Análise do uso do LTE-A MCC entre os militares em ambientes operacionais

Sónia Martins Pedrinho

Dissertação para 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 Ribeiro da Cunha Sanguino

Orientador: Prof. Luís Manuel de Jesus Sousa Correia

Vogal 1: Prof. António Manuel Raminhos Cordeiro Grilo

Vogal 2: Ten Cor Tm (Eng) José Jaime Soares Pereira

Novembro de 2017

Aos meus Pais, Irmão e Avó, por todo o seu apoio, sacrifício e amor!

Agradecimentos

O meu primeiro agradecimento vai para o Orientador desta Dissertação de Mestrado, o Sr. Professor Luís M. Correia, pelo auxílio, partilha de conhecimento e experiência profissional durante a realização e desenvolvimento deste trabalho. Para além do seu papel como Orientador ensinou-me a melhorar e a evoluir pessoal e profissionalmente através das suas aulas, conselhos e experiências pessoais.

Agradeço à Academia Militar pelo contributo que teve na minha formação e no meu desenvolvimento como militar e enquanto pessoa. Neste sentido, agradeço a todos os meus Professores e Diretores de Curso de Transmissões, pela preocupação e apoio durante o meu percurso na Academia Militar. Especiais agradecimentos vão também para os Oficiais do Exército que se disponibilizaram para fornecer informações relevantes para o meu trabalho, me prestaram apoio e contribuíram com o seu conhecimento e experiência profissional para o desenvolvimento desta Dissertação de Mestrado: o Major de Transmissões Pedro Grifo, o Capitão de Transmissões Luís Regada, o Capitão de Infantaria José Manuel Martins, o Tenente de Infantaria Comando André Ramos e o Sargento-Chefe de Transmissões Paulo Jorge Belo.

Gostaria de agradecer do fundo do coração ao meu Pai, Mãe, Irmão e Avó, que para além de Família são os meus melhores amigos, por todo o apoio que me deram (ainda que, muitas vezes, à distância) e por toda a paciência e carinho que demonstraram nos momentos oportunos. Quero relembrar também todos os amigos que me acompanharam, quer nos momentos de estudo ou lazer, e a todos os meus camaradas do Curso de Transmissões e do Curso Brigadeiro D. Carlos de Mascarenhas.

Resumo

Esta Dissertação de Mestrado analisa o desempenho do sistema LTE-A MCC entre os militares do Exército em ambientes operacionais, integrados nas Operações de Estabilização e nas Operações de Apoio Civil. A análise centra-se na forma de transmitir voz e dados, em tempo real, num pelotão de infantaria. Com a utilização do sistema LTE-A MCC é possível fazer face às elevadas taxas de transmissão de dados e permitir que os militares tenham vários serviços disponíveis cuja informação é, posteriormente, encaminhada para o escalão superior. Para além do que existe no Exército e é sustentado pelo Sistema de Informação e Comunicações Tático pretende-se integrar uma nova tecnologia, o LTE-A MCC. Foram utilizados modelos de propagação em ambientes urbanos, suburbanos, rurais e interior de edifícios. Foram abordados os conceitos fundamentais do sistema LTE-A, a comunicação em modo direto entre os militares, o cálculo da cobertura e da capacidade dos vários serviços e a integração do sistema numa rede *ad hoc* com retransmissão. Como caso de estudo foi utilizada a República Centro-Africana onde estão, atualmente, militares portugueses que atuam como uma Força de Reação Rápida da MINUSCA. Os casos críticos de comunicação verificam-se para o serviço de *streaming* de vídeo, nos ambientes exteriores para as frequências de 64 MHz e 890 MHz, por falta de capacidade. Na frequência de 64 MHz, 23 militares conseguem transmitir vídeo até uma distância de 308 m. Na frequência de 890 MHz, 27 militares têm o serviço disponível e podem transmitir até 364 m.

Palavras-chave

LTE-A MCC, Rede *Ad Hoc*, Cobertura, Capacidade, Operações Militares, República Centro-Africana.

Abstract

This Master Thesis analyses the performance and the use of the LTE-A MCC system among military of the Army in operational environments that are integrated in Stabilisation Operations and Civil Support Operations. The analysis focuses on how to transmit voice and data, in real time, in an infantry platoon. With the use of LTE-A MCC, it is possible to cope with high data rates and allow the military to have several available services whose information is then forwarded to the upper echelon. In addition to what exists in the Army and it is supported by the Tactical Information and Communications System, it is intended to integrate a new technology, LTE-A MCC. Propagation models were used in urban, suburban, rural and indoor environments. The key concepts of LTE-A addressed include device-to-device communications between the military, coverage and capacity calculations for the various services, and the integration of the system into an ad hoc network with retransmission. The Central African Republic was used as a case study, where the portuguese military are currently acting as a Quick Reaction Force of MINUSCA. The worst results occur for the video streaming service, in outdoor environments for the 64 MHz and 890 MHz frequencies, due to the lack of capacity. At 64 MHz, 23 military can do video streaming up to a distance of 308 m. At 890 MHz, 27 military have the service available and they can do video streaming up to 364 m.

Keywords

LTE-A MCC, Ad Hoc Network, Coverage, Capacity, Military Operations, Central African Republic.

Índice

Agradecimentos v
Resumo vii
Abstract viii
Índice ix
Lista de Figuras xi
Lista de Tabelas xii
Lista de Siglas e Acrónimos xiv
Lista de Símbolos xvii
Lista de Software xix
1 Introdução 1
1.1 Enquadramento 2
1.2 Motivação e Objetivos 5
2 Conceitos Fundamentais e Estado da Arte 7
2.1 Arquitetura da Rede 8
2.2 Interface Rádio 10
2.3 LTE-A MCC 14
2.4 Redes Ad Hoc 17
2.5 Capacidade e Cobertura 20
2.6 Serviços e Aplicações 24
2.7 Estado da Arte 27
3 Definição dos Cenários e Desenvolvimento dos Modelos 29
3.1 Definição dos cenários 30
3.2 Modelos de propagação 34
3.2.1 Ambientes exteriores 34
3.2.2 Ambientes interiores 38
3.3 Antenas 38
3.4 Cálculo da cobertura 42
3.5 Cálculo da capacidade 48

3.6 Rede ad hoc com retransmissão 50
4 Análise de Resultados 57
4.1 Cenário real: a RCA 58
4.2 Ambiente Urbano – Bangui..... 61
4.2.1 Serviço de voz 61
4.2.2 Serviço de streaming de vídeo 63
4.3 Ambiente Suburbano – Bambari..... 65
4.3.1 Serviço de voz 65
4.3.2 Serviço de streaming de vídeo 66
4.4 Ambiente Rural – Gongo 67
4.4.1 Serviço de voz 67
4.4.2 Serviço de streaming de vídeo 69
4.5 Ambientes interiores..... 70
5 Conclusões 75
Anexo A. COST 231 Walfish-Ikegami 81
Anexo B. ITM / Longley-Rice 85
Referências 89

Lista de Figuras

Figura 1.1. Rádio Marconi H-4855 (Extraído de [CrMu16]). 3
Figura 1.2. Rádio P/PRC-525 (Extraído de [CRYP16]). 3
Figura 1.3. Débito binário nas tecnologias PLMN e PMR (Adaptado de [Simi12]). 4
Figura 2.1. Arquitetura da rede LTE-A (Adaptado de [TTYS12]). 8
Figura 2.2. Componentes da rede LTE-A (Adaptado de [PICM13]). 9
Figura 2.3. Representação da estrutura de um RB (Extraído de [KuGü15]). 11
Figura 2.4. Características principais do LTE-A (Extraído de [HoTo11]). 13
Figura 2.5. Extensão da LB com a introdução da CA em LTE-A (Extraído de [3GPP13]). 13
Figura 2.6 Arquitetura para aplicações de missão crítica com base no LTE (Extraído de [USW17]). 15
Figura 2.7. Comunicação em LTE (à esquerda) e LTE-A MCC (à direita) (Extraído de [PhHK13]). 16
Figura 2.8. Vista de uma rede ad hoc móvel e sem fios no terreno (Extraído de [COTS11]). ... 19
Figura 2.9. Deslocamento em progressão contínua (Adaptado de [FM07]). 22
Figura 2.10. Deslocamento em progressão sobreapoiada (Adaptado de [FM07]). 23
Figura 2.11. Deslocamento em progressão por lanços com sobreapoio (Adaptado de [FM07]). 23
Figura 2.12. Rede móvel ad hoc Alcatel-Lucent 9907 RDN (Extraído de [Alca10]). 28
Figura 3.1. Cenários onde os militares podem operar. 31
Figura 3.2. Atenuação da propagação em função da distância. 36
Figura 3.3. Atenuação da propagação em função da frequência para uma distância fixa de 100 m. 37
Figura 3.4. Projeção da antena VHF-LB Vest Antenna (Extraído de [JaHo09]). 39
Figura 3.5. Antena VHF-LB Vest Antenna integrada no colete MOLLE (Extraído de [WTWS05]). 39
Figura 3.6. Diagrama de radiação e ganho da antena VHF-LB Vest Antenna (Extraído de [JaHo09]). 40
Figura 3.7. Antena LTE wearable BW-700-3000 (Extraído de [PHAR13]). 40
Figura 3.8. Diagrama de radiação da antena LTE Wearable BW 700-3000 (Extraído de [PHAR13]). 41
Figura 3.9. Antena veicular UHF710VM/HG (Extraído de [COMR16]). 41
Figura 3.10. Diagrama de radiação da antena veicular (Extraído de [COMR16]). 41
Figura 3.11. Terminal tático Harris Fusion (Extraído de [HARR17]). 41
Figura 3.12. Relação do débito binário com a SNR (Extraído de [ANTE14]). 48
Figura 3.13. Fluxograma da comunicação na rede ad hoc. 51
Figura 3.14. Comunicação do pelotão na rede ad hoc e ligação a uma viatura. 51
Figura 3.15. Comunicação na rede ad hoc em ambiente urbano (Adaptado de [123R17]). 53
Figura 3.16. Comunicação na rede ad hoc em ambiente rural (Adaptado de [PINI12]). 55
Figura 3.17. Comunicação no interior de uma habitação (Adaptado de [PINI12]). 55
Figura 4.1. Bandeira da RCA (Extraído de [WIKI17a]). 58
Figura 4.2. Localização da RCA (Extraído de [OPER17]). 58
Figura 4.3. Bangui (Extraído de [CIDA17]). 59
Figura 4.4. Bambari (Extraído de [1FND17]). 59

Figura 4.5. Gongo (Extraído de [1FND17]). 60
Figura 4.6. Rua da cidade de Bangui (Adaptado de [1FND17]). 62
Figura 4.7. Ngakobo, vila de Bambari (Extraído de [1FND17]). 66
Figura 4.8. Mobaye (Extraído de [1FND17]). 67
Figura 4.9. Casa típica de regiões suburbanas e rurais, na RCA (Extraído de [1FND17]). 70

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Características das redes ad hoc (Adaptado de [COTS11]). 19
Tabela 2.2. Número de RBs e de sub-portadoras, em LTE (Adaptado de [Guit16]). 21
Tabela 2.3. Características dos rádios (Adaptado de [CRYP16] e [MiRS06]). 23
Tabela 2.4. Classes de serviço do sistema UMTS (adaptado de [Corr16]). 25
Tabela 2.5. Características de QCI para o sistema LTE (adaptado de [3GPP15]). 26
Tabela 2.6. Ritmo de transmissão dos serviços utilizados (Adaptado de [Guit16] e [MoBo11]). 27
Tabela 3.1. Parâmetros para os cenários de referência. 32
Tabela 3.2. Parâmetros para o cálculo da cobertura dos ambientes exteriores. 32
Tabela 3.3. Parâmetros para o cálculo da capacidade. 33
Tabela 3.4. Possíveis modelos a aplicar aos três tipos de ambiente e suas limitações. 35
Tabela 3.5. Características das antenas manpack, veicular e do terminal tático Harris. 42
Tabela 3.6. Valores para obter a SNR consoante a modulação [Corr16]. 44
Tabela 3.7. Cobertura em ambientes exteriores por comunicação direta entre emissor e recetor. 45
Tabela 3.8. Potência mínima para cada serviço. 46
Tabela 3.9. Coeficiente de perda de potência, Cp (Adaptado de [ITUR17]). 47
Tabela 3.10. Perdas de penetração dos pisos, Lf [dB] (Adaptado de [ITUR17]). 47
Tabela 3.11. Cobertura em interior de edifícios (3 pisos). 48
Tabela 3.12. Número de militares que podem comunicar voz e dados. 49
Tabela 3.13. Resultados para o cenário do ambiente urbano. 54
Tabela 4.1. Parâmetros utilizados nos ambientes exteriores. 60
Tabela 4.2. Características dos ambientes (Extraído de [1FND17]). 60
Tabela 4.3. Parâmetros utilizados no ambiente interior. 61
Tabela 4.4. Cenário NLoS, em QPSK. 61
Tabela 4.5. Resultados do serviço de voz, em QPSK. 63
Tabela 4.6. Número de RBs e potência de emissão usados (QPSK). 63
Tabela 4.7. Resultados do serviço de streaming de vídeo, em QPSK. 64
Tabela 4.8. Número de RBs e potência de emissão usados (16-QAM). 64
Tabela 4.9. Resultados do serviço de streaming de vídeo, em 16-QAM. 64
Tabela 4.10. Serviço de voz, cenário NLoS, em QPSK. 65
Tabela 4.11. Serviço de streaming de vídeo, cenário NLoS, em QPSK. 67
Tabela 4.12. Serviço de voz, cenário NLoS, em QPSK. 68
Tabela 4.13. Resultados do serviço de voz, em QPSK. 68
Tabela 4.14. Resultados do serviço de streaming de vídeo, em QPSK. 69
Tabela 4.15. Resultados do serviço de streaming de vídeo, em 16-QAM. 70
Tabela 4.16. Serviços de voz e streaming de vídeo, em QPSK. 71
Tabela 4.17. Serviço de voz. 71
Tabela 4.18. Serviço de streaming de vídeo. 72
Tabela 4.19. Resultados de cobertura e capacidade. 72

Lista de Siglas e Acrónimos

1FND/MINUSCA	1ª Força Nacional Destacada/*United Nations Multidimensional Integrated Stabilization Mission in the Central African Republic*
3GPP	3rd *Generation Partnership Project*
4G	4ª Geração
AMBR	*Aggregated Maximum Bit Rate*
ANACOM	Autoridade Nacional de Comunicações
ARP	*Allocation and Retention Priority*
CA	*Carrier Aggregation*
CAS	*Close Air Support*
CC	*Component Carrier*
CCE	*Critical Communications Europe*
Cmdt	Comandante
D2D	*Device-to-Device*
DL	*Downlink*
EB	Estação de Base
EIRP	*Effective Isotropic Radiated Power*
eNB	*Evolved Node* B
EPC	*Evolved Packet Core*
EPS	*Evolved Packet System*
EUA	Estados Unidos da América
E-UTRA	*Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access*
E-UTRAN	*Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network*
FDD	*Frequency Division Duplex*
GBR	*Guaranteed Bit Rate*
GCSE	*Group Communication System Enablers*
GPRS	*General Packet Radio Service*
GSM	*Global System for Mobile Communications*
GW	*Gateway*
HF	*High Frequency*
HSS	*Home Subscriber Server*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IMS	IP *Multimedia Sub-System*
IMT-Advanced	*International Mobile Telecommunications-Advanced*
IOPS	*Isolated* E-UTRAN *Operations*

IP	*Internet Protocol*
ITM	*Irregular Terrain Model*
LAN	*Local Area Network*
LB	Largura de Banda
LoS	*Line of Sight*
LTE	*Long Term Evolution*
LTE-A	*LTE-Advanced*
M2M	*Machine to Machine*
MANET	*Mobile Ad hoc Network*
MEDEVAC	*Medical Evacuation*
MBR	*Maximum Bit Rate*
MCC	*Mission Critical Communications*
MCPTT	*Mission Critical Push To Talk*
MIMO	*Multiple Input Multiple Output*
MITM-TC	Missão, Inimigo, Terreno e condições meteorológicas, Meios, Tempo disponível e Considerações de âmbito civil
MM	*Mobility Management*
MME	*Mobility Management Entity*
MOLLE	*Modular Lightweight Load Carrying Equipment*
Non-GBR	*Non-Guaranteed Bit Rate*
OAP	Operações de Apoio à Paz
OFDM	*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
OFDMA	*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
P/PRC	*Portugal/Portable Radio Communications*
P2P	*Peer-to-Peer*
PAPR	*Peak to Average Power Ratio*
PAR	Ponto de Acesso Rádio
PC	Prefixo Cíclico
PCEF	*Policy Control Enforcement Function*
PCRF	*Policy and Charging Rules Function*
PDN GW	*Packet Data Network Gateway*
PLMN	*Public Land Mobile Network*
PMR	*Professional Mobile Radio*
ProSe	*Proximity Services*
PTT	*Push To Talk*
PV	Polarização Vertical
QAM	*Quadrature Amplitude Modulation*
QCI	*Quality of Service Class Identifier*
QoS	*Quality of Service*

QPSK	*Quadrature Phase Shift Keying*
RB	*Resource Block*
RCA	República Centro-Africana
RDN	*Rapidly Deployable Network*
RE	*Resource Element*
RRM	*Radio Resource Management*
SAE	*System Architecture Evolution*
SC-FDMA	*Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*
S-GW	*System Architecture Evolution Gateway*
SIP	*Session Initiation Protocol*
SIRESP	Sistema Integrado das Redes de Emergência e Segurança em Portugal
SMS	*Short Message Service*
SNR	*Signal to Noise Ratio*
STANAG	*Standardization Agreement*
TDD	*Time Division Duplex*
TEDS	TETRA *Enhanced Data Service*
TETRA	*Terrestrial Trunked Radio*
TM	Terminal Móvel
TO	Teatro de Operações
UAV	*Unmanned Aerial Vehicle*
UE	*User Equipment*
UHF	*Ultra High Frequency*
UL	*Uplink*
UMTS	*Universal Mobile Telecommunications System*
URI	*Uniform Resource Indicator*
USIM	*Universal Subscriber Identity Module*
VHF	*Very High Frequency*
VoIP	*Voice over IP*
WMN	*Wireless Mesh Network*
WSN	*Wireless Sensor Network*

Lista de Símbolos

α	Decaimento médio de potência
Δf	Largura de banda do sinal
λ	Comprimento de onda
ρ_N	Relação sinal-ruído
ϕ	Ângulo de rua
A	Parâmetro para obter a SNR
c	Parâmetro para obter a SNR
d	Distância horizontal entre os TMs
F	Fator de ruído no recetor
G_r	Ganho de receção da antena
G_t	Ganho de transmissão da antena
h_b	Altura da EB
H_B	Altura do edifício
h_m	Altura do TM
H_{te}	Altura do telhado do edifício
k	Perdas de penetração dos pisos
k_a	Fator de correção do modelo COST 231 *Walfish-Ikegami*
k_d	Fator de correção do modelo COST 231 *Walfish-Ikegami*
k_f	Fator de correção do modelo COST 231 *Walfish-Ikegami*
L_0	Atenuação do espaço livre
L_{ael}	Atenuação adicional ao espaço livre
L_{bsh}	Perdas devido à diferença entre o telhado e as antenas
L_f	Número de pisos entre os TMs
L_{ori}	Atenuação causada pela orientação da rua
L_p	Atenuação de percurso
$L_{p\ int}$	Atenuação de interior de edifícios
L_{rm}	Atenuação devido à propagação sobre os telhados
L_{rt}	Atenuação devido à difração do último telhado ao TM
L_u	Perdas devido ao utilizador
L_U	Atenuação resultante das perdas em ambiente urbano
L_v	Atenuação causada pela vegetação
M_I	Margem de interferência
N	Coeficiente de perdas de percurso

$N_{bits,sym}$	Número de *bits* por símbolo
N_{MIMO}	Ordem da configuração MIMO
N_{RB}	Número total de RBs
$N_{RB,u}$	Número de RBs por utilizador
$N_{sub,RB}$	Número de sub-portadoras por RB
$N_{sym,sub}$	Número de símbolos por sub-portadora
N_u	Número de utilizadores
P_{EIRP}	Potência efetiva radiada isotropicamente
P_N	Potência de ruído
P_r	Potência de receção da antena
$P_{RX\ mín}$	Potência mínima à entrada do recetor
P_t	Potência transmitida pela antena
$P_{t\ inicial}$	Potência de transmissão inicial
$P_{t\ mín}$	Potência de transmissão mínima
$P_{TX\ máx}$	Potência máxima à saída do emissor
R_b	Débito binário de um RB
$R_{b\ ref}$	Débito binário de referência consoante a modulação
R_b^{ser}	Ritmo de transmissão do serviço
$R_{máx}$	Raio máximo da cobertura do TM
t	Duração de um RB
w_B	Distância entre o centro de dois edifícios seguidos
w_s	Largura da rua entre dois edifícios

Lista de *Software*

Matlab R2014b	*Software* de computação numérica
Microsoft Excel 2016	*Software* de computação numérica e edição de gráficos
Microsoft Visio 2016	*Software* de edição de fluxogramas e gráficos
Microsoft Word 2016	*Software* de processamento de texto
Wolfram Alpha	*Software* de computação matemática

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo versa sobre o contexto em que a Dissertação se insere, nomeadamente nas Operações de Apoio Civil e Operações de Estabilização e apresenta o enquadramento, a motivação, os objetivos e a estrutura da mesma.

1.1 Enquadramento

Desde a Primeira Grande Guerra à entrada na Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), à Guerra Colonial e, posteriormente, ao período do 25 de Abril, que as Transmissões do Exército Português sofreram inúmeras e significativas evoluções [SPLG08]. Consequentemente, surgiram novas formas de atuar nos Teatros de Operações (TOs), onde se verifica que a necessidade de comunicar já não abrange apenas a transmissão de voz, mas, principalmente, de dados. As atividades complexas e de risco que são executadas pelos militares requerem uma grande capacidade de planeamento, comando, controlo e coordenação. Para tal, a comunicação deve ser feita com as condições de qualidade de serviço (QoS) e segurança adequadas.

O espetro das operações militares abrange as operações ofensivas, defensivas, de estabilização e de apoio civil. Hoje em dia, em ambientes operacionais, a transmissão de dados (*e-mails*, imagens, vídeos, dados biométricos dos militares) é muito útil para as forças militares, representando uma evolução importante e um salto tecnológico significativo.

O Exército Português tem como missão participar na defesa militar da República, através de missões internacionais na salvaguarda da vida e dos interesses dos portugueses, cooperar com as forças de segurança, cooperar em missões de proteção civil e colaborar em tarefas relacionadas com o bem-estar das populações [ExPo16]. No sentido de cumprir estes objetivos, surgem as Operações de Estabilização (no exterior do território nacional) e as Operações de Apoio Civil (em território nacional). O primeiro tipo de operações consiste na participação de Portugal em Missões no Estrangeiro, nomeadamente, em Operações de Apoio à Paz (OAP). Estas servem para interagir com a população, e com outras agências e entidades civis no sentido de alcançar um ambiente seguro. Como exemplo, existem as operações desenvolvidas na República Centro-Africana (RCA). O segundo tipo de operações envolve a colaboração do Exército Português com entidades civis, como a Proteção Civil, no apoio em caso de catástrofes naturais ou provocadas, no apoio geral de engenharia, no combate a incêndios, entre outros, a fim de garantir a salvaguarda de pessoas e bens [MiDN12]. Como exemplo, temos o apoio no combate a incêndios, como foi o caso da catástrofe em Pedrógão Grande, em junho deste ano.

Dentro das Operações de Estabilização, as OAP são estabelecidas para prevenir ou pôr fim a um conflito, evitando o reacender das hostilidades através de medidas que conduzam à reconciliação das partes [MiDN11]. Nas missões, todos os militares utilizam o rádio *Marconi* H-4855, Figura 1.1, para a difusão verbal de informação no interior do pelotão.

Da viatura do Comandante (Cmdt) de Secção para a viatura do Cmdt de Pelotão e, deste para o Cmdt de Companhia, a transmissão de dados é feita através do rádio *Portugal/Portable Radio Communications* 525 (P/PRC-525), Figura 1.2. Este rádio é usado para a difusão verbal de informação no interior do pelotão, quando em deslocamento nas viaturas e/ou para comunicação com o Cmdt de Companhia ou com o Escalão Superior. O rádio P/PRC-525 utiliza-se para transmitir voz e dados para o escalão superior, contudo a um débito binário muito reduzido (72 kb/s) [DCSI16].

Figura 1.1. Rádio *Marconi* H-4855 (Extraído de [CrMu16]).

Figura 1.2. Rádio P/PRC-525 (Extraído de [CRYP16]).

Por outro lado, no âmbito civil, o Sistema Integrado das Redes de Emergência e Segurança em Portugal (SIRESP) é a operadora de comunicações responsável por responder às exigências das missões operacionais do conjunto de utilizadores, entre os quais está o Exército. Este sistema tem como objetivo proporcionar às forças e serviços de segurança, emergência e proteção civil, uma rede única de comunicações a nível nacional de modo a garantir a proteção e o socorro da população. Para garantir uma resposta adequada aos desafios da atuação diária dos utilizadores do SIRESP, bem como aos cenários de emergência e de catástrofes, é necessário um serviço de cobertura nacional com características específicas, como a interoperabilidade, a confidencialidade da informação e a qualidade das comunicações. O SIRESP baseia-se na tecnologia *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA), que é utilizada em segurança pública, agências governamentais e serviços de emergência e pela maioria dos países da União Europeia, e disponibiliza serviços de comunicação de voz e dados necessários para a eficiência das operações do dia a dia das forças e serviços de segurança e emergência ou em cenários críticos de recuperação de catástrofes [SIRE09]. Quando o Exército desenvolve missões no âmbito das Operações de Apoio Civil utiliza esta tecnologia por uma questão de interoperabilidade com a Proteção Civil, com equipamentos rádio cedidos pela mesma [DCSI16].

A tecnologia TETRA usa uma largura de banda (LB) de 380-400 MHz e proporciona uma base sólida para o desenvolvimento de aplicações que usam canais de comunicação segura e fiável. O TETRA foi concebido para suportar voz e serviços de dados, contudo possui um débito binário limitado a 7,2 kb/s, por cada janela temporal (*time slot*) [FoHB14]. A natureza de banda estreita desta tecnologia, em semelhança com o que acontece com o sistema usado pelo rádio P/PRC-525, traduz-se na

incapacidade de fornecer suporte para serviços de dados intensivos, como *streaming* de vídeo em tempo real, *download* de ficheiros, navegação na *Internet*, serviços estes que oferecem uma melhor perceção dos acontecimentos no terreno [USW17].

Como o TETRA é um sistema de segurança e emergência, tem especificidades que os sistemas comerciais como o Sistema Global de Comunicações Móvel (*Global System for Mobile Communications* – GSM) ou o *Long Term Evolution* (LTE) não possuem. Contudo, o sistema LTE-*Advanced* (LTE-A) já proporciona um conjunto robusto de mecanismos de QoS que permite realizar operações de segurança pública, resolver problemas relacionados com o congestionamento da rede, e fazer face à necessidade de elevadas taxas de transmissão de dados. Desta forma, o LTE-A está a tornar na tecnologia de comunicação de banda larga de preferência para a segurança pública para substituir a tecnologia TETRA [FaNi15].

Uma comparação entre as redes de comunicação *Professional Mobile Radio* (PMR), onde se encontra a tecnologia TETRA, e as redes de comunicações comerciais móveis, como as *Public Land Mobile Network* (PLMN), onde se encontra o LTE-A, revela a enorme divergência entre os dois tipos de redes. As redes PMR suportam débitos binários semelhantes aos das redes de comunicações móveis de segunda geração, como o GSM em Serviço Geral de Rádio por Pacotes (*General Packet Radio Service* – GPRS), como é possível observar na Figura 1.3. Apesar da existência do TETRA *Enhanced Data Service* (TEDS), com 150 kb/s, o débito binário da tecnologia TETRA está longe de alcançar os débitos das tecnologias PLMN, como é o caso do LTE-A, que podem suportar débitos de pico de 300 Mb/s (*Release* 8 e 9) e 3 Gb/s (*Release* 10 e 11) [USW17].

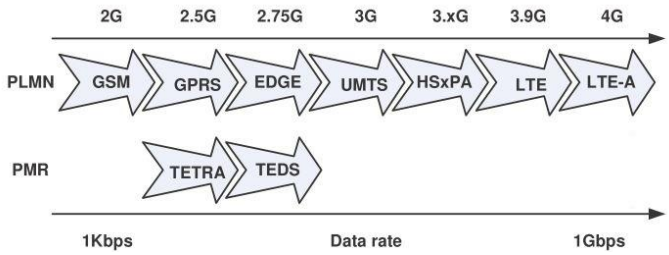


Figura 1.3. Débito binário nas tecnologias PLMN e PMR (Adaptado de [Simi12]).

Assim, a principal desvantagem dos sistemas PMR, quando comparados com os sistemas PLMN, é a LB estreita e a reduzida taxa de transferência de dados. Para resolver este problema, várias instituições governamentais e empresas comerciais propuseram a utilização de redes de banda larga, como o LTE-A para a prestação de serviços e aplicações de missão crítica [USW17].

As comunicações de missão crítica (*Mission Critical Communications* – MCC) surgem da necessidade de fornecer comunicações em situações onde as redes convencionais de banda larga fixa não podem atender aos pedidos exigidos. Ao nível militar, existem situações em que o Cmdt de Pelotão pode necessitar de transmitir uma informação para todo o pelotão, havendo necessidade de interromper todas as comunicações que possam estar a ocorrer no momento, prevalecendo a prioridade daquela chamada. Ao nível civil, isso acontece, por exemplo, em áreas afetadas por catástrofes onde as infraestruturas de telecomunicações colapsam e os intervenientes no local ficam desprovidos de qualquer meio de comunicação [FoHB14]. Neste sentido, surge o LTE-A MCC como uma versão do

sistema LTE-A, com a mesma arquitetura de rede, mas com a introdução de novas funcionalidades que o sistema comercial não possui, como a prioridade e o estabelecimento rápido de chamadas, as chamadas de grupo, as chamadas de emergência, entre outros, como referido pela organização de telecomunicações 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP), no *Release* 14 [3GPP17c].

1.2 Motivação e Objetivos

O sucesso de uma operação militar tem por base um sistema de comunicações robusto, fiável e seguro. Em ambientes operacionais, a comunicação inclui os serviços de voz e dados entre os militares, os respetivos Comandantes e o Escalão Superior. Uma força sem comunicações encontra-se totalmente isolada no terreno, pois não consegue transmitir informação ao escalão superior, pedir apoio aéreo próximo (*Close Air Support* – CAS) ou apoio médico e evacuação (*Medical Evacuation – MEDEVAC*). A velocidade e a quantidade de informação crítica que é partilhada é de extrema importância, visto que podem fazer a diferença entre o sucesso ou não da missão ou, em caso extremo, entre a vida ou a morte. O segredo está no facto de as ações no terreno se tornarem cada vez mais num confronto digital, onde a segurança dos militares depende da eficiência e robustez na transmissão da informação e do tempo oportuno para a realizar.

Atualmente, ainda existe pouca informação sobre a utilização do LTE-A MCC nas comunicações militares, nomeadamente, em situações de emergência e catástrofes naturais ou nos TOs. No âmbito civil, começam a surgir as primeiras utilizações deste sistema pelas forças e serviços de segurança nas suas atividades de proteção civil. Contudo, o TETRA ainda é o sistema mais utilizado e, por isso, verifica-se uma intensificação da quantidade de informação disponível. Assim, tomou-se como ponto de partida o sistema TETRA, que tem características semelhantes às do LTE-A MCC. O LTE-A é uma tecnologia que permite transmitir voz e dados de forma eficiente, contribuindo para o melhor desempenho dos militares e dos agentes de segurança nas suas missões.

A presente Dissertação apresenta como caso de estudo as OAP realizadas na RCA, integradas nas Operações de Estabilização. O Exército Português encontra-se representado na RCA pelos militares da força especial dos Comandos, que neste TO atuam como uma Força de Reação Rápida da *United Nations Multidimensional Integrated Stabilization Mission in the Central African Republic* (MINUSCA). Este país é confrontado com a guerra, desde há 4 anos, com massacres, violações, pilhagens, destruição, miséria e fome. O cenário a analisar é um país que sofre de ameaças por parte de grupos armados. A maioria das províncias do país (14 em 16) está sob o poder de grupos rebeldes. Assim, a missão dos portugueses é a de restabelecimento e manutenção da paz. Esses grupos não dispõem de meios de Guerra Eletrónica (GE), pelo que não representam ameaça às nossas comunicações, conduzindo a que este fator não tenha sido alvo de estudo. Contudo, no que diz respeito à segurança das comunicações, esta poderá ser implementada, posteriormente, sobre a arquitetura do LTE-A, através de uma camada de *software* que permitirá a cifra dos dados.

O objetivo principal desta Dissertação de Mestrado é analisar o desempenho e a utilização do LTE-A MCC, entre os militares em ambientes operacionais, permitindo a transferência de voz e dados, em tempo real, e garantindo uma solução para as elevadas taxas de transmissão que surgem associadas aos mesmos. Para tal, é feito o cálculo da cobertura e da capacidade da rede *ad hoc* com retransmissão, em diferentes cenários onde os militares atuam, caracterizados em quatro tipos de ambientes: urbano, suburbano rural e interior de edifícios.

Atualmente, as unidades de escalão pelotão são usadas cada vez mais de forma isolada, logo pretende-se garantir as comunicações num pelotão de infantaria através de uma rede *ad hoc* e, posteriormente, possibilitar a interligação com a viatura do Cmdt de Pelotão para transmitir as informações para o escalão superior. Num TO, o módulo de Ponto de Acesso Rádio (PAR), destinado a integrar os utilizadores móveis, tem capacidade para incorporar mais tecnologia, como por exemplo, uma estação base (EB) de LTE (*Harris Fusion Tactical Cellular*), colocando uma antena externa no mastro de uma *shelter* (viatura que serve de módulo de comunicações), permitindo o acesso aos serviços de voz e dados necessários dentro do pelotão e para fora deste. Desta forma, pretende-se introduzir o LTE-A MCC nas Transmissões do Exército, contribuindo para melhorar o sistema que é utilizado pelos módulos do Projeto Sistema de Informação e Comunicações Tático (SIC-T).

A Dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, sendo este o primeiro.

O segundo capítulo introduz a arquitetura da rede LTE-A, a sua interface rádio e aborda o sistema LTE-A MCC. De seguida, são abordadas as comunicações em modo direto (*Device-to-Device* (D2D) *communications*) entre os militares, ou seja, ao nível da camada de ligação de dados, e as redes *ad hoc*, ao nível da camada de rede. Contudo, a abordagem feita na Dissertação prende-se com os aspetos rádio da rede *ad hoc,* nomeadamente, a cobertura e a capacidade, e não com a análise de algoritmos ou protocolos de encaminhamento. No fim do capítulo, são apresentados os serviços e aplicações do LTE e o estado da arte.

O terceiro capítulo descreve os cenários possíveis onde os militares podem atuar e as diversas condições e características dos mesmos. Caracterizam-se os quatro tipos de ambiente: urbano, suburbano, rural e interior de edifícios, onde se apresentam vários modelos de propagação para serem utilizados nos respetivos cenários. São indicadas as antenas a utilizar nos terminais móveis e na viatura, assim como um equipamento LTE possível de acoplar num centro de comunicações. São apresentados os cálculos da cobertura e da capacidade do sistema LTE-A MCC e o capítulo termina com a aferição dos modelos utilizados nos diferentes cenários.

O quarto capítulo apresenta e descreve um caso de estudo, caracterizado por quatro cenários na RCA, onde são aplicados os modelos desenvolvidos no terceiro capítulo e, no final, é apresentada uma Tabela com os resultados.

O quinto capítulo apresenta as conclusões deste trabalho, as dificuldades que surgiram ao longo de todo o processo e expõe várias propostas para trabalhos futuros no seguimento desta Dissertação.

Capítulo 2

Conceitos Fundamentais e Estado da Arte

Inicialmente é feita uma breve descrição acerca da arquitetura de rede e da interface rádio do LTE-A. De seguida, é abordado o LTE-A MCC onde são descritas algumas das suas funcionalidades, entre as quais a comunicação D2D, são abordadas as redes *ad hoc*, são apresentados dois parâmetros importantes das redes de comunicações móveis, como a cobertura e a capacidade e, por fim, são indicados os serviços e aplicações do LTE e o estado da arte.

2.1 Arquitetura da Rede

Esta secção é baseada em [HoTo11] e [PICM13], e apresenta a arquitetura da rede do LTE/LTE-A.

O LTE-A e o LTE apresentam a mesma arquitetura de rede. A Figura 2.1 mostra a divisão da arquitetura do sistema LTE-A nos seus quatro domínios: o Equipamento do Utilizador (*User Equipment* – UE), o *Evolved Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) *Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), o *Evolved Packet Core* (EPC) e o domínio dos Serviços. De todos os domínios, os primeiros três fazem parte da arquitetura *Evolved Packet System* (*EPS*).

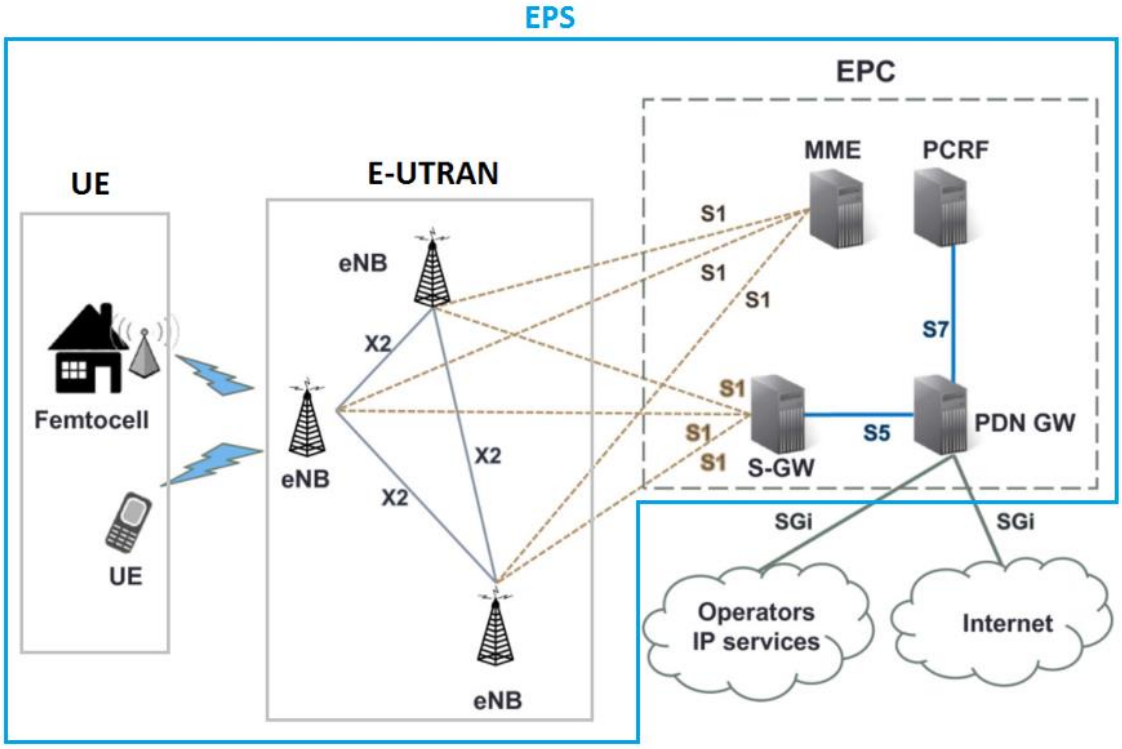


Figura 2.1. Arquitetura da rede LTE-A (Adaptado de [TTYS12]).

O UE inclui o *Universal Subscriber Identity Module* (USIM) e o terminal móvel (TM). O USIM é utilizado para identificar e autenticar o utilizador, e originar palavras-chave de segurança que protegem as transmissões de interface rádio.

A arquitetura E-UTRAN é constituída por nós lógicos, denominados *evolved Node* B (eNB), que ligam o UE ao EPC. Estes nós estão ligados entre si através de uma interface X2, como mostra a Figura 2.1, logo conseguem comunicar entre si para o *handover*, eliminando o grande fluxo de dados através dos controladores, como acontece nos sistemas de GSM e UMTS com os Controladores da Estação de Base e os Controladores da Rede Rádio, respetivamente. O eNB é uma EB que é responsável por todas as funções relacionadas com o acesso rádio: representa o ponto terminal de todos os protocolos rádio em direção ao equipamento do utilizador, e permite a retransmissão de dados entre a ligação rádio e a correspondente ligação baseada em *Internet Protocol* (IP) em direção ao EPC. Por outro lado, é também responsável por várias funções do plano de controlo:

- *Mobility Management* (MM) – controla e mede o nível de sinal de rádio proveniente do UE, toma decisões para fazer *handover* dos UEs entre células e é responsável pelo encaminhamento dos pedidos dos UEs para se ligarem à rede.
- *Radio Resource Management* (RRM) – controla o uso da interface rádio através da alocação de recursos baseada em pedidos, dando prioridade e organizando o tráfego de acordo com a QoS exigida.

O EPC é responsável pelo controlo geral do UE. Normalmente, localiza-se numa plataforma centralizada, quer num centro de comando ou numa plataforma móvel, como um veículo aéreo não tripulado (*Unmanned Aerial Vehicle* – UAV). Na Figura 2.2 apresentam-se os seus principais componentes lógicos e as respetivas funções são apresentadas de seguida:

- *Mobility Management Entity* (MME) – é o elemento principal do EPC, sendo usado como principal canal de controlo entre o utilizador e a rede. É responsável pela autenticação e segurança do UE na rede e mantém o controlo da localização de todos os UEs na sua área de serviço.
- *Home Subscriber Server* (HSS) – regista todos os dados dos utilizadores e regista a localização do utilizador dentro do nó de controlo de rede visitada.
- *System Architecture Evolution Gateway* (S-GW) – gere os *handovers* realizados pelo UE entre os eNBs e proporciona a existência de "túneis" para encaminhar os pacotes de dados do utilizador.
- *Packet Data Network Gateway* (PDN GW) – estabelece a ligação entre o EPC e outras redes IP externas. É responsável por levar todo o tráfego de dados até à rede onde o UE se irá ligar.
- *Policy and Charging Rules Function* (PCRF) – elemento responsável por controlar a política de tomada de decisão, assim como a deteção de serviços baseados em fluxos e o controlo do tráfego. Fornece a autorização para a tomada de decisões sobre como lidar com os serviços em termos de QoS e fornece informação ao *Policy Control Enforcement Function* (PCEF), integrado no P-GW, com o intuito de definir as limitações mais adequadas do fluxo de dados.

O domínio dos Serviços inclui os serviços dos operadores baseados em IP *Multimedia Sub-system* (IMS), e pode incluir serviços que não são disponibilizados pelo operador de rede móvel, por exemplo, serviços prestados através da *Internet* (ligação do utilizador a um servidor de *Internet* para serviços de *web browsing*).

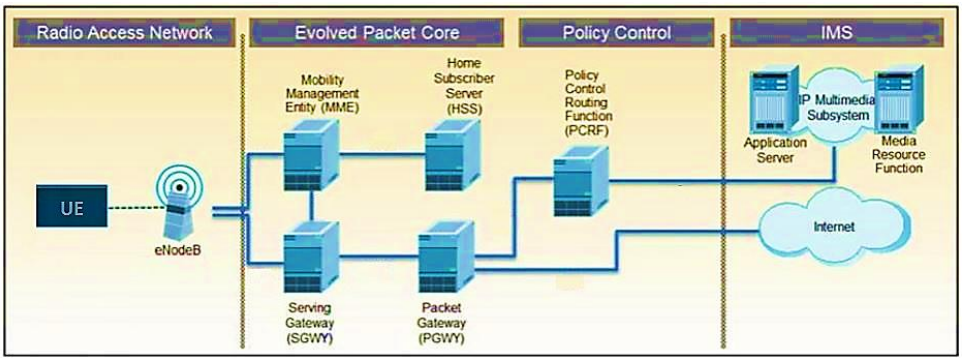


Figura 2.2. Componentes da rede LTE-A (Adaptado de [PICM13]).

2.2 Interface Rádio

Esta secção é baseada principalmente em [HoTo11] e [Agil09] e apresenta os aspetos fundamentais da interface rádio do LTE, incluindo conceitos como as técnicas de acesso múltiplo, a alocação de recursos, as bandas de frequência, os esquemas de modulação e o *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). No final da secção, são apresentadas as características principais do LTE-A.

As bandas de frequência de funcionamento atribuídas ao *Evolved* UMTS *Radio Access* (E-UTRA) sofreram alteração na medida em que a 3GPP, no *Release* 8, inicialmente, definiu 17 bandas em *Frequency Division Duplex* (FDD) e 8 bandas em *Time Division Duplex* (TDD). No *Release* 11, mais tarde, o E-UTRA foi configurado para operar com 27 bandas atribuídas a FDD e 12 a TDD.

O espectro disponível emitido pela Autoridade Nacional de Comunicações (ANACOM) inclui uma gama de frequências de 450, 800, 900, 1800, 2100, 2600 MHz. Os operadores portugueses apenas escolheram algumas bandas (800,1800, 2600 MHz) para o LTE, visto que as restantes bandas são suportadas pelos sistemas GSM e UMTS.

Existem diversos documentos que dizem respeito ao espectro eletromagnético utilizado por forças militares. A OTAN dispõe de normas relativas às comunicações rádio conhecidas por *Standardization Agreement* (STANAG). Existe o STANAG 4203 para HF, o STANAG 4204 para VHF e o STANAG 4205 para UHF. No caso das comunicações em VHF, são utilizadas frequências dentro da banda 30-108 MHz. O STANAG 4204 refere que os equipamentos rádio devem operar na banda VHF Tático (30-88 MHz) [DCSI16].

As bandas de frequência consideradas para a análise desta Dissertação são 61-68 MHz, 873-876 MHz, 918-921 MHz e 1675-1690 MHz, sendo que foram escolhidas como frequências centrais 64 MHz, 890 MHz e 1682 MHz.

O LTE é baseado em *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), para *Downlink* (DL), e em *Single Carrier-Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA), para *Uplink* (UL). O motivo pelo qual se usam diferentes técnicas está relacionado com as vantagens que cada uma fornece: o SC-FDMA, em UL, otimiza o alcance e o a potência utilizada, enquanto que o OFDMA, em DL, permite fazer alocação dinâmica de recursos, no domínio da frequência.

O LTE, com OFDMA, divide uma banda larga em múltiplas sub-portadoras com larguras de banda estreitas e ortogonais entre si, espaçadas de 15 kHz, onde cada uma tem um débito reduzido em favor de uma maior robustez face à interferência inter-simbólica. Cada sub-portadora é modulada por forma a que as restantes contíguas possuam o mínimo de interferência. Desta forma, há um maior aproveitamento do espetro resultante da sobreposição espetral das sub-portadoras. Os utilizadores podem ser associados a qualquer uma das sub-portadoras no domínio da frequência.

Esta técnica de acesso múltiplo acarreta uma limitação: a alocação não é feita numa única sub-portadora base, mas é baseada em blocos de recursos (*Resource Blocks* – RBs). Na Figura 2.3 é possível observar um RB, que é a unidade de recursos mais pequena que pode ser atribuída a um utilizador. Um RB consiste num conjunto de 12 sub-portadoras consecutivas, no domínio da frequência,

resultando numa LB de 180 kHz, com a duração de 6 ou 7 símbolos *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), no caso de ser usado o prefixo cíclico (PC) extenso ou normal, respetivamente, numa janela temporal de 0,5 ms. O OFDM é uma técnica que divide o sinal em fluxos de dados paralelos e que se deslocam em sub-portadoras de rádio [GoMa13]. A separação dos símbolos OFDM com PC reduz a interferência inter-simbólica. A unidade mínima de alocação de capacidade é designada por elemento de recurso (*Resource Element* – RE). Um RE consiste numa sub-portadora durante um símbolo OFDM, logo um RB é constituído por 84 REs (12 sub-portadoras × 7 símbolos OFDM) ou 72 REs (12 sub-portadoras × 6 símbolos OFDM), por janela temporal.

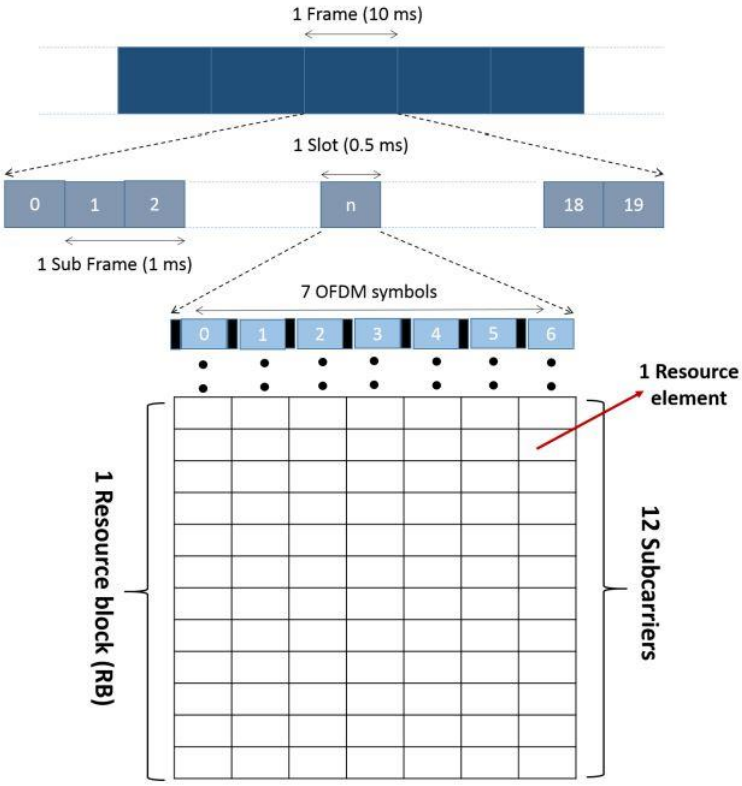


Figura 2.3. Representação da estrutura de um RB (Extraído de [KuGü15]).

A limitação do OFDMA, referida anteriormente, conduz a um problema importante que reside na relação entre a potência de pico e a potência média do sinal (*Peak to Average Power Ratio* – PAPR). O sinal é constituído por várias sub-portadoras paralelas (correspondendo a várias ondas sinusoidais no domínio do tempo) e faz com que o mesmo varie rapidamente, causando problemas nos amplificadores. Esta variação brusca do sinal requer potência extra, o que leva a um consumo superior de energia das baterias dos TMs. Outra desvantagem é a grande sensibilidade a erros de sincronismo ao nível da descodificação do sinal.

Como o OFDMA possui grandes variações de potência, em UL, utiliza-se SC-FDMA para transmitir símbolos binários com uma relação PAPR que pode ser 3 dB inferior à relação atingida em OFDMA. Assim, há um maior aproveitamento da potência dos TMs, que são alimentados por baterias e onde interessa que os consumos de potência sejam minimizados. O SC-FDMA baseia-se no princípio de transmissão que consiste em transmitir a informação modulada em apenas uma portadora.

Uma das características introduzidas pelo LTE foi o MIMO. Esta técnica utiliza múltiplas antenas e múltiplos transmissores em ambos os pontos (origem e destino) e possibilita a transmissão DL e UL em simultâneo [GoMa13]. Assim, o MIMO é usado para aumentar o débito binário através da transmissão de dois ou mais fluxos de dados em duas ou mais antenas diferentes que são recebidos por duas ou mais antenas, utilizando os mesmos recursos em frequência e tempo, separados apenas através da utilização de diferentes sinais de referência. As operações com o MIMO englobam a multiplexagem espacial, a pré-codificação e a diversidade de transmissão. O princípio da multiplexagem espacial consiste em enviar sinais a partir de duas ou mais antenas diferentes com diferentes fluxos de dados e processá-los no recetor de forma separada, o que conduz a um aumento do pico de frequência de dados por um fator de 2, no caso de uma configuração de antenas 2×2, ou por um fator de 4, no caso de uma configuração de antenas 4×4. Na pré-codificação, os sinais transmitidos pelas diferentes antenas são "ponderados" por forma a maximizar a relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio* – SNR). A diversidade de transmissão baseia-se em enviar o mesmo sinal a partir de múltiplas antenas, com codificação, por forma a explorar os ganhos de desvanecimento entre as diferentes antenas.

Em LTE, a potência máxima de transmissão para um TM é inferior ou igual a 23 dBm [Corr16]. A potência radiada pela antena depende da potência transmitida pela mesma e do seu ganho. Em DL, a potência radiada depende também das perdas no cabo que liga o transmissor à antena da EB, enquanto que em UL depende da utilização de voz ou dados, uma vez que se tem de ter em conta as perdas devido ao utilizador [Corr16].

Quanto aos esquemas de modulação do LTE, são considerados a *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) (16-QAM ou 64-QAM) e a *Quadrature Phase Shift Key* (QPSK), em função das condições do canal e ritmo de transmissão [PeNe12].

Segundo [3GPP13], o LTE-A surge com algumas melhorias em relação ao LTE, por forma a responder aos requisitos da norma *International Mobile Telecommunications-Advanced* (IMT-Advanced). As principais características introduzidas no *Release* 10 para o LTE-A são:

- a agregação de portadoras (*carrier aggregation* – CA) até uma banda total de 40 MHz, com possibilidade de alcançar os 100 MHz;
- a evolução para o MIMO 8x8 em DL e 4x4 em UL, com a introdução de mais antenas;
- a introdução de nós de retransmissão para aumentar o alcance da rede;
- a coexistência de macro-, micro-, pico- e femto-células (ordem decrescente de potência), a introdução da retransmissão, entre outros, para aumentar a eficiência espetral por área de cobertura.

Estas características, resumidas na Figura 2.4, têm em conta a compatibilidade com as versões anteriores do LTE, logo o LTE-A pode ser considerado uma "ferramenta de recursos" que pode ser implementada de forma flexível no topo do *Release* 8/9 do LTE.

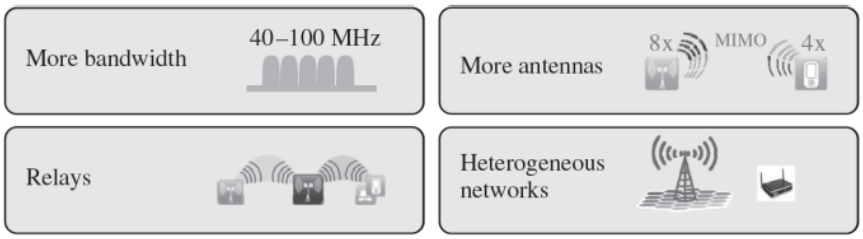


Figura 2.4. Características principais do LTE-A (Extraído de [HoTo11]).

A forma mais direta de aumentar a capacidade é aumentando a LB. Uma vez que é importante manter a compatibilidade com as versões anteriores (*Release* 8/9), esse aumento da LB, em LTE-A, ocorre através da CA, que pode ser usada em FDD e TDD. Cada portadora que pode ser agregada é designada por portadora de componente (C*omponent Carrier* – CC*)*. Como mostra a Figura 2.5, a CC pode ter uma LB de 1,4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz, e só pode ser agregado um máximo de cinco CCs. Por consequência, a LB máxima é de 100 MHz. O número de portadoras agregadas em UL e DL pode ser diferente, contudo o número de CCs em UL nunca é superior ao número de portadoras em DL. As CCs individualmente podem também ter LB diferentes [3GPP13].

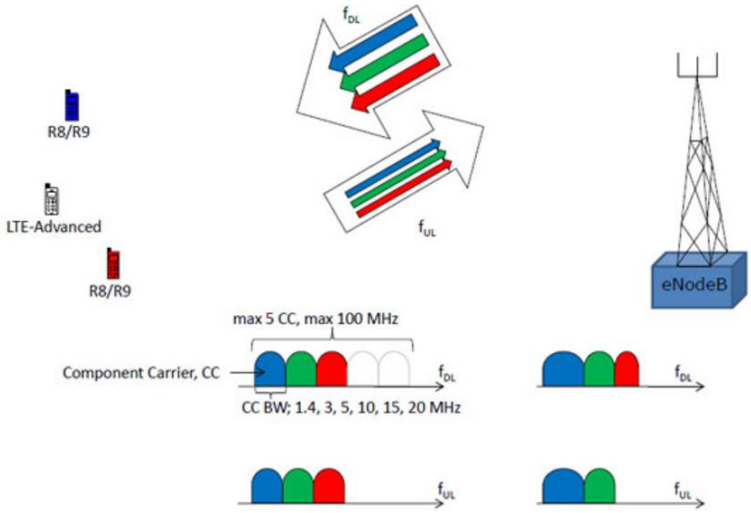


Figura 2.5. Extensão da LB com a introdução da CA em LTE-A (Extraído de [3GPP13]).

Em relação à melhoria na configuração MIMO, a grande mudança é que o LTE-A suporta a transmissão em DL com 8 antenas que, juntamente com 8 recetores no TM, corresponde a uma configuração 8x8. Na ligação UL, o TM é dimensionado para suportar até 4 transmissores, levando à configuração 4x4, quando combinada com 4 recetores eNodeB [Agil09]. Estas melhorias permitem o aumento dos débitos de transmissão e da eficiência espetral devido à introdução de mais antenas [3GPP13].

A outra nova característica introduzida no LTE-A é a retransmissão, que consiste numa melhoria da cobertura em condições de difícil comunicação. Os principais casos de utilização de retransmissão têm resultado prático no aumento dos débitos de transmissão em zonas urbanas e em interiores. Isto acontece através da ação de um nó de retransmissão que atua como repetidor: recebe, amplifica e retransmite os sinais UL e DL [3GPP13].

2.3 LTE-A MCC

Esta secção é baseada em [3GPP17b], [IEEE17] e [Rohi15], e aborda o LTE-A MCC.

Muitas organizações nacionais e internacionais de segurança pública estão a considerar o LTE como a tecnologia da próxima geração [3GPP17b]. A adoção do LTE pela *FirstNet* para organizações de segurança pública nos Estados Unidos da América (EUA), a preferência pelo LTE pelo Ministério do Interior do Reino Unido, e as intenções da Coreia do Sul de construir uma rede nacional de LTE para Segurança Pública, tornou-se o catalisador para o desenvolvimento do LTE para comunicações críticas. Em relação às comunicações críticas, as próximas normas da 3GPP (*Release* 13 e 14) vão suportar a introdução faseada dos seguintes serviços, na norma do LTE [Rohi15]:

- *Group Communication System Enablers* (GCSE) fornece um mecanismo rápido e eficiente para distribuir o mesmo conteúdo (voz ou vídeo) para vários utilizadores de forma controlada. O serviço deve permitir modos de operação flexíveis consoante o ambiente em que os utilizadores operam (modo D2D ou através da EB) e deve possibilitar a comunicação para diferentes grupos em paralelo.
- *Proximity Services* (ProSe) é uma tecnologia de modo direto que permite aos TMs de LTE detetarem-se uns aos outros e comunicarem diretamente entre si, sem recorrer a uma EB. Desta forma, serve para dar suporte às comunicações D2D quando não há cobertura disponível da rede LTE. Oferece benefícios como a escalabilidade, a privacidade, a segurança e a eficiência das baterias dos TMs.
- *Isolated* E-UTRAN *Operations* (IOPS) permite manter um nível de comunicação entre os utilizadores, oferecendo-lhes serviços locais de missão crítica, a partir dos eNodeBs, quando a ligação *backhaul* para a infraestrutura central não está disponível (por ter sido danificada ou destruída).
- *Mission Critical Push To Talk* (MCPTT) para chamadas de grupo ou individuais. Também suporta chamadas privadas entre pares de utilizadores envolvidos numa comunicação de grupo MCPTT, com evolução futura para suportar recursos multimédia (*Release* 14) [GSMA17].

Como é possível observar na Figura 2.6, o LTE-A MCC tem a mesma arquitetura de rede que o LTE-A. No que diz respeito à segurança, será implementada sobre a arquitetura do LTE-A uma camada de *software* para gestão da rede, e outra camada abaixo, para codificação das comunicações. Este sistema agrega funcionalidades que as comunicações militares e de segurança pública e emergência necessitam, como a prioridade e o estabelecimento rápido de chamadas, as chamadas de grupo, as chamadas de emergência e os serviços de dados. Todas estas características são importantes no âmbito militar, porque existe um ambiente hierárquico onde o Cmdt de Pelotão necessita de transmitir ordens do escalão superior para os subordinados e, simultaneamente, fazer chegar ao escalão superior o resultado das ações realizadas. O objetivo da 3GPP é preservar as características do LTE enquanto, simultaneamente, adiciona funcionalidades necessárias para a segurança pública. As principais tecnologias e recursos de comunicação que irão dar suporte ao LTE-A MCC incluem o modo de comunicação direta, o MCPTT, o sistema de voz *full duplex*, as chamadas de grupo, a identificação do

indivíduo que está a falar, o alerta de emergência e a qualidade de áudio [IEEE17]. A comunicação em modo direto é descrita, de seguida, com mais pormenor.

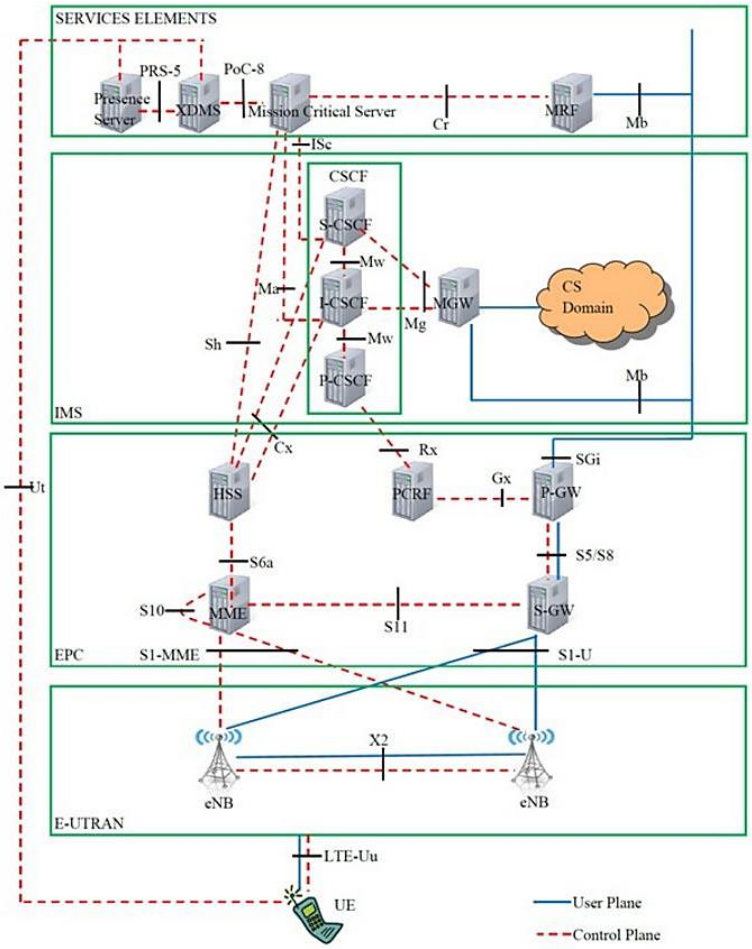


Figura 2.6 Arquitetura para aplicações de missão crítica com base no LTE (Extraído de [USW17]).

A constante exigência de elevadas taxas de dados para serviços multimédia de acesso sem fios tem sido um desafio para a 3GPP, onde é proposto o desenvolvimento de novos componentes de tecnologia que permitam encontrar os requisitos da norma IMT-Advanced. Os sistemas de comunicação de banda larga móvel oferecem larguras de banda elevadas até 100 MHz para suportar uma grande quantidade de serviços [PhHK13]. Para além disso, a 3GPP tem identificado as comunicações D2D como a principal funcionalidade para situações de segurança pública ou recuperação de catástrofes, devido à sua capacidade de proporcionar serviços de emergência através do intermédio de uma EB ou atuando como repetidor para transmitir informações de um emissor para um recetor [IEEE17].

As comunicações D2D não precisam de uma arquitetura, porque esta técnica permite a comunicação ponto-a-ponto (*Peer-to-Peer* – P2P), sem fios, em LTE-A. Como é possível observar na Figura 2.7, neste tipo de comunicação, os utilizadores comunicam diretamente entre si através dos TMs em vez da típica comunicação com as duas ligações (DL e UL), por intermédio de uma EB. A tecnologia do modo direto traz grandes vantagens ao ser utilizada juntamente com o LTE-A, pois permite um rápido acesso ao espetro de rádio com o respetivo controlo dos níveis de interferência, tornando a utilização do espectro mais eficiente.

O modo direto envolve quatro tipos de ganho: o ganho de proximidade (*proximity gain*), o ganho de salto (*hop gain*), o ganho de reutilização (*reuse gain*) e o ganho de partilha (*pairing gain*). No ganho de proximidade, as comunicações de curto alcance que usam uma ligação D2D permitem um elevado débito binário, um atraso reduzido e um baixo nível de consumo de energia. No ganho de salto, a transmissão D2D utiliza apenas um "salto" em vez de dois (como acontece com o recurso a uma EB). No ganho de reutilização, tanto as ligações D2D como as celulares partilham os mesmos recursos rádio. O ganho de partilha facilita novos tipos de serviços, sem fios, em áreas locais, e o UE pode escolher o modo de comunicação celular ou o modo direto. Para além disso, o débito binário total da rede, com as comunicações D2D, pode aumentar até 65% quando comparado com o caso em que o tráfego D2D é todo transmitido pelo modo celular.

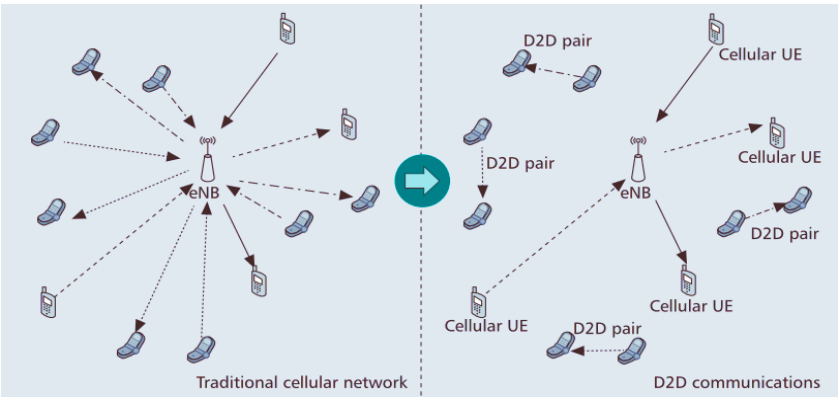


Figura 2.7. Comunicação em LTE (à esquerda) e LTE-A MCC (à direita) (Extraído de [PhHK13]).

Para permitir as comunicações D2D nas redes LTE-A, foram propostos dois mecanismos de conectividade baseados nos protocolos *Session Initiation Protocol* (SIP) e IP. Os sistemas LTE com *System Architecture Evolution* (SAE) utilizam os protocolos anteriores para operar apenas no domínio da comutação de pacotes. Na arquitetura SAE, a entidade MME trabalha em conjunto com o PDN GW para configurar limites, túneis IP e ligações IP entre os UEs e o PDN GW. Uma sessão em modo direto pode ser iniciada através do servidor PDN (que deteta o potencial tráfego D2D) ou através dos utilizadores que selecionam diretamente o formato SIP *Uniform Resource Indicator* (URI) com uma extensão local, como *.direct*, *.local*, *.peer* ou *.short*, com o respetivo URI do UE de destino. Para configurar uma sessão em modo direto, o eNB solicita aos UEs para verificar se estes estão todos na faixa de comunicação, sendo fornecido um maior ou menor débito. Se estes critérios forem confirmados, o eNB configura uma portadora D2D para a comunicação direta entre os dois UEs, contudo mantém a portadora SAE entre os UEs e a *gateway* (GW) para a comunicação celular e controla os recursos rádio para ambas as comunicações celular e D2D. A partir desta altura, os UEs podem transmitir os pacotes através do endereço IP do seu UE correspondente usando a ligação D2D, ou seja, sem a intervenção do eNB ou do S-GW.

Uma das principais dificuldades nas comunicações D2D é decidir qual o modo de transmissão ideal para as ligações D2D para que o débito binário total da rede seja maximizado e os requisitos de QoS sejam assegurados. Para se alcançar o máximo débito binário, as comunicações D2D devem ser capazes de operar nos modos seguintes:

- Modo silêncio – quando os recursos disponíveis não são suficientes para suportar o tráfego D2D e o espetro de reutilização não é utilizável devido a problemas de interferência, os equipamentos D2D não conseguem transmitir dados e permanecem “silenciosos”.
- Modo de reutilização – os equipamentos D2D transmitem dados diretamente entre si reutilizando alguns recursos da rede celular. A reutilização do espetro pode estar presente nas comunicações DL ou UL.
- Modo dedicado – a rede celular dedica uma parte extra dos recursos para os equipamentos D2D realizarem as suas comunicações diretas.
- Modo celular – o tráfego D2D é retransmitido através do eNB.

De entre os modos descritos anteriormente, o que permite uma maior eficiência espetral é o de reutilização, onde o desempenho do sistema pode ser melhorado pela otimização da potência de transmissão. Os modos dedicado e celular facilitam a tarefa de gestão da interferência, porque a potência de transmissão máxima pode ser utilizada para proporcionar um melhor desempenho do sistema, uma vez que as ligações D2D não interferem com os restantes utilizadores. Contudo, estes dois modos podem não utilizar os recursos de forma eficiente para maximizar o débito binário total da rede.

2.4 Redes *Ad Hoc*

Esta secção é baseada em [BeBB15] e [COTS11], e aborda as redes *ad hoc*.

Com o aumento da quantidade de informação em tempo real que é necessário transmitir nos TOs, as arquiteturas de rede tradicionais não conseguem lidar com este problema. É preciso tecnologia móvel que garanta flexibilidade e fiabilidade, e que cumpra as necessidades dos militares no terreno. Estes estão constantemente em movimento e precisam de uma rede de comunicações que assegure a disponibilidade dos serviços de voz e dados, tornando possível a circulação da informação entre os diversos escalões.

No contexto de uma rede sem fios, uma rede *ad hoc* é uma rede criada diretamente entre dois dispositivos ligados entre si, sem necessidade de um ponto de acesso ou *router* [GoMa13]. Estas redes formam-se espontaneamente e organizam-se automaticamente sem ser necessário a existência de uma infraestrutura prévia. É constituída por um conjunto de nós (*hosts*) que podem comunicar entre si sem o recurso a uma EB. Ao contrário do que acontece nas redes por fio onde apenas alguns nós (*routers*) são responsáveis pela entrega de dados, numa rede *ad hoc* cada nó atua como um nó terminal e, até, como nó retransmissor de mensagens quando os recetores não estão ao alcance dos transmissores. Quando dois nós estão na mesma zona de transmissão podem comunicar diretamente entre si, enquanto que a comunicação com um nó fora desta zona é realizada através de vários nós intermediários, em modo *multi-hop* [BeBB15].

Um nó pode mover-se dentro da rede *ad hoc,* sendo possível juntar-se ou desconectar-se da rede a qualquer momento, o que causa o aparecimento/desaparecimento de ligações. Para controlar estes movimentos usam-se protocolos de encaminhamento. Num ambiente de mobilidade, estes protocolos necessitam que haja um caminho completamente definido antes de qualquer possível transmissão de dados. O facto do nó se mover não implica, necessariamente, uma redução no desempenho da rede se as ligações do grafo não forem afetadas, ou o forem pouco, quando é preciso transmitir os pacotes [BeBB15].

Estas redes têm interesse em circunstâncias caracterizadas por uma inexistência de infraestrutura. Do ponto de vista prático, uma rede *ad hoc* sem fios é útil em situações que exigem a rápida implementação de uma rede LAN ou no caso de uma falha numa infraestrutura [BeBB15].

Existem três tipos de redes *ad hoc*: *Wireless Mesh Network* (WMN), *Wireless Sensor Network* (WSN) e *Mobile Ad hoc Network* (MANET). Para esta Dissertação é a rede MANET que interessa estudar, que é caracterizada por uma forte dinâmica dos nós, que se traduz numa topologia altamente variável devido às mudanças frequentes das posições dos nós. A informação passa por vários nós de retransmissão até chegar ao destino. Ao contrário das redes WMN e WSN, os nós da rede MANET são todos móveis e a comunicação pode ocorrer entre quaisquer nós da rede [BeBB15].

Uma MANET é constituída por um conjunto de nós móveis que formam redes dinâmicas autónomas e independentes de qualquer infraestrutura. Desta forma, a mobilidade dos nós tem como consequência a possível e rápida alteração da topologia da rede. Os nós comunicam entre si sem a intervenção de uma EB. Como o raio de cobertura das redes sem fio é limitado, é necessário efetuar vários saltos (*hops*) para se trocar informação entre os diversos nós da rede. Desta forma, neste tipo de redes cada nó funciona como *router* ou como *host*, sendo considerada uma rede *multi-hop* [COTS11].

As características apresentadas pelas redes *ad hoc* apresentam-se na Tabela 2.1. As redes *ad hoc* oferecem uma grande vantagem aos militares que se movimentam, no terreno, visto que, não sendo suportadas por uma infraestrutura fixa, permitem aos militares continuar a partilhar informações e a comunicar entre si à medida que se deslocam. As características de auto-formação e *self-healing* facilitam o processo de implementação destas redes e minimizam a necessidade de configuração manual das mesmas. Por outro lado, a sua característica *multi-hop* aumenta a cobertura da rede e cria caminhos redundantes por forma a garantir uma maior robustez e resiliência a falhas [COTS11].

Por outro lado, uma rede IP militar, em parte, pode ser baseada numa infraestrutura fixa através da utilização de satélites e equipamento de rede em operações e centros de comando, embora, muitas vezes, a forma mais viável para implementar uma rede de comunicações seja através de uma rede móvel e sem fios. Como é possível observar na Figura 2.8, em pleno TO, tendo em conta que os militares estão dentro de carros de combate ou perto dos mesmos, uma possível forma eficiente de criar uma rede móvel e sem fios é utilizando as viaturas como nós de trânsito que transportam a infraestrutura necessária à construção e manutenção destas redes móveis. Esta infraestrutura está equipada com rádios *backhaul* e *routers*. Os rádios *backhaul* são os rádios de infraestrutura de rede que podem comunicar com outros rádios *backhaul* ou com satélites, sendo que cada rádio *backhaul* se

liga a um *router* IP para criar um nó de rede. Os militares apeados transportam os TMs que se podem ligar ao mesmo nó da rede IP. Através de um comutador *Ethernet*, que é conectado ao *router* de um nó de trânsito, é possível estabelecer uma rede de área local (*Local Area Network* – LAN) para os militares permitindo-lhes utilizar os diversos equipamentos eletrónicos necessários. Desta forma, com o mesmo sistema de rede IP, num nó de trânsito, é possível estabelecer comunicação no interior e para o exterior do mesmo.

Tabela 2.1. Características das redes *ad hoc* (Adaptado de [COTS11]).

Auto-formação	Os nós que partilhem o mesmo alcance rádio podem estabelecer uma associação de rede sem qualquer pré-configuração ou intervenção manual.
Self-healing	Os nós podem juntar-se ou sair da rede rapidamente sem afetar o funcionamento dos restantes nós.
Não precisa de infraestrutura	Os nós móveis formam a sua própria rede e constituem a sua própria infraestrutura.
P2P	As redes tradicionais suportam sistemas que operam, essencialmente, segundo o paradigma cliente-servidor. Nas redes *ad hoc*, os nós móveis comunicam e trocam informação sem depender de uma EB.
Predominantemente sem fios	O ambiente *ad hoc* é, essencialmente, sem fios. Contudo, pode ser aplicado em ambientes de estrutura fixa.
Dinâmica	Os nós estão em constante movimento e a topologia da rede *ad hoc* está em constante alteração.

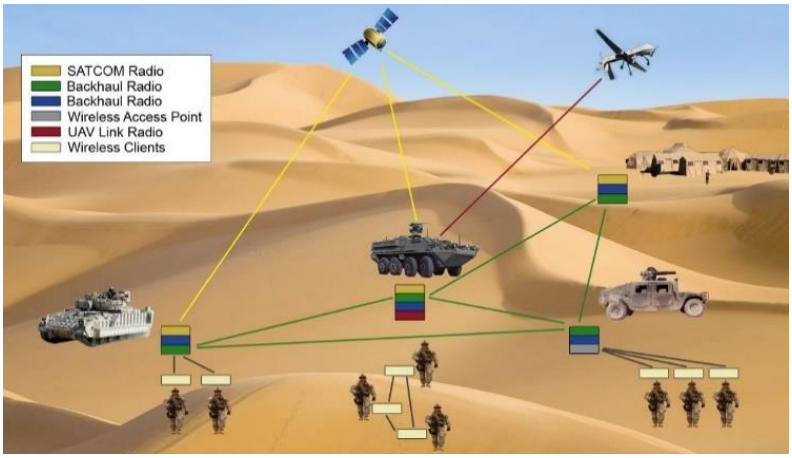


Figura 2.8. Vista de uma rede *ad hoc* móvel e sem fios no terreno (Extraído de [COTS11]).

2.5 Capacidade e Cobertura

Esta secção é baseada em [3GPP13], [Guit16] e [MiDN11], e aborda duas características fundamentais a ter em conta nas comunicações móveis, quando se pretende comunicar e transmitir informação.

Em comunicações móveis, a cobertura de uma estação rádio é a área geográfica onde uma EB e um TM podem comunicar nos dois sentidos, e onde a qualidade da comunicação entre ambos depende da potência do sinal no local geográfico onde se encontra o TM [PeNe12].

O débito binário do utilizador depende de parâmetros como o número de RBs atribuídos, a modulação, a configuração MIMO, o tamanho do PC, e a taxa de codificação do canal, entre outros. O débito binário de cada utilizador, por cada RB, é dado por [Guit16].

$$R_{b\,[\mathrm{Mb/s}]} = \frac{N_{sub,RB} \cdot N_{sym,sub} \cdot N_{RB,u} \cdot N_{bits,sym} \cdot N_{MIMO}}{t_{[\mu s]}} \tag{2.1}$$

onde:

- $N_{sub,RB}$: número de sub-portadoras por RB (12, num espaçamento de 15 kHz/sub-portadora)
- $N_{sym,sub}$: número de símbolos por sub-portadora (PC normal: 7 símbolos. PC extenso: 6)
- $N_{RB,u}$: número de RBs por utilizador
- $N_{bits,sym}$: número de *bits* por símbolo (depende da modulação escolhida)
- N_{MIMO}: ordem da configuração MIMO
- t : duração de um RB (~500 μs)

No caso particular das redes celulares, como o LTE, a capacidade de uma rede relaciona-se com o número de RBs disponíveis e o número de utilizadores aos quais aqueles são atribuídos, bem como o tipo de serviço que estes pretendem utilizar. Por conseguinte, a capacidade não só é limitada pela LB, exigindo a sua utilização eficiente, como também depende dos requisitos definidos para os serviços que podem abranger uma ampla gama de parâmetros de desempenho do sistema, tais como o atraso e a SNR [3GPP13]. A capacidade pode ser avaliada em termos do número de utilizadores que podem ser servidos, o que depende da QoS e do débito binário exigido para cada utilizador. Esta é representada por uma estimativa do número total de utilizadores para um determinado débito. Assim, pode ser calculada a partir de:

$$N_u = \frac{N_{sub,RB} \cdot N_{sym,sub} \cdot N_{RB} \cdot N_{bits,sym} \cdot N_{MIMO}}{R_{b\,[\mathrm{Mb/s}]} \cdot t_{[\mu s]}} \tag{2.2}$$

onde:

- N_u: número de utilizadores
- N_{RB}: número total de RBs (depende da LB)

A técnica de multiplexagem MIMO foi concebida para melhorar o valor de SNR, aumentando a cobertura e o débito de transmissão de dados alcançados. A CA permite agregar múltiplas bandas de frequência conduzindo a um melhor aproveitamento do espectro. Além disso, pode melhorar a eficiência da rede e o desempenho médio dos utilizadores, através da alocação dinâmica do tráfego

em todo o espectro e a agregação de células com cobertura diferente (redes heterogéneas), permitindo a construção de redes flexíveis de acordo com os pedidos de tráfego. Para suportar implementações flexíveis, a 3GPP especificou uma LB de 1,4 MHz até 20 MHz, como mostra a Tabela 2.2. Para os sinais de DL, a sub-portadora de componente contínua não é transmitida, mas é considerada no número de sub-portadoras [3GPP13].

Tabela 2.2. Número de RBs e de sub-portadoras, em LTE (Adaptado de [Guit16]).

LB [MHz]	Número de RBs	Número de sub-portadoras DL (UL)
1,4	6	73 (72)
3	15	181 (180)
5	25	301 (300)
10	50	601 (600)
15	75	901 (900)
20	100	1201 (1200)

A estimativa da cobertura é utilizada para determinar a área de cobertura de cada TM. Através do balanceamento de potência calcula-se a potência recebida no recetor a partir de uma determinada potência transmitida, onde são considerados todos os ganhos e perdas ao longo do caminho (ganhos e perdas do emissor e recetor, da atenuação da atmosfera, obstáculos, perdas pela propagação em espaço livre, desvanecimento rápido ou lento). O cálculo do raio máximo de cobertura do TM obtém-se pela combinação da expressão do balanceamento de potência com a expressão do modelo adequado às perdas de percurso, de acordo com

$$R_{máx[\mathrm{km}]} = 10^{\frac{P_t\,[\mathrm{dBm}]+G_t\,[\mathrm{dBi}]+P_r\,[\mathrm{dBm}]+G_r\,[\mathrm{dBi}]-L_p\,[\mathrm{dB}]}{10\cdot\alpha}} \tag{2.3}$$

onde:

- P_t: potência transmitida pela antena
- G_t: ganho de transmissão da antena
- P_r : potência recebida pela antena
- G_r: ganho de receção da antena
- α: decaimento médio de potência
- L_p: atenuação de percurso

Ao nível militar, nas OAP, uma das ações dos militares consiste na execução de patrulhas. Uma patrulha é um conjunto de militares, destacado por uma Unidade, com a finalidade de cumprir uma missão de reconhecimento e/ou de combate [MiDN11]. No caso particular da ação de uma patrulha, que se destina a mostrar presença, demonstrar força ou fazer um reconhecimento, um dos princípios fundamentais a ter em consideração no seu deslocamento é a segurança. Esta é conferida, em grande parte, pela ligação entre todos os militares através dos meios de comunicação que têm ao seu dispor. Por norma, em Operações de Estabilização, as missões em que os militares do Exército participam são

executadas com viaturas. No entanto, em determinado momento os militares podem ter necessidade de apear (por exemplo, para montar um posto de observação, reconhecer locais, como áreas edificadas ou apenas para falar com a população), pois só o Homem consegue chegar onde as viaturas não passam [MiDN12].

No terreno, existem três técnicas de progressão dos militares apeados: progressão contínua, Figura 2.9, progressão sobreapoiada, Figura 2.10, e progressão por lanços com sobreapoio, Figura 2.11. O tipo de progressão e as seis variáveis de missão – Missão, Inimigo, Terreno e condições meteorológicas, Meios, Tempo disponível e Considerações de âmbito civil (MITM-TC) – têm influência direta e fazem variar as distâncias entre os militares. Tendo em conta o período do dia (dia ou noite), a visibilidade (boa ou reduzida devido a nevoeiro) ou caso haja indícios de ameaça, as distâncias dentro do pelotão aumentam ou diminuem. Sempre que possível deve manter-se o contacto visual entre os militares, por isso as distâncias apresentadas nas Figuras 2.9 a 2.11 são flexíveis.

Na Figura 2.9, numa situação de progressão contínua, a mínima distância entre os militares "vizinhos" é de 10 m e a máxima é de 20 m, de dia. Desta forma, a distância máxima entre os militares mais afastados (Cmdt de Esquadra da 1ª secção e os atiradores 4 e 5 da 3ª secção) é de, aproximadamente, 260 m [FM07].

Na Figura 2.10, as distâncias aumentam e, assim, a mínima distância entre os militares "vizinhos" é de 10-20 metros e a máxima é de 50-100 m, de dia, entre a 1ª secção e o grupo de comando. Desta forma, a distância máxima entre os militares mais afastados varia entre 350-400 m.

Na Figura 2.11, observa-se o tipo de deslocamento em progressão por lanços com sobreapoio, onde a distância máxima entre os militares, entre secções é de 150 m. Contudo, este último tipo de deslocamento é mais utilizado em Operações Ofensivas.

Assim, a distância máxima, com margem, considerada entre o primeiro e o último militar é de 400 m.

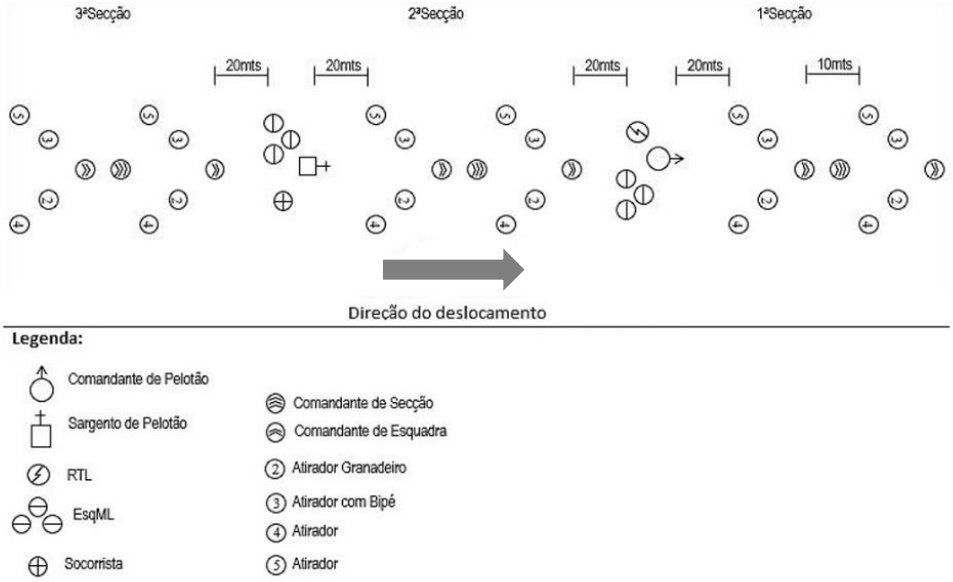


Figura 2.9. Deslocamento em progressão contínua (Adaptado de [FM07]).

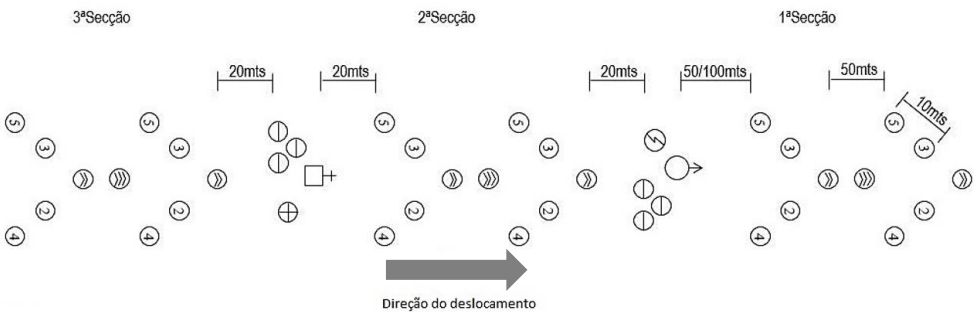


Figura 2.10. Deslocamento em progressão sobreapoiada (Adaptado de [FM07]).

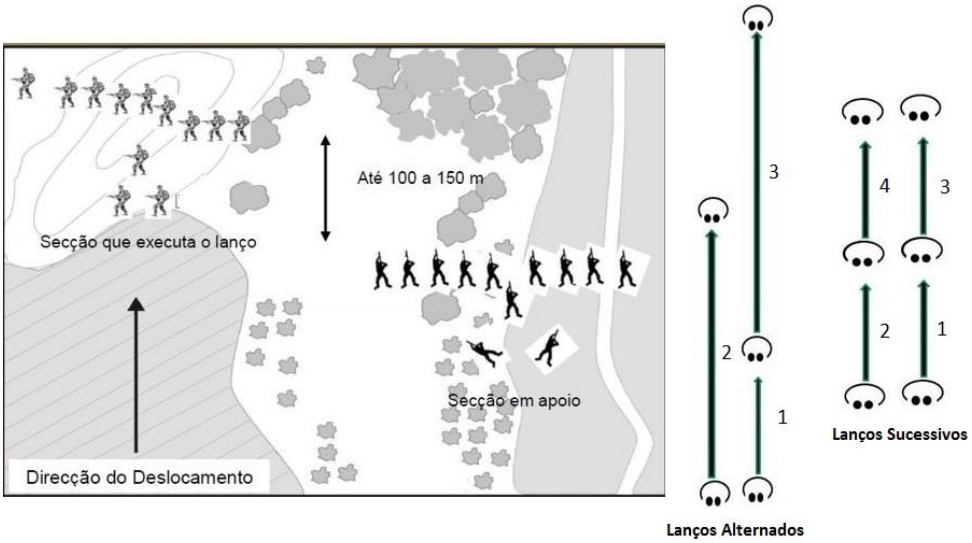


Figura 2.11. Deslocamento em progressão por lanços com sobreapoio (Adaptado de [FM07]).

Em TOs, os meios de comunicação rádio usados são o rádio *Marconi* H-4855 e o rádio P/PRC-525. A antena do rádio Marconi H-4855 tem 6,25 cm de comprimento e está otimizada para trabalhar como um monopolo de $\lambda/4$, para $\lambda = 25\ \mathrm{cm}$. A antena do rádio P/PRC-525 tem 1,32 m de comprimento e está otimizada para trabalhar como um monopolo de $\lambda/4$, para $\lambda = 5{,}28\ \mathrm{m}$. Na Tabela 2.3 encontram-se as características relativas aos respetivos rádios descritos, baseado em [CRYP16] e [MiRS06].

Tabela 2.3. Características dos rádios (Adaptado de [CRYP16] e [MiRS06]).

Rádio	**Antena**	**Cobertura em Frequência**
Marconi H-4855	Monopolo de $\lambda/4$ (*f* = 2,4 GHz)	2,4 – 2,483 GHz (UHF)
P/PRC-525	Monopolo de $\lambda/4$ (*f* = 56,8 MHz)	33 – 88 MHz (VHF)

O rádio P/PRC-525 é um rádio tático usado pelo Exército Português. O rádio permite o encaminhamento de dados, tem capacidade de comutação e interface para redes analógicas e digitais

táticas, computadores e outros equipamentos e terminais de dados. Apresenta um elevado desempenho digital e cobre as bandas HF, VHF e UHF num único equipamento. Tendo em conta os diferentes modos de dados de alta velocidade (incluindo OFDM 72 kb/s) e protocolos, bem como diferentes modos anti-bloqueio, integra-se perfeitamente nas redes militares de comunicações táticas seguras e de alto desempenho [EID16].

2.6 Serviços e Aplicações

Esta secção é baseada em [Corr16], [Khab14], [HoTo11] e [3GPP15], e apresenta os serviços e aplicações do LTE. O serviço mais comum é a voz e está disponível para todos os utilizadores. O seu débito binário é conhecido e é bastante constante ao longo do tempo, por isso, os operadores fornecem acesso ao serviço de voz com uma qualidade razoavelmente boa. Para este tipo de serviço, o principal fator que pode comprometer a QoS é o atraso. No entanto, os serviços de dados, como mensagens de texto curtas (*Short Message Service* – SMS), *streaming* de vídeo, jogos *online*, videoconferências, navegação na *Internet*, envio e receção de *e-mails*, aplicações interativas, entre outros, tornaram-se muito mais importantes. Estes serviços têm requisitos e especificações muito diferentes, como o débito binário, o atraso e a duração, e envolvem uma enorme quantidade de tráfego. Para garantir uma boa QoS, os operadores procuram satisfazer os requisitos dos utilizadores tendo em conta o crescimento dos serviços de dados e, por sua vez, os fabricantes dos equipamentos móveis melhoram os dispositivos para proporcionar uma melhor experiência aos utilizadores [Alca09].

Desta forma, a 3GPP especificou quatro classes de serviço para caracterizar o tráfego em UMTS, de acordo com as suas características. Tendo em conta o nível de prioridade que os difere, estes serviços designam-se por conversacional, *streaming*, interativo e *background*, ordenados do mais para o menos prioritários [Alca09]. A Tabela 2.4 resume as principais características de cada classe, sendo a sensibilidade ao atraso o fator que as distingue com maior relevância.

A primeira classe de serviço é conversacional em tempo real. Os serviços deste grupo, como por exemplo, o *Voice over IP* (VoIP), são sensíveis ao atraso. O tráfego destes serviços tem reduzida tolerância ao atraso, por isso, não é aceitável a opção da existência de um *buffer* para melhorar a qualidade de serviço. Embora as taxas de tráfego geradas para estes serviços sejam dependentes do *codec* usado, para simplificar, assume-se que a satisfação do utilizador pode ser alcançada desde que o acesso ao mesmo, com a taxa de dados de serviço nominal, seja garantida. Portanto, o gestor de recursos deve atender à taxa de dados mínima exigida por forma a alocar os recursos de rádio suficientes para esses serviços [Khab14].

Os serviços do segundo grupo, os serviços de *streaming*, são também sensíveis ao atraso, contudo o seu fluxo de atraso é assimétrico. O gestor dos recursos pode facilmente atender aos serviços de *streaming* através de um *buffer*. A satisfação do utilizador pode ser obtida desde que o total de dados

oferecido durante um intervalo de tempo desde o início do serviço seja maior ou igual à quantidade de dados oferecida pela taxa de dados nominal fixa, durante o mesmo intervalo de tempo [Khab14].

Tabela 2.4. Classes de serviço do sistema UMTS (adaptado de [Corr16]).

Classe do serviço	**Tempo real**	**Simétrico**	**Débito binário garantido**	**Atraso**	***Buffer***	**Exemplo**
Conversacional	Sim	Sim	Sim	Mínimo e fixo	Não	Voz
Streaming	Sim	Não	Sim	Mínimo e variável	Sim	*Video streaming*
Interativo	Não	Não	Não	Moderado e variável	Sim	Navegação na *Web*
Background	Não	Não	Não	Grande e variável	Sim	SMS, *e-mail*

Os serviços da terceira classe, os interativos, como a navegação na *Web*, são mais tolerantes ao atraso, o que permite a redução da taxa de dados atribuída aos serviços [Khab14].

O tráfego de *background* é aquele que não tem quase nenhum atraso ou tempo de serviço limitado, sendo a classe que tem a prioridade mais reduzida numa rede. A fonte e o destino deste tipo de serviços não exigem uma taxa de dados mínima ou um tempo máximo de serviço, por isso, o tráfego é normalmente gerido durante os períodos de carga reduzida da rede [Khab14].

Estas classes de serviço não foram especificamente definidas para o LTE, mas fornecem informações sobre os principais tipos de tráfego a serem considerados. O LTE utiliza mais classes QoS do que o UMTS, sendo cada uma definida por um Identificador de Classe de Qualidade do Serviço (*Quality of Service Class Identifier* – QCI) e pela prioridade do serviço, como se apresenta na Tabela 2.5. A 3GPP definiu também quatro identificadores de QoS especiais para as comunicações de segurança pública (QCIs 65, 66, 69 e 70), em destaque, a vermelho, na Tabela 2.5 [Alca09].

A evolução da rede para uma rede mais orientada para o serviço de dados conduziu a 3GPP a redefinir os parâmetros de QoS seguintes [HoTo11]:

- QCI – parâmetro que identifica um conjunto de valores lógicos para a prioridade, o atraso e o débito de perdas. Existem 13 classes de QCI.
- Prioridade de alocação e retenção (*Allocation Retention Priority* – ARP) – parâmetro que indica a prioridade de uma portadora em relação a outras.

- *Maximum Bit Rate* (MBR) – parâmetro que indica o débito binário máximo para a onda portadora. Associado à portadora GBR.
- *Aggregated Maximum Bit Rate* (AMBR) – parâmetro que indica o débito binário máximo que o UE pode ter para todas as portadoras na mesma ligação PDN.

Tabela 2.5. Características de QCI para o sistema LTE (adaptado de [3GPP15]).

QCI	Tipo de Recurso	Prioridade	Atraso [ms]	Débito de perdas (10^{-n})	Exemplos de Aplicações
1	GBR	2	100	2	Voz Conversacional
2		4	150	3	Vídeo Conversacional (*Live Streaming*)
3		3	50	3	Jogos em tempo real
4		5	300	6	Vídeo Não conversacional (*Buffered Streaming)*
65		0.7	75	2	*Voz em Mission Critical user plane Push To Talk* (MCPTT)
66		2	100	2	Voz em *Non-Mission Critical user plane Push To Talk*
5	Não-GBR	1	100	6	IMS *Signaling*
6		6	300	6	Video (*Buffered Streaming)* (*www*, *e-mail*, *chat*, P2P)
7		7	300	3	Voz, Vídeo (*Live Streaming*), *Gaming Interactive*
8		8	300	6	Video (*Buffered Streaming)* (*www*, *e-mail*, *chat*, P2P)
9		9			
69		0.5	60	6	*Mission Critical delay sensitive signaling* (MCPTT *signaling*)
70		5.5	200	6	*Mission Critical Data*

O eNB tem como responsabilidade assegurar a QoS necessária para uma portadora através da interface rádio. As portadoras podem ser classificadas em duas categorias consoante os serviços que prestam [HoTo11]:

- *Guaranteed Bit Rate* (GBR) – indica o número de recursos mínimos que são atribuídos à onda portadora.
- *Non-Guaranteed Bit Rate* (Non-GBR) – não garante nenhum débito binário específico.

Na Tabela 2.6 são apresentados os serviços proporcionados pelo LTE que podem ser integrados num pelotão, como a voz, o correio eletrónico, a comunicação direta entre equipamentos (*Machine to Machine* – M2M), ou seja, a possibilidade de usar um sensor que regista os dados dos biométricos dos militares e os transmite a um *software* que os possa tratar, a partilha de ficheiros e o *streaming* de vídeo.

Tabela 2.6. Ritmo de transmissão dos serviços utilizados (Adaptado de [Guit16] e [MoBo11]).

Serviço		**Classe do serviço**	**Ritmo de transmissão [kbit/s]**		
			mín.	**méd.**	**máx.**
VoIP		Conversacional	8	32	64
Correio Eletrónico		*Background*	10	100	1 333
M2M	*Smart Meters*	*Background*	-	200	-
	e-Health	Interativo	-	200	-
Partilha de ficheiros		Interativo	200	1 600	4 444
***Streaming* de vídeo**		*Streaming*	500	5 000	10 000

2.7 Estado da Arte

Hoje em dia, num TO, os Centros de Comando e Controlo precisam de recursos integrados e interoperáveis que possibilitem que os militares e os sistemas trabalhem juntos de forma eficaz. As redes militares transportam uma grande variedade de aplicações e dados e, por isso, devem fornecer serviços seguros, previsíveis, mensuráveis e, até, garantidos.

Segundo [Alca10], as prioridades básicas para os militares (água, comida, munições) assim como as respetivas quantidades são limitadas ao que eles próprios ou as viaturas que os acompanham podem transportar: qualquer coisa que compete por peso ou espaço deve ser reduzido. Assim, os obstáculos à mobilidade, como o tamanho e o peso físico dos equipamentos de comunicação portáteis, a baixa duração da bateria, o elevado consumo de energia, a LB disponível limitada, a intensidade e a qualidade do sinal, a criptografia e a segurança são limitações ao fornecimento de comunicações para os militares. A *Alcatel-Lucent* 9907 *Rapidly Deployable Network* (RDN) é uma rede compacta, autónoma e de quarta geração (4G) que permite que unidades altamente móveis estabeleçam rapidamente uma rede segura para serviços de voz, vídeo, dados e sensores, em tempo real. Este sistema robusto pode ser instalado e executado em menos de 10 min, com a mínima intervenção do utilizador. O equipamento que suporta esta rede é compacto e móvel, tem 10 kg e o tamanho de uma caixa de sapatos. A *Alcatel-Lucent* 9907 RDN pode ser implementada como uma solução de célula única para comunicações locais ou como uma rede *ad hoc* com múltiplos nós. Várias redes *Alcatel-Lucent* 9907 RDN, dentro do alcance umas das outras, podem criar uma rede *ad hoc*, em malha, usando a rede sem fios IEEE 802.11 [Alca10].

Segundo [OMNI16], o sistema LTE está a evoluir no sentido de se tornar a tecnologia dominante em MCC, tendo em conta que a maior desvantagem da tecnologia TETRA é o débito binário reduzido. Como referido por [FeMI13], o sistema LTE-A (*Release* 12) proporciona débitos binários mais elevados, em UL, (objetivo: 500 Mb/s) e novos procedimentos para uma melhor cobertura através de nós de

retransmissão. Por sua vez, uma vez que o protocolo IP foi originalmente concebido para redes fixas militares, há boas razões para supor que o mesmo é adequado para MCC. O LTE-A MCC fornece procedimentos para o tratamento prioritário de chamadas de emergência, serviços de multimédia com prioridade e transmissão de mensagens de alerta.

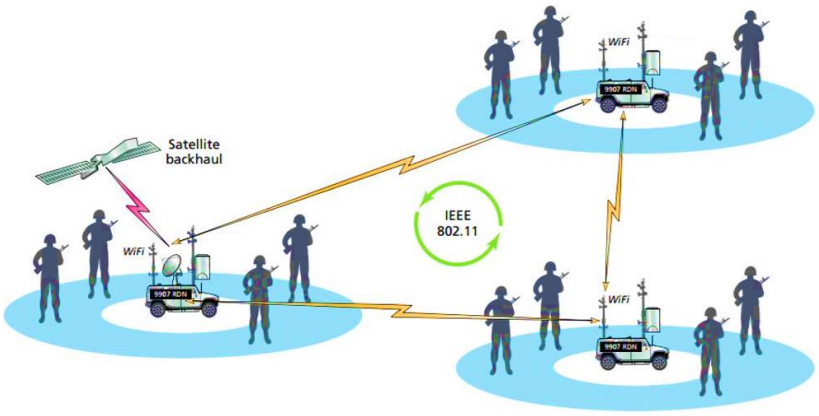


Figura 2.12. Rede móvel *ad hoc Alcatel-Lucent* 9907 RDN (Extraído de [Alca10]).

Segundo [LZYH16], a introdução de retransmissão no sistema LTE-A MCC proporciona uma maior cobertura e maior capacidade ao sistema. Assim, esta tecnologia representa um importante fator nos sistemas de comunicações móveis. No LTE-A, um nó de retransmissão (que se trata de uma EB de potência baixa), ajuda a encaminhar os dados dos TMs vizinhos para um eNB local, proporcionando uma maior capacidade nas fronteiras das células. Por sua vez, a importância da retransmissão pode ser demonstrada através do desenvolvimento de uma rede *ad hoc* sem fios, que consiste num conjunto de nós diretamente ou indiretamente ligados por um canal sem fios e que podem comunicar uns com os outros sem qualquer infraestrutura de rede pré-existente ou centralizada. A transmissão de pacotes por *multi-hop* é uma das principais características das redes *ad hoc* sem fios por forma a ultrapassar a limitação do alcance de transmissão de um transcetor de rádio, ou seja, um pacote pode atingir mais do que o alcance do transcetor através de múltiplos saltos para alcançar um determinado nó que está mais distante. Este será o princípio a ter em conta na abordagem da transmissão de dados entre os militares no terreno.

Uma rede de retransmissão LTE-A *multi-hop*, sendo um tipo de rede *ad hoc*, fornece uma infraestrutura que possibilita transportar tráfego por áreas extensas sem necessidade de recorrer a redes existentes, logo apresenta grandes vantagens para aplicações militares. Por outro lado, este ano, na conferência *Critical Communications Europe* (CCE), na Dinamarca, foi discutida a necessidade de desenvolver futuras redes de missão crítica para oferecer cobertura, débito binário, capacidade, resiliência e segurança, bem como comunicações de voz. Tendo em conta a necessidade de redes de dados avançadas, existe um grande interesse em como as necessidades de missões críticas podem ser atendidas pelos sistemas 3GPP [3GPP17a].

De acordo com [3GPP17b], o *Release 13* aborda o primeiro conjunto de especificações que abrange os serviços de missão crítica, de forma especial a funcionalidade do PTT. Foi completado um estudo sobre a "*Isolated* E-UTRAN *operations*" para a utilização em segurança pública e foi investigada a arquitetura para suportar serviços de emergência através de redes locais sem fios.

Capítulo 3

Definição dos Cenários e Desenvolvimento dos Modelos

Este capítulo apresenta o estudo das condições de operacionalidade do sistema LTE-A MCC com o intuito de perceber as limitações do mesmo, quer ao nível da cobertura, quer ao nível da capacidade. São definidos vários cenários de atuação dos militares, onde se apresentam os modelos de propagação para os ambientes urbano, suburbano, rural e interior de edifícios, cuja implementação nos respetivos cenários depende das restrições de cada modelo. São apresentadas as antenas utilizadas nos TMs e, ainda, um equipamento de LTE e uma antena veicular para fazer a ligação entre o pelotão e a restante força. Apresentam-se os cálculos da cobertura e capacidade do sistema, assim como as suas limitações. O capítulo termina com a aferição dos modelos numa abordagem da comunicação numa rede *ad hoc* com retransmissão dentro do pelotão e a respetiva ligação a uma viatura.

3.1 Definição dos cenários

Esta secção consiste na apresentação e descrição de vários cenários possíveis onde os militares podem atuar. Estes cenários podem ocorrer em quatro ambientes: urbano, suburbano, rural e interior de edifícios. A classificação dos ambientes é um ponto crucial para a correta aplicação de modelo de propagação. Esta classificação tem em conta as características físicas do local e a morfologia do terreno, como a ondulação, a existência de superfícies aquáticas, a altura, a densidade de vegetação e a densidade de edifícios.

O ambiente urbano caracteriza-se por ter uma elevada concentração populacional e grande densidade de infraestruturas e edifícios. O ambiente suburbano é caracterizado pelas áreas que se localizam na periferia das cidades e, normalmente, apresentam alguns obstáculos às comunicações. O ambiente rural caracteriza-se pelos locais com baixa densidade demográfica, povoamento disperso e existência de muitos espaços livres, ou seja, sem obstáculos aos TMs, sendo exemplo disso, as aldeias do interior do país [SLID12]. Desta forma, podem-se definir cenários dentro dos quatro tipos de ambiente. Dos cenários descritos de seguida, apresentam-se alguns na Figura 3.1.

- **Ambiente urbano**
  - Ambiente urbano de elevada densidade: apresenta um grande número de edifícios de vários andares e ruas estreitas, há um quantitativo elevado de população, uma grande densidade de infraestruturas, vias de comunicação e de transportes e poucos espaços verdes. Exemplo: Nova Iorque (EUA).
  - Ambiente urbano de baixa densidade: apresenta edifícios com menos andares e ruas menos estreitas que na área anterior, densidade populacional inferior e mais zonas verdes. Exemplo: Lisboa (Portugal).
- **Ambiente suburbano**
  - Ambiente suburbano: consiste nos arredores da cidade e apresenta edifícios baixos (máximo 3 andares) e ruas largas, com predominância de vivendas. Exemplos: Bairro do Arco do Cego (Lisboa, Portugal).
- **Ambiente rural**
  - Ambiente rural altamente arborizado: área ocupada por grandes extensões de vegetação densa, árvores com tamanho entre 30 e 50 metros e inexistência de habitação. Exemplo: Floresta tropical da Amazónia (Brasil).
  - Ambiente rural arborizado: existência de árvores e vegetação, poucas habitações e infraestruturas. Exemplo: Bom Sucesso (Figueira da Foz, Coimbra, Portugal).
  - Ambiente rural montanhoso: existência de montanhas e habitações pequenas. Exemplo: Afeganistão.
  - Ambiente rural pouco arborizado: apresenta construções dispersas com apenas um ou dois andares, quantitativo reduzido de população e apresenta pouca vegetação. Exemplo: Alentejo (Portugal).
  - Ambiente rural não arborizado: ausência de vegetação. Exemplos: Iraque (Ásia). Numa situação extrema, considera-se o caso do deserto.

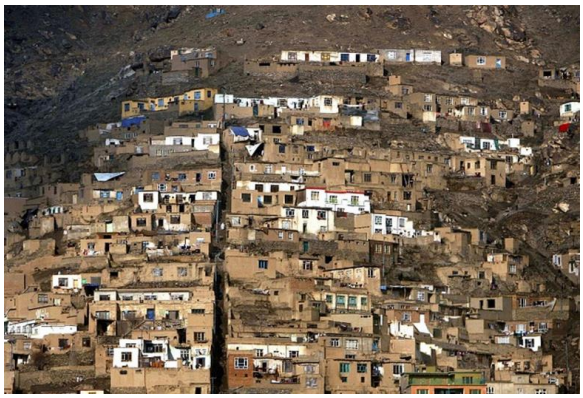
(a) Cidade de S. Paulo, urbano denso ([SLID12]).

(b) Cidade de Lisboa, urbano ([SLID12]).

(c) Arco do Cego, suburbano ([CaML17]).

(d) Amazónia, rural altamente arborizado ([OuBe16]).

(e) Bom Sucesso, rural arborizado ([Acad17]).



(f) Afeganistão, rural montanhoso ([PIXA13]).

(g) Alentejo, rural pouco arborizado ([SAPO15]).

(h) Iraque, rural deserto/montanhoso ([OPER16]).

Figura 3.1. Cenários onde os militares podem operar.

- **Interior de edifícios**
  - Existe uma atenuação adicional na propagação das ondas eletromagnéticas devido à penetração nas paredes, pisos e obstáculos nos interiores.

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 são apresentados os parâmetros que descrevem os cenários de referência para os três tipos de ambiente e que serão usados no modelo COST 231 *Walfish-Ikegami*, no modelo *Irregular Terrain Model* (ITM) ou *Longley-Rice* e no modelo de *Weissberger*, para o cálculo da cobertura. Para o ambiente rural, o valor de $L_{V\,[\mathrm{dB}]}$ foi interpolado conforme se apresenta no Anexo B. Como a transmissão de voz e dados é feita, em modo direto, entre os militares, as alturas da antena emissora e recetora serão iguais (considerou-se h_m = 1,80 m, valor aproximado para a altura do militar). Considerando a Figura 2.10, apresentada na Secção 2.6 (L_u é proposto em [NeRo15]), a distância máxima a considerar entre os militares mais afastados é de 400 m.

Tabela 3.1. Parâmetros para os cenários de referência.

Parâmetro	Designação	Unidades	Valor
h_m	Altura do TM	[m]	1,8
P_t	Potência de transmissão	[dBm]	1 a 23
$G_t = G_r$	Ganho de transmissão/receção	[dBi]	3 ou -6
L_u	Perdas do utilizador	[dB]	10
M_I	Margem de interferência	[dB]	1
F	Fator de ruído no recetor	[dB]	10
Δf	Largura de banda do sinal	[kHz]	180

Tabela 3.2. Parâmetros para o cálculo da cobertura dos ambientes exteriores.

Ambiente Urbano	Ambiente Suburbano	Ambiente Rural
$w_B[\mathrm{m}] = 20$	$w_B[\mathrm{m}] = 35$	$L_V\,[\mathrm{dB}] = 6{,}4$
$H_B[\mathrm{m}] = 22$	$H_B[\mathrm{m}] = 7$	
$\phi[°] = 90$	$\phi[°] = 90$	
$w_s[\mathrm{m}] = 10$	$w_s[\mathrm{m}] = 17{,}5$	
$L_{bsh}[\mathrm{dB}] = 0$	$L_{bsh}[\mathrm{dB}] = 0$	
f = 64, 890, 1682 MHz		

Os parâmetros necessários para a análise dos cenários e o cálculo da capacidade são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Parâmetros para o cálculo da capacidade.

Bandas de Frequência	**61 – 68**	**873 – 876** **918 – 921**	**1675 – 1690**
f [MHz]	64	890	1682
LB [MHz]	7	6	15
# RBs	35	30	75
# sub-portadoras ocupadas	466	400	900
# símbolos OFDM/janela temporal	7		
Duração da janela temporal [ms]	0,5		
LB da sub-portadora [kHz]	15		

Note-se que o objetivo desta tese é o de estimar as cobertura e capacidade máximas. Assim, no que diz respeito às frequências e larguras de banda, considera-se que o sistema funciona em FDD, em cada uma das bandas apresentadas na Tabela 3.3, e que a largura de banda apresentada nesta tabela é usada totalmente para DL ou UL. Obtém-se portanto uma avaliação da cobertura e capacidade máximas, para o caso mais favorável, e as limitações obtidas indicam problemas na utilização do sistema em condições diferentes das tomas aqui, i.e., que a largura de banda seja partilhada entre DL e UL em FDD, ou que seja usado TDD, com partilha temporal entre DL e UL.

Num TO, existem módulos de comunicações (viaturas táticas de comunicações) que se destinam a fornecer os serviços diretamente aos utilizadores que estão a ser apoiados. Os serviços mínimos disponíveis dentro de um pelotão, com base na Tabela 2.6, são os seguintes: voz, correio eletrónico, serviços M2M (*e-Health* e *smart meters*), partilha de ficheiros e *streaming* de vídeo. Tendo em conta que a rede é IP, o serviço de voz é o VoIP.

Quanto ao correio eletrónico, existe um servidor de *e-mail* instalado num módulo de comunicações (por exemplo, num nó de acesso) que está ligado à rede de comunicações da Brigada. A ligação IP chega ao PAR e os utilizadores usam uma conta de correio eletrónico, através do servidor, que está na LAN.

Ao nível do estado de saúde e condição dos militares, podem ser usadas as aplicações M2M, nomeadamente, o *e-Health*, pois permite a monitorização remota de informações do estado de saúde dos mesmos e o possível disparo de alarmes quando são detetadas condições críticas. Estas informações são obtidas a partir de sensores (*smart meters*) que os militares têm de usar para medir, por exemplo, a pressão arterial, a temperatura corporal e a frequência cardíaca. Posteriormente, os dados são transferidos através do seu TM para um equipamento que os vai armazenar e tratar [ETSI13]. Desta forma é possível, por exemplo, acompanhar e monitorizar a situação vital de cada militar e, numa situação extrema, detetar se há feridos ou baixas.

A partilha de ficheiros é usada em situações em que o Cmdt de Pelotão recebe informação do escalão superior ou, mesmo, quando pretende enviar um documento ou imagem para os Cmdts de Secção.

O serviço de *streaming* de vídeo servirá para comunicar alguma situação que os militares estejam a observar e que seja de interesse o Cmdt de Pelotão e/ou Cmdt de Companhia acompanharem, em tempo real. Imagine-se uma situação em que um pelotão é apoiado por uma secção UAV, numa ação de reconhecimento, e o Cmdt dá-lhe indicações para o colocar num determinado itinerário. O UAV poderá ter uma câmara a gravar e, em tempo real, mostrar o vídeo ao Cmdt de Pelotão, através da ligação por LTE-A.

3.2 Modelos de propagação

Existem diversos modelos de propagação, mas não existe apenas um que seja capaz de abranger todos os cenários descritos anteriormente. Nesta secção são apresentados os modelos usados para a propagação em ambientes exteriores e interiores.

3.2.1 Ambientes exteriores

Por forma a obter uma correta avaliação do desempenho do LTE-A MCC foram usados modelos de propagação de acordo com o ambiente correspondente aos diferentes cenários onde os militares operam. Os modelos dependem de vários parâmetros, como a frequência, a distância entre o emissor e o recetor, o número de militares que comunicam e o tipo de ambiente. O último parâmetro é o primeiro a ter em consideração, pois é a partir da seleção do ambiente onde ocorrem as operações que são diferenciados os restantes parâmetros.

A Tabela 3.4. apresenta vários modelos possíveis de implementar tendo em consideração os três tipos de ambiente exterior. Os dados foram obtidos a partir de [Corr16], [WeJJ82] e [PWNJ11]. A vermelho encontram-se as restrições dos modelos que não abrangem as características definidas para os cenários descritos na Secção 3.1. e que, por isso, representam os motivos pelos quais esses modelos não foram escolhidos. A azul apresentam-se os modelos que foram escolhidos para analisar os cenários. De seguida, apresentam-se os motivos pelos quais não se escolheram os restantes modelos disponíveis para as bandas de frequência em análise:

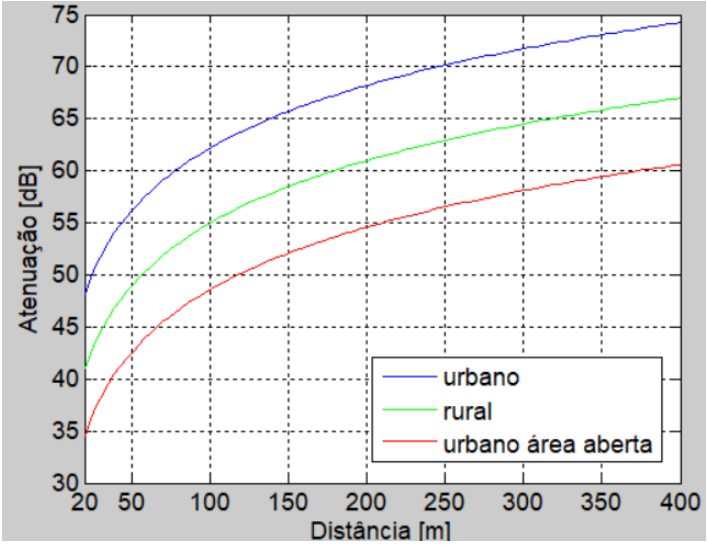
- O modelo *Egli* [PWNJ11] apresenta uma restrição no alcance de uma distância mínima de 1 km. Como se vão analisar distâncias inferiores a 400 m, dentro de um pelotão, não é aceitável. A restrição para a altura mínima da antena emissora é de 30 m, o que não abrange a altura pretendida de 1,8 m.
- O modelo COST 231 *Okumura-Hata* [Corr16] abrange os três tipos de ambiente, mas tem a limitação de ser aplicável apenas para distâncias superiores a 5 km. Como se vão analisar distâncias inferiores a 400 m, dentro de um pelotão, não é aceitável.

Tabela 3.4. Possíveis modelos a aplicar aos três tipos de ambiente e suas limitações.

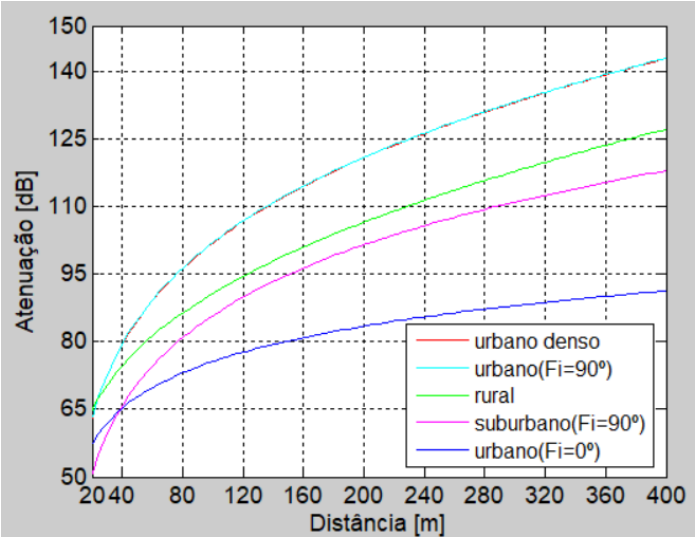
Ambiente	f [MHz]	Modelos	Banda de frequências [MHz]	Alcance [km]	Altura do emissor [m]	Altura do recetor [m]
Urbano	64	ITM	20 – 20 000	1 – 2 000	0,5 – 3 000	0,5 – 3 000
		Egli	30 – 1 000	1 – 50	30 – 200	1 – 10
	890	COST 231 *Okumura-Hata*	150 – 1 500	> 5	30 – 200	1 – 10
		COST 231 *Walfish-Ikegami*	800 – 2 000	0,02 – 5	4 – 50	1 – 3
	1682	COST 231 *Okumura-Hata* (extensão)	1 500 – 2 000	> 5	30 – 200	1 – 10
		COST 231 *Walfish-Ikegami*	800 – 2 000	0,02 – 5	4 – 50	1 – 3
Suburbano	64	ITM	20 – 20 000	1 – 2 000	0,5 – 3 000	0,5 – 3 000
		Egli	30 – 10 000	1 – 50	30 – 200	1 – 10
	890	COST 231 *Okumura-Hata*	150 – 1 500	> 5	30 – 200	1 – 10
		COST 231 *Walfish-Ikegami*	800 – 2 000	0,02 – 5	4 – 50	1 – 3
	1682	COST 231 *Walfish-Ikegami*	800 – 2 000	0,02 – 5	4 – 50	1 – 3
		COST 231 *Okumura-Hata* (extensão)	1 500 – 2 000	> 5	30 – 200	1 – 10
Rural	64	ITM	20 – 20 000	1 – 2 000	0,5 – 3 000	0,5 – 3 000
	890	COST 231 *Okumura-Hata*	150 – 1 500	> 5	30 – 200	1 – 10
		Weissberger	230 – 95 000	< 0,4	–	–
	1682	COST 231 *Okumura-Hata* (extensão)	1 500 – 2 000	> 5	30 – 200	1 – 10
		Weissberger	230 – 95 000	< 0,4	–	–

A evolução da atenuação da propagação ao longo da distância, para alguns cenários descritos anteriormente, para as frequências centrais de 64 MHz, 890 MHz e 1682 MHz, é apresentada na Figura 3.2, para distâncias a partir de 20 m, visto que até essa distância os militares se encontram em linha de vista (LoS)

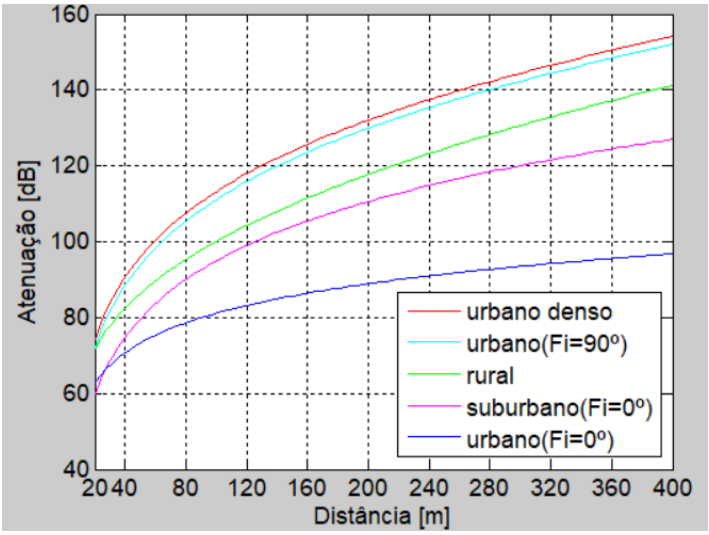
Para a frequência de 64 MHz, nos ambientes urbano, suburbano e rural, foi usado o modelo **ITM** [WeJJ82], também conhecido por *Longley-Rice Model*, porque é o que reúne as características mais próximas das pretendidas. Este modelo é válido para distâncias superiores a 1 km, contudo foi estendido para uma gama de distâncias desde os 20 aos 400 m (estando fora do intervalo de validade), portanto os erros de aplicação do modelo serão maiores.



(a) Atenuação para *f*=64 MHz.



(b) Atenuação para *f*=890 MHz.



(c) Atenuação para *f*=1682 MHz.

Figura 3.2. Atenuação da propagação em função da distância.

Para as frequências de 890 MHz e 1682 MHz, o modelo a usar para os ambientes urbano e suburbano, foi o modelo **COST 231 *Walfish-Ikegami*** [Corr16]. Este modelo tem a limitação de uma altura mínima para a antena de emissão de 4 m, sendo, todavia, possível utilizá-lo (como irá acontecer) para o valor de h_m = 1,80 m. Esta situação irá comportar, contudo, uma probabilidade de erro obtido maior. Em alternativa a este modelo poderiam ter sido usadas ferramentas baseadas em traçados de raios (*Ray Tracing Model* [Yuls15]), para distâncias inferiores a 500 m, contudo trata-se de um modelo mais complexo e que se encontra fora do enquadramento da Dissertação.

Para o ambiente rural, para as frequências de 890 MHz e 1682 MHz foi usado o modelo ***Weissberger*** [Corr16], que respeita todas as condições. Nas Figuras 3.2. (b) e (c), o ambiente rural apresentado caracteriza um ambiente rural bastante arborizado, como por exemplo, o cenário descrito pela floresta tropical amazónica, visto que foi usado o modelo de *Weissberger*.

No que diz respeito à atenuação da propagação dos sinais em função da frequência, tendo em conta as frequências das portadoras usadas, escolheu-se a gama de valores em [60, 1700] MHz. Foi escolhida a distância fixa de 100 m, porque se considerou ser a distância real, em média, a que, geralmente, os militares se deslocam. Até aos 800 MHz, para os ambientes urbano e suburbano foi usado o modelo ITM. Dos 800 aos 1700 MHz, foi usado o modelo COST 231 *Walfish-Ikegami*. Dos 60 aos 1700 MHz, para um ambiente rural foi usado o modelo ITM e para um ambiente rural muito arborizado foi usado o modelo de *Weissberger*. Embora o modelo de *Weissberger* não seja aplicável para frequências inferiores a 230 MHz, este foi estendido na frequência desde os 60 aos 230 MHz que estando fora do seu intervalo de validade. Como se verifica pela Figura 3.3, ao longo de toda a gama de frequências analisada, a maior atenuação da propagação dos sinais encontra-se em ambientes urbanos. Para um ambiente com elevada densidade de vegetação, verifica-se que a atenuação é superior à que ocorre num ambiente suburbano. E, por último, a menor atenuação verifica-se para um ambiente rural.

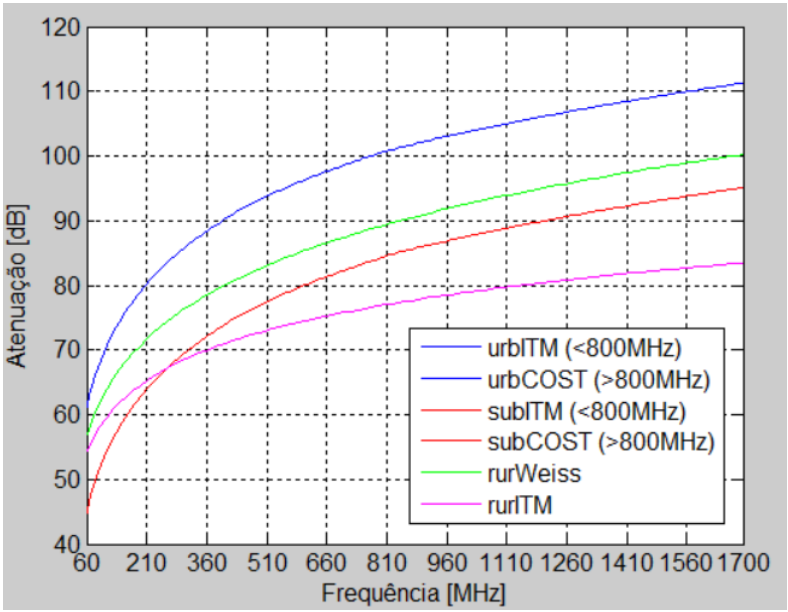


Figura 3.3. Atenuação da propagação em função da frequência para uma distância fixa de 100 m.

3.2.2 Ambientes interiores

A propagação em ambientes interiores difere da propagação no exterior. No caso do interior, a extensão da cobertura é definida pela geometria do edifício e os limites do mesmo afetam a propagação, causando uma atenuação adicional. Os parâmetros que influenciam essa atenuação são a reflexão e a difração em torno dos objetos dentro dos compartimentos (incluindo paredes e pisos), perda de transmissão através desses mesmos obstáculos e atenuação adicional através dos materiais de construção. Assim, a propagação no interior dos edifícios tem associada uma perda adicional devido às paredes internas, aos vários pisos, aos móveis e outras infraestruturas [ITUR17].

Para a determinação da atenuação dentro de edifícios e respetivo cálculo da cobertura foi escolhido o modelo definido pela recomendação ITU-R P.1238-8 [ITUR17], que é válido numa gama de frequências desde 300 MHz a 100 GHz. No entanto, o modelo foi também aplicado para a frequência de 64 MHz. Pode haver um limite no isolamento causado pelos vários pisos, visto que o sinal pode seguir outros caminhos com menos atenuação do que atravessar os vários andares [ITUR17].

3.3 Antenas

Nesta secção apresentam-se as antenas usadas pelos TMs dos militares. O ganho de uma antena indica o aumento aparente da potência de transmissão devido à sua capacidade de concentrar energia, ou seja, o ganho é uma forma de como a antena concentra a potência disponível num número limitado de direções [Glob17].

Segundo [Glob17], na polarização vertical (PV), as linhas de força verticais do campo elétrico são perpendiculares ao solo e a onda de rádio pode percorrer uma distância considerável ao longo da superfície terreste com uma quantidade mínima de perdas. Para frequências VHF e UHF podem usar-se antenas com PV ou polarização horizontal. Uma vez que a onda de rádio é transmitida diretamente a partir da antena emissora para a antena de receção, a polarização original produzida no emissor não é alterada até que chegue ao recetor. Como as alturas das antenas que serão usadas são inferiores a 3 m, a PV oferece a vantagem de fornecer um sinal mais forte recebido em frequências até cerca de 60 MHz. Acima dos 100 MHz, a diferença entre as duas polarizações é pequena, contudo quando as antenas estão localizadas perto de florestas densas, as ondas polarizadas horizontalmente sofrem perdas inferiores às ondas verticalmente polarizadas (Anexo B, Tabela B.1). Pelo contrário, quando é utilizada a PV, a interferência produzida ou captada a partir de transmissões fortes de VHF ou UHF é menor, pois estas usam polarização horizontal. Este facto é importante quando as antenas são utilizadas, principalmente, em áreas urbanas e suburbanas, onde as televisões e estações que operam em modulação de frequência podem interferir com as comunicações.

Para haver comunicação entre dois TMs, a antena emissora e a recetora têm de estar polarizadas na mesma direção, para que a antena do recetor receba o máximo do sinal. As antenas verticais simples

proporcionam uma comunicação omnidirecional, o que representa uma vantagem quando as comunicações ocorrem a partir de um veículo em movimento. Logo, o tipo de polarização escolhida foi a PV para que as antenas dos TMs dos militares possam comunicar entre si e, posteriormente, com a antena na viatura, que estará também polarizada verticalmente.

A típica antena de chicote (*whip antenna*) tem um ganho superior ao de uma antena que possa ser integrada numa peça de roupa ou colete tático (*wearable antenna*) [JaHo09], contudo a primeira apresenta desvantagens: o militar que a transporta é um alvo facilmente detetável no terreno, porque a antena de chicote sobressai da silhueta do militar e a antena facilmente fica presa ou é partida por ramos de árvores e arbustos e limita os movimentos do militar [WTWS05]. Estas limitações podem ser eliminadas pela substituição da antena de chicote por uma antena portátil e flexível integrada no colete [NeRo15]. Desta forma, as antenas escolhidas para os TMs foram a antena VHF-LB *Vest Antenna* para VHF, Figuras 3.4 e 3.5, e a antena LTE *Wearable* BW-700-3000 para UHF, Figura 3.7. Para fazer a ligação entre os militares que andam no terreno e o escalão superior escolheu-se a antena veicular tática de LTE UHF710VM/HG, Figura 3.9.

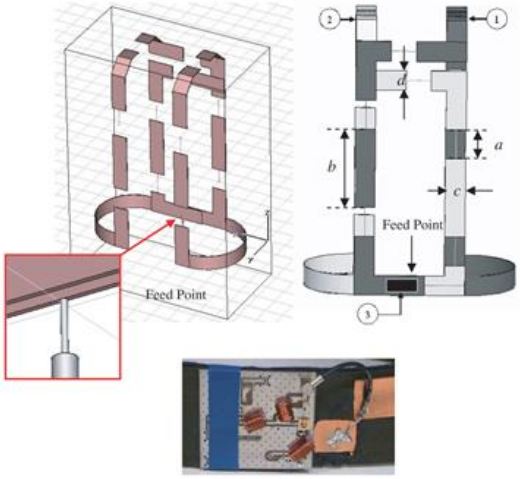


Figura 3.4. Projeção da antena VHF-LB *Vest Antenna* (Extraído de [JaHo09]).

Figura 3.5. Antena VHF-LB *Vest Antenna* integrada no colete MOLLE (Extraído de [WTWS05]).

Na banda VHF, as antenas portáteis são de grandes dimensões, comparativamente ao tamanho médio do corpo humano. Contudo, a antena VHF-LB *Vest Antenna* pode ser facilmente integrada no colete do militar. Embora a Figura 3.5 mostre a antena no interior do colete, esta pode ser integrada por cima

do colete balístico usado pelos militares, em várias operações, pois dependendo do material com que este é feito, as suas placas podem funcionar como escudo e absorver a radiação emitida pela antena.

Segundo [JaHo09], apresenta-se na Figura 3.6, o diagrama de radiação da antena para a frequência de 60 MHz onde os resultados foram obtidos na posição de pé. Foi escolhida esta posição (e não a posição de joelhos ou deitada), visto que, em OAP, os militares andam, maioritariamente, de pé.

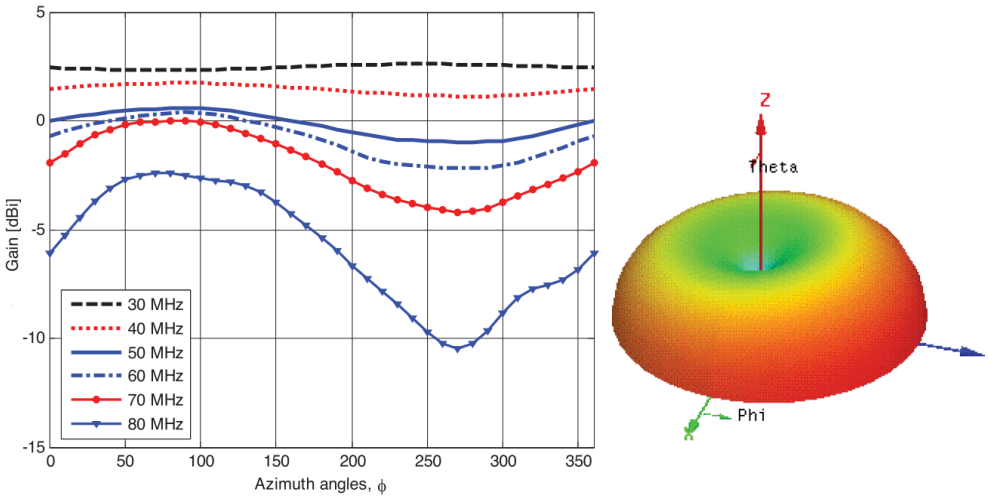


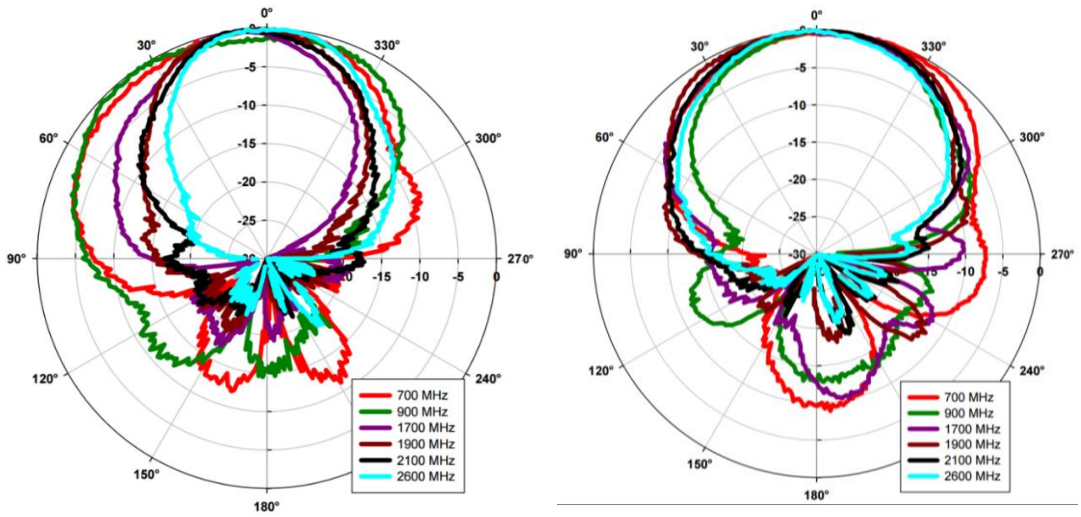
Figura 3.6. Diagrama de radiação e ganho da antena VHF-LB *Vest Antenna* (Extraído de [JaHo09]).

A antena *Wearable* BW-700-3000, Figura 3.7, foi otimizada para operar em LTE e fabricada usando um material flexível que facilmente se transporta no colete tático. Os conetores disponíveis permitem que seja possível ligar-se a vários rádios [PHAR13]. O seu diagrama de radiação hemisférico, apresentado na Figura 3.8, representado por planos de corte, cujas frequências de interesse são a de 900 MHz e 1700 MHz, pois são as mais próximas às frequências a ser analisadas (890 MHz e 1682 MHz).

Figura 3.7. Antena LTE *Wearable* BW-700-3000 (Extraído de [PHAR13]).

A antena veicular UHF710VM/HG é uma antena tática de LTE para ambientes militares. A Figura 3.10 mostra o seu diagrama de radiação para a frequência de 910 MHz.

O *Harris Fusion Tactical Cellular*, na Figura 3.11, é um sistema robusto, fiável e autónomo de LTE com uma tecnologia sem fios e com elevada LB. Este equipamento pode ser montado em *shelters*, em mastros temporários nos módulos de comunicações ou em centros de comunicações fixos. É constituído por três componentes principais: um rádio LTE robusto, o *software* LTE *Evolved Packet Core* e dispositivos baseados em *Android*.



(a) plano de elevação (b) plano azimutal

Figura 3.8. Diagrama de radiação da antena LTE *Wearable* BW 700-3000 (Extraído de [PHAR13]).

Figura 3.9. Antena veicular UHF710VM/HG (Extraído de [COMR16]).

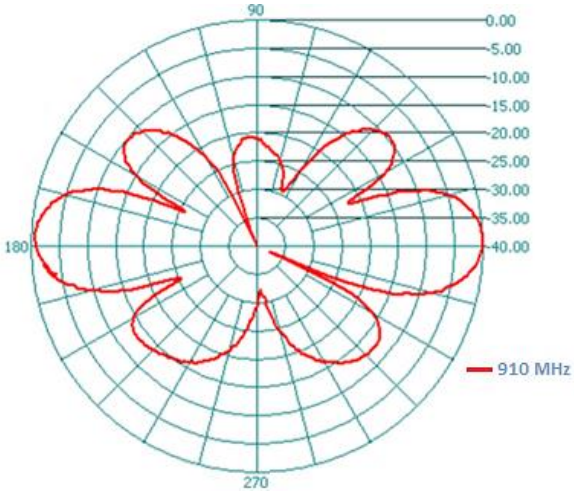


Figura 3.10. Diagrama de radiação da antena veicular (Extraído de [COMR16]).

Figura 3.11. Terminal tático *Harris Fusion* (Extraído de [HARR17]).

O *Harris Fusion Tactical Cellular*, funciona como uma “bolha” de LTE que proporciona cobertura aos utilizadores permitindo a comunicação de voz, dados e vídeo com elevada capacidade e velocidade de transferência, sem a existência de uma infraestrutura [HARR17]. Desta forma, este sistema com grande LB e a flexibilidade, ao ser incorporado em viaturas que se deslocam em ambientes diversificados, conduz à inovação no TO [HARR15].

As especificações das diferentes antenas e do terminal tático de LTE apresentam-se na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Características das antenas *manpack*, veicular e do terminal tático *Harris*.

f [MHz]	64	890 e 1682		
	Antenas			**Terminal tático**
	VHF-LB *Vest Antenna*	**LTE *Wearable* BW-700-3000**	**Veicular UHF710VM/HG**	***Harris Fusion***
Banda de frequências [MHz]	30 – 88	700 – 3000	700 – 960	
Diagrama de radiação	Omnidirecional	Hemisférico	Omnidirecional	
Ganho [dBi]	-6 a -4	3	4	
Dimensões ($l \times a \times$) [cm]	40 x 70 x 20	8,9 x 14,6 x 1,0	108	32 x 40 x 13
Peso [gr]		57	3 450	12 050
Referência	[JaHo09]	[PHAR13]	[COMR16]	[HARR15]

3.4 Cálculo da cobertura

Nesta secção apresentam-se as considerações sobre a cobertura do sistema. O cálculo do valor máximo das perdas de percurso numa célula é essencial para estimar a cobertura da mesma. Assim, o cálculo da potência de receção é uma ferramenta necessária para o planeamento da cobertura, fornecendo uma estimativa da atenuação do sinal entre os TMs [Corr16].

Pretende-se, então, determinar a distância máxima entre os militares que garanta a cobertura da rede que lhes permita comunicar, quer em voz quer em dados. Para avaliar as perdas de propagação entre os TMs, têm de ser tomadas em consideração todas as perdas e ganhos das antenas, assim como as potências de emissão e de receção das mesmas, de acordo com:

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

A potência efetiva radiada isotropicamente (*Effective Isotropic Radiated Power* – EIRP) pode ser definida de acordo com (3.2). A potência máxima do emissor depende do sistema LTE e do TM. Com a proximidade e/ou contacto do TM com o corpo do militar existem perdas. Os militares usam colete balístico, capacete, armamento, munições e granadas, e visto que o TM estará em grande parte do tempo junto ao corpo do mesmo, considerou-se uma atenuação de 10 dB [NeRo15] para ambos os serviços de voz e dados.

$$P_{EIRP[\mathrm{dBm}]} = P_{t\ [\mathrm{dBm}]} + G_{t\ [\mathrm{dBi}]} = P_{TX\ máx\ [\mathrm{dBm}]} - L_{u\ [\mathrm{dB}]} + G_{t\ [\mathrm{dBi}]} \tag{3.2}$$

onde:

- $P_{TX\ máx}$: potência máxima à saída do emissor
- L_u: perdas devido ao utilizador.

A potência disponível na antena de receção é obtida de acordo com (3.3). Esta depende do serviço utilizado e da ligação UL ou DL.

$$P_{r\ [\mathrm{dBm}]} = P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]} + L_{u\ [\mathrm{dB}]} \tag{3.3}$$

onde:

- $P_{RX\ mín}$: potência mínima à entrada do recetor

Segundo [Corr16], para LTE, a sensibilidade pode calcular-se de acordo com (3.4). Foi tomado o valor de $M_I = 1$ dB, visto que a interferência co-canal é mínima.

$$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]} = P_{N\ [\mathrm{dBm}]} + M_{I\ [\mathrm{dB}]} + \rho_{N\ [\mathrm{dB}]} \tag{3.4}$$

onde:

- M_I: margem de interferência, com $M_I \in [1{,}3]$ dB
- P_N : potência de ruído
- ρ_N: relação sinal-ruído

A potência média de ruído, segundo [Corr16], pode ser determinada através de:

$$P_{\mathrm{N}\ [\mathrm{dBm}]} = -174 + 10\log\left(\Delta f_{\ [\mathrm{Hz}]}\right) + F_{\ [\mathrm{dB}]} \tag{3.5}$$

onde:

- Δf: LB do sinal, onde $\Delta f = N_{sub} \cdot 15\ \mathrm{kHz}$
- F : fator de ruído no recetor, com $F \in [6, 11]$ dB

A relação sinal-ruído, ρ_N, é obtida a partir de (3.6). Os valores de $R_{b\ ref}, A$ e c apresentam-se na Tabela 3.6. Foi escolhida a modulação mais baixa, porque se pretende calcular a atenuação para a maior distância, onde as condições são as mais desfavoráveis e, por isso, a SNR é mais baixa. Através

de $R_{\mathrm{b\ ref}}/A$ obtém-se o débito binário máximo de um RB. Contudo, no serviço de vídeo é necessário uma SNR maior, e o ritmo mínimo do serviço (500 kb/s) é superior ao ritmo máximo suportado por um RB na modulação QPSK (380 kb/s), logo usou-se a modulação de 16-QAM.

$$R_b\left(\rho_{N\,[\mathrm{dB}]}\right) = \frac{R_{b\,ref}}{A + e^{-c\cdot\rho_N}} \Leftrightarrow \rho_{N[\mathrm{dB}]} = -\frac{1}{c}\cdot ln\left(\frac{R_{b\,ref}}{R_b} - A\right) \tag{3.6}$$

onde:

- R_b : débito binário de um RB
- $R_{b\,ref}$: débito binário de referência
- A, c: parâmetros para obter ρ_N

Tabela 3.6. Valores para obter a SNR consoante a modulação [Corr16].

	$R_{b\,ref\,[\mathrm{kb/s}]}$	A	$c\ [\mathrm{dB}^{-1}]$
4-PSK	173,4	0,4555	0,3254
16-QAM	138,7	0,1229	0,2586

No que diz respeito ao modelo *Weissberger* que é usado em zonas com vegetação, as perdas de propagação devem-se à folhagem onde os sinais caem exponencialmente. Desta forma, aplicou-se este modelo a cenários caracterizados por ambientes rurais. O modelo é definido por (3.7), sendo válido dentro dos parâmetros seguintes:

- $f_{[\mathrm{MHz}]} \in [230;\ 95\,000]$: frequência de sinal da onda portadora
- $d_{[\mathrm{m}]} \in\ ]0, 400]$: distância horizontal entre o emissor e o recetor

$$L_{p\,[\mathrm{dB}]} = \begin{cases} L_0 + 0{,}063\cdot f^{0{,}284}{}_{[\mathrm{MHz}]}\cdot d_{\,[\mathrm{m}]} & ,0 < d_{\,[\mathrm{m}]} \leq 14 \\ L_0 + 0{,}187\cdot f^{0{,}284}{}_{[\mathrm{MHz}]}\cdot d^{0{,}588}{}_{\,[\mathrm{m}]} & ,14 < d_{\,[\mathrm{m}]} \leq 400 \end{cases} \tag{3.7}$$

Em ambientes exteriores, para o cálculo da cobertura teve-se em consideração cada uma das frequências em estudo, o tipo de ambiente, o modelo usado e os parâmetros das Tabelas 3.3. e 3.4. Os valores finais da cobertura apresentados na Tabela 3.7 foram obtidos de acordo com (2.3) e com o auxílio da função de *Lambert* na resolução de equações onde a distância dependia da função logarítmica. Os valores da distância máxima apresentados foram calculados para uma potência de transmissão de 23 dBm e arredondados por defeito por forma a garantir a cobertura, ou seja, tendo em conta o pior caso. Os valores que se apresentam a vermelho, na Tabela 3.7, são aqueles que estão abaixo dos 400 m que é necessário garantir. Tendo em consideração que o modelo ITM (Anexo B) não apresenta uma expressão para o cálculo da atenuação da propagação das ondas de rádio em ambientes de tipo suburbano e, por consequência, não é possível determinar a cobertura, de forma exata, foi calculada a média entre os valores da distância máxima obtida para ambientes urbanos e a respetiva distância obtida para ambientes rurais.

Como mostra a Tabela 3.7, em comparação com todos os serviços, foi obtida a menor cobertura para

o valor de 77 m, no serviço de *streaming* de vídeo (em ambiente urbano, 1682 MHz, sem linha de vista (NLoS)). Para que a distância máxima atingida fosse de 400 m, a potência de transmissão máxima, para este serviço seria de 71,66 dBm (14 kW), o que não faz qualquer sentido pois é muito elevado, logo, com este exemplo, verifica-se que existirão limitações de distância difíceis de ultrapassar.

Tabela 3.7. Cobertura em ambientes exteriores por comunicação direta entre emissor e recetor.

		R_{max} [m]			
Serviços		**VoIP (8 kb/s)**	**Correio Eletrónico (10 kb/s)**	**Partilha de ficheiros ou M2M (200 kb/s)**	***Streaming* de vídeo (500 kb/s)**
f [MHz]		**Ambiente Urbano**			
64		23 000	21 000	6 000	3 000
890	LoS	11 000	10 000	3 000	2 000
	NLoS	232	226	143	119
1682	LoS	6 000	6 000	2 000	1 000
	NLoS	155	150	94	77
		Ambiente Suburbano			
64		39 000	36 000	9 000	6 000
890	LoS	11 000	10 000	3 000	2 000
	NLoS	497	482	291	238
1682	LoS	6 000	6 000	2 000	1 000
	NLoS	317	308	184	150
		Ambiente Rural			
64		62 000	57 000	15 000	9 000
890		420	412	289	247
1682		284	279	193	164

Por outro lado, foram obtidos valores de distância máxima da ordem dos quilómetros, o que significa que não existem problemas de cobertura. Considerando uma distância superior a 400 m, os serviços de voz e correio eletrónico são os que alcançam a maior e menor distâncias, respetivamente, 62 km e 412 m, em ambiente rural. Enquanto que para o serviço de voz é apenas necessária uma potência inferior a 1 dBm (< 1,25 mW), para o serviço de correio eletrónico é necessário 22,20 dBm (166 mW).

Assim, a potência de transmissão utilizada pode diminuir para cada serviço e ao utilizar menos potência de transmissão o gasto das baterias dos equipamentos rádio é menor, o que é um fator de preocupação nas comunicações num pelotão de infantaria. Contudo, 1 dBm não é suficiente para garantir os 400 m para todos os serviços, portanto, a Tabela 3.8 apresenta as potências mínimas para cada serviço.

Tabela 3.8. Potência mínima para cada serviço.

		$P_{t\,min}$ [dBm]			
Serviços		**VoIP (8 kb/s)**	**Correio Eletrónico (10 kb/s)**	**Partilha de ficheiros ou M2M (200 kb/s)**	***Streaming* de vídeo (500 kb/s)**
f [MHz]		**Ambiente Urbano**			
64		< 1	< 1	< 1	3,01
890	LoS	< 1	< 1	< 1	2,01
	NLoS	> 23	> 23	> 23	> 23
1682	LoS	< 1	< 1	3,20	7,50
	NLoS	> 23	> 23	> 23	> 23
		Ambiente Suburbano			
64		< 1	< 1	< 1	2,00
890	LoS	< 1	< 1	< 1	2,01
	NLoS	19,90	20,60	> 23	> 23
1682	LoS	< 1	< 1	3,2	7,50
	NLoS	> 23	> 23	> 23	> 23
		Ambiente Rural			
64		< 1	< 1	< 1	< 1
890		21,30	21,95	> 23	> 23
1682		> 23	> 23	> 23	> 23

Os valores a azul da Tabela 3.8 coincidem com os valores da Tabela 3.7 que são da ordem dos quilómetros e que exigem uma potência muito reduzida, enquanto que os valores de potência a vermelho correspondem aos valores da Tabela 3.7 cujas distâncias são inferiores aos 400 m e com os quais existem problemas de cobertura.

No que diz respeito à propagação em interior de edifícios, o modelo utilizado definido pela

recomendação ITU-R P.1238-8 assume que os TMs estão localizados dentro do edifício, considerando as perdas entre os vários pisos e, desta forma, a atenuação é dada de acordo com:

$$L_{p\ int\ [\mathrm{dB}]} = 20 \cdot log_{10}\left(f_{[\mathrm{MHz}]}\right) + C_p \cdot log_{10}\left(d_{[\mathrm{m}]}\right) + L_{f\,[\mathrm{dB}]}(k) - 28 \tag{3.8}$$

onde:

- f: frequência
- C_p: coeficiente de perdas de percurso
- d: distância entre os TMs, onde $d > 1\ \mathrm{m}$
- L_f: perdas de penetração dos pisos
- k: número de pisos entre os TMs, onde $k\ \geq 0$

O coeficiente de perdas indicado na Tabela 3.9, inclui uma tolerância implícita para a transmissão através de paredes e obstáculos. A Tabela 3.10. apresenta as perdas de penetração dos pisos. Em ambas as Tabelas 3.9 e 3.10, os valores obtidos para 64 MHz e 1682 MHz foram extrapolados a partir dos dados que a ITU-R define para o espaço de "escritório".

Tabela 3.9. Coeficiente de perda de potência, C_p (Adaptado de [ITUR17]).

Frequência [MHz]	C_p
64	35
890	33
1682	31

Tabela 3.10. Perdas de penetração dos pisos, $L_{f\ [\mathrm{dB}]}$ (Adaptado de [ITUR17]).

Ambiente	$L_{f\ [\mathrm{dB}]}$		
	f **[MHz]**		
	64	**890**	**1682**
Piso térreo	0	0	0
1 piso	4	9	14
2 pisos	17	19	21
3 pisos	25	24	23

Desta forma, de acordo com (2.3), obteve-se a cobertura dentro de um edifício genérico com 3 pisos (valor que foi tomado como referência), apresentando-se os resultados na Tabela 3.11. Para 64 MHz, os valores apresentados correspondem ao uso da antena VHF-LB com um ganho de -6 dBi, enquanto para as restantes frequências, foi usada a antena LTE *Wearable* BW-700-3000 com um ganho de 3 dBi.

Os cálculos foram efetuados com uma potência de transmissão de 23 dBm. Se fosse usada apenas uma potência de transmissão de 1 dBm a cobertura mínima, para o serviço de *streaming* de vídeo, seria de 2,50 m e a cobertura máxima, correspondente ao serviço de voz seria de 42 m.

Tabela 3.11. Cobertura em interior de edifícios (3 pisos).

R_{max} [m]	**Serviços**			
f **[MHz]**	**VoIP (8 kb/s)**	**Correio Eletrónico (10 kb/s)**	**Partilha de ficheiros ou M2M (200 kb/s)**	***Streaming* de vídeo (500 kb/s)**
64	166	158	74	55
890	172	164	74	54
1682	172	163	70	50

3.5 Cálculo da capacidade

Nesta secção é apresentado o cálculo da capacidade para os ambientes exteriores e interiores.

Em todos os sistemas de comunicação, e como proposto originalmente por *Claude Shannon* (curva a preto da Figura 3.12), o débito binário máximo possível, livre de erros, para uma rede LTE, é uma função da LB e do valor da SNR. O ritmo de transmissão de um RB está associado à modulação e à SNR [ANTE14]. Como mostra a Figura 3.12, um débito binário maior requer um tipo de modulação superior, contudo é necessário haver potência disponível para tal, visto que uma potência de transmissão maior requer maior utilização da bateria dos TMs e este facto pode ser condicionante em determinados momentos das operações. Assim, a capacidade depende da SNR que, por sua vez, depende da distância.

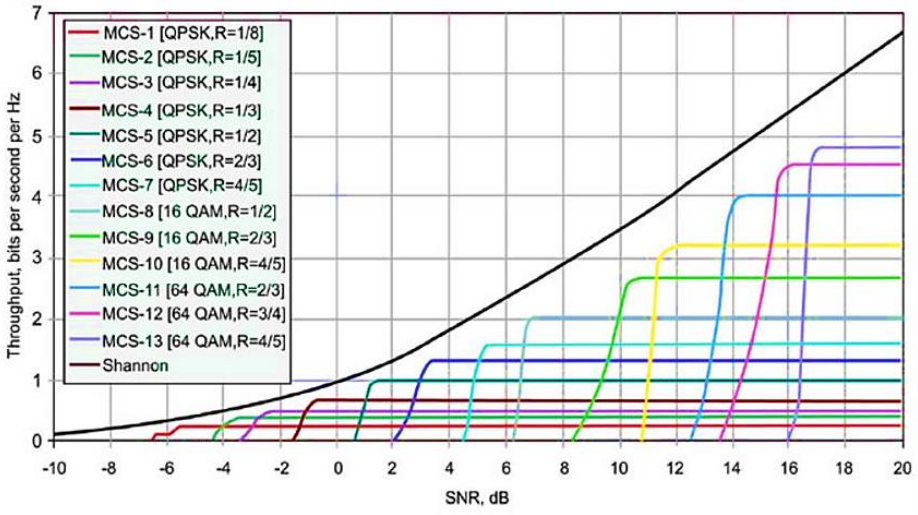


Figura 3.12. Relação do débito binário com a SNR (Extraído de [ANTE14]).

Para efetuar o cálculo da capacidade, recorreu-se à expressão (2.2) e os valores obtidos para cada uma das frequências em estudo, consoante o serviço requerido, apresenta-se na Tabela 3.12. Foram escolhidos os ritmos de transmissão médio e máximo dos serviços para se obter o número máximo de militares que podem ser abrangidos pela capacidade do sistema. Para o serviço M2M apenas se utilizou o ritmo médio, segundo a Tabela 2.6.

Tabela 3.12. Número de militares que podem comunicar voz e dados.

Serviço	**Ritmo de transmissão [kb/s]**	***f*=64 MHz**	***f*=890 MHz**	***f*=1682 MHz**	**Modulação**	**# RBs**
VoIP	32	1 470	1 260	3 150	QPSK	1
	64	735	630	1 575		1
Correio Eletrónico	100	470	403	1 008	QPSK	2
	1 333	70	60	151	16-QAM	15
M2M	200	235	201	504	QPSK	4
Partilha de Ficheiros	1 600	58	50		16-QAM	17
	4 444	21	18	45	16-QAM	
		31	27		64-QAM	
***Streaming* de Vídeo**	5 000	18	16	40	16-QAM	
		28	24		64-QAM	
	10 000	9	8	20	16-QAM	
		14	12	30	64-QAM	

Genericamente, um pelotão é constituído por 30 militares, sendo este valor tomado como referência para o número mínimo a obter no cálculo da capacidade. Quando este número foi alcançado (ou ultrapassado) não se recorreu a uma modulação superior, pois já se tinha atingido o objetivo (daí a existência de espaços em branco na Tabela 3.12). Sempre que o valor obtido da capacidade foi inferior a 30, aumentou-se a modulação até ser possível obter maior capacidade. Ainda assim, verificou-se que, para os serviços de partilha de ficheiros e de *streaming* de vídeo, a capacidade não foi totalmente alcançada. No caso do último serviço, quer para o ritmo médio quer para o máximo, com uma modulação de 64-QAM, não se consegue abranger os 30 militares para todas as frequências, sendo o caso mais crítico para o último serviço onde apenas são abrangidos 12 militares. Para 1682 MHz, a

capacidade apresenta sempre os valores mais altos, visto que das três frequências, esta é a que possui uma LB maior, Tabela 3.3. Na Tabela 3.12, na coluna “RBs”, foi inserido o número mínimo de RBs necessários para abranger os 30 militares, sem, necessariamente, se usar toda a LB disponível.

3.6 Rede *ad hoc* com retransmissão

Nesta secção é apresentada a rede *ad hoc* através da qual os militares irão comunicar, considerando os serviços que têm à sua disposição e a cobertura e a capacidade calculadas nas secções anteriores.

Do ponto de vista da arquitetura de rede e da interface rádio, a questão das redes *ad hoc* pode ser abordada no que diz respeito à existência ou não de regeneração do sinal. Os nós de retransmissão da rede funcionam como repetidores que realizam a amplificação de sinais, ou seja, são os responsáveis por retransmitir o sinal e, desta forma, prolongar a dimensão da rede. O repetidor atua na camada física do Modelo OSI onde recebe os pacotes e os retransmite sem realizar qualquer outro tipo de tratamento de dados sobre os mesmos a não ser o da amplificação do sinal. Desta forma, não existe regeneração do sinal, ou seja, a configuração da rede é passiva e os seus repetidores também. Os nós apenas amplificam e encaminham o sinal recebido, com um consumo reduzido de potência.

Por outro lado, os repetidores também podem desempenhar outras funções para além da amplificação como a descodificação, a deteção de colisão num segmento e a sinalização da ocorrência da mesma noutros segmentos. Estas ações fazem parte de uma rede *ad hoc* com configuração ativa, onde existe maior consumo de potência [MeRe13].

As tecnologias têm de ser ajustadas às necessidades e a principal preocupação de um pelotão de infantaria na utilização do sistema LTE-A MCC, num TO, não será, certamente, como é que o sistema funciona, mas apenas confiar que este está operacional e pronto a funcionar, ou seja, as comunicações são um suporte fundamental e devem ser o mais transparente possível para os militares.

No caso particular desta Dissertação onde é analisado um pelotão de infantaria, a opção escolhida é a de ausência de regeneração do sinal pois é aquela que exige menos potência, visto que a bateria dos TMs é uma preocupação dentro do pelotão. Na Figura 3.13. apresenta-se o fluxograma com a sequência de passos do processo que permite aferir a comunicação do pelotão na rede *ad hoc*.

Para garantir a comunicação é necessário que a potência recebida no nó seguinte seja suficiente para permitir a continuidade da transmissão de voz ou dados, ou seja, a potência recebida tem de ser superior ou igual à sensibilidade do recetor. A partir de (3.1) deduz-se (3.9),

$$P_{r\,[\mathrm{dBm}]} = P_{t\,[\mathrm{dBm}]} + G_{t\,[\mathrm{dBi}]} + G_{r\,[\mathrm{dBi}]} - L_{p\,[\mathrm{dB}]} \tag{3.9}$$

Na Figura 3.14 observa-se um esquema da comunicação dentro do pelotão e a respetiva ligação a uma viatura, que é apenas uma representação, pois não implica que os militares tenham de estar alinhados como na figura.

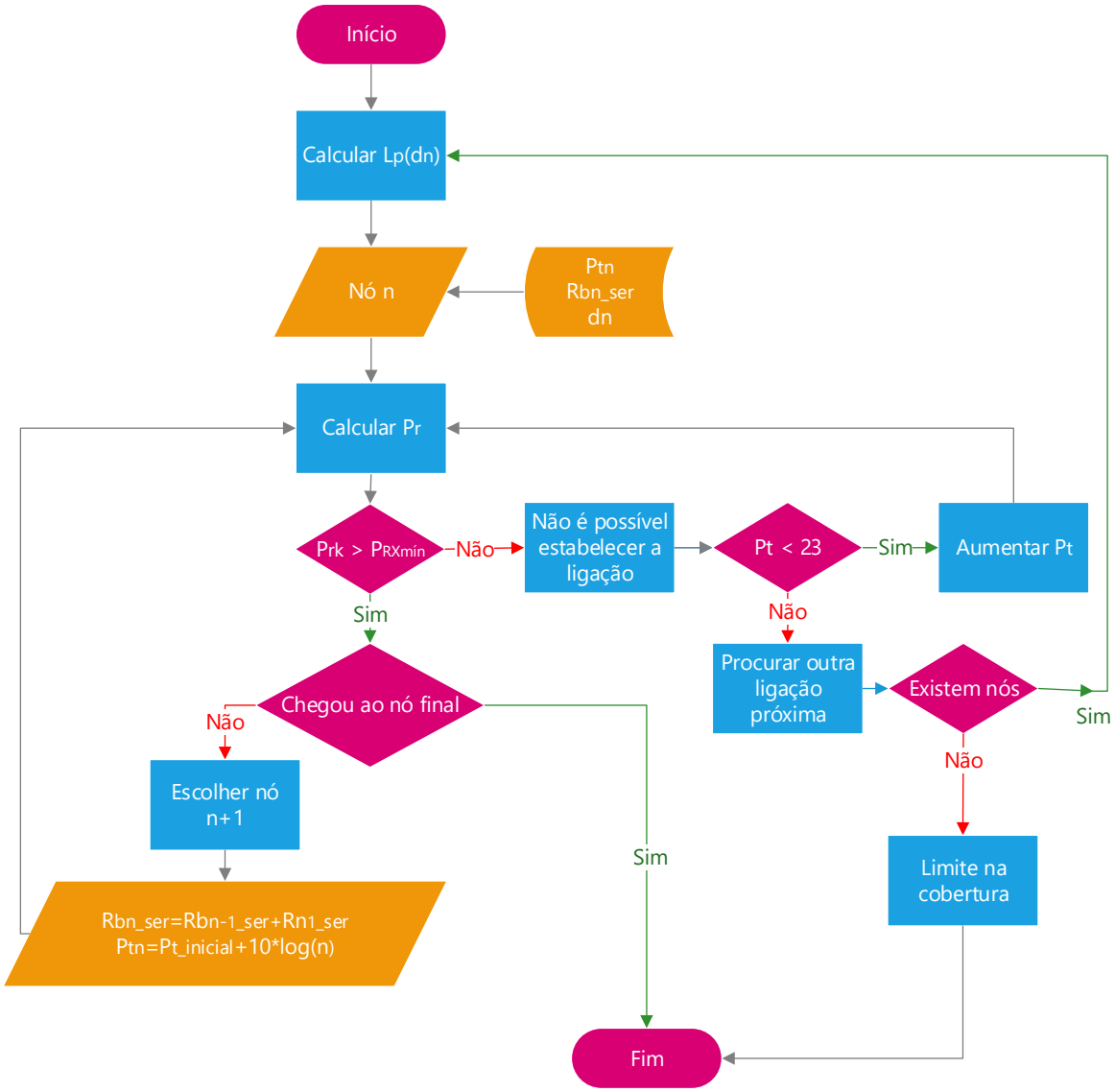


Figura 3.13. Fluxograma da comunicação na rede *ad hoc*.

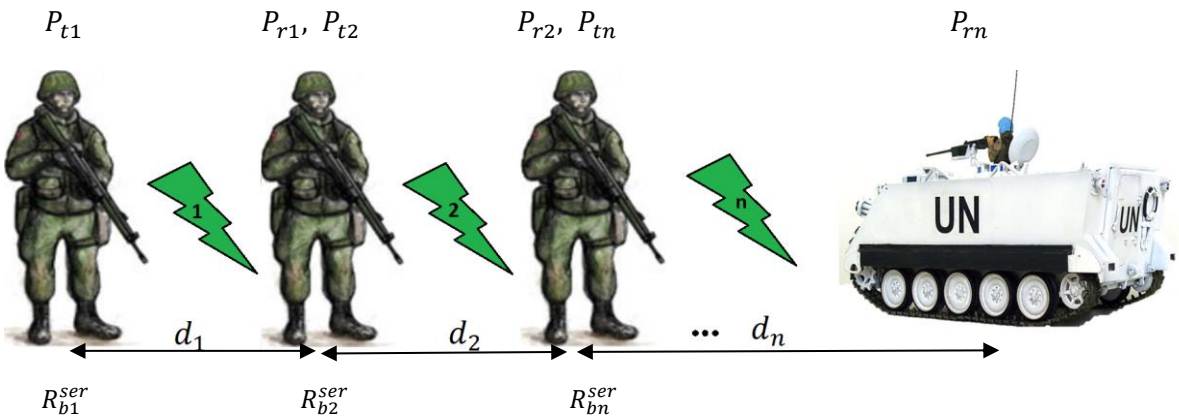


Figura 3.14. Comunicação do pelotão na rede *ad hoc* e ligação a uma viatura.

Com base na Figura 3.14 e a partir de (3.9) deduzem as várias potências recebidas nos diferentes nós constituintes da rede:

$$P_{rn\,[\mathrm{dBm}]} = P_{tn\,[\mathrm{dBm}]} + G_{tn\,[\mathrm{dBi}]} + G_{rn\,[\mathrm{dBi}]} - L_p(d_{n\,[\mathrm{km}]})_{[\mathrm{dB}]} \tag{3.10}$$

onde:

- 1, 2,…, n: ligações entre os militares
- $R^{ser}_{b1,2,\ldots,n}$: ritmo de transmissão do serviço utilizado
- $L_p(d_{1,2,\ldots,n})$: perdas de percurso associadas às ligações

Para além disso é necessário respeitar as seguintes condições:

$$P_{rn\,[\mathrm{dBm}]} \geq P_{RX\,mín\,[\mathrm{dBm}]} \tag{3.11}$$

$$R^{ser}_{bn\,[\mathrm{kb/s}]} \leq R^{RB}_{b\,[\mathrm{kb/s}]} \tag{3.12}$$

$$P_{tn\,[\mathrm{dBm}]} \leq P_{TX\,máx\,[\mathrm{dBm}]} \tag{3.13}$$

$$\begin{cases} P_{tn\,[\mathrm{dBm}]} = P_{t\,inicial\,[\mathrm{dBm}]} + 10 \cdot log_{10}(\#\mathrm{RBs}), & \text{se aumentar o número de RBs} \\ P_{tn\,[\mathrm{dBm}]} = P_{t\,n-1[\mathrm{dBm}]} + 0\ \mathrm{dBm}, & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{3.14}$$

$$R^{ser}_{b\,n\,[\mathrm{kb/s}]} = R^{ser}_{b\,n-1\,[\mathrm{kb/s}]} + R^{ser}_{b\,1\,[\mathrm{kb/s}]} \tag{3.15}$$

De seguida, foi escolhido um dos serviços – o serviço de partilha de ficheiros – e aplicado em três cenários-exemplo (urbano, rural e interior de edifícios), para fazer a aferição dos modelos descritos. Foi selecionado um ambiente urbano, com 1682 MHz, num cenário NLoS. Usaram-se os dados das Tabelas 3.1 e 3.2 respeitantes ao ambiente urbano e tomou-se por base o fluxograma da Figura 3.13. Tomou-se como exemplo o cenário da Figura 3.15 (as distâncias na figura não estão representadas à escala) e estabeleceu-se uma distância máxima de 400 m entre o militar mais afastado (A) e a viatura (B). Pretende-se que seja garantida a comunicação entre (A) e (B) e o serviço de partilha de ficheiros esteja disponível para todos os militares. Formularam-se três hipóteses:

1) Hipótese 1: Comunicação direta entre A e B (a preto):
   Calcularam-se as perdas de percurso associadas à distância máxima de 400 m para fazer a comunicação direta. Com um ritmo de 200 kb/s só é necessário 1 RB, visto que o débito binário máximo, por RB, numa modulação de QPSK, é de 380 kb/s. Usou-se a potência de transmissão máxima de 23 dBm, mas não foi possível estabelecer a ligação, visto que a potência recebida (-162,90 dBm) é inferior à sensibilidade (-107,72 dBm). Logo, a primeira hipótese foi refutada.
2) Hipótese 2: Comunicação com 2 saltos entre A e B (a cor de laranja):
   Dividiu-se a distância de 400 m em dois “saltos”. Calcularam-se as perdas de percurso para o primeiro “salto”, a uma distância de 180 m, com uma potência de transmissão máxima de 23 dBm e obteve-se uma potência recebida de -115,83 dBm. Este valor está abaixo da sensibilidade logo, a segunda hipótese foi refutada.

3) Hipótese 3: Comunicação com 5 saltos entre A e B (a verde):
Dividiu-se a distância de 400 m em cinco “saltos”. Calcularam-se as perdas de percurso para a distância de 90 m, com uma potência de transmissão de 14 dBm e obteve-se uma potência recebida de -107,34 dBm. Como o valor está acima da sensibilidade é possível estabelecer a ligação e continuou-se a comunicação para o salto seguinte. Para a segunda e terceira ligações usaram-se 2 RBs, visto que o ritmo de transmissão do serviço aumentou para 400 kb/s e 600 kb/s, respetivamente. No último “salto”, usaram-se 3 RBs, para o ritmo de 800 kb/s e o ganho de receção foi de 4 dBi, visto que o último “salto” é realizado para a viatura. Assim como o débito binário aumentou, também aumentou a potência de transmissão, pois é necessário transmitir dois, três e quatro sinais, respetivamente. Calcularam-se, de novo, as perdas de percurso para as ligações seguintes obtendo-se sempre valores acima da sensibilidade. A terceira hipótese foi confirmada.

Desta forma, a comunicação entre A e B teve sucesso com um mínimo de cinco “saltos”. Os cinco militares envolvidos na retransmissão de dados também tinham a possibilidade de comunicar de igual forma. Os resultados apresentam-se na Tabela 3.13.

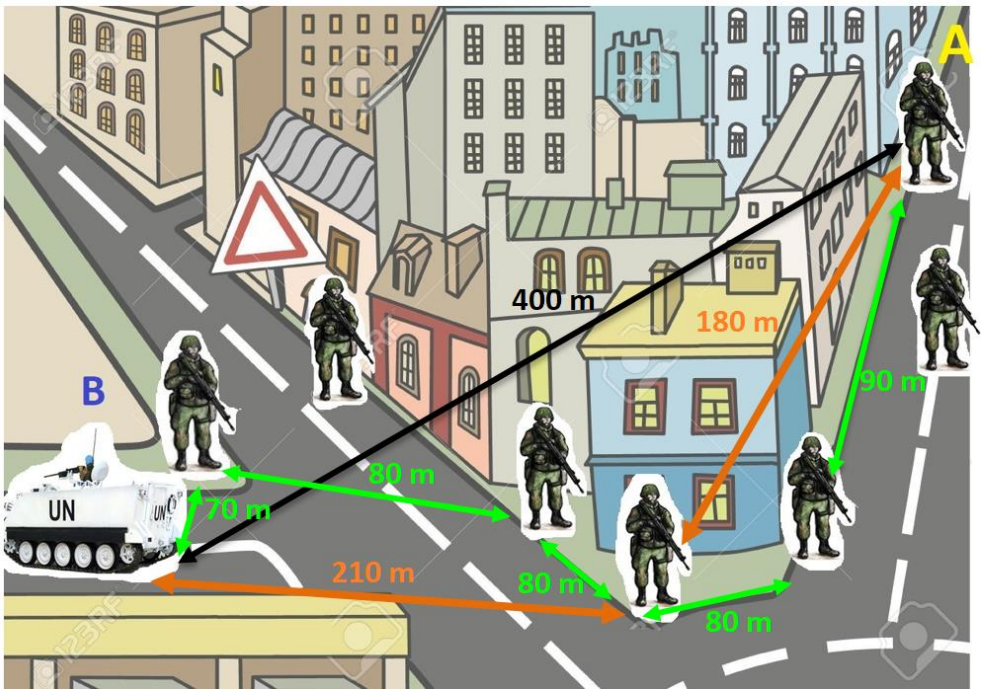


Figura 3.15. Comunicação na rede *ad hoc* em ambiente urbano (Adaptado de [123R17]).

O próximo cenário a analisar está descrito na Figura 3.16 (as distâncias na figura não estão representadas à escala) e trata um ambiente rural, em 64 MHz e, posteriormente, em1682 MHz. Usaram-se os dados das Tabelas 3.1, 3.2 e B.1 respeitantes ao ambiente rural. A partir da expressão (B.1) calculou-se a atenuação de percurso ao longo de 400 m. Com uma potência de transmissão de 1 dBm e para o ritmo de 200 kb/s obteve-se uma potência de receção de -69,0 dBm. Este valor está acima da sensibilidade calculada que foi de -107,72 dBm, para uma modulação de QPSK, logo, consegue-se estabelecer uma ligação direta entre ambos os militares.

Tabela 3.13. Resultados para o cenário do ambiente urbano.

<table>
<tr><th>Hipótese 1</th><th>Hipótese 2</th><th>Hipótese 3</th></tr>
<tr><td>$d\ [\mathrm{m}] = 400$</td><td>$d_1\ [\mathrm{m}] = 180$
$d_2\ [\mathrm{m}] = 210$</td><td>$d_1\ [\mathrm{m}] = 90$
$d_{2,3,4}\ [\mathrm{m}] = 80$
$d_5\ [\mathrm{m}] = 70$</td></tr>
<tr><td>$R_b^{ser}[\mathrm{kb/s}] = 200$</td><td>$R_{b1\ ser\ [\mathrm{kb/s}]} = 200$</td><td>$R_{b1}^{ser}[\mathrm{kb/s}] = 200$
$R_{b2}^{ser}[\mathrm{kb/s}] = 400$
$R_{b3}^{ser}[\mathrm{kb/s}] = 600$
$R_{b4}^{ser}[\mathrm{kb/s}] = 800$</td></tr>
<tr><td colspan="3">Modulação QPSK: $\rho_n = 2{,}729 \Rightarrow R_{b\ máx}^{RB}[\mathrm{kb/s}] = 380$</td></tr>
<tr><td colspan="2">#RBs usados = 1</td><td>#RBs usados = 1
#RBs usados = 2
#RBs usados = 2
#RBs usados = 3</td></tr>
<tr><td>$P_{t\ [\mathrm{dBm}]} = 23$</td><td>$P_{t1\ [\mathrm{dBm}]} = 23$</td><td>$P_{t1\ [\mathrm{dBm}]} = 14$
$P_{t2\ [\mathrm{dBm}]} = 17$
$P_{t3\ [\mathrm{dBm}]} = 17$
$P_{t4\ [\mathrm{dBm}]} = 22$</td></tr>
<tr><td colspan="3">$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]} = -107{,}72$</td></tr>
<tr><td>$P_{r\ [\mathrm{dBm}]} = -162{,}90$</td><td>$P_{r1\ [\mathrm{dBm}]} = -115{,}83$</td><td>$P_{r1\ [\mathrm{dBm}]} = -107{,}34$
$P_{r2\ [\mathrm{dBm}]} = -101{,}37$
$P_{r3\ [\mathrm{dBm}]} = -101{,}37$
$P_{r4\ [\mathrm{dBm}]} = -95{,}27$</td></tr>
</table>

Num cenário idêntico, para uma frequência de 1682 MHz, a comunicação apenas foi possível com dois “saltos” de 200 m cada um. Na segunda ligação foi necessário usar 2 RBs, visto que o ritmo aumentou para 400 kb/s, usou-se uma potência de 17 dBm e obteve-se uma potência recebida de -102,73 dBm (valor igualmente superior a -107,72 dBm).

O último cenário, representado na Figura 3.17, retrata a comunicação do serviço partilha de ficheiros em interiores de edifícios. Foi escolhida uma casa com 2 andares e pretende-se estabelecer a ligação entre dois militares a 20 m de distância, em pisos diferentes, em 1682 MHz. Usou-se uma potência de transmissão de 1 dBm, para um ritmo de 200 kb/s e uma modulação de QPSK, onde foi apenas usado 1 RB. Com base em (3.8) e nas Tabelas 3.9 e 3.10 foi obtida a potência de receção de -100,85 dBm, valor superior à sensibilidade de -107,72 dBm.

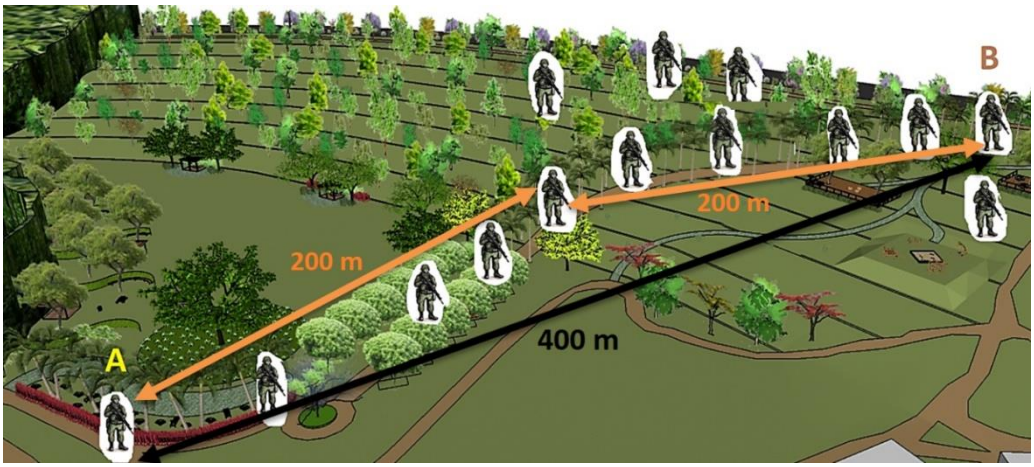


Figura 3.16. Comunicação na rede *ad hoc* em ambiente rural (Adaptado de [PINI12]).

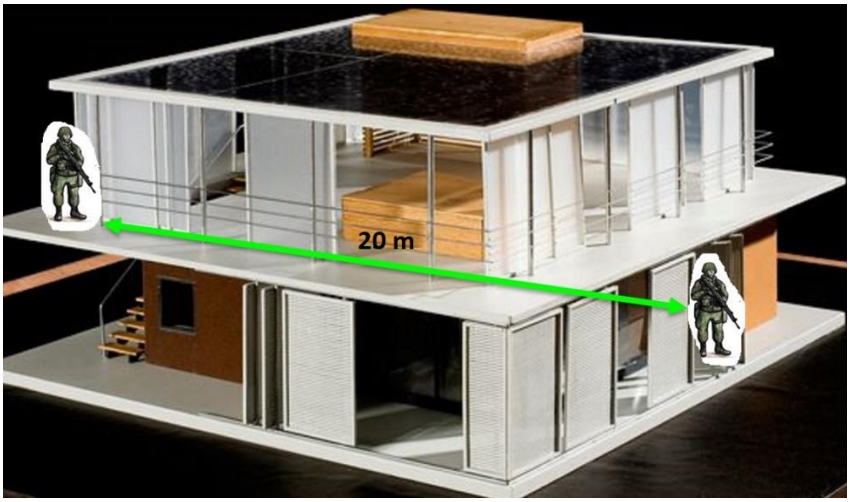


Figura 3.17. Comunicação no interior de uma habitação (Adaptado de [PINI12]).

Capítulo 4

Análise de Resultados

Este capítulo apresenta como caso de estudo o TO na RCA, em 2017. A abordagem da rede *ad hoc* com retransmissão e os respetivos cálculos da cobertura e capacidade são aplicados num cenário real, nos quatro tipos de ambiente: urbano, suburbano, rural e interior de edifícios. São analisados os dois serviços críticos, no que diz respeito ao débito binário, ou seja, o serviço de voz com o débito de 8 kb/s e o serviço de *streaming* de vídeo com 500 kb/s, ambos débitos mínimos. São apresentadas as modulações usadas, a potência de emissão e receção, a sensibilidade, assim como o número de RBs que limita o número de “saltos” que é possível realizar na rede *ad hoc* dentro do pelotão.

4.1 Cenário real: a RCA

Esta secção apresenta, de forma sucinta, uma descrição sobre o cenário real que foi analisado e onde a 1ª Força Nacional Destacada/MINUSCA (1FND/MINUSCA) executa várias operações militares.

A RCA, apresentada nas Figuras 4.1 e 4.2, é uma ex-colónia francesa, situada no coração de África. Tornou-se uma república dentro da Comunidade Francesa e totalmente independente em 1960. É um país afetado por problemas políticos, religiosos e por catástrofes naturais. Os golpes de estado e as guerras civis sucedem-se desde 1960, o ano da independência. Em março de 2013, a coligação de rebeldes muçulmanos *Seleka* conquistou o poder na capital *Bangui* e a partir de então começaram os conflitos no interior do país [YOUT17]. Apesar das suas riquezas naturais, como o ouro, os diamantes, o ferro, o urânio, o petróleo e o café, a existência de terra fértil e água com abundância, é um país pobre, pois as rendas provenientes do turismo não cobrem o seu défice comercial. Não tem saída para o mar nem uma rede de caminhos de ferro e tem poucas estradas. Só os rios que atravessam o país permitem que pessoas e mercadorias viajem de uns locais para os outros [WIKI17a].

Figura 4.1. Bandeira da RCA (Extraído de [WIKI17a]).

Figura 4.2. Localização da RCA (Extraído de [OPER17]).

Bangui é a maior cidade da RCA (Figura 4.3), com população estimada, em 2012, de 734 350 habitantes. Situa-se a sudoeste do país, na margem norte do rio *Ubangui*. A cidade é cercada por espessas florestas tropicais nas margens do rio. Bangui tem sido uma região alvo de intensa atividade rebelde e de destruição. Serve como centro comercial e administrativo do país, pois é a sede da Assembleia Nacional, edifícios governamentais, bancos, empresas estrangeiras e embaixadas. Os habitantes dos subúrbios de *Bangui* vivem em casas conhecidas como *Kodros*, que são feitas de tijolos de barro com telhado de palha [CIDA17].

Figura 4.3. *Bangui* (Extraído de [CIDA17]).

A abordagem dos cenários foi feita em relação aos dois casos extremos relativamente ao débito binário: serviços de voz e de *streaming* de vídeo para 64 MHz, 890 MHz e 1682 MHz. Estabeleceu-se um cenário com 30 militares numa rua da cidade de Bangui com o objetivo de o serviço estar disponível no pelotão e, por fim, transmitir a informação para o escalão superior com recurso a uma viatura que se encontra imediatamente a seguir ao pelotão. Este cenário foi, assim, aplicado ao ambiente urbano.

No que diz respeito ao ambiente suburbano, *Bambari* é a segunda maior cidade do país, Figura 4.4, onde se localiza o aeroporto de *Bambari* e a Diocese Católica Romana. É uma região onde existem depósitos de minério de ferro [WIKI17b]. O cenário analisado é igual ao do ambiente urbano já descrito.

Figura 4.4. *Bambari* (Extraído de [1FND17]).

Relativamente ao ambiente rural, utilizou-se a região do *Gongo* localizada a sudeste de *Bambari*, numa das catorze províncias da RCA, denominada *Basse-Kotto* [1FND17]. Estabeleceu-se um cenário com 30 militares que atravessam uma região do Gongo, Figura 4.5, e cujo objetivo é garantir a disponibilidade dos serviços de voz e *streaming* de vídeo dentro do pelotão e, posteriormente, para a viatura mais próxima que os acompanha. Na Tabela 4.1 apresentam-se os dados utilizados para a análise dos ambientes exteriores e na Tabela 4.2 as características específicas de cada ambiente.

Figura 4.5. *Gongo* (Extraído de [1FND17]).

Tabela 4.1. Parâmetros utilizados nos ambientes exteriores.

Parâmetro	Unidades	Valor
f	[MHz]	64, 890, 1682
h_m	[m]	1,8
$P_{t\ inicial}$	[dBm]	1
$G_t = G_r$	[dBi]	-6 ou 3
	[dBi]	4 (viatura)
L_u	[dB]	10
M_I	[dB]	1

Parâmetro	Unidades	Valor
A		0,4555
$R_{b\ ref}$	[kb/s]	173,4
c	[dB^{-1}]	0,3254
F		10
Δf	[kHz]	180
$R_{b\ min}^{voz}$	[kb/s]	8
$R_{b\ min}^{vídeo}$	[kb/s]	500

Tabela 4.2. Características dos ambientes (Extraído de [1FND17]).

Bangui	***Bambari***	***Gongo***	**Interior de edifícios**
$w_B[\mathrm{m}] = 25$	$w_B[\mathrm{m}] = 20$	$L_V\ [\mathrm{dB}] = 6$	$k = 0$
$H_B[\mathrm{m}] = 15$	$H_B[\mathrm{m}] = 4$		$L_f\ [\mathrm{dB}] = 0$
$w_s[\mathrm{m}] = 10$	$w_s[\mathrm{m}] = 8$		

No que diz respeito aos ambientes interiores, para a análise da transmissão dos dois serviços, selecionou-se uma habitação típica da RCA. Como é de esperar, não há necessidade do pelotão todo entrar na habitação, por isso, considerou-se que, no máximo, 3 militares entram na casa. A habitação tem 1 andar e pretende-se garantir, em primeiro lugar, a ligação entre os dois militares mais afastados a uma distância de 20 m. Os dados utilizados estão expressos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Parâmetros utilizados no ambiente interior.

Parâmetro	Unidades	Valor		
f	[MHz]	64	890	1682
P_t	[dBm]	1		
d	[m]	20		
n		0		
N		35	33	31
L_f	[dB]	0		

4.2 Ambiente Urbano – *Bangui*

Nesta secção é apresentado um ambiente urbano da RCA, caracterizado pela cidade de *Bangui*.

4.2.1 Serviço de voz

Começando por analisar o serviço de voz, para 64 MHz, usou-se o modelo ITM (Anexo B). Primeiro, fez-se a comunicação direta entre o militar mais afastado da viatura e a própria, portanto, num cenário NLoS, para uma distância de 400 m, onde apenas ele transmite. Foi possível estabelecer a ligação, visto que a potência recebida era superior à sensibilidade, como se apresenta na Tabela 4.4. Desta forma, se ele é o que está mais afastado, então todos os militares individualmente conseguem comunicar diretamente para a viatura.

Tabela 4.4. Cenário NLoS, em QPSK.

Comunicação direta	**NLoS** ($d_{[\mathrm{m}]} = 400$)		
$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	74,25	134,06	143,17
$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-85,08	-136,06	-145,17
$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}$	-119,84		

De seguida, recorreu-se à comunicação com retransmissão para garantir que o serviço está disponível para todos os militares onde se estabeleceu a distância de 14 m entre militares, agora sim num cenário

com LoS. Nesta situação, mais do que um militar pode comunicar, havendo a transmissão de vários sinais. Supondo que os militares se deslocam apeados à distância de 14 m entre cada um até à viatura, portanto, numa situação de LoS, perfazendo um total de 420 m, calculou-se a atenuação de percurso para cada "salto" através de (A.3), (B.1) e (B.2).

No 1º "salto", usou-se uma potência de transmissão de 1 dBm, 1 RB e a modulação de QPSK. Com base em (3.9), calculou-se a potência recebida no 2º nó. De seguida, segundo (3.4), (3.5) e (3.6) calculou-se a sensibilidade para verificar que a potência recebida está acima da mesma e é possível continuar a comunicação. No 2º "salto", procedeu-se de igual forma ao anterior, com a exceção de que o ritmo de transmissão do serviço de voz aumentou para 16 kb/s, visto que ao sinal de voz que será transmitido do 2º nó se acrescenta, também, o sinal de voz a transmitir do 1º nó. Desta forma, o valor da SNR aumenta e, consequentemente, aumenta o valor da sensibilidade para -117,64 dBm. Como a distância entre homens é igual e os ganhos se mantêm até ao 29º "salto", a potência de receção é sempre a mesma ao longo de 29 "saltos" e igual à do primeiro. No 30º "salto", do último militar para a viatura, o ritmo de transmissão do serviço é de 240 kb/s, a sensibilidade é de -106,39 dBm e a potência de receção é de -56,08 dBm, logo a comunicação foi efetuada com sucesso. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.4.

Para 890 MHz e 1682 MHz, usou-se o modelo COST 231 *Walfish-Ikegami* (Anexo A) para o mesmo cenário descrito anteriormente, sendo de acrescentar o facto de poder haver LoS ou não. Na Tabela 4.2 são apresentados os parâmetros típicos que caracterizam uma rua de *Bangui*, e na Figura 4.6 estão representados alguns deles. É de notar que a distância representada por w_B deveria terminar no centro do edifício mais à direita na fotografia, mas como este não foi captado representou-se apenas assim.

Figura 4.6. Rua da cidade de *Bangui* (Adaptado de [1FND17]).

Primeiro, fez-se a comunicação direta entre o militar mais afastado da viatura e a própria, num cenário NLoS, para uma distância de 400 m. Não foi possível estabelecer a ligação, pois a potência recebida era inferior à sensibilidade (valores a vermelho da Tabela 4.4). Logo, recorreu-se à comunicação com retransmissão onde se estabeleceu a distância de 14 m entre militares, num cenário LoS.

Calcularam-se as perdas de percurso para uma distância de 14 m segundo (A.1)–(A.6) e, posteriormente, a potência recebida e a sensibilidade. Para todos os casos houve sucesso com apenas uma potência de transmissão de 1 dBm. O valor da sensibilidade aumenta ao longo do número de

“saltos”, sendo apenas apresentado na Tabela o valor mínimo (o do 1º “salto”) e o máximo (o do 30º “salto”). Para a comunicação de voz não houve problemas, visto que todos os militares conseguem usar o serviço e alcançar o mínimo de 420 m. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Resultados do serviço de voz, em QPSK.

Comunicação com retransmissão	**Q-PSK**	**LoS** ($d_{[\mathrm{m}]} = 14$)		
“salto”	$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
1º – 30º	$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	45,08	53,39	58,92
1º – 29º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-66,08	-56,39	-61,92
1º	$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}^{1º\ salto}$	-119,84		
30º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-56,08	-55,39	-60,92
	$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}^{30º\ salto}$	-106,39		

4.2.2 Serviço de *streaming* de vídeo

Aplicou-se o mesmo cenário descrito na Secção 4.1 ao serviço de *streaming* de vídeo com o objetivo de tornar disponível a transmissão/receção de vídeo dentro do pelotão. O ritmo mínimo deste serviço é de 500 kb/s, portanto, para a modulação de QPSK, é necessário usar 2 RBs logo na primeira ligação. Segundo a Tabela 3.3, nas bandas de 64 MHz, 890 MHz e 1682 MHz existem 35, 30 e 75 RBs disponíveis, respetivamente. Assim, procedeu-se de igual forma à descrita na secção anterior para o cálculo das sucessivas potências recebidas. Na Tabela 4.6 apresenta-se o número de RBs usados na comunicação na rede e a respetiva potência de transmissão necessária em cada retransmissão.

Tabela 4.6. Número de RBs e potência de emissão usados (QPSK).

“Salto”	1	2	…	22	…	26	…	30
#RBs	2	3	…	29	…	35	…	40
$P_{t\ [\mathrm{dBm}]}$	4	8,77	…	18,62	…	19,44	…	20,02

Ao utilizar a modulação de QPSK, em 64 MHz, usaram-se os 35 RBs e a capacidade fica limitada ao 26º “salto”, ou seja, a 27 militares, o que perfaz uma distância máxima de 364 m. Em 890 MHz, usaram-se os 30 RBs até ao 22º “salto”, ou seja, a capacidade fica limitada a 23 militares, o que perfaz uma distância de 308 m. Desta forma, a comunicação é comprometida por falta de capacidade. Em 1682 MHz, consegue-se alcançar os 420 m com a utilização de 40 RBs, visto que existe capacidade suficiente. Apenas os resultados de interesse se apresentam na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Resultados do serviço de *streaming* de vídeo, em QPSK.

Comunicação com retransmissão	**QPSK**	**LoS** ($d_{[\mathrm{m}]} = 14$)		
"salto"	$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
1º – 30º	$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	45,08	53,39	58,92
	$P_{RX\ min\ [\mathrm{dBm}]}$	-88,59		
1º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-63,08	-53,39	-58,92
2º		-58,31	-48,62	-54,14
22º		-48,46	-37,77	-44,30
26º		-37,64	---	-43,47
30º		---	---	-41,91

Uma vez que o ritmo do serviço de *streaming* de vídeo é elevado, usou-se também a modulação 16-QAM no mesmo cenário, que tem um débito máximo de 1128 kb/s por RB, segundo (3.6). A Tabela 4.8 apresenta o número de RBs e a respetiva potência de transmissão usados com esta modulação.

Tabela 4.8. Número de RBs e potência de emissão usados (16-QAM).

"Salto"	1º, 2º	3º, 4º	…	28º, 29º	30º
#RBs	1	2	…	13	14
$P_{t\ [\mathrm{dBm}]}$	1	4	…	12,14	12,46

Ao utilizar a modulação de 16-QAM, em todas as frequências é possível alcançar a distância de 420 m pretendida. Para as três frequências foi possível estabelecer a ligação e transmitir vídeo, com uma modulação de 16-QAM, utilizando um máximo de 14 RBs. Apenas os resultados de interesse se apresentam na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Resultados do serviço de *streaming* de vídeo, em 16-QAM.

Comunicação com retransmissão	**16-QAM**	**LoS** ($d_{[\mathrm{m}]} = 14$)		
"salto"	$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
1º – 30º	$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	45,08	53,39	58,92
	$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}$	-103,23		
1º, 2º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-66,08	-56,39	-61,92
3º, 4º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-63,08	-53,39	-58,92
30º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-44,61	-43,93	-49,46

Das duas modulações usadas, a de 16-QAM é a mais favorável pois além de se conseguir atingir a distância pretendida, é usada menor potência de transmissão à custa de serem necessários menos RBs e o débito binário suportado ser maior.

4.3 Ambiente Suburbano – *Bambari*

Nesta secção é apresentado um ambiente suburbano da RCA, caracterizado pela cidade de *Bambari*.

4.3.1 Serviço de voz

Começando por analisar o serviço de voz, para 64 MHz, usou-se o modelo ITM (Anexo B). Como havia sido referido anteriormente, visto que este modelo não apresenta uma expressão para o cálculo da atenuação da propagação das ondas de rádio em ambientes de tipo suburbano e, por consequência, não é possível determinar a cobertura, de forma exata, foi calculada a média entre os valores da atenuação obtida para o ambiente urbano e para o rural, ambos para o serviço de voz. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Serviço de voz, cenário NLoS, em QPSK.

Comunicação direta	**NLoS** ($d_{[\mathrm{m}]} = 400$)		
$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	60,43	115,27	124,38
$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-71,43	-117,27	-126,38
$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}$	-119,84		

Para 890 MHz e 1682 MHz, usou-se o modelo COST 231 *Walfish-Ikegami* (Anexo A) para o mesmo cenário descrito anteriormente, sendo de salientar o facto de existirem situações de LoS ou NLoS.

Primeiro, fez-se a comunicação direta entre o militar mais afastado da viatura e a própria, num cenário NLoS, para uma distância de 400 m utilizando a modulação QPSK e uma potência de transmissão de 1 dBm. Contudo, para a frequência de 1682 MHz não é possível estabelecer a ligação, pois a potência recebida é inferior à sensibilidade (valor a vermelho da Tabela 4.10). Logo, recorreu-se à comunicação com retransmissão onde se estabeleceu a distância de 14 m entre militares, num cenário LoS, como mostra a Figura 4.7.

Figura 4.7. *Ngakobo*, vila de *Bambari* (Extraído de [1FND17]).

Calcularam-se as perdas de percurso para uma distância de 14 m segundo (A.1)–(A.6). A potência recebida mantém-se ao longo dos 30 “saltos”, visto que a atenuação em cada “salto” é a mesma, resultante da distância entre homens ser igual a 14 m e a potência de transmissão é de 1 dBm, pois o número de RBs é sempre igual a 1. Utilizou-se a modulação QPSK e a potência de receção é sempre superior à sensibilidade.

Os resultados são iguais ao do ambiente urbano e apresentam-se na Tabela 4.5, porque o modelo utilizado foi o mesmo e o cenário é, igual, em LoS, onde as características do ambiente não influenciam. Logo, há sucesso na comunicação entre o pelotão e a viatura.

4.3.2 Serviço de *streaming* de vídeo

Analisando agora o serviço de *streaming* de vídeo, como já foi referido, para 64 MHz, o modelo ITM não apresenta uma expressão específica para o cálculo da atenuação da propagação, procedeu-se de igual forma ao serviço de voz e calculou-se a média entre os dois ambientes urbano e rural. Os resultados encontram-se na Tabela 4.11.

Para 890 MHz e 1682 MHz, começou por se utilizar a modulação QPSK num cenário NLoS. Com base na Tabela 4.6, sabe-se qual a potência mínima necessária para fazer a comunicação entre o militar mais afastado e a viatura (a uma distância de 400 m). Neste caso foram necessários 2 RBs devido ao débito binário do serviço.

Calculou-se a potência recebida e esta está abaixo da sensibilidade, logo o militar mais afastado não consegue comunicar de forma direta com a viatura. Desta forma, para que todo o pelotão tenha acesso ao serviço procedeu-se ao cálculo das potências num cenário LoS. Os resultados, assim como as conclusões, são iguais aos apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.9.

Tabela 4.11. Serviço de *streaming* de vídeo, cenário NLoS, em QPSK.

Comunicação direta	**NLoS** ($d_{[\mathrm{m}]} = 400$)		
$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	60,43	115,27	124,38
$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-59,43	-114,27	-123,38
$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}$	-88,59		

4.4 Ambiente Rural – *Gongo*

Nesta secção será apresentado um ambiente rural da RCA, caracterizado pela região do *Gongo*.

4.4.1 Serviço de voz

Começando por analisar o serviço de voz e com base na Tabela 3.4, usou-se o modelo ITM (Anexo B), para 64 MHz. Foi analisada a região de *Mobaye*, pertencente à região do Gongo, que faz fronteira com a República Democrática do Congo. Como se observa na Figura 4.8 é uma região muito arborizada, portanto atribuiu-se ao fator de atenuação pela vegetação o valor de 6 dB, segundo a Tabela B.1.

Figura 4.8. *Mobaye* (Extraído de [1FND17]).

Recorrendo a (B.1), calculou-se a atenuação de percurso, para uma situação de NLoS, para uma distância de 400 m, onde se obtém sucesso na ligação como se pode observar na Tabela 4.12.

Tabela 4.12. Serviço de voz, cenário NLoS, em QPSK.

Comunicação direta	**NLoS** ($d_{[\mathrm{m}]} = 400$)		
$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	46,61	112,47	141,24
$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-57,60	-129,07	-143,24
$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}$	-119,84		

De seguida, recorreu-se à comunicação com retransmissão para garantir que o serviço está disponível para todos os militares onde se estabeleceu a distância de 14 m entre militares, num cenário com LoS. Supondo que os militares se deslocam apeados à distância de 14 m entre cada um até à viatura, calculou-se a atenuação de percurso para cada "salto". Conseguiu-se também, com sucesso, alcançar a distância desejada. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.13.

Para as frequências de 890 MHz e 1682 MHz utilizou-se o Modelo de *Weissberger*, onde foi aplicado o mesmo cenário e calculadas as respetivas potências.

Primeiro, foi analisado o cenário NLoS para a distância de 400 m e onde apenas o militar mais afastado transmite. A atenuação de percurso é dada por (3.7). Como se observa na Tabela 4.12 não é possível estabelecer a ligação nas frequências mais elevadas.

De seguida, fez-se a comunicação com retransmissão por forma a que todos os militares possam comunicar e utilizou-se (3.7), onde a distância entre homens é de 14 m e, portanto, há LoS. Foi utilizada a modulação QPSK. A Tabela 4.13 mostra os resultados de interesse e comprova que a comunicação tem sucesso.

Tabela 4.13. Resultados do serviço de voz, em QPSK.

Comunicação com retransmissão	**Q-PSK**	**LoS** ($d_{[\mathrm{m}]} = 14$)		
"salto"	$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
1º – 30º	$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	37,49	60,42	67,15
1º – 29º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-58,49	-63,42	-70,15
1º	$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}^{1º\ salto}$	-119,84		
30º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-48,49	-62,42	-69,15
	$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}^{30º\ salto}$	-106,39		

4.4.2 Serviço de *streaming* de vídeo

Aplicou-se o mesmo cenário descrito anteriormente, ao serviço de *streaming* de vídeo. Inicialmente usou-se a modulação QPSK, Tabela 4.14. Segundo a Tabela 3.3, na banda dos 64 MHz, 890 MHz e 1682 MHz existem 35, 30 e 75 RBs disponíveis, respetivamente. Assim, procedeu-se ao cálculo das potências recebidas. Na Tabela 4.6 apresenta-se o número de RBs usados e a respetiva potência de transmissão necessária. Desta forma, sucedeu o mesmo que nos cenários anteriores, visto que os resultados ficam limitados pelo número de RBs da modulação utilizada, ou seja, apenas há sucesso em 1682 MHz onde é alcançada a distância máxima. Nas frequências de 64 MHz e 890 MHz, a comunicação fica limitada por falta de capacidade, respetivamente, a 27 e 23 militares, nas condições descritas.

Tabela 4.14. Resultados do serviço de *streaming* de vídeo, em QPSK.

Comunicação com retransmissão	**QPSK**	**LoS** ($d_{[\mathrm{m}]} = 14$)		
"salto"	$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
1º – 30º	$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	37,49	60,42	67,15
	$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}$	-88,59		
1º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-55,49	-60,42	-67,15
2º		-50,72	-55,65	-62,38
22º		-40,87	-44,80	-52,53
26º		-30,05	---	-51,71
30º		---	---	-50,13

Visto que com a modulação QPSK não há total sucesso, usou-se a modulação 16-QAM. Esta modulação tem um débito máximo de 1128 kb/s por RB. Na Tabela 4.8 apresenta-se o número de RBs usados e a respetiva potência de transmissão utilizada. De igual forma, como nos ambientes anteriores, com a utilização da modulação de 16-QAM, em todas as frequências é possível alcançar a distância de 420 m pretendida, utilizando um máximo de 14 RBs. Apresentam-se os resultados na Tabela 4.15, de modo similar aos anteriores.

Tabela 4.15. Resultados do serviço de *streaming* de vídeo, em 16-QAM.

Comunicação com retransmissão	**16-QAM**	**LoS** ($d_{[\mathrm{m}]} = 14$)		
"salto"	$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
1º – 30º	$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	37,49	60,42	67,15
	$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}$	-103,23		
1º, 2º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-58,49	-63,42	-70,15
3º, 4º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-55,49	-60,42	-67,15
30º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-37,03	-50,96	-57,69

4.5 Ambientes interiores

Nesta secção são apresentados os resultados da análise de uma habitação típica de um ambiente suburbano ou rural da RCA, apenas com o piso térreo, como mostra a Figura 4.9. Foi analisada a comunicação de voz e o serviço de *streaming* de vídeo no interior da mesma.

Figura 4.9. Casa típica de regiões suburbanas e rurais, na RCA (Extraído de [1FND17]).

Para analisar o serviço de voz, usou-se o modelo definido pela recomendação ITU-R P.1238-8 definido na secção 3.2.2. Recorrendo a (3.8) e às Tabelas 3.9, 3.10 e 4.2, calculou-se a atenuação de percurso para as três frequências, para uma distância de 20 m entre os dois militares mais afastados e com uma potência de transmissão de 1 dBm. Para as três frequências obtém-se sucesso na comunicação sendo de realçar que a potência de receção alcançada é muito superior à sensibilidade.

Para analisar o serviço de *streaming* de vídeo foi utilizado o mesmo cenário e o mesmo modelo. Este serviço exige um débito mínimo de 500 kb/s, pelo que foi necessário utilizar 2 RBs e uma potência de transmissão de 4 dBm, segundo a Tabela 4.6. A atenuação de percurso é igual à da voz. Desta forma,

é obtido sucesso em ambas as situações podendo os dois militares comunicar entre si no interior da casa. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.16.

Tabela 4.16. Serviços de voz e streaming de vídeo, em QPSK.

Comunicação direta		$d = 20\ \mathrm{m}$		
$f_{[\mathrm{MHz}]}$		**64**	**890**	**1682**
$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$		53,66	51,06	48,46
$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	**Voz**	-74,66	-54,06	-51,46
	Vídeo	-71,66	-51,06	-48,46
$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}$	**Voz**	-119,84		
	Vídeo	-88,59		

Como foi descrito anteriormente na Secção 4.1, são 3 os militares dentro da habitação. Deste modo, foi realizada a comunicação com retransmissão para os dois serviços disponíveis. Considerou-se uma distância entre homens de 10 m, perfazendo os 20 m de distância total. Não se verifica nenhum problema na comunicação por voz. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.17.

Tabela 4.17. Serviço de voz.

Comunicação com retransmissão	**Q-PSK**	**Voz**		
"salto"	$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
1º, 2º	$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	43,12	41,12	39,12
	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-64,12	-44,12	-42,12
1º	$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}^{1º\ salto}$	-119,84		
2º	$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}^{2º\ salto}$	-117,64		

Quanto ao serviço de vídeo foram necessários 2 RBs para realizar o 1º "salto", com uma potência de transmissão de 4 dBm e 3 RBs no 2º "salto" com uma potência de 8,77 dBm, segundo a Tabela 4.6, visto que o débito do 2º "salto" aumenta para 1 Mb/s. Desta forma, a potência de receção será diferente, assim como a sensibilidade. Conseguiu-se de igual forma obter sucesso na transmissão. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.18.

Por último, na Tabela 4.19 apresenta-se um resumo com os resultados obtidos para os quatro tipos de ambiente e para os dois serviços de voz e *streaming* de vídeo, onde foi utilizada a modulação QPSK. Os casos críticos, quer em relação à cobertura, quer à capacidade verificam-se apenas para o serviço de *streaming* de vídeo, nos três tipos de ambiente exterior para 64 MHz e 890 MHz, pois existe falta de

RBs e, portanto, problemas de capacidade (a vermelho na Tabela 4.17).

Tabela 4.18. Serviço de *streaming* de vídeo.

Comunicação com retransmissão	**Q-PSK**	**Vídeo**		
"salto"	$f_{[\mathrm{MHz}]}$	**64**	**890**	**1682**
1º, 2º	$L_{p\ [\mathrm{dB}]}$	43,12	41,12	39,12
1º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-61,12	-41,12	-39,12
2º	$P_{r\ [\mathrm{dBm}]}$	-56,35	-36,35	-34,35
1º, 2º	$P_{RX\ mín\ [\mathrm{dBm}]}$	-88,59		

Tabela 4.19. Resultados de cobertura e capacidade.

Serviço	**Tipo de Ambiente**	**Frequência [MHz]**	**Cobertura [m]**	**Capacidade**
Voz	**Urbano/Suburbano**	64	420	30
		890		
		1682		
	Rural	64	420	30
		890		
		1682		
	Interior de edifícios	64	20	3
		890		
		1682		
***Streaming* de vídeo**	**Urbano/Suburbano**	64	364	27
		890	308	23
		1682	420	30
	Rural	64	364	27
		890	308	23
		1682	420	30
	Interior de edifícios	64	20	3
		890		
		1682		

Em 64 MHz, para os ambientes urbano, suburbano e rural, apenas 23 militares conseguem transmitir vídeo até uma distância máxima de 308 m. Em 890 MHz, são 27 os militares que têm o serviço disponível e podem transmitir até 364 m. Para os ambientes urbano e suburbano, os resultados são iguais, visto que a análise da comunicação com retransmissão foi feita em LoS, logo as características específicas de cada ambiente não influenciam os resultados.

Nos casos em que foi necessário utilizar a modulação de 16-QAM, verifica-se que a distância dos 400 m foi alcançada, mais precisamente, os 420 m e não há problemas de capacidade, tendo sido utilizada, no máximo, uma potência de transmissão de 12,46 dBm com recurso a 14 RBs.

Capítulo 5

Conclusões

Este capítulo apresenta as conclusões, as limitações encontradas ao longo do trabalho e as respetivas soluções e, por fim, algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros na continuação desta Dissertação de Mestrado.

O objetivo principal desta Dissertação de Mestrado foi analisar o desempenho e a utilização do LTE-A MCC, entre os militares em ambientes operacionais, permitindo a transferência de voz e dados, em tempo real e garantindo uma solução para as elevadas taxas de transmissão que surgem associadas aos mesmos. Foi calculada a cobertura e a capacidade da rede *ad hoc* com retransmissão, em diferentes cenários onde os militares atuam, caracterizados em quatro tipos de ambientes: urbano, suburbano, rural e interior de edifícios. Para alcançar o objetivo, foi utilizada, como caso de estudo, a República Centro-Africana para analisar cenários específicos do país, enquadrados nos quatro tipos de ambiente, onde os militares portugueses se encontram destacados como Força de Reação Rápida da MINUSCA. Foram desenvolvidos modelos de propagação e implementados nos diferentes cenários, com o intuito de calcular a cobertura e a capacidade da rede *ad hoc* utilizada por um pelotão de infantaria.

O primeiro capítulo fornece um enquadramento sobre o propósito deste trabalho, explicitando a importância das comunicações num ambiente operacional, onde estão presentes situações de emergência e segurança, analogamente como acontece, no âmbito civil, nas missões executadas pela Proteção Civil e nas quais o Exército também colabora. Deste modo, precedem-se as motivações e objetivo que levam ao desenvolvimento deste trabalho.

O segundo capítulo descreve os conceitos fundamentais do LTE-A considerando a sua arquitetura, a interface rádio, os aspetos de cobertura e capacidade e os serviços e aplicações do sistema. É abordada a comunicação em modo direto entre os militares como parte integrante do LTE-A MCC, entre outras características específicas como as chamadas de grupo e as chamadas privadas entre certos elementos da rede. No final do capítulo é exposto o estado da arte, no que respeita à utilização do LTE-A MCC nas comunicações até então. A *Alcatel-Lucent*, em 2010, desenvolveu uma rede compacta e autónoma de 4G que permite criar uma rede segura para vários serviços, em tempo real. Esta rede exige a mínima intervenção do utilizador para ser instalada e executada. Pode ser implementada como uma rede *ad hoc* com múltiplos nós. O LTE-A proporciona débitos binários mais elevados e novos procedimentos para uma melhor cobertura através de nós de retransmissão e permite o tratamento prioritário de chamadas de emergência e serviços de multimédia com prioridade, assim como a transmissão de mensagens de alerta. A introdução de retransmissão permite ao LTE-A proporcionar uma maior cobertura e maior capacidade às comunicações.

O terceiro capítulo apresenta os cenários possíveis onde os militares podem realizar operações, envolvendo estes uma grande diversidade de meios e condições ambientais. Dentro dos três tipos de ambiente foram caracterizados cenários de atuação e desenvolvidos e implementados os respetivos modelos de propagação para a análise dos mesmos. Tendo em consideração aspetos como a distância entre os militares, a frequência utilizada e as características de cada ambiente, calculou-se a atenuação causada pelo percurso entre o emissor e o recetor, com o auxílio dos Anexos A e B. A partir desta atenuação e, juntamente, com uma determinada potência de transmissão máxima, para os diversos serviços disponíveis no pelotão, calculou-se a cobertura e a capacidade do sistema. Foram abordados todos os serviços indispensáveis à realização das comunicações dentro de um pelotão.

O capítulo quatro começa com uma breve apresentação e descrição da República Centro-Africana,

onde são caracterizados os tipos de ambiente que foram analisados – urbano, suburbano, rural e interior de edifícios. Como o débito binário é uma das características principais dos serviços e a qual condiciona a velocidade de transmissão de informação e, por sua vez, tem influência direta na cobertura e capacidade da rede, foram apenas estudados os serviços de voz e *streaming* de vídeo que coincidem com os que têm o débito mais baixo e o mais alto, respetivamente. Os resultados referentes aos restantes serviços encontram-se dentro dos limites analisados.

Foram descritos cenários dentro desses ambientes onde se pretende estabelecer e garantir as comunicações, quer por voz, quer por vídeo, dentro de um pelotão de infantaria numa rede *ad hoc*. O objetivo principal era garantir a comunicação dentro do pelotão e, posteriormente, fazer a ligação com uma viatura mais afastada que serviria de EB para transmitir as informações para o escalão superior.

Para o primeiro cenário, em ambiente urbano, caracterizado pela cidade de *Bangui*, foram analisados os serviços de voz e *streaming* de vídeo, nas três frequências em estudo. Em primeiro lugar, para o serviço de voz, efetuou-se o cálculo da atenuação de percurso numa situação NLoS, com a modulação mais baixa, onde a distância de 400 m entre o primeiro e o último militar os limita para comunicarem de forma direta. Em 890 MHz e 1682 MHz foram obtidos valores de potência de receção inferiores ao da sensibilidade. Apenas foi possível comunicar em 64 MHz. De seguida, recorreu-se à comunicação com retransmissão, onde foi obtido sucesso para as três frequências, ou seja, alcançou-se a distância de 420 m até à viatura próxima do pelotão e os 30 militares tinham o serviço disponível. A potência de receção variou entre os -60,92 dBm e os -55,39 dBm, para uma sensibilidade de -106,39 dBm. Para o serviço de *streaming* de vídeo, pelo contrário, quando se utilizou a modulação de QPSK houve problemas de capacidade em duas frequências e, por isso, apenas se alcançou uma distância máxima de 364 m, para a frequência mais baixa, e 308 m para 890 MHz. Para a primeira situação 27 militares tinham o serviço disponível, enquanto na segunda situação, apenas 23 militares. Deste modo, e para solucionar o problema, recorreu-se à modulação de 16-QAM. Com um débito mínimo de 500 kb/s usaram-se, no máximo, 14 RBs. No final, a comunicação ficou garantida, com uma potência de receção a variar entre os -66,08 dBm e os -43,93 dBm, para uma sensibilidade de -103,23 dBm.

Para o segundo cenário, o ambiente suburbano caracterizado pela cidade de *Bambari* teve uma análise semelhante à do ambiente urbano. Para 64 MHz, para a situação de NLoS, como o modelo ITM não apresenta uma expressão específica para um ambiente suburbano, fez-se a média dos valores obtidos para o cálculo da atenuação de percurso nos ambientes urbano e rural e, de seguida, procedeu-se ao cálculo das respetivas potências de receção e sensibilidade. Para as restantes frequências, foi calculada a atenuação de percurso, a potência de receção e a sensibilidade, numa situação de NLoS, mediante as características típicas de *Bambari*. Não foi possível comunicar com sucesso em 1682 MHz, com uma potência de receção de -126,38 dBm inferior à sensibilidade de -119,84 dBm. Mesmo nas duas frequências mais baixas, onde se obteve valores superiores à sensibilidade, estes foram próximos daquela. Desta forma, recorreu-se à comunicação com retransmissão e os resultados obtidos foram iguais aos do ambiente urbano, visto que o modelo de propagação utilizado foi o mesmo e os parâmetros de cada tipo de ambiente não variam numa situação de LoS.

Para o terceiro cenário, o ambiente rural é caracterizado pela região do *Gongo*. Como se trata de uma

região com uma densidade elevada de vegetação, não foi possível comunicar voz, de forma direta nas frequências mais elevadas, onde se obteve uma potência receção de -129,07 dBm e -143,24 dBm para 890 MHz e 1682 MHz, respetivamente, em contraste com a sensibilidade de -119,84 dBm. Procedeu-se ao uso da comunicação com retransmissão e obteve-se sempre uma potência de receção superior à sensibilidade, com valores de potência de receção a variar entre -70,15 dBm e -48,49 dBm, para uma sensibilidade de -106,39 dBm. Em relação à transmissão de vídeo, já na comunicação com retransmissão não foi possível, mais uma vez, ter o serviço disponível para todo o pelotão, por falta de capacidade, à exceção de 1682 MHz, visto que a LB onde esta está inserida é a maior das três frequências. Quando se utilizou a modulação de 16-QAM, conseguiu alcançar-se a distância de 420 m, onde todo o pelotão consegue transmitir vídeo, com valores de potência de receção a variar de -70,15 dBm a -37,03 dBm, para uma sensibilidade de -103,23 dBm.

Para o quarto cenário, no interior de uma habitação típica de ambiente suburbano e rural da RCA, realizou-se a comunicação direta entre os dois militares afastados de 20 m e foi possível ter os dois serviços disponíveis, como era de esperar, com valores de potência de receção, no serviço de voz, a variar de -74,66 dBm a -51,46 dBm, para uma sensibilidade de -119,84 dBm e, no serviço de *streaming* de vídeo, a variar entre -71,66 dBm e -48,46 dBm, para uma sensibilidade de -88,59 dBm. De seguida, usou-se a comunicação com retransmissão onde os três militares conseguem, de igual modo, obter sucesso na comunicação. Para o serviço de voz obteve-se valores de potência de receção a variar de -64,12 dBm a -42,12 dBm, para uma sensibilidade de -117,64 dBm e, no serviço de *streaming* de vídeo, a variar de -61,12 dBm a -34,35 dBm, para uma sensibilidade de -88,59 dBm.

Com esta análise, conseguiu-se alcançar um dos principais objetivos desta Dissertação: perceber que, ao longo de uma rede de comunicações *ad hoc* com retransmissão, ou seja, uma rede não estruturada, não são apenas as questões relacionadas com a potência que limitam as comunicações, mas também a capacidade da própria rede.

Perante a análise realizada, a principal limitação das comunicações prende-se, portanto, com a capacidade, mais concretamente, com o número de RBs disponíveis em cada LB, quando se faz a comunicação com retransmissão. Assim, existem serviços que estão limitados pela capacidade da rede, devido ao elevado débito binário. Com a comunicação de voz não há problemas de capacidade nem de potência, mesmo utilizando a modulação mais baixa, o Q-PSK. Contudo, para o serviço de *streaming* de vídeo houve cenários em que não foi possível que os 30 militares pudessem transmitir vídeo.

Relativamente às dificuldades encontradas ao longo da elaboração desta Dissertação, a primeira está relacionada com a falta de informação disponível no que respeita ao LTE-A MCC, especificamente ao nível de comunicações militares em situações de segurança e emergência e, portanto, ter-se recorrido a informação que existe no âmbito civil, nomeadamente, ao sistema TETRA usado pela Proteção Civil e pelo sistema SIRESP. A segunda prende-se com o facto de ter sido difícil encontrar as frequências de trabalho no âmbito militar.

Apresento de seguida um conjunto de propostas a serem desenvolvidas em trabalhos futuros.

Neste trabalho foram analisados cenários integrados em Operações de Estabilização, visto que, de momento, o LTE-A MCC ainda não possui proteção contra a GE e a RCA não tem este tipo de ameaça. Contudo, para que seja possível estender a sua aplicação às Operações Ofensivas e Defensivas, onde a ameaça de GE é uma realidade, seria implementada uma camada de segurança "por cima" da arquitetura do LTE-A, por forma a dificultar a interceção das comunicações e a resistência às interferências. Um exemplo seria a utilização do método de transmissão de sinais de rádio – *frequency hopping* – que consiste na alteração constante e aleatória da onda portadora através de diferentes canais.

A segunda proposta seria integrar as antenas no capacete dos militares e não no colete. Para além disso, adicionar uma câmara para gravar vídeo. O capacete poderia ter uma proteção adequada para evitar que o militar seja exposto a radiação nociva. Uma desvantagem apresentada no uso da antena no colete é o facto de se o militar estiver deitado, a antena colocada no colete terá uma atenuação maior do que se o mesmo estiver em pé ou de joelhos, logo o ganho da antena será muito mais reduzido. Caso a antena esteja no capacete, o militar terá sempre a cabeça erguida, para observar o que está à sua volta, logo não haverá tanta proximidade ao solo e o ganho será superior.

A terceira proposta prende-se com o seguinte: em vez da criação de uma rede *ad hoc* no pelotão, usar um módulo de comunicações, ou seja, uma viatura ou um UAV (*drone*), na qual fosse instalado um eNodeB (por exemplo, o equipamento *Harris* LTE), que acompanha o pelotão para garantir a cobertura numa determinada área onde este executa uma ação (por exemplo, uma patrulha de reconhecimento). Simultaneamente, o pelotão pode ter ligação com outro eNodeB equipado com outra tecnologia (por exemplo, fibra ótica, ligação de feixes hertzianos, ligação via satélite) e que está num ponto de altitude considerável vantajoso (um "picaroto") que tanto pode servir de repetidor para o posto de comando como dar, igualmente, cobertura ao pelotão.

A última proposta seria o estudo e a implementação de um TM que os militares possam utilizar no terreno e que permita captar imagens e/ou vídeo, ou seja, um equipamento do género de um telemóvel/tablet (compacto, com uma bateria pequena, leve e com uma longa duração) que permita interligar-se aos sistemas de comunicações disponíveis nas viaturas militares (*Pandur* ou *Leopard*).

Anexo A

COST 231 *Walfish-Ikegami*

Este anexo apresenta uma descrição do modelo de propagação usado para calcular as perdas de percurso num ambiente urbanos e suburbanos.

As figuras e as equações presentes neste anexo foram baseadas em [Corr16]. O modelo COST 231 *Walfish-Ikegami* é baseado nos modelos *Ikegami* e *Walfish-Bertoni* e, portanto, tem em consideração as mesmas premissas dos anteriores. Na Figura B.1. está representado um esquema que permite calcular as perdas de percurso existentes entre os TMs, através do modelo de propagação COST 231 *Walfish-Ikegami*. Este modelo é aplicado em ambientes urbanos e suburbanos, para distâncias pequenas (< 5 km), e é válido dentro de certos parâmetros como:

- $f_{[\mathrm{MHz}]} \in [800, 2000]$: frequência de sinal da onda portadora
- $d_{[\mathrm{km}]} \in [0{,}02;\ 5]$: distância horizontal entre os TMs
- $h_{m\ [\mathrm{m}]} \in [1, 3]$: altura do TM
- $h_{b\ [\mathrm{m}]} \in [4, 50]$: altura da EB

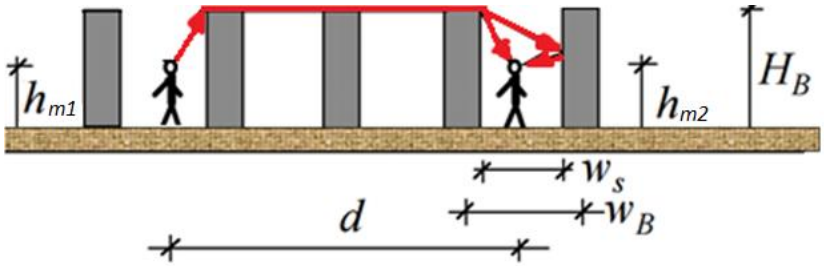


Figura A.1. Esquema do modelo COST 231 *Walfish-Ikegami*, para $\phi = 90°$ (Adaptado de [Corr16]).

Embora o modelo de COST 231 *Walfish-Ikegami* considere h_b como sendo a altura da antena da EB (onde está incluída a altura do edifício, portanto $h_{b\ [\mathrm{m}]} \in [4, 50]$), nesta Dissertação, as antenas estarão sempre abaixo da altura dos edifícios ($h_m \leq H_B$), pois não haverá EB no topo dos telhados e os TMs são transportados pelos próprios militares. Assim, considera-se $h_b = h_m = 1{,}8$ m, como sendo a altura do TM, que coincide com a altura média de um militar.

O cálculo das perdas de percurso numa rua, num cenário de propagação com LoS, ou seja, $\phi = 0°$, e $d > 20$ m , ou seja, fora da zona de espaço livre, é dado por:

$$L_{p\ [\mathrm{dB}]} = 42{,}6 + 26\log\left(d_{[\mathrm{km}]}\right) + 20\log(f_{[\mathrm{MHz}]}) \tag{A.1}$$

Para os restantes casos em que existe um ou mais edifícios entre os militares, ou seja, $\phi = 90°$, as perdas de percurso são calculadas da seguinte forma:

$$L_{p\ [\mathrm{dB}]} = \begin{cases} L_{0\ [\mathrm{dB}]} & ,\quad L_{rt} + L_{rm} \leq 0 \\ L_{0\ [\mathrm{dB}]} + L_{rt\ [\mathrm{dB}]} + L_{rm\ [\mathrm{dB}]} & ,\quad L_{rt} + L_{rm} > 0 \end{cases} \tag{A.2}$$

onde:

- L_0: atenuação devido à propagação em espaço livre
- L_{rt}: atenuação devido à propagação sobre os telhados
- L_{rm}: atenuação devido à difração desde o último telhado até ao TM

Quando $L_{rt} + L_{rm} \leq 0$, as perdas de percurso são dadas pela atenuação devido à propagação em espaço livre:

$$L_{0\,[\mathrm{dB}]} = 32{,}44 + 20\log\left(d_{[\mathrm{km}]}\right) + 20\log\left(f_{[\mathrm{MHz}]}\right) \tag{A.3}$$

Quando $L_{rt} + L_{rm} > 0$, a atenuação devido à propagação sobre os telhados é dada por:

$$L_{rt\,[\mathrm{dB}]} = L_{bsh\,[\mathrm{dB}]} + k_a + k_d\log\left(d_{[\mathrm{km}]}\right) + k_f\log\left(f_{[\mathrm{MHz}]}\right) - 9\log\left(w_{B[\mathrm{m}]}\right) \tag{A.4}$$

Com:

$$L_{bsh\,[\mathrm{dB}]} = \begin{cases} -18\log\left(h_{m\,[\mathrm{m}]} - H_{B[\mathrm{m}]} + 1\right) & , h_m > H_B \\ 0 & , h_m \leq H_B \end{cases} \tag{A.5}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & , h_m > H_B \\ 54 - 0{,}8\left(h_{m\,[\mathrm{m}]} - H_{B[\mathrm{m}]}\right) & , d \geq 0{,}5\ \mathrm{km}\,, h_m \leq H_B \\ 54 - 1{,}6\left(h_{m\,[\mathrm{m}]} - H_{B[\mathrm{m}]}\right)\cdot d_{[\mathrm{km}]} & , d < 0{,}5\ \mathrm{km}\,, h_m \leq H_B \end{cases} \tag{A.6}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & , h_m > H_B \\ 18 - 15\cdot\dfrac{h_m - H_B}{H_B} & , h_m \leq H_B \end{cases} \tag{A.7}$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0{,}7\left(\dfrac{f_{[\mathrm{MHz}]}}{925} - 1\right) & , \text{ambiente urbano e suburbano} \\ -4 + 1{,}5\left(\dfrac{f_{[\mathrm{MHz}]}}{925} - 1\right) & , \text{ambiente urbano denso} \end{cases} \tag{A.8}$$

onde:

- L_{bsh}: perdas devido à diferença de altura entre o telhado e as antenas
- k_a, k_d, k_f: fatores de correção
- w_B: distância entre o centro de dois edifícios seguidos
- H_B: altura do edifício

A atenuação devido à difração desde o último telhado até ao TM é dada por:

$$L_{rm\,[\mathrm{dB}]} = -16{,}9 - 10\log\left(w_{s[\mathrm{m}]}\right) + 10\log\left(f_{[\mathrm{MHz}]}\right) + 20\log\left(H_{B[\mathrm{m}]} - h_{m\,[\mathrm{m}]}\right) + L_{ori\,[\mathrm{dB}]} \tag{A.910}$$

A atenuação devido à orientação da rua é dada por:

$$L_{ori\,[\mathrm{dB}]} = \begin{cases} -10 + 0{,}354\,\phi_{[°]} & , 0° < \phi < 35° \\ 2{,}5 + 0{,}075\left(\phi_{[°]} - 35\right) & , 35° \leq \phi < 55° \\ 4 - 0{,}114\left(\phi_{[°]} - 55\right) & , 55° \leq \phi \leq 90° \end{cases} \tag{A.11}$$

onde:

- ϕ: ângulo de incidência do sinal nos edifícios, no plano horizontal.
- w_s: largura da rua entre dois edifícios

Na ausência de valores específicos, recomendam-se os seguintes:

$$w_B \in [20, 50]\mathrm{m} \tag{A.12}$$

$$w_s = \frac{w_B}{2} \tag{A.13}$$

$$H_{B\,[\mathrm{m}]} = 3 \cdot (\#\mathrm{andares}) + H_{te} \tag{A.14}$$

$$H_{te[\mathrm{m}]} = \begin{cases} 0 & ,\mathrm{plano} \\ 3 & ,\mathrm{inclinado} \end{cases} \tag{A.15}$$

Apesar deste modelo não abranger toda a LB que é analisada nesta Dissertação e, por isso, ser usado fora do intervalo de frequências em que o mesmo é válido, aceita-se a presença de alguns erros nos resultados obtidos. O erro aumenta quando h_m diminui em relação a H_B, sendo que o desvio padrão é de [4,7] dB, onde quanto menor for a regularidade das ruas do ambiente urbano em análise menor será o valor do desvio padrão.

Anexo B

ITM / *Longley-Rice*

Este anexo descreve o modelo de propagação ITM, também designado por Modelo ITM ou Modelo de *Longley-Rice*.

Este anexo foi baseado em [HuLK82], [WeJJ82] e [LoRi68]. O modelo de propagação ITM prevê a atenuação de um sinal rádio em função da distância e da variação do mesmo ao longo do tempo e do espaço. Foi projetado para frequências de 20 MHz a 20 GHz e para uma grande variedade de distâncias e altura das antenas. É aplicado em ambientes urbanos, suburbanos e rurais e é válido dentro dos seguintes parâmetros:

- $f_{[\mathrm{MHz}]} \in [20, 20\,000]$
- $d_{[\mathrm{km}]} \in [1, 2\,000]$
- $h_{b\,[\mathrm{m}]} \in [0{,}5;\ 3\,000]$

O cálculo das perdas de percurso é expresso por:

$$L_{p\,[\mathrm{dB}]} = L_{0\,[\mathrm{dB}]} + L_{ael\,[\mathrm{dB}]} + L_{U\,[\mathrm{dB}]} + L_{V\,[\mathrm{dB}]} \tag{B.1}$$

Com:

$$L_{U\,[\mathrm{dB}]} = \begin{cases} 16{,}5 + 15 \cdot log_{10}\left(\frac{f_{[\mathrm{MHz}]}}{100}\right) + 0{,}12 \cdot d_{\,[\mathrm{km}]} & \text{, área urbana} \\ 0 & \text{, área aberta} \end{cases} \tag{B.2}$$

onde:

- L_{ael}: atenuação adicional ao espaço livre
- L_U: atenuação resultante das perdas em ambiente urbano
- L_V: atenuação causada pela vegetação

Para os cenários a serem analisados só interessam distâncias inferiores a 400 m. De acordo com [HuLK82] e como se observa na Figura B.1., a atenuação relativa ao espaço livre, L_{ael} , até aos 15 km é 0 dB, logo engloba as distâncias que pretendemos e este fator é nulo. Esta região está integrada na zona de LoS, onde as protuberâncias da Terra não interferem com as ondas de rádio diretas, contudo é admissível que alguns montes ou outros obstáculos o possam fazer.

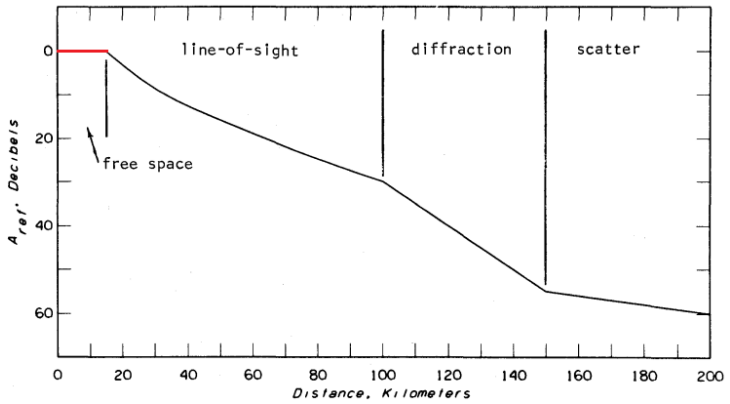


Figura B.1. Atenuação relativa ao espaço livre em função da distância (Extraído de [HuLK82]).

$L_{U\,[\mathrm{dB}]}$ representa a diferença entre os valores médios da atenuação extra definida por *Okumura*, para ambientes urbanos, e a atenuação definida por *Longley-Rice* para áreas abertas [WeJJ82].

O fator de atenuação $L_{V\ [\mathrm{dB}]}$ é consideravelmente menor para frequências VHF do que para frequências mais elevadas, porque a vegetação é mais transparente a longos comprimentos de onda. Como referido na Secção 3.1, utilizou-se a PV para a análise dos ambientes em estudo e, através de uma interpolação, foi inferido um valor máximo de atenuação para a frequência de trabalho de 64 MHz, visto que a Tabela B.1 apenas incluía valores para as frequências de 30 e 100 MHz.

Tabela B.1. Atenuação pela vegetação (Adaptado de [WeJJ82]).

$L_{V\ [\mathrm{dB}]}$		
$f_{\ [\mathrm{MHz}]}$ **Polarização**	**Horizontal**	**Vertical**
30	0	2 – 3
64		3,5 – 6,4
100	2 – 3	5 – 10

Referências

[123R17] 123RF – Imagens – ambiente urbano, https://br.123rf.com/photo_50352195_ambiente-urbano-pintada-no-estilo-dos-desenhos-animados..html, Set. 2017.

[1FND17] 1FND/MINUSCA, Informação militar (dados e fotografias) cedida pela 1FND/MINUSCA, RCA, 2017.

[3GPP13] 3GPP – 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, 3GPP TS 23.203, Versão 13.5.1, Valbonne, França, Set. 2015 (http://www.3gpp.org/DynaReport/23203.htm).

[3GPP17a] 3GPP – *Mission Critical features at TCCA event*, http://www.3gpp.org/news-events/conferences/1826-cce_2017, Fev. 2017.

[3GPP17b] 3GPP – *Release* 13, http://www.3gpp.org/release-13, 2017.

[3GPP17c] 3GPP – *Release* 14, http://www.3gpp.org/release-14, 2017.

[Acad17] Academia Militar, https://www.facebook.com/265041063851906/photos/pcb.401645616858116/401645366858141/?type=3&theater, Abr. 2017.

[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).

[Alca09] Alcatel-Lucent, *The LTE Network Architecture – A comprehensive tutorial,* White Paper, Alcatel-Lucent, Paris, França, 2009 (http://www.cse.unt.edu/~rdantu/FALL_2013_WIRELESS_NETWORKS/LTE_Alcatel_White_Paper.pdf).

[Alca10] Alcatel Lucent, *Mission-critical Communications for Defense*, Strategic White Paper, 2010 (http://www.mvnodynamics.com/wp-content/uploads/2010/09/oct_2010_mission_critical_communication_defense_swp.pdf).

[ANTE14] ANTENNA – Optimizing RF Signal Performance to Improve Coverage and Capacity, http://www.antennasonline.com/main/articles/optimizing-rf-signal-performance-to-improve-lte-coverage-and-capacity/, Jun. 2014.

[BeBB15] M. Benslama, M. Boucenna e H. Batatia, “Ad Hoc Networks: Study and discussion of performance”, em John Wiley & Sons, Inc. (1ª ed.), *Ad Hoc Networks Telecommunications and Game Theory*, EUA, 2015.

[CaML17] CM LISBOA – Arquivo Municipal Arco do Cego, http://www.cm-

lisboa.pt/equipamentos/common/municipais/info/arquivo-municipal-arco-do-cego, 2017.

[CIDA17] Cidades em fotos – Fotos de Bangui – República Centro-Africana, http://cidadesemfotos.blogspot.pt/2013/05/fotos-de-bangui-republica-centro.html, 2017.

[COMR16] COMROD – UHF710VM/HG Series Tactical LTE Vehicle/Shelter/Mast Mount Antenna, http://www.comrod.com/getfile.php/132695/Datasheets/T%20Antennas%20-%20Military/UHF710VM-HG.pdf, Mar. 2016.

[Corr16] L.M. Correia, *Mobile Communications Systems – Theoretical Lessons*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2016.

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

[CRYP16] CRYPTO MUSEUM – Selex PRR H4855 Personal Role Radio, http://cryptomuseum.com/radio/selex/prr/index.htm, Out. 2016.

[DCSI16] Direção de Comunicações e Sistemas de Informação, Informação privada, Lisboa, 2016.

[EID16] EID – PRC-525 Combat Net Radio, http://www.eid.pt/prod/7/prc-525_combat_net_radio, Dez. 2016.

[ETSI13] *Machine-to-Machine Communications (M2M); Use Cases of M2M applications for eHealth*, ETSI Technical Report, European Telecommunications Standards Institute, França, Set. 2013.

[ExPo16] EXÉRCITO PORTUGUÊS – Missão, https://www.exercito.pt/pt/quem-somos/missao, 2016.

[FaNi15] R. Favraud e N. Nikaein, “Wireless mesh backhauling for LTE/LTE-A networks”, em *IEEE Military Communications Conference*, Out. 2015.

[FeMI13] Federal Ministry of the Interior, *On the Future Architecture of Mission Critical Mobile Broadband PPDR Networks*, White Paper, Berlim, Alemanha, 2013 (https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwisnun8qZLRAhUK1hQKHVRKCkYQFggZMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cept.org%2FDocuments%2Ffm-49%2F14437%2FFM49(13)-071-Info_White-Paper-on-Mission-Critical-Mobile-Broadband-PPDR-Networks&usg=AFQjCNEZVjHT1yYCivyEgnGMMoKjgmdm_Q&sig2=t3rH5sYbOnjgXiPKN0cvZA).

[FM07] *FM 3-21.8 The Infantry Rifle Platoon and Squad*, Headquarters Department of the Army, Washington DC, EUA, 2007.

[FoHB14] S. Forge, R. Horvitz e C. Blackman, *Is Commercial Cellular Suitable for Mission Critical Broadband?*, Final Report, 2014 (http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/FinalReportEN.pdf).

[Glob17] *FM 24-18: Tactical Single-Channel Radio Communications Techniques Chapter 3 Antennas*, Field Manual, EUA, 2017 (http://www.globalsecurity.org/intell/library/policy/army/fm/24-18/fm24-18_4.htm)

[GoMa13] J. Gouveia e A. Magalhães, *Redes de Computadores*, FCA, Lisboa, PT, 2013.

[GSMA17] GSMA, *Network 2020: Mission Critical* Communicatons, *White Paper*, Londres, UK.

[Guit16] J. Guita, *Balancing the load in LTE urban networks via interfrequancy handovers*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2016.

[HARR15] Harris, *Bringing 4G LTE to the tactical environment*, 2015 (https://www.harris.com/sites/default/files/downloads/solutions/fusion-tactical-cellular.pdf).

[HARR17] HARRIS – Harris Fusion Tactical Cellular, https://www.harris.com/solution/harris-fusion-tactical-cellular, 2017.

[HoTo11] H. Holma e A. Toskala, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced Second Edition*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, 2011.

[HuLK82] G. A. Hufford, A.G. Longley e W. A. Kissick, *A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode*, U. S. Department of Commerce, EUA, 1982.

[IEEE17] IEEE – *Mission Critical Public-Safety Communications: Architectures, Enabling Technologies, and Future Applications*, http://ieeeaccess.ieee.org/special-sections/mission-critical-public-safety-communications-architectures-enabling-technologies-future-applications/, 2017.

[ITUR17] ITU-R, *Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*, Recommendation ITU-R P.1238-9, 2017.

[JaHo09] A. Jafargholi e A. Hosseinbeig, "VHF-LB Vest Antenna", *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 14, 2009, pp. 247-262.

[Khab14] S. Khatibi, *Radio Resource Management Strategies in Virtual Networks*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2014.

[KuGü15] A. Kumbhar e İ. Güvenç, *A Comparative Study of Land Mobile Radio and LTE-based Public Safety Communications*, Universidade da Florida, Miami, EUA, 2015 (http://ieeexplore.ieee.org.sci-hub.cc/document/7132951/)

[LoRi68] A. G. Longley e P. L. Rice, *Prediction of Troposferic Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain*, ESSA Tech. Rep. ERL 79-ITS 67, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C.,1968 (file:///C:/Users/sonia/Downloads/ERL%2079-ITS%2067.pdf).

[LZYH16] J. Li, Y. Q. Zhao, F. R. Yu e X. Huang, "Queueing Analysis of Two-Hop Relay Technology in LTE/LTE-A Networks with Unsaturated and Asymmetric Traffic", *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 3, No. 3, Jun. 2016, pp. 378-385.

[MeRe13] N. Meghanathan e Y. B. Reddy, "Power allocation in cognitive radio", *Cognitive Radio Technology Applications for Wireless and Mobile Ad Hoc Networks*, EUA, 2013.

[MiDN11] Ministério da Defesa Nacional, *PDE3-65-00 Operações de Apoio à Paz – Tácticas, Técnicas e Procedimentos*, Exército Português, 2011.

[MiDN12] Ministério da Defesa Nacional, *PDE3-00 Operações*, Exército Português, 2012.

[MiRS06] MILITARY RADIO SPECIFICATIONS – AN/PRC-343 (H4855), http://www.milspec.ca/radspec/prc-343.html, Jul. 2006.

[NeRo15] P. Nepa e H. Rogier, "Wearable Antennas for Off-Body Radio Links at VHF and UHF Bands:

Challenges, the state of the art, and future trends below 1 GHz", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 57, No. 5, Out. 2015, pp. 30-52.

[OMNI16] OMNITELE – LTE for Communications – Mind the Step, http://www.omnitele.com/2016/lte-for-critical-communications-deployment-strategy/, Abr. 2016.

[OPER16] OPERACIONAL – Segundo ano de missão no Iraque: Formação e treino, http://www.operacional.pt/segundo-ano-de-missao-no-iraque-formacao-e-treino/, Jun. 2016.

[OPER17] Opera Mundi – Um ano após golpe de Estado, República Centro-Africana apresenta "raízes de genocídio",http://operamundi.uol.com.br/media/images/Rep%20Centro%20Africana.jpg, 2017.

[OuBe16] OUTDOOR BEASTS – Capt. Peacock's Journal: The State of Amazonas, http://outdoorbeasts.com/2016/05/capt-peacocks-journal-the-state-of-amazonas/, Mai. 2016.

[PeNe12] D. Pernes e D. Neves, "Análise de Cobertura e Capacidade em Redes Móveis LTE de Quarta Geração (4G)", Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2012.

[PHAR13] PHARAD – LTE Wearable Antenna, 700-3000 MHz, http://www.pharad.com/pdf/lte-wearable-antenna-datasheet.pdf, Jul. 2013.

[PhHK13] P. Phunchongharn, E. Hossain e D. In King, "Resource Allocation For Device-to-Device Communications Underlaying LTE-Advanced Networks", *IEEE Wireless Communications*, Vol. 20, No. 4, Aug. 2013, pp. 91-100.

[PICM13] PICMG – LTE infrastructure for today's military networks, http://picmg.mil-embedded.com/articles/lte-infrastructure-todays-military-networks/, Out. 2013.

[PINI12] PINI WEB – Sustentabilidade, http://piniweb.pini.com.br/construcao/sustentabilidade/comeca-o-solar-decathlon-europe-2012-na-espanha-269474-1.aspx, Set. 2012.

[PIXA13] PIXABAY, https://pixabay.com/pt/afeganist%C3%A3o-casas-edif%C3%ADcios-fora-79493/, Fev. 2013.

[PWNJ11] K. M. Pattani, K. H. Wandra, B. H. Nagpara e G. R. Joshi, "Replacement of Hata Model for Sub-urban Terrain by *Egli* Model for WCDMA", *Journal of Information, Knowledge and Research in Eletronics and Communication Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 71-73.

[Rohi15] Rohill, *LTE for Critical Communications LTEtra¯Node*, White Paper, 2015 (http://www.rohill.nl/images/pdf-downloads/whitepapers/LTE-for-Critical-Communications-version-1.1.pdf)

[SAPO15] SAPO – Alentejo eleito como destino a visitar pelo jornal The New York Times, https://sol.sapo.pt/artigo/121822/alentejo-eleito-como-destino-a-visitar-pelo-jornal-the-new-york-times, Jan. 2015.

[Simi12] M. B. Simié, "Feasibility of Long Term Evolution (LTE) as Technology for Public Safety", *20th Telecommunications Forum*, Serbia, Belgrade, Nov. 2012.

[SIRE09] SIRESP – Gestão de Redes Digitais de Segurança e Emergência, S.A., http://www.siresp.com/index.html, 2009.

[SLID12] SLIDE SHARE – Áreas de Fixação Humana, https://pt.slideshare.net/abarros/reas-rurais-e-

reas-urbanas-1-parte, Fev. 2012.

[SPLG08] G. Santos, P. Pinto, P. Lima e J. Golias, *As Transmissões Militares da Guerra Peninsular ao 25 de Abril*, Comissão Portuguesa da História Militar, Lisboa, Portugal, 2008.

[TTYS12] T.-T. Tran, Y. Shin e O.-S. Shin, "Overview of enabling technologies for 3GPP LTE-advanced", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012.

[USW17] Univ. South Wales, Research – Mission Critical Applications over LTE and LTE-Advanced (4G/5G), http://mobile.research.southwales.ac.uk/mission-critical-voice, Oct. 2017

[WeJJ82] M. M. Weiner, E. Jappe e N. J. Johnson, *Input Parameter Specification for the Longley-Rice and Johnson-Gierhart Tropospheric Radio Porpagation Programs, 0.02-40 GHz*, Hanscom Air Force Base, Massachusetts, EUA, 1982.

[WIKI17a] WIKIPÉDIA, República Centro-Africana, https://pt.wikipedia.org/wiki/Rep%C3%BAblica_Centro-Africana, Ago. 2017.

[WIKI17b] WIKIPÉDIA, Bambari, https://en.wikipedia.org/wiki/Bambari, Mai, 2017.

[WTWS05] C. A. Winterhalter, J. Teverovsky, P. Wilson, J. Slade et al., "Development of electronic textiles to support networks, communications, and medical applications in future U.S. Military protective clothing systems", *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 9, No. 3, Set. 2005, pp. 402-406.

[YOUT17] YOUTUBE – Os Comandos na República Centro-Africana, https://www.youtube.com/watch?v=An29lWTUkns, Set. 2017.

[YuIs15] Z. Yun e M. Iskander, "Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications", *IEEE Access*, Vol. 3, Jul. 2015, pp. 1089-1100.