando a equação:

$$L_{0[dB]} = 32.44 + 20\log\left(d_{[km]}\right) + 20\log\left(f_{[MHz]}\right) \tag{B.3}$$

O valor de L_{rm} pode ser calculado usando a equação:

$$L_{rm[dB]} = -16.9 - 10\log\left(w_{s[m]}\right) + 10\log\left(f_{[MHz]}\right) + 20\log\left(H_{B[m]} - h_{m[m]}\right) + L_{ori[dB]} \tag{B.4}$$

Com,

$$L_{ori[dB]} = \begin{cases} -10.0 + 0.354\phi_{\,[0]}, \ 0° < \phi < 35° \\ 2.5 + 0.075\left(\phi_{\,[0]} - 35\right), \ 35° \leq \phi \leq 55° \\ 4.0 - 0.114\left(\phi_{\,[0]} - 55\right), \ 55° \leq \phi \leq 90° \end{cases} \tag{B.5}$$

E

$$L_{rt[dB]} = L_{bsh[dB]} + k_a + k_d\log\left(d_{[km]}\right) + k_f\log\left(f_{[MHz]}\right) - 9\log(w_{B[m]}) \tag{B.6}$$

Com,

$$k_d = \begin{cases} 18 & , h_b > H_B \\ 18 - 15\frac{h_b - H_B}{H_B} & , h_b \leq H_B \end{cases} \tag{B.7}$$

$$L_{bsh[dB]} = \begin{cases} -18\log\left(h_{b[m]} - H_{B[m]} + 1\right), h_b > H_B \\ 0 \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad , h_b \leq H_B \end{cases} \tag{B.8}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & , h_b > H_B \\ 54 - 0.8\left(h_{b[m]} - H_{B[m]}\right) & , d \geq 0.5\ km\ e\ h_b \leq H_B \\ 54 - 1.6\left(h_{b[m]} - H_{B[m]}\right)d_{[km]}, & d < 0.5\ km\ e\ h_b \leq H_B \end{cases} \tag{B.9}$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7\left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1\right), urbano\ e\ sub\ urbano \\ -4 + 1.5\left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1\right), densamente\ urbano \end{cases} \tag{B.10}$$

Onde:

- L_{bsh}: perdas relativas à diferença entre a altura dos edifícios e as antenas;
- k_a: aumento das perdas no caminho para as antenas abaixo dos telhados dos edifícios adjacentes;
- k_d: dependência das perdas por difração *multi-screen* versus distância;
- k_f: dependência das perdas por difração *multi-screen* versus frequência;
- w_B: distância entre edifícios.

Anexo C

Recomendação ITU-R P.1411-8

Este anexo apresenta o modelo de propagação recomendado pela ITU-R usado para calcular as perdas no caminho.

São especificados modelos de propagação entre terminais localizados ao nível das ruas, que são específicos em ambientes urbanos ou suburbanos. Este modelo é válido dentro dos seguintes parâmetros,

- $f \in [300, 3000]\ MHz$;
- $d \in [0.02,\ 3]\ km$;
- $h_b \in [1.9,\ 3]\ \ m$;
- $h_m \in [1.9,\ 3]\ m$;

A ITU-R definiu um processo com oito passos para o cálculo da atenuação em espaço livre.

Passo 1: Calcular o valor médio das perdas em linha de vista:

$$L_{LoS}^{médio}(d) = 32.45 + 20\log_{10} f_{[MHz]} + 20\log_{10}(\frac{d_{[m]}}{1000}) \qquad \text{(C.1)}$$

Passo 2: Para uma dada percentagem de localização requisitada, p (%), calcular a correção da localização em LoS:

$$\Delta L_{LoS}(p) = 1.5624\sigma\left(\sqrt{-2\ln\left(1-\frac{p}{100}\right)} - 1.1774\right) com\ \sigma = 7dB \qquad \text{(C.2)}$$

Passo 3: Adicionar a correção da localização em LoS ao valor médio das perdas:

$$L_{LoS}(d,p) = L_{LoS}^{médio}(d) + \Delta L_{LoS}(p) \qquad \text{(C.3)}$$

Passo 4: Calcular o valor médio das perdas sem linha de vista:

$$L_{NLoS}^{médio}(d) = 9.5 + 45\log_{10} f_{[MHz]} + 40\log_{10}\left(\frac{d_{[m]}}{1000}\right) + L_{urban} \qquad \text{(C.4)}$$

L_{urban} depende da categoria do ambiente e dá-se por 0 dB para suburbano, 6.8 dB para urbano e 2.3 dB para urbano denso.

Passo 5: Para a percentagem de localização requisitada, *p* (%), calcular a correção da localização em NLoS:

$$\Delta L_{NLoS}(p) = \sigma N^{-1}\left(\frac{p}{100}\right) com\ \sigma = 7\ dB \qquad \text{(C.5)}$$

Passo 6: Adicionar a correção da localização em NLoS ao valor médio das perdas:

$$L_{NLoS}(d,p) = L_{NLoS}^{médio}\left(d_{[m]}\right) + \Delta L_{NLoS}(p) \qquad \text{(C.6)}$$

Passo 7: Para a percentagem de localização requisitada, *p* (%), calcular a distância d_{LoS} para qual a fração F_{LoS} igual *p*:

$$d_{LoS}(p) = 212\left[\log_{10}\left(\frac{p}{100}\right)\right]^2 - 64\log_{10}\left(\frac{p}{100}\right)\ se\ p < 45 \qquad \text{(C.7)}$$

$$d_{LoS}(p) = 79.2 - 70\left(\frac{p}{100}\right) se\ p > 45 \qquad \text{(C.8)}$$

Tabela C. 2 Valores de LoS e NLoS de acordo com a percentagem de localização.

p *(%)*	$\Delta L_{LoS_{[dB]}}$	$\Delta L_{NLoS_{[dB]}}$	$d_{LoS_{[m]}}$
1	-11.3	-16.3	976
10	-7.9	-9.0	276
50	0.0	0.0	44
90	10.6	9.0	16
99	20.3	16.3	10

Passo 8: As perdas no caminho a uma distância *d* é dado por:

Se *d* < d_{LoS} então $L(d,p) = L_{LoS}(d,p)$;

Se *d* > $d_{LoS} + w$, então $L(d,p) = L_{NLoS}(d,p)$;

Caso contrário faz-se uma interpolação linear entre os valores $L_{LoS}(d_{LoS},p)$ e $L_{NLoS}(d_{LoS}+w,p)$:

$$L_{LoS} = L_{LoS}(d_{LoS},p)$$

$$L_{NLoS} = L_{NLoS}(d_{LoS}+w,p)$$

$$L(d,p) = L_{LoS} + \frac{(L_{NLoS} - L_{LoS})(d - d_{LoS})}{w}$$

A largura *w* é introduzida para providenciar uma região entre as regiões LoS e NLoS, esta região de transição é tipicamente uma largura de *w* = 20 m.

Anexo D

Weissberger

Este anexo apresenta o modelo de atenuação de Weissberger que considera o efeito da vegetação na propagação [Corr14].

O modelo sugere que em primeiro lugar se calcule as perdas em espaço livre e depois se adicione a atenuação especifica provocada pela vegetação.

Começa-se por calcular as perdas em linha de vista, utilizando a equação (B.3).

De seguida adiciona-se as perdas derivadas da vegetação,

$$L_{v[dB]} = \begin{cases} 0.063 f_{[MHz]}^{0.284} d_{v[m]}, 0 \leq d_{v[m]} \leq 14 \\ 0.187 f_{[MHz]}^{0.284} d_{v[m]}^{0.588}, 14 \leq d_{v[m]} \leq 400 \end{cases} \quad \text{(D.1)}$$

Para *f* > 200 MHz, onde d_v é a distância efetiva que as ondas atravessam vegetação.

A atenuação calculada segundo o modelo de Weissberger é adicionado às perdas em espaço livre.

Anexo E

Cálculos Taxas de Transferência Máximas

Este anexo apresenta os resultados obtidos no cálculo das taxas de transferência dos diversos sistemas.

Tabela E. 3 Taxas de transferência requisitadas associadas aos diversos serviços no sistema com um pelotão de infantaria associado, com as viaturas em coluna.

Serviço	$R_{bMax_{[Mbit/s]}}$
Voz	0.61
Email	5.00
***Streaming* de vídeo**	19.20
Transferência de Ficheiros	51.2

Tabela E. 4 Taxas de transferência requisitadas associadas aos diversos serviços no sistema com quatro pelotões de infantaria associados, com as viaturas em coluna.

Serviço	$R_{bMax_{[Mbit/s]}}$
Voz	1.71
Email	14
***Streaming* de vídeo**	53.76
Transferência de Ficheiros	143.36

Anexo F

Análise gráfica dos modelos de propagação

Este anexo apresenta a análise gráfica realizada no Matlab dos modelos CWI, ITU-R e Weissberger, fazendo vários fatores, A análise está dividida nos ambientes urbano, suburbano e floresta, em cada um deles faz-se variar a distância ou a frequência obtendo em todos eles uma atenuação.

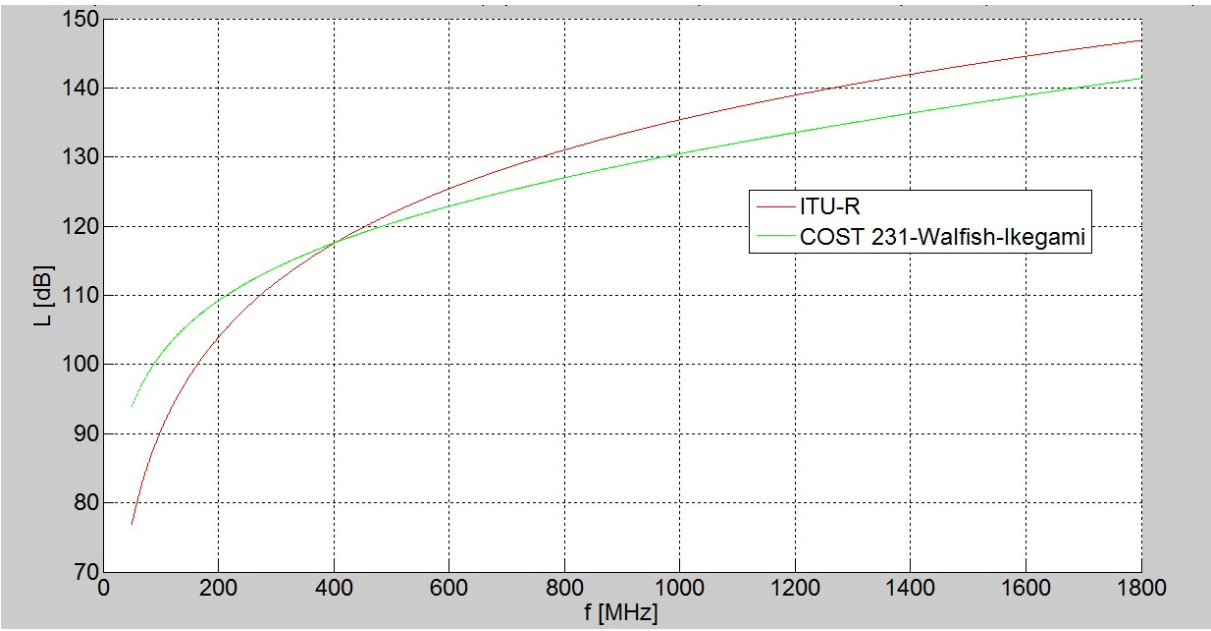

Figura F. 17 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio urbano em função da frequência (Φ= 0º)

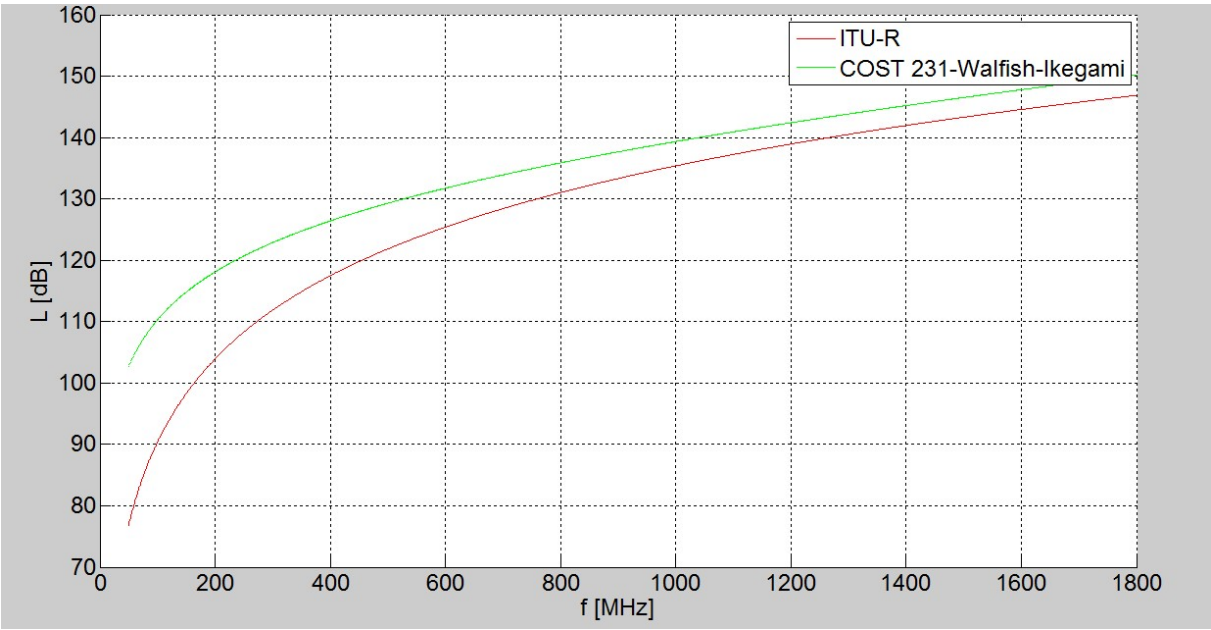

Figura F. 18 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio urbano em função da frequência (Φ= 90º)

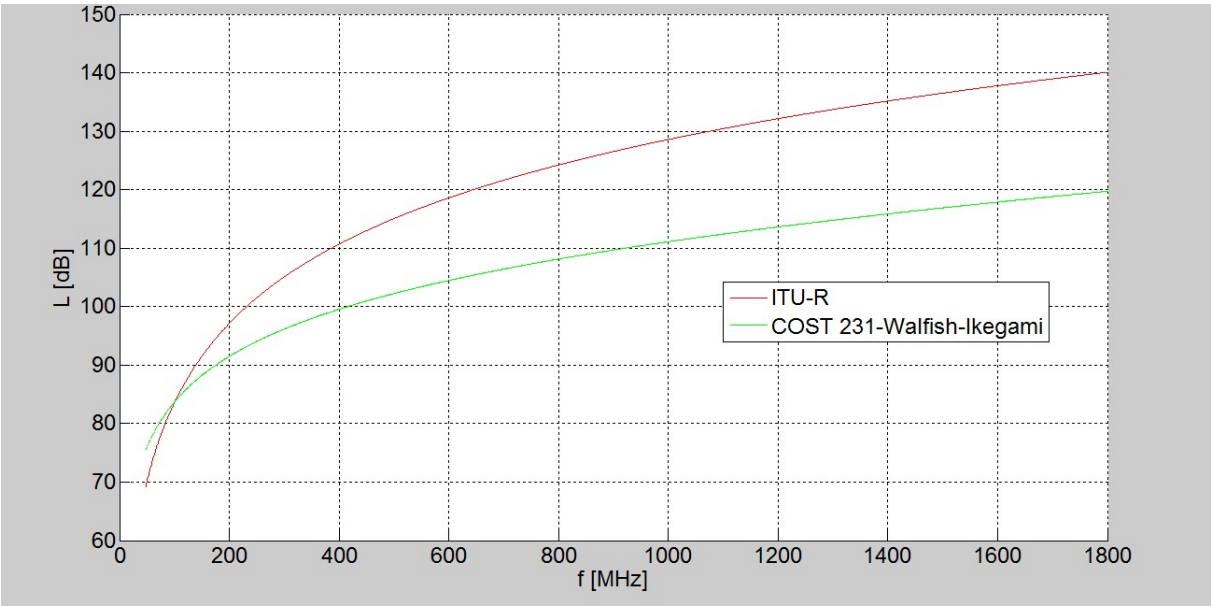

Figura F. 19 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio suburbano em função da frequência (Φ= 0º)

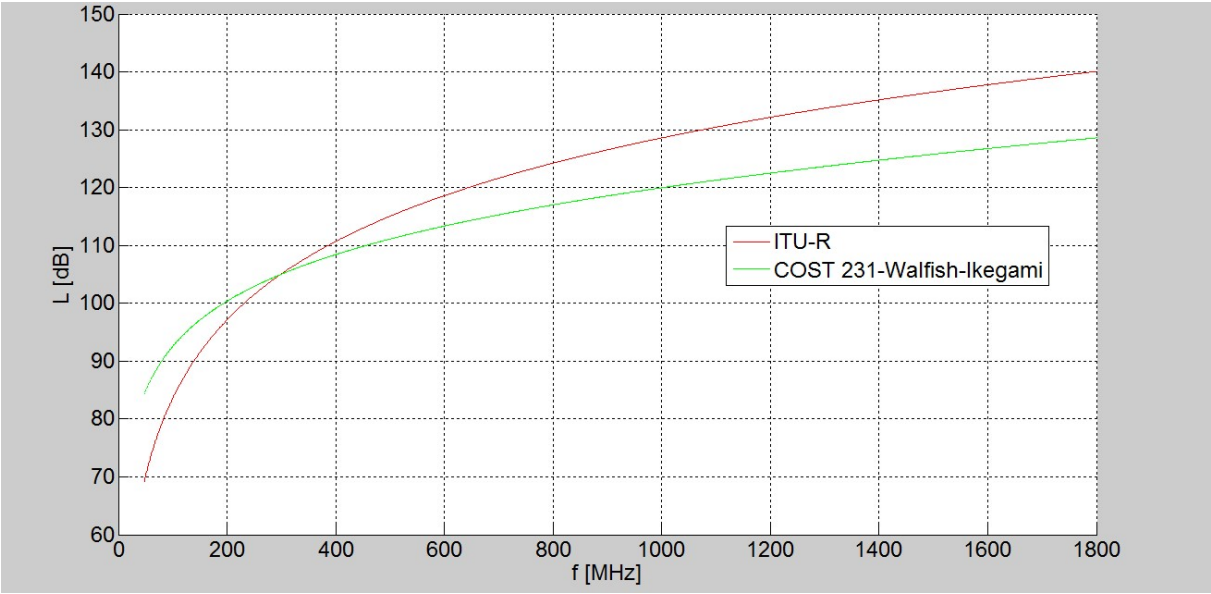

Figura F. 20 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio suburbano em função da frequência (Φ= 90º)

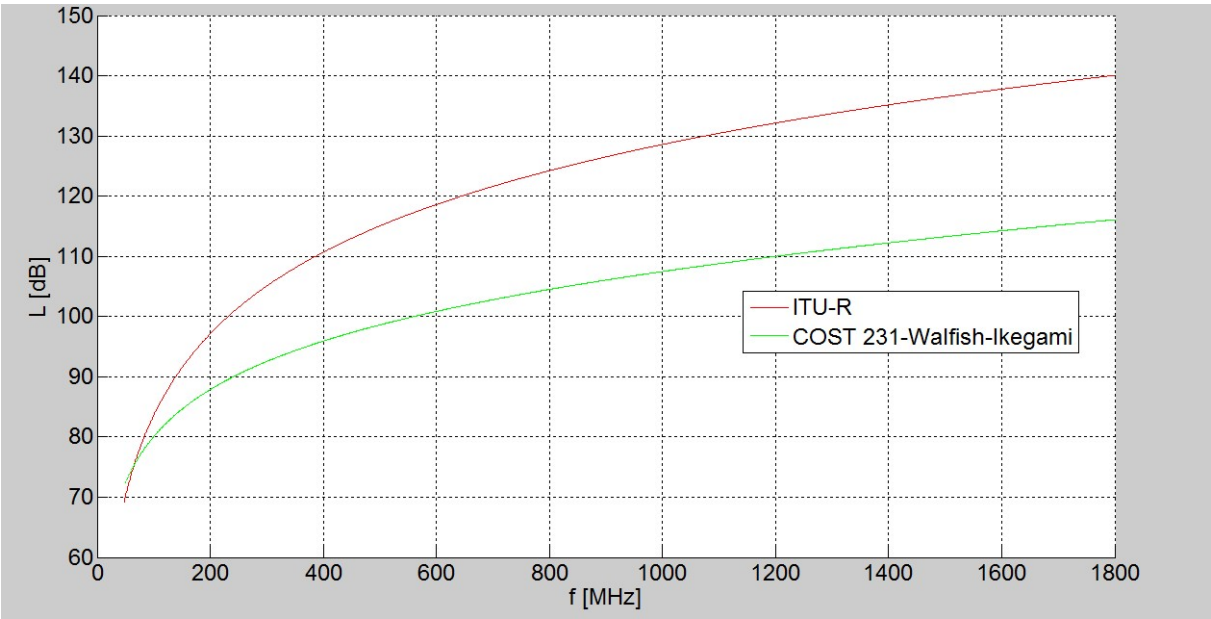

Figura F. 21 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio rural em função da frequência (Φ= 0º)

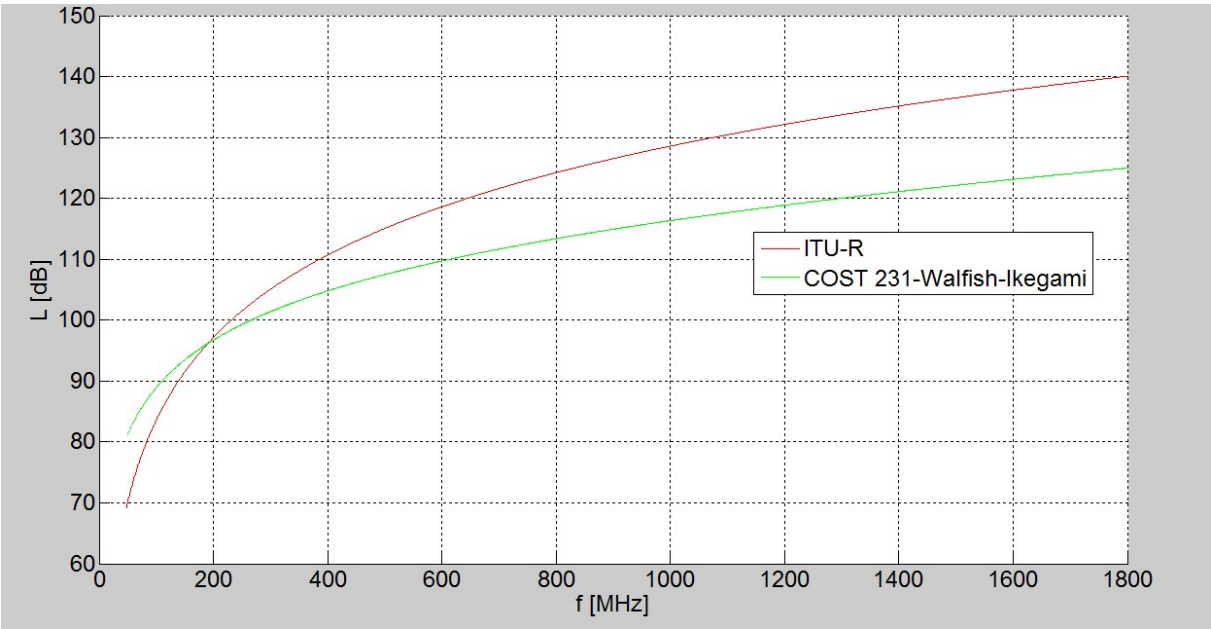

Figura F. 22 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio rural em função da frequência (Φ= 90º)

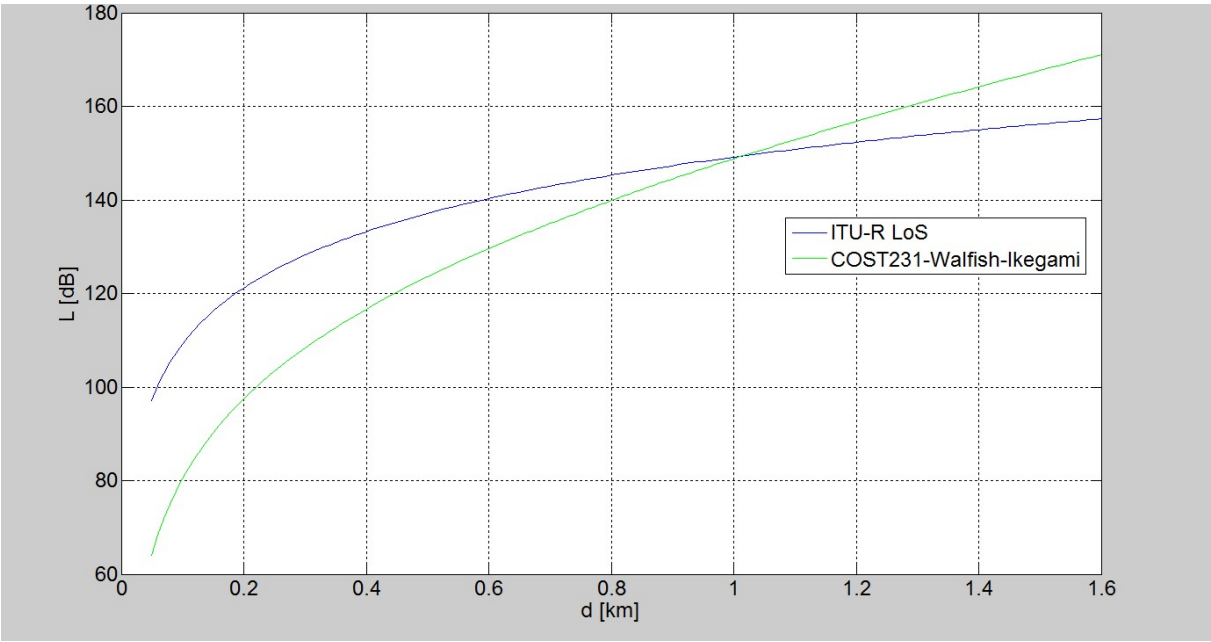

Figura F. 23 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio urbano em função da distância (Φ= 0º)

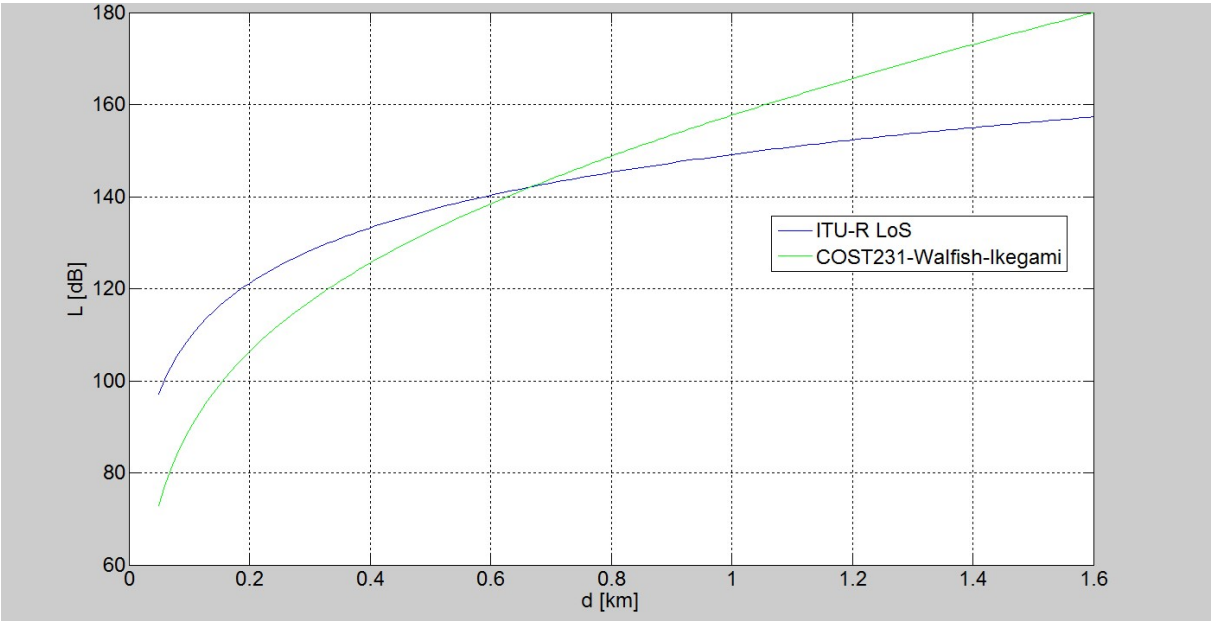

Figura F. 24 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio urbano em função da distância (Φ= 90º)

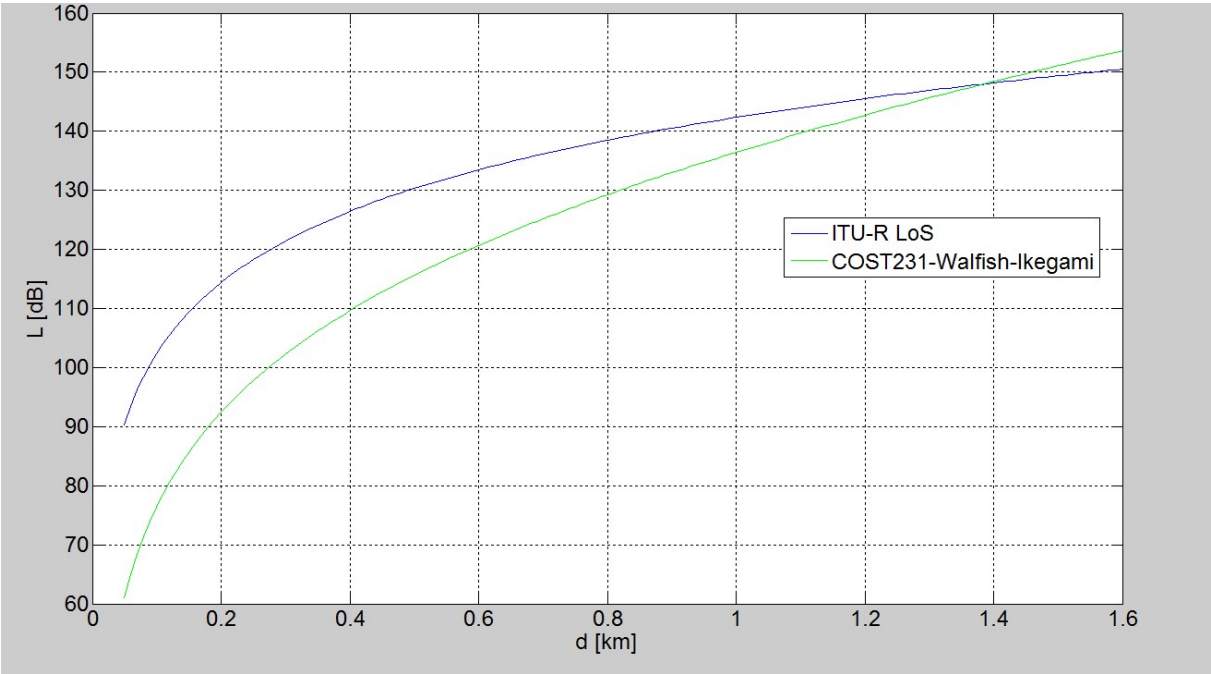

Figura F. 25 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio suburbano em função da distância (Φ= 0º)

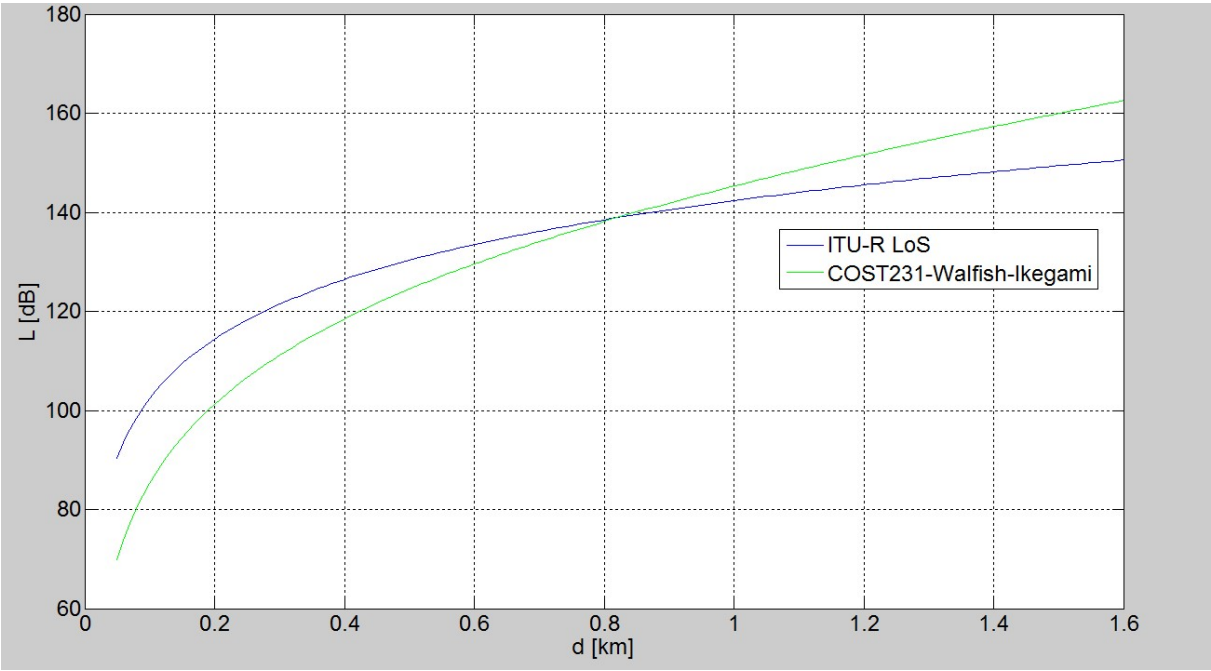

Figura F. 26 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio suburbano em função da distância (Φ= 90º)

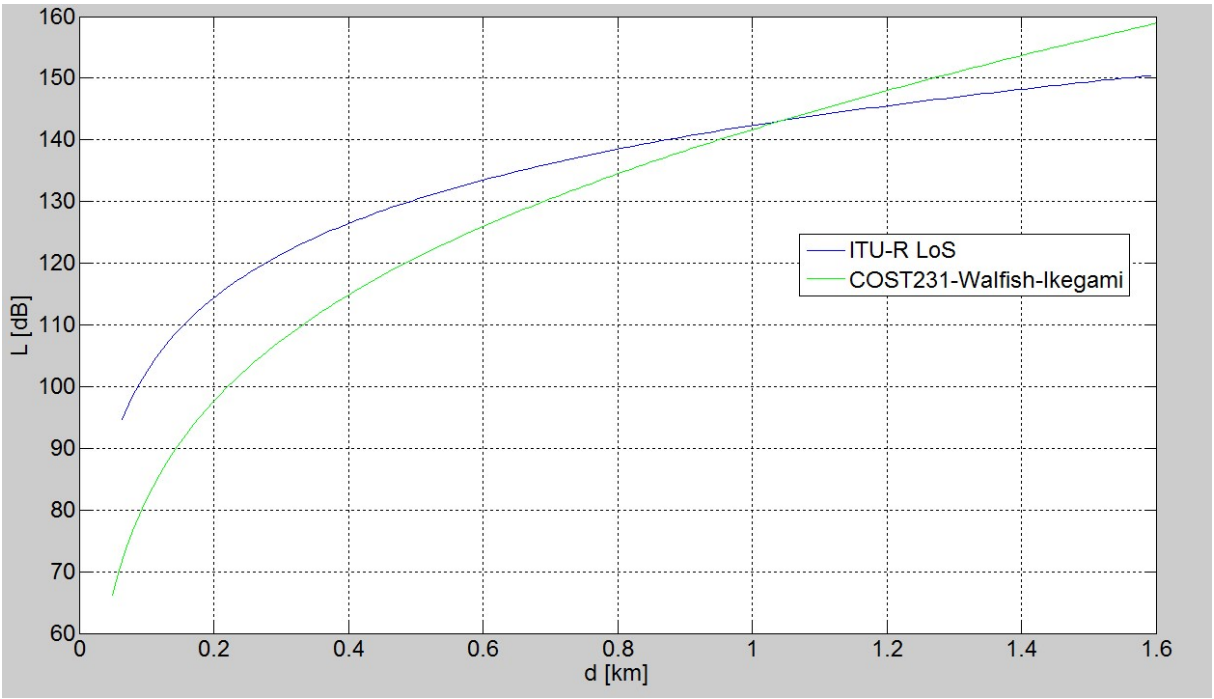

Figura F. 27 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio rural em função da distância (Φ= 90º)

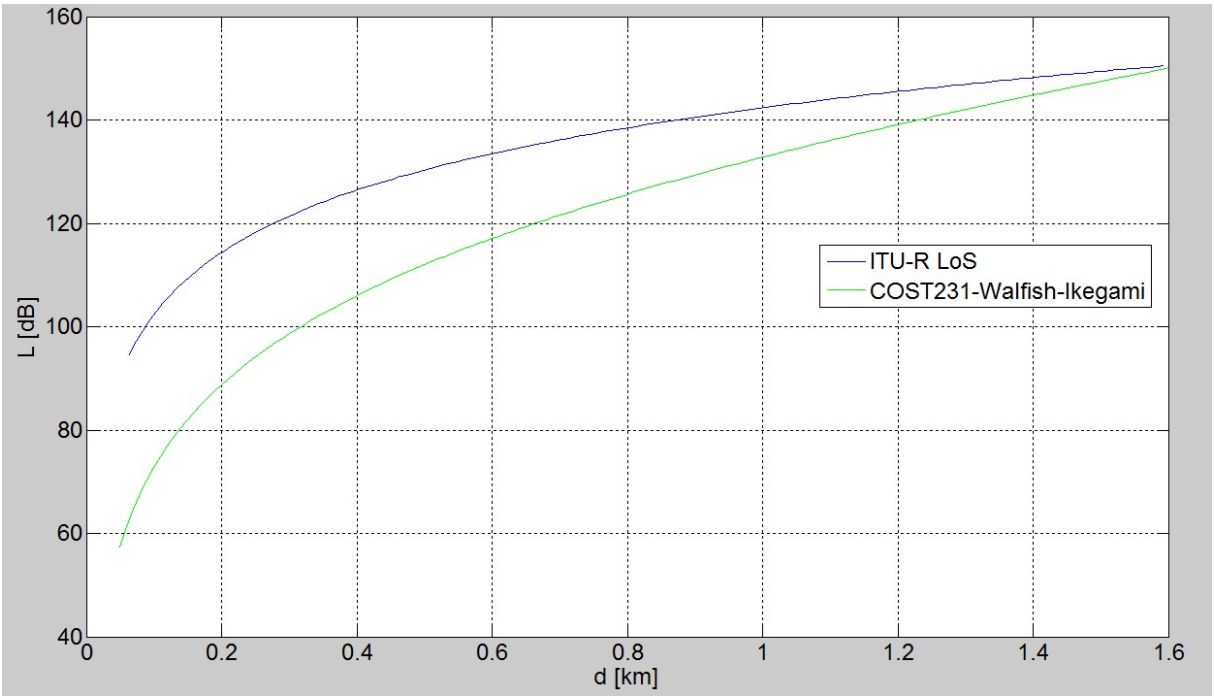

Figura F. 28 Comparação modelos ITU-R e COST231 em meio rural em função da distância (Φ= 0º)

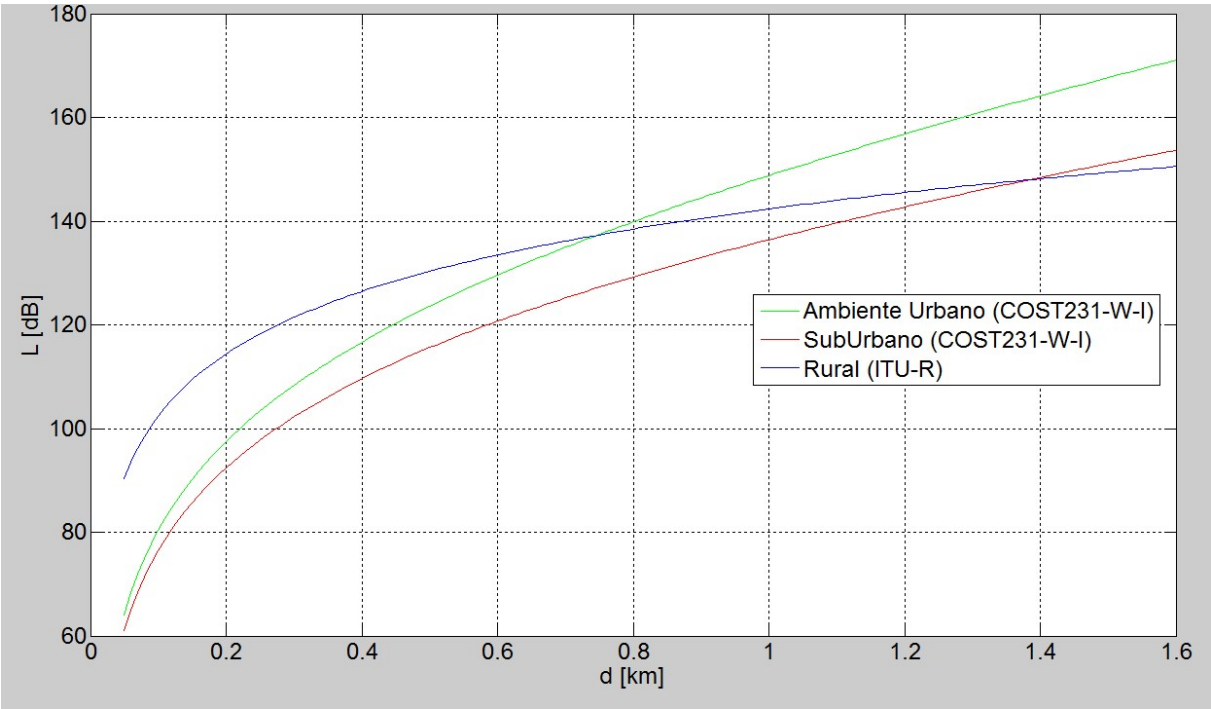

Figura F. 29- Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários (Φ=0º)

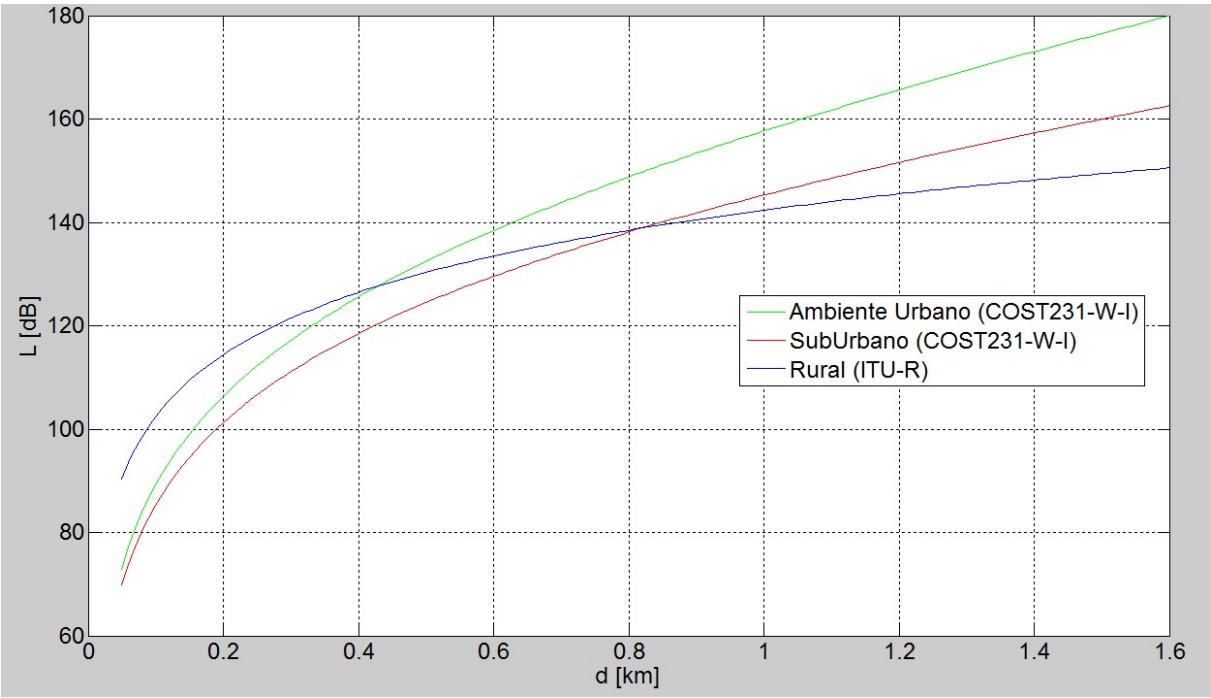

Figura F. 30 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários em função da distância(Φ=90º)

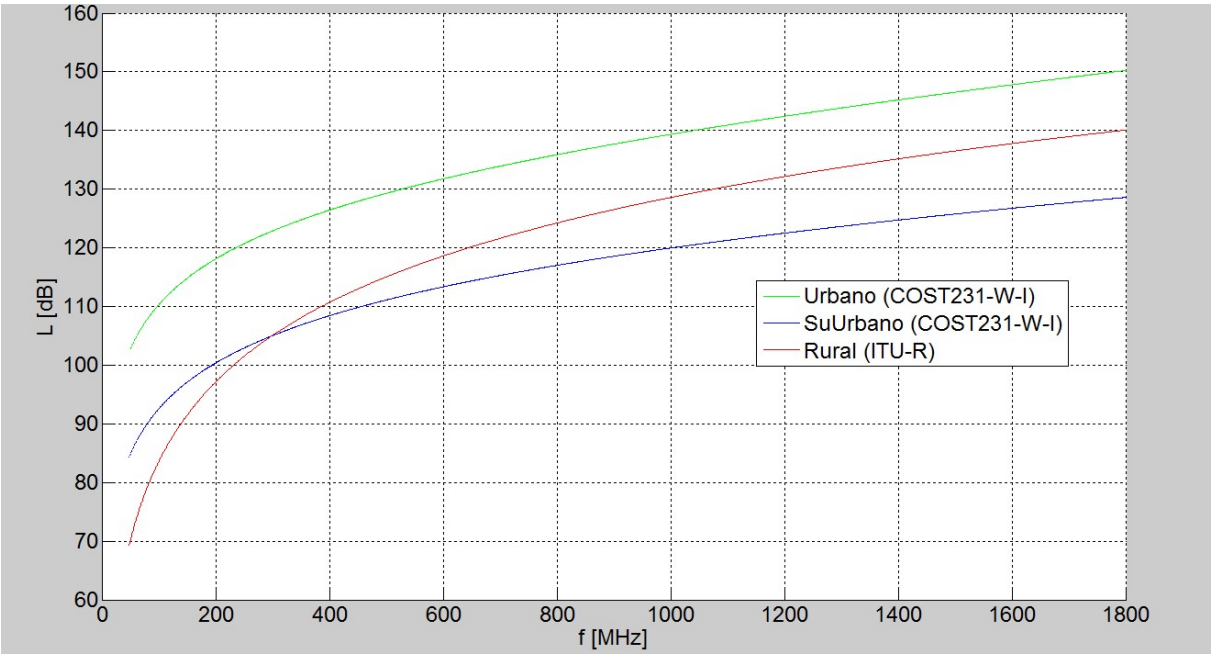

Figura F. 31 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários em função da frequência (Φ=90º)

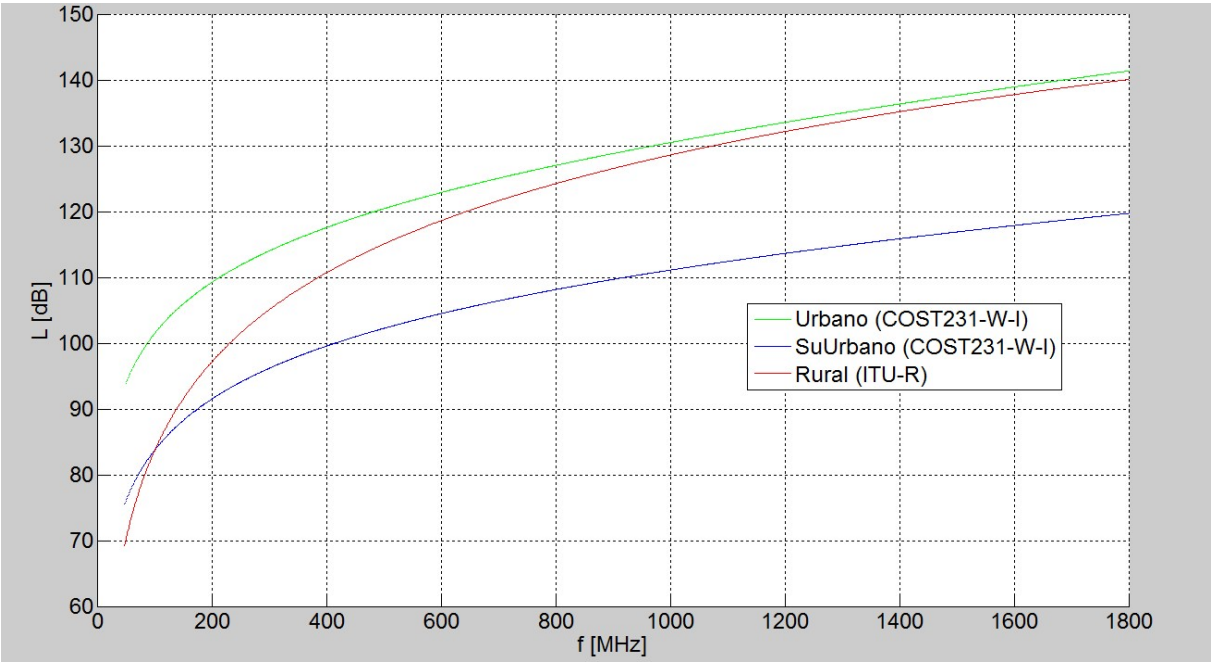

Figura F. 32 Ensaio comparativo dos modelos nos respetivos cenários em função da frequência (Φ=0º)

O modelo de *Weissberger* também prevê a atenuação derivada da distância e da frequência, as figuras 3.19 e 3.20 representam a influência da vegetação na propagação

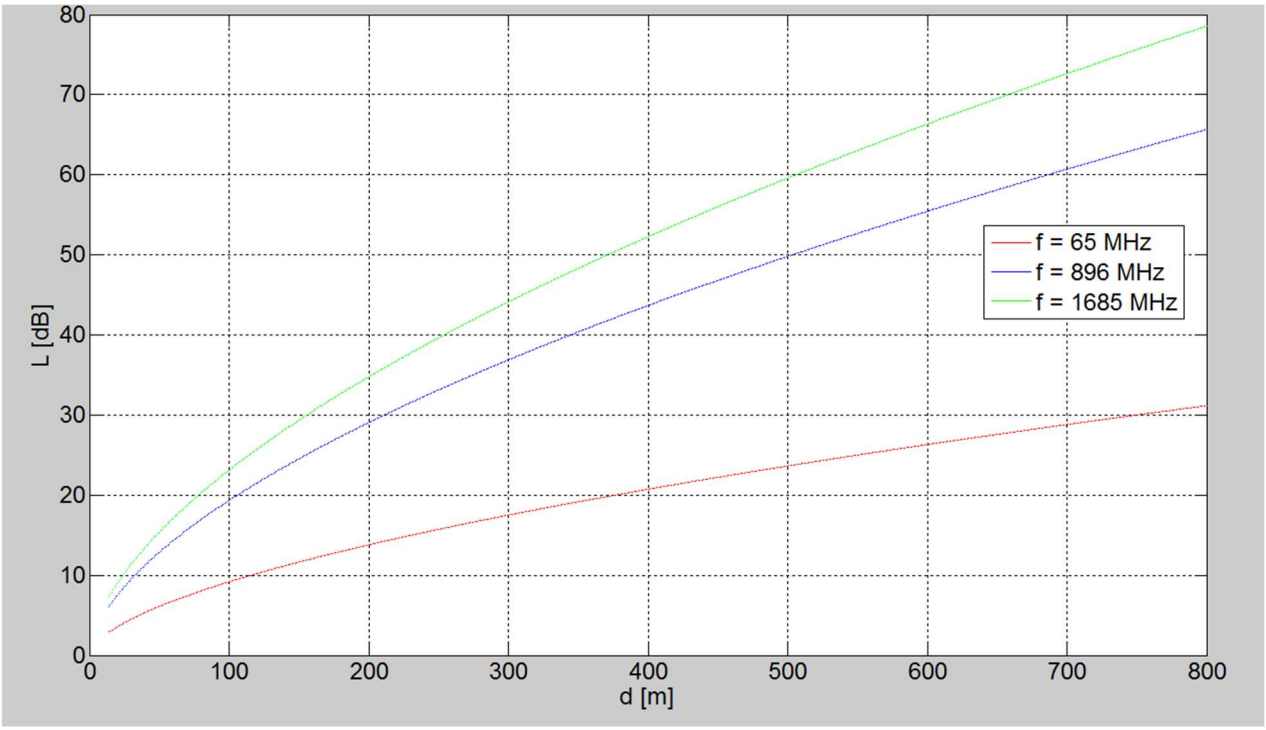

Figura F.17 - Atenuação provocada pela vegetação em função da distância

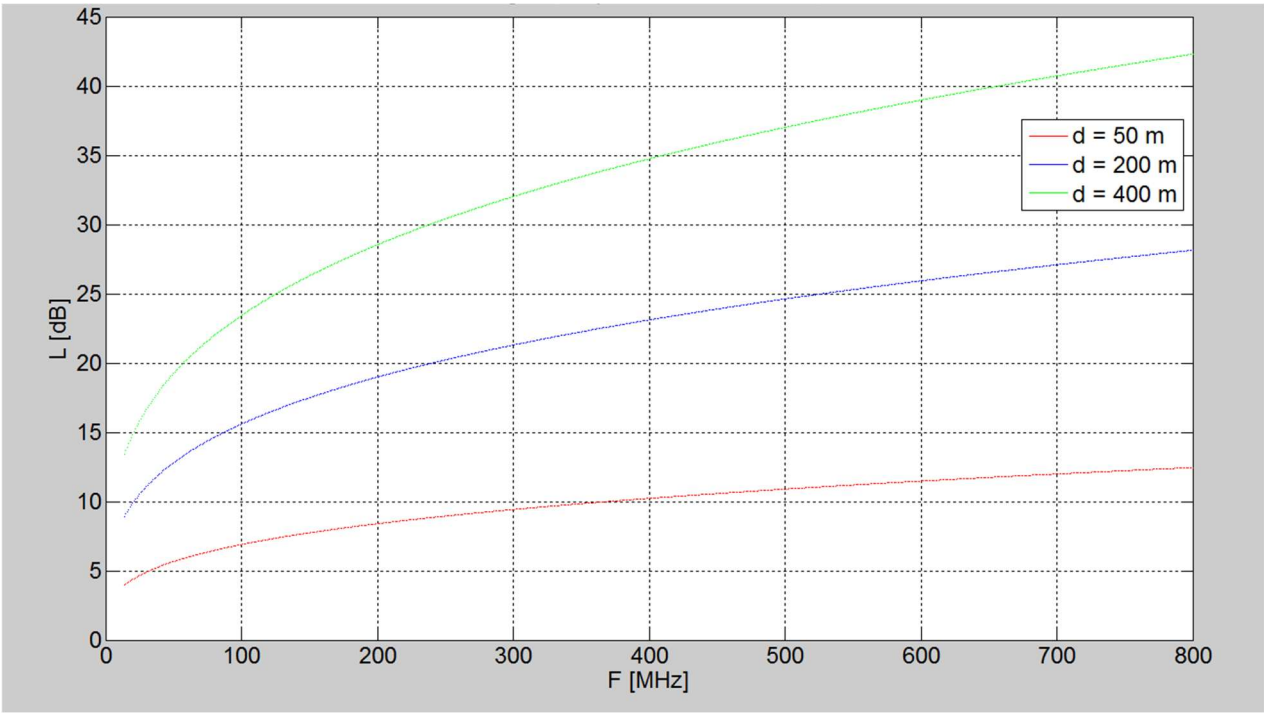

Figura F.18 - Atenuação provocada pela vegetação em função da frequência

Anexo G

Número de utilizadores em paralelo

Este anexo apresenta os resultados obtidos em relação ao número de utilizadores em paralelo para as distâncias de 50, 200 e 600 metros.

Com os resultados das taxas de transferência obtidos interessa saber quais são então as capacidades do sistema que se obtêm fazendo uma divisão simples pelo valor da taxa de transferência do serviço. Verifica-se que para serviços de baixa taxa de transferência, consegue-se executar milhares de serviços em paralelo

Tabela G. 13 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de voz (50 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	31203	31203	31203	92505	92505	92505	122951	122951	122951
Suburbano	31203	31203	31203	92505	92505	92505	122951	122951	122951
Rural	31203	31203	31203	92505	92505	92505	122951	122951	122951
Floresta	31203	31203	31203	92505	92505	92505	122951	122951	122951

Tabela G. 14 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de voz (200 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	31203	31203	31186	92505	92498	91467	122951	122949	122236
Suburbano	31203	31203	31185	92505	92498	91450	122951	122949	122222
Rural	31203	31203	31203	92505	92505	92505	122951	122951	122951
Floresta	31203	31203	31190	92505	92505	31190	122951	122949	122384

Tabela G. 15 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de voz (600 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	31203	31112	11719	92501	88753	12294	122950	119797	13096
Suburbano	31203	31124	12718	92501	89119	13479	122950	120152	14597
Rural	31203	31195	25721	92505	91933	40658	122951	122590	53541
Floresta	31203	28557	111	92505	5579259	125	122951	76461	139

Tabela G. 16 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de email (50 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	3807	3807	3807	11286	11286	11286	15000	15000	15000
Suburbano	3807	3807	3807	11286	11286	11286	15000	15000	15000
Rural	3807	3807	3807	11286	11286	11286	15000	15000	15000
Floresta	3807	3807	3807	11286	11286	11286	15000	15000	15000

Tabela G. 17 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de email (200 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	3807	3807	3805	11286	11286	11159	15000	15000	14913
Suburbano	3807	3807	3805	11286	11286	11157	15000	15000	14911
Rural	3807	3807	3807	11286	11286	11286	15000	15000	15000
Floresta	3807	3807	3805	11286	11285	11182	15000	15000	14931

Tabela G. 18 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de email (600 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	3807	3796	1430	11285	10828	1500	15000	14615	1598
Suburbano	3807	3797	1552	11285	10873	1644	15000	14658	1781
Rural	3807	3806	3138	11286	11216	4960	15000	14956	6532
Floresta	3807	3484	14	11286	6807	17	15000	9328	29

Tabela G. 19 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de *streaming* de vídeo (50 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	991	991	991	2939	2939	2939	3906	3906	3906
Suburbano	991	991	991	2939	2939	2939	3906	3906	3906
Rural	991	991	991	2939	2939	2939	3906	3906	3906
Floresta	991	991	991	2939	2939	2939	3906	3906	3906

Tabela G. 20 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de *streaming* de vídeo (200 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	991	991	991	2939	2939	2939	3906	3906	3884
Suburbano	991	989	404	2939	2939	2939	3906	3906	3883
Rural	991	991	991	2939	2939	2920	3906	3906	3883
Floresta	991	991	991	2939	2939	2912	3906	3906	3888

Tabela G. 21 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de *streaming* de vídeo (600 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	991	988	372	2939	2820	391	3906	3806	416
Suburbano	991	989	404	2939	2831	428	3906	3817	464
Rural	991	989	880	2939	2830	1830	3906	3817	1830
Floresta	991	907	4	2939	1773	4	3906	2429	8

Tabela G. 22 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de transferência de ficheiros (50 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	371	371	371	1102	1102	1102	1464	1464	1464
Suburbano	371	371	151	1102	1061	160	1464	1431	173
Rural	371	371	371	1102	1102	1102	1464	1464	1464
Floresta	371	371	371	1102	1102	1102	1464	1464	1464

Tabela G. 23 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de transferência de ficheiros (200

m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	371	371	371	1102	1102	1089	1464	1464	1456
Suburbano	371	370	152	1102	1162	161	1464	1431	173
Rural	371	371	371	1102	1102	1102	1464	1464	1464
Floresta	371	371	371	1102	1102	1092	1464	1464	1458

Tabela G. 24 Número de utilizadores em paralelo a realizar serviço de transferência de ficheiros (600 m).

Número Utilizadores	Modulação								
	4-PSK			16-QAM			64-QAM		
	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]	65 [MHz]	896 [MHz]	1685 [MHz]
Urbano	371	370	139	1102	1057	146	1464	1427	156
Suburbano	371	370	152	1102	1062	161	1464	1431	173
Rural	371	371	306	1102	1095	484	1464	1460	637
Floresta	371	340	1	1102	664	1	1464	910	2

Referências

[3GPP13] *LTE-Advanced*, http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced, Jun. 2013.

[3GPP15] 3GPP, *Technical Specification Group Services and System Aspects; Policy and Charging Control Architecture (Release 13)*, Relatório TS 23.107, V13.5.1, Set. 2015 (http://www.3gpp.org/DynaReport/23203.htm).

[Agil09] Agilent Technologies, *Agilent 3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development, and Test Challenges*, Application Note, EUA, 2009 (http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8139EN.pdf).

[Alme13] D. Almeida, *Inter-Cell Interference Impact on LTE Performance in Urban Scenarios*, Dissertação de Mestrado, IST, Lisboa, 2013.

[BCGS04] S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, I. Stojmenovic, *Mobile Ad hoc Networking*, IEEE, Nova Jersei, EUA, 2004.

[CiNoLi13] T. Clancy, M. Norton, M. Lichtman, *Security Challenges with LTE-Advanced Systems and Military Spectrum*, em IEEE Military Communications Conference, pp. 375–381, San Diego, EUA, 2013.

[CorAgra02] C. Cordeiro, e D. Agrawal, *Mobile Ad hoc Networking*, University of Cincinnati, Cincinnati, EUA, 2002.

[Corr14] L. Correia, *Mobile Communications Systems – Lecture Notes*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, Fev. 2014.

[COTS11] COTS Journal – *Mobile Ad Hoc Networking Ravemps Military Communications*, http://www.cotsjournalonline.com/articles/view/102158, Nov. 2011.

[DPSB08] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold. e P. Beming, *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*, Elsevier, Oxford, Inglaterra, 2008.

[DSAD13] Ms. Dhanashri, A. Shukla, Ms. Apurva, A. Deshpande, *A Study paper on 4G and MANET*, Wireless Network of Battlefield in Future, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol.4. Issue 12, Dezembro 2013, pp. 262-267.

[EID16] EID, *PRC-525 Combat Net Radio, Consulta Públic Disponível* http://www.eid.pt/prod/7/prc-525_combat_net_radio [Acedido 2 Nov., 2016].

[Eric16] Ericsson, *Ericsson Mobility Report*, Consulta Pública, Março 2016 [Online]. Disponível: http://www.ericsson.com/mobility-report, 2016].

[Exe13] Exército Português, Equipamento Complementar de Comunicações VBR Pandur II, , Jul. 2013.

[Exe15] Exército Português, Caracterizar o emprego do PelAtMec PANDUR nos deslocamentos, Mafra, 2015.

[Exe16] Exército Português, https://www.exercito.pt, Dez. 2016.

[EMGFA17] EMGFA – Operações das Forças armadas, http://www.emgfa.pt/pt/operacoes/missoes/cjtfoir, Ago. 2017.

[FHB14] S. Gorge, R. Horvitz, C. Blackman, "*Is Commercial Cellular Suitable for Mission Critical Broadband*?" DG Communications Networks , Comissão Europeia,2014.

[Getty17] GettyImages, *Bagdad Neighborhood,* http://www.gettyimages.pt/fotos/dora-neighborhood-in-baghdad, Out. 2017,

[Guita16] J. Guita, *Balancing the load in LTE urban networks via inter-frequency handovers*, Dissertação Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2016.

[HoTo11] H. Holma e A. Toskala, LTE for UMTS: Evolution to LTE Advanced (2nd Edition), John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, Mar. 2011.

[HoToRe16] H. Holma, A. Toskala e J. Reunanen, *LTE Small Cell Optimization 3GPP Evolution to Release 13*, John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra , 2016.

[ITUR15] ITU-R, *Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*, Recomendação ITU-R, nº P.1411-8, Jul. 2015 (https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-8-201507-I!!PDF-E.pdf).

[ITUR16] ITU-R, *Attenuation in vegetation*, Recomendação ITU-R, nº P.833-9, Set. 2016 (https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-9-201609-I!!PDF-E.pdf).

[Khatibi14] S. Khatibi, *Radio Resource Management Strategies in Virtual Networks*, Ph.D., Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2014.

[LCTH16] S. Lien, C. Chien, F. Tseng, T. Ho, 3GPP Device-To-Device Communications For Beyond 4G, IEEE Communications Magazine, Mar. 2016, pg 28-35.

[MS13] Motorola Solutions, *Mission Critical Communications Designed To a Tougher Standard*, White Paper, 2013. (https://www.motorolasolutions.com/content/dam/msi/docs/en-xw/static_files/Mission_Critical_Communications_Tougher_White_Paper.pdf)

[Op16] Operacional, (www.opercaional.pt), Dez. 2016.

[PCroma03] PANCROMA –*City of Bagdad*, http://www.terrainmap.com/rm31.html, Mar.2003.

[SeTB11] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, *LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*, Wiley, Chichester, United Kingdom, 2011.

[ShStock16] Shutterstock, Aerial view of a west Baghdad neighbourhood, https://www.shutterstock.com/pt/image-photo/aerial-view-west-baghdad-neighborhood-99225524, Out. 2017.

[RWLLL15] Y. Ren, C. Wang, D. Liu, F. Liu, and E. Liu, *Applying LTE-D2D to support V2V Communication using local Geographic Knowledge*, China, 2015.

[RoSch14] Rohde & Schwarz, *HF – VHF/UHF – SHF Antennas*, Alemanha, Nov. 2014.

[TranSS12] T. Tran, Y. Shin e O. Shin, *Overview of enabling technologies for 3GPP LTE-advanced*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking", 2012.

[TTG13] The Thales Group, *Thales Selected to Study Military Uses Of LTE Broadbrand Communications Standard*, Press Release, 2013. (https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/security/press-release/thales-selected-study-military-uses-lte-broadband-communications)

[VFS13] K. Vanganuru, S. Ferrante, G. Sternberg. *System Capacity and Coverage of a Cellular Network with D2D Mobile Relays*, InterDigital Communications LLC, EUA, 2013.