

**ALGORITMO PARA DESENVOLVER UMA
FERRAMENTA DE PLANEAMENTO PARA O SISTEMA
DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS LTE**

Sofia Margarida Rosa de Sá

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:
Prof. Doutor Américo Correia

Co-orientador:
Prof. Doutor Pedro Sebastião

ISCTE-IUL

Outubro de 2010

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Pedro Sebastião e Professor Doutor Américo Correia, pela dedicação e disponibilidade demonstrada ao longo do desenvolvimento da dissertação, tendo sido um apoio fundamental para a realização da mesma.

Ao Instituto de Telecomunicações (IT), pelo apoio financiamento para o desenvolvimento de parte do trabalho apresentado nesta dissertação, no âmbito do projecto COILS.

À Alcatel-Lucent pelo apoio e informação disponibilizada, essencial para o desenvolvimento desta dissertação, a referir, o Eng.º Nuno Marques e o Eng.º Luís Santos.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas do ISCTE-IUL pela amizade, apoio e motivação demonstrada ao longo destes anos, tanto nos bons como nos maus momentos, a referir, Liliana Fiens, Gabriel Calado e Pedro Silvestre.

Finalmente gostaria de agradecer à minha família, especialmente aos meus pais, por todo o apoio, amor, carinho e educação demonstrado ao longo da minha vida, moldando-me na pessoa que sou hoje e permitindo-me chegar cada vez mais longe.

Para os meus pais.

Resumo

O trabalho desenvolvido nesta dissertação visa propor um algoritmo para o planeamento do sistema de comunicações móveis *LTE (Long-Term Evolution)*. O algoritmo apresentado evidencia as alterações necessárias a aplicar a uma ferramenta já implementada da Alcatel-Lucent, A9155, para o planeamento do sistema *WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)*, por forma a utilizar a mesma plataforma da ferramenta de planeamento.

Para compreender as alterações a aplicar à ferramenta foi analisado o sistema de comunicações móveis *LTE* e as principais técnicas utilizadas neste sistema, comparando-as com o sistema de comunicações móveis *WiMAX*. Escolheu-se modelos de propagação e tráfego a considerar na ferramenta de planeamento.

Desenvolveu-se um algoritmo que consiste em analisar as necessidades dos utilizadores da rede e os serviços que estes utilizam de modo a obter a capacidade necessária por célula. Este algoritmo permite a opção de obter uma dada capacidade necessária para um conjunto de utilizadores, ou, como alternativa obter a capacidade, quando existe constrangimento económico para a implementação da rede.

Palavras-chave: *LTE*, ferramenta de planeamento, modelos propagação, modelos de tráfego, *WiMAX*.

Abstract

The work developed in this dissertation aims to propose an algorithm for the planning of a LTE mobile communication system. The presented algorithm demonstrates the necessary changes to apply to an existent Alcatel-Lucent tool, A9155, for the WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) mobile communication system, in order to use the same platform.

The LTE mobile communication system and its techniques were analyzed and compared to the WiMAX mobile communication system, in order to understand the changes needed. Propagation and traffic models were chosen for the planning tool.

It was developed an algorithm that analyzes the network users needs and the services they user, in order to obtain the required capacity per cell. This algorithm allows the option of obtaining required capacity for a given set of users, or, the capacity when there is an economic constraint to the implementation of the network.

Keywords: LTE, planning tool, propagation models, traffic models, WiMAX.

Índice

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE TABELAS	XVI
LISTA DE ACRÓNIMOS	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS	XX
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 ÂMBITO E MOTIVAÇÃO	2
1.2 ESTADO DA ARTE.....	3
1.3 OBJECTIVOS	3
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 2 - REQUISITOS LTE	5
2.1 INTRODUÇÃO	6
2.1.1 <i>Evolução dos utilizadores de comunicações móveis</i>	6
2.1.2 <i>Evolução do tráfego de dados</i>	7
2.1.3 <i>Objectivos do LTE</i>	8
2.2 REQUISITOS DE DESEMPENHO	8
2.2.1 <i>Arquitectura</i>	9
2.2.2 <i>Capacidade</i>	9
2.2.3 <i>Latência</i>	9
2.2.4 <i>Mobilidade</i>	9
2.2.5 <i>Cobertura</i>	10
2.2.6 <i>Flexibilidade Espectral</i>	10
2.2.7 <i>Modulação e Codificação Adaptativa</i>	12
2.3 CAMADA FÍSICA	14
2.3.1 <i>Ligação Descendente: OFDM</i>	14
2.3.2 <i>Ligação Ascendente: SC-FDM</i>	18
2.3.3 <i>Canais lógicos, de transporte e físicos</i>	19
2.4 SISTEMAS COM MÚLTIPLAS ANTENAS	23
2.5 CONCLUSÃO.....	27
CAPÍTULO 3 - PLANEAMENTO DE REDES MÓVEIS CELULARES	29
3.1 INTRODUÇÃO	30
3.2 PLANEAMENTO POR COBERTURA.....	30
3.2.1 <i>Tipos de modelos de propagação</i>	31
3.2.1.1 <i>Modelos Outdoor</i>	31
3.2.1.2 <i>Modelos Indoor</i>	31
3.2.2 <i>Modelos de propagação para LTE</i>	34
3.3 PLANEAMENTO POR CAPACIDADE.....	36
3.3.1 <i>Caracterização do Tráfego</i>	37

3.3.2	<i>Modelos de Agregação de tráfego</i>	39
3.3.2.1	Método baseado na razão <i>Peak to Average</i>	42
3.3.2.2	Método baseado numa aproximação Gaussiana para a agregação de tráfego	42
3.3.3	<i>Probabilidade de bloqueio</i>	44
3.3.3.1	Algoritmo <i>knapsack</i>	45
3.3.3.2	Algoritmo Kaufman-Roberts	47
3.3.3.3	Dimensionamento da capacidade do sistema	48
3.4	<i>QoS CLASS IDENTIFIER</i>	49
3.5	CONCLUSÕES	50
CAPÍTULO 4 - FERRAMENTA DE PLANEAMENTO		53
4.1	INTRODUÇÃO	54
4.2	UTILIZADORES	54
4.2.1	<i>Tipos de Utilizadores</i>	54
4.2.2	<i>Mobilidade</i>	55
4.2.3	<i>Modelação do perfil dos utilizadores</i>	55
4.3	CARACTERIZAÇÃO DE AMBIENTES	56
4.4	CARACTERIZAÇÃO DOS SERVIÇOS	58
4.5	CAPACIDADE E RECURSOS DA CÉLULA	61
4.5.1	<i>Cálculo da duração de símbolo</i>	61
4.5.2	<i>Cálculo da capacidade da célula - TDD</i>	62
4.5.3	<i>Cálculo da capacidade da célula - FDD</i>	64
4.5.4	<i>Gestão de recursos</i>	64
4.5.4.1	Alocação de recursos para as necessidades mínimas de <i>throughput</i>	65
4.5.4.2	Alocação de recursos para as necessidades máximas de <i>throughput</i>	67
4.6	CONCLUSÕES	70
CAPÍTULO 5 - ALGORITMO PROPOSTO PARA A FERRAMENTA DE PLANEAMENTO PARA O SISTEMA DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS LTE		71
5.1	INTRODUÇÃO	72
5.2	<i>WIMAX VERSUS LTE</i>	72
5.3	<i>INPUTS NECESSÁRIOS</i>	74
5.3.1	<i>Bandas de Frequência</i>	74
5.3.2	<i>Modelo de propagação</i>	75
5.3.3	<i>MIMO</i>	75
5.3.4	<i>Estrutura da trama</i>	76
5.3.5	<i>Características dos serviços</i>	78
5.3.5.1	Classe <i>QoS</i>	79
5.3.5.2	Probabilidade de bloqueio	80
5.3.5.3	Esquemas de modulação e codificação	80
5.3.5.4	Parâmetros de <i>throughput</i>	81
5.3.6	<i>Perfis dos utilizadores</i>	81
5.4	<i>OUTPUTS ESPERADOS</i>	82
5.5	ALGORITMO PROPOSTO	82
5.5.1	<i>Diagrama geral do algoritmo</i>	82
5.5.2	<i>Cálculo da capacidade do tráfego agregado</i>	84
5.5.2.1	Método da aproximação Gaussiana	84
5.5.2.2	Método da probabilidade de bloqueio	85
5.5.3	<i>Gestão de recursos</i>	86
5.5.3.1	Alocação de recursos para as necessidades mínimas de <i>throughput</i>	86
5.5.3.2	Alocação de recursos para as necessidades máximas de <i>throughput</i>	88

5.6	CONCLUSÕES.....	90
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....		91
6.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	92
6.2	TRABALHO FUTURO	92
ANEXOS		95
ANEXO A - MODELOS DE PROPAGAÇÃO		96
ANEXO B – DESENVOLVIMENTO DE EXPRESSÕES AUXILIARES PARA O CÁLCULO DO TRÁFEGO		105
REFERÊNCIAS		111

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Evolução dos utilizadores móveis [41].	6
Figura 2.2 – Evolução do tráfego entre 2009 e 2014 [38].	8
Figura 2.3 – Comparação entre os modos <i>FDD</i> e <i>TDD</i> [8].	11
Figura 2.4 - Exemplo de modulação adaptativa [9].	13
Figura 2.5 – Representação frequência-tempo de um sinal <i>OFDM</i> [42].	15
Figura 2.6 – Estrutura de uma sub-trama <i>OFDM</i> [13].	17
Figura 2.7 – Comparação entre <i>ODFMA</i> e <i>SC-FDMA</i> [15].	19
Figura 2.8 – Mapeamento de canais [40].	20
Figura 2.9 – Comparação entre as diferentes técnicas de múltiplas antenas [16].	24
Figura 2.10 – Débito binário teórico da ligação descendente em função dos esquemas de modulação e codificação e <i>MIMO</i> [3].	25
Figura 2.11 - Débito binário teórico da ligação ascendente em função dos esquemas de modulação e codificação [3].	26
Figura 2.12 – Exemplo da utilização da técnica <i>beamforming</i> .	27
Figura 3.1 – Modelos de propagação (<i>outdoor</i> e <i>indoor</i>) em função da faixa de frequência [19].	32
Figura 3.2 – Modelo de propagação (<i>outdoor</i>) em função da altura da antena das estações base [19].	33
Figura 3.3 – Modelo de propagação (<i>outdoor</i>) em função da antena da estação terminal [19].	33
Figura 3.4 – Gráfico comparativo dos diferentes modelos de propagação <i>outdoor</i> .	35
Figura 3.5 – Distribuição típica do tráfego diário numa rede móvel [21].	38
Figura 3.6 - Perfil da utilização das diferentes aplicações móveis no período de maior tráfego [22].	38
Figura 3.7 – <i>Inputs</i> e <i>outputs</i> dos modelos de agregação de tráfego [23].	39
Figura 3.8 - Função de densidade de probabilidade do tráfego agregado.	39
Figura 3.9 – Exemplificação da agregação de tráfego de diferentes fontes [23].	43
Figura 3.10 – Diferentes estados de ocupação do sistema com capacidade $C = 4$ [23].	47
Figura 3.11 – Probabilidades de ocorrência de cada estado [23].	47
Figura 3.12 – Probabilidade de bloqueio para diferentes capacidades de sistema.	49
Figura 4.1 – Características da mobilidade dos utilizadores [29].	55
Figura 4.2 – Características dos perfis dos utilizadores [29].	55
Figura 4.3 – Características da modelação de ambientes [29].	57
Figura 4.4 – Características da modelação das classes de cenários [29].	58
Figura 4.5 - Características dos serviços de voz [29].	59
Figura 4.6 – Esquemas de modulação e codificação [29].	61
Figura 4.7 – Esquema do símbolo <i>OFDM</i> .	61
Figura 5.1 – Caracterização das bandas de frequência [34].	74

Figura 5.2 – Parâmetros de um modelo de propagação [34].	75
Figura 5.3 – Características do <i>site</i> [34].	76
Figura 5.4 – Estrutura da trama LTE.	77
Figura 5.5 – Características da estrutura da trama <i>WiMAX</i> [35].	78
Figura 5.6 – Características dos serviços.	79
Figura 5.7 – Esquemas de modulação e codificação.	80
Figura 5.8 – Características do perfil dos utilizadores.	81
Figura 5.9 - Características da modelação de ambientes [29].	82
Figura 5.10 – Diagrama geral do algoritmo proposto.	83
Figura 5.11 – Diagrama do algoritmo de dimensionamento da capacidade da célula para uma dada probabilidade de bloqueio de serviços.	86
Figura 5.12 – Diagrama do algoritmo de alocação de recursos para as necessidades mínimas de <i>throughput</i> .	88
Figura 5.13 - Diagrama do algoritmo de alocação de recursos para as necessidades máximas de <i>throughput</i> .	89
Figura A.1 – Gráfico de <i>Amu</i> em função da frequência e distância [36].	96
Figura A.2 – Factor de correcção da altura da antena da estação base [36].	97
Figura A.3 – Factor de correcção da altura da antena do terminal móvel [36].	97
Figura A.4 – Aplicação do valor de θ [19].	103
Figura B.5 - Função de densidade de probabilidade do tráfego agregado do k-ésimo serviço.	105

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Bandas de frequências para o <i>FDD</i> [5].	12
Tabela 2.2 - Bandas de frequências para o <i>TDD</i> [5].	12
Tabela 2.3 - Esquemas de modulação e codificação [10].	14
Tabela 2.4 – Parâmetros <i>OFDM</i> para o esquema de transmissão da ligação descendente [12].	16
Tabela 3.1 – Organização dos diferentes identificadores de classe do <i>QoS</i>	50
Tabela 4.1 – Organização dos terminais móveis em função do <i>QoS</i> e da prioridade [29].	66
Tabela 5.1 – Comparação entre as tecnologias <i>WiMAX</i> e <i>LTE</i> [4].	73
Tabela 5.2 - Organização dos terminais móveis em função do <i>QoS</i> e da prioridade.....	87
Tabela A.1 – Valores para os parâmetros de γ_1 [19].	103

Lista de Acrónimos

1G – Primeira geração de sistemas de comunicações móveis

2G – Segunda geração de sistemas de comunicações móveis

3G – Terceira geração de sistemas de comunicações móveis

4G – Quarta geração de sistemas de comunicações móveis

3GPP – 3rd Generation Partnership Project

AAS – Advanced Antenna Systems

ACK - Acknowledgement

AMC – Adaptative Modulation and Coding

BE – Best Effort

BCCH – Broadcast Control Channel

BCH – Broadcast Channel

BPSK – Binary Phase Shift Keying

CAGR – Coumpound Annual Growth Rate

CCCH – Common Control Channel

CQI – Channel Quality Indicator

DCCH – Dedicated Control Channel

DL – Downlink

DL-SCH – Downlink Shared Channel

DTCH – Dedicated Traffic Channel

DVB-H – Digital Video Broadcasting – Handheld

ErtPS – extended real-time Polling Service

E-UTRAN - Evolved – UMTS Terrestrial Radio Access Network

FC – Função Característica

FDD – Frequency Division Duplexing

FDP – Função Densidade de Probabilidade

FDPC – Função Densidade de Probabilidade Cumulativa

FDM – Frequency Division Multiplexing

FTP – File Transfer Protocol

GBR – Guaranteed bit-rate

GoS – Grade of Service

GPRS – General Packet Radio Service

GSM – Global System for Mobile Communications

HARQ – Hybrid Automatic Repeat Request

HSPA – High Speed Packet Access

HTTP – HyperText Transfer Protocol

IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers

IP – Internet Protocol

LoS – Line of Sight

LTE – Long Term Evolution

LUI – Lisbon University Institute

MCCH – Multicast Control Channel

MIMO – Multiple Input and Multiple Output

MISO – Multiple Input Single Output

MTCH – Multicast Traffic Channel

NACK – Non-Acknowledgement

Non-GBR – Non-guaranteed bit-rate

nrtPS – non-real-time Polling Service

OFDM - Orthogonal Frequency-Division Multiplexing

P2A – Peak to Average

PARP – Peak to Average Ratio Power

PBCH – Physical Broadcast Channel

PC – Prefixo Cíclico

PCCH – Paging Control Channel

PCH – Paging Channel

PDCCH – Physical Downlink Control Channel

PDSCH – Physical Downlink Shared Channel

PELR – Packet Error Loss Rate

PMCH – Physical Multicast Channel

PRACH – Physical Random Access Channel

PRB – Physical Resource Block

PUCCH – Physical Uplink Control Channel

PUSCH – Physical Uplink Shared Channel

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

QCI – QoS Class Identifier

QoS – Quality of Service

QPSK – Quadrature Phase Shift Keying

RACH – Random Access Channel

RB – Resource Block

rtPS – real-time Polling Service

SC-FDM – Single Carrier Frequency-Division Multiplexing

SIMO – Single Input Multiple Output

SISO – Single Input Single Output

SNR – Signal-to-Noise Ratio

SINR – Signal-to-Interference and Noise Ratio

TDD – Time Division Duplexing

TDMA – Time Division Multiple Access

UGS – Unsolicited Grant Service

UL – Uplink

UL-SCH – Uplink Shared Channel

UMTS – Universal Mobile Telecommunications System

UTRAN – UMTS Terrestrial Radio Access Network

VA – Variável Aleatória

Wi-Fi – Wireless Fidelity

WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access

Lista de Símbolos

Δf – Espaçamento entre sub-portadoras

β – Atenuação específica para trajectos curtos

λ_k – Taxa média de chegada de chamadas por hora do k -ésimo serviço

μ_k – Tempo médio de utilização do k -ésimo serviço

$\pi(n)$ – Probabilidade de ocorrência do estado n

$\rho_{dados\ DL}$ – Probabilidade de actividade por hora do serviço de dados na ligação descendente

$\rho_{dados\ UL}$ – Probabilidade da actividade por hora do serviço de dados na ligação ascendente

ρ_k – Intensidade de tráfego por hora do k -ésimo serviço

ρ_{voz} – Probabilidade de actividade por hora do serviço de voz

p_{u_k} – Percentagem de utilizadores que utilizam o k -ésimo serviço

γ_1 – Perda de percurso em ambiente *outdoor*

γ_2 – Perda de percurso em ambiente *indoor*

$\Phi_{A_g}(\omega)$ – Função característica do tráfego agregado

$\Phi_{A_k}(\omega)$ – Função característica do k -ésimo serviço

ε – *Overflow*

ε_{esp} – Eficiência espectral

ε_k – Probabilidade de bloqueio do k -ésimo serviço

σ_{A_g} – Variância do tráfego agregado

σ_{A_k} – Variância do k -ésimo serviço

$\gamma_{1,k}$ – *Skewness* do k -ésimo serviço

A_{maz} – Atenuação máxima

A_g – Tráfego agregado

A_k – Tráfego k -ésimo serviço

a_{A_k} – Quantidade de recursos necessários para o k -ésimo serviço

b_k – Número de recursos utilizados pelo k -ésimo serviço

C – Capacidade do sistema

C_{A_g} – Capacidade tráfego agregado
 C_{A_k} – Capacidade do tráfego do k -ésimo serviço
 Cod – Taxa de codificação
 $CAGR$ – Taxa de crescimento anual do tráfego
 d_0 – Distância de referência
 d_{bp} – Distância de *breakingpoint*
 $D_{chamadas}$ – Duração média da chamada
 d_{depth} – Longitude do trajecto dentro da zona vegetativa
 D_{PC} – Duração do prefixo cíclico
 $D_{símbolo}$ – Duração do tempo de símbolo
 $D_{símbolo}^{útil}$ – Duração do tempo útil de símbolo
 D_{slot} – Duração do *slot*
 $D_{sub-trama}$ – Duração da sub-trama
 D_{TGr}^{TDD} – Tempo de guarda recebido
 D_{Tgt}^{TDD} – Tempo de guarda transmitido
 D_{Trama} – Tempo total da trama
 $D_{Trama}^{útil}$ – Tempo útil da trama
 $E[A_k]$ – Valor esperado do tráfego do k -ésimo serviço
 ENV – Tipo de ambiente
 $F_{amostragem}$ – Frequência de amostragem
 $f_{amostragem}$ – Factor de amostragem
 $F_{[MHz]}$ – Frequência utilizada em MHz
 FAF – Factor de atenuação do chão
 G – Constante de normalização da probabilidade de ocorrência do estado n
 G_f – Ganho da penetração do sinal em edifícios.
 $G_{PC/útil}$ – Razão entre o tempo do prefixo cíclico e o tempo útil
 h_b – Altura da antena emissora
 h_t – Altura da antena do terminal móvel
 k – k -ésimo serviço
 K_1 – Factor correctivo do tipo de modelo de propagação
 K_2 – Factor correctivo da distância entre antena transmissora e receptora

K_c – Factor de correcção morfológico
 k_{TEC} – Constante da tecnologia
 LB_{canal} – Largura de banda do canal
 M – Conjunto de estados
 m_{Ag} – Quantidade média de recursos utilizados para o tráfego agregado
 m_{Ak} – Quantidade média de recursos utilizados para o tráfego do k -ésimo serviço
 M_i – Terminal móvel i
 m_k – Tráfego médio necessário por utilizador para o k -ésimo serviço
 N – Número total de tipos de serviços
 N_{Ae} – Número de antenas emisoras
 $N_{área}$ – Número total de utilizadores da área
 $N_{bits/simb}$ – Número de bits por símbolo
 N_{BR} – Número de blocos de recursos por sub-trama
 $N_{chamadas}$ – Número médio de chamadas por hora
 NE – Número de ambientes
 NF – Número de pisos
 N_{FFT} – Número total de sub-portadoras por canal
 $N_{Gerados}$ – Número de utilizadores gerados
 n_i – Número da classe do i -ésimo serviço
 N_k – Número de utilizadores para o k -ésimo serviço
 $N_{sessão}$ – Número de sessões por hora
 N_{simb} – Número de símbolos por sub-portadoras
 N_{sp} – Número de sub-portadoras por bloco de recursos
 N_{Simb} – Número de Símbolos
 $N_{símbolos/Trama}^{útil}$ – Número de símbolos úteis da trama
 $N_{S/ST}^{DL}$ – Número de símbolos na sub-trama da ligação descendente
 $N_{S/ST}^{UL}$ – Número de símbolos na sub-trama da ligação ascendente
 $N_{sub-portadoras}^{Dados}$ – Número de sub-portadoras de dados por canal
 N_t – Número de utilizadores da classe de cenário t
 $N_{Utilizadores}^{Célula}$ – Número de utilizadores por célula
 $N_{utilizadores}$ – Número total de utilizadores

N_u – Número de utilizadores a utilizar serviços
 N_{u_k} – Número de utilizadores do k -ésimo serviço
 NW – Número de paredes
 O – *Overhead* para a técnica *FDD*
 O_{Fixo}^{DL} – *Overhead* fixo da ligação descendente
 O_{Fixo}^{UL} – *Overhead* fixo da ligação ascendente
 $O_{Variável}^{DL}$ – *Overhead* variável da ligação descendente
 $O_{Variável}^{UL}$ – *Overhead* variável da ligação ascendente
 p – Prioridade de serviço
 $P2A_k$ – Indicador do grau de serviço do k -ésimo serviço
 $P(n, C)$ – Probabilidade de n recursos ocupados num sistema com capacidade C
 $p_{A_g}(a_g)$ – Função densidade de probabilidade do tráfego agregado
 $p_{A_k}(a_k)$ – Função densidade de probabilidade do tráfego do k -ésimo serviço
 $PL_{[dB]}$ – Perdas de percurso
 $PL_{LUI[dB]}$ – Perdas de percurso do modelo de propagação unificado *LUI*
 P_t – Peso da classe de cenário t
 p_{u_k} – Percentagem de utilizadores que utilizam o k -ésimo serviço
 R^{DL} – Percentagem de recursos da ligação descendente
 R^{UL} – Percentagem de recursos da ligação ascendente
 R_{buffer}^{DL} – Percentagem de recursos no *buffer* da ligação descendente
 R_{buffer}^{UL} – Percentagem de recursos no *buffer* da ligação ascendente
 $R_{célula}$ – Recurso da célula para a técnica *FDD*
 $R_{célula}^{DL}$ – Recursos da ligação descendente da célula
 $R_{célula}^{UL}$ – Recursos da ligação ascendente da célula
 $r_{DL-Trama}^{TDD}$ – Razão entre a sub-trama da ligação descendente e a trama
 R_k – Débito binário do k -ésimo serviço
 $R_{[km]}$ – Distância entre o transmissor e o receptor em km
 R_{max}^{DL} – Percentagem de recursos máximos da ligação descendente
 R_{max}^{UL} – Percentagem de recursos máximos da ligação ascendente
 R_{min}^{DL} – Percentagem de recursos mínimos da ligação descendente
 R_{min}^{UL} – Percentagem de recursos mínimos da ligação ascendente

R_{res}^{DL} – Percentagem de recursos resultantes da ligação descendente
 R_{res}^{UL} – Percentagem de recursos resultantes da ligação ascendente
 S_t – Área da superfície da classe de cenário t
 TA – Tráfego agregado
 TL^{DL} – Carga de tráfego da ligação descendente
 TL^{UL} – Carga de tráfego da ligação ascendente
 $TP_{Canal-DL}^{Pico}$ – *Throughput* de pico do canal para a ligação descendente
 $TP_{Canal-UL}^{Pico}$ – *Throughput* de pico do canal para a ligação ascendente
 $TP_{médio}^{DL}$ – *Throughput* médio da ligação descendente
 $TP_{médio}^{UL}$ – *Throughput* médio da ligação ascendente
 TP_{min}^{DL} – *Throughput* mínimo do serviço para a ligação descendente
 TP_{min}^{UL} – *Throughput* mínimo do serviço para a ligação ascendente
 TP_{max}^{DL} – *Throughput* máximo do serviço para a ligação descendente
 TP_{max}^{UL} – *Throughput* máximo do serviço para a ligação ascendente
 $TP_{resultante}^{DL}$ – *Throughput* resultante para a ligação descendente
 $TP_{resultante}^{UL}$ – *Throughput* resultante para a ligação ascendente
 $T_{Sub-trama}$ – Duração da sub-trama
 $TP_{Utilizador-DL}^{Pico}$ – *Throughput* de pico do utilizador para a ligação descendente
 $TP_{Utilizador-UL}^{Pico}$ – *Throughput* de pico do utilizador para a ligação ascendente
 V_{DL} – Volume de tráfego médio de dados transferidos na ligação descendente
 VEG – Tipo de vegetação
 V_k – Volume de tráfego por hora do k -ésimo serviço
 V_{UL} – Volume de tráfego médio de dados transferidos na ligação ascendente
 WAF – Factor de atenuação da parede
 W_e – Perdas de penetração em edifícios
 W_{GE} – Perdas adicionais das paredes
 X_f – Factor correctivo para a frequência
 X_h – Factor correctivo para a altura efectiva

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo faz-se uma breve descrição do trabalho desenvolvido, apresentando os objectivos e a motivação que estiveram na sua origem, e a estrutura da tese.

1.1 Âmbito e motivação

As relações humanas têm por base a comunicação, sendo esta essencial para manter o bom funcionamento da sociedade. Os primeiros sistemas de comunicações móveis estimularam o modo como nos relacionamos, aliando a comunicação à mobilidade. No entanto era um serviço analógico que fornecia apenas serviços de voz e que apresentava algumas limitações tecnológicas. A primeira evolução do sistema de comunicações móveis surge com a 2G (segunda geração), onde se realiza a transição do analógico para digital, permitindo uma gama de serviços mais abrangente (voz e dados). A rede 3G (terceira geração) surge então como um melhoramento das redes móveis permitindo assim a utilização dos serviços 2G com melhores débitos binários.

A constante evolução dos sistemas de comunicações móveis influencia o aparecimento de novas tecnologias (*WiMAX*, *HSPA- High Speed Packet Access*, *DVB-H-Digital Video Broadcasting – Handheld*), cada vez mais competitivas e orientadas aos requisitos do utilizador. Estas novas tecnologias permitem ao utilizador obter mais e melhor qualidade de serviços independentemente da sua localização. Actualmente a tendência de procura de locais onde os utilizadores possam usufruir dos serviços inverteu-se, passando a ser as redes móveis a fornecer níveis de serviços mais elevados, aliando a mobilidade a uma elevada capacidade.

É neste âmbito que surge o *LTE*. O *LTE* apresenta-se como uma evolução do *UMTS* (*Universal Mobile Telecommunications System*) e surge devido à necessidade de melhorar a rede já existente. Com esta tecnologia espera-se melhorar, substancialmente, os débitos binários dos utilizadores, aumentar a capacidade dos sectores e reduzir a latência, o que representa melhores condições de serviço e mobilidade para o utilizador.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação enquadra-se no âmbito de simplificar e otimizar as condições de planeamento de uma rede de comunicações móveis que utilize o *LTE*. A principal motivação que esteve subjacente ao desenvolvimento desta dissertação foi, por um lado, poder ajudar quem tem necessidade de fazer o planeamento de sistemas de comunicações móveis *LTE*, e por outro lado, poder contribuir para uma ferramenta de planeamento que tem por base uma já existente,

A9155, da Alcatel-Lucent, e que pretende utilizá-la para contemplar este tipo de sistemas de comunicações móveis.

1.2 Estado da arte

A evolução das redes móveis requer um planeamento de redes móveis celulares cada vez mais preciso e direccionado para as necessidades dos utilizadores. As ferramentas de planeamentos existentes apresentam-se como um instrumento fundamental para compreender as necessidades de uma rede.

Sendo o *LTE* um sistema recente existe a necessidade de desenvolver algoritmos para a modelação do tráfego de modo a que seja possível suportar as necessidades dos utilizadores móveis. Surge então a necessidade de aliar esta tecnologia a uma ferramenta de planeamento de redes celulares.

Existem algumas ferramentas de planeamento disponíveis para o sistema de comunicações móveis *LTE*, entre elas a ferramenta de planeamento rádio *Atoll*, que permite a caracterização dos parâmetros da rede, tráfego, análise da cobertura da célula e planeamento por capacidade [1].

1.3 Objectivos

Esta dissertação tem como objectivo principal propor um algoritmo para uma ferramenta de planeamento por capacidade para o sistema de comunicações *LTE*. Para cumprir este objectivo é necessário compreender a tecnologia *LTE*, principalmente entender as técnicas *OFDM*, identificar modelos de propagação, *indoor* e *outdoor*, analisar vários modelos de tráfego multi-serviço e escolher o mais eficiente para a aplicação numa ferramenta de planeamento.

Propor o algoritmo a implementar com a identificação dos conteúdos das janelas da ferramenta, *input* e *output*, não descurando o *user-friendly* e a eficiência da ferramenta.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação apresenta-se estruturada em 6 capítulos e 2 anexos. No capítulo 1 faz-se uma breve introdução sobre a motivação e o âmbito em que se insere esta

dissertação e quais os seus objectivos principais. No capítulo 2 apresenta-se uma descrição da tecnologia *LTE*. O capítulo 3 aborda as questões de planeamento por cobertura e por capacidade existentes para o sistema de comunicações móveis *LTE*. No capítulo 4 descreve-se o funcionamento da ferramenta de planeamento A9155 da Alcatel-Lucent considerando o planeamento por capacidade. No capítulo 5 apresenta-se o algoritmo proposto para a ferramenta de planeamento e identificam-se as alterações necessárias a efectuar à ferramenta de planeamento A9155, para os sistemas de comunicação *WiMAX*, para poder fazer o planeamento para os sistemas de comunicações móveis *LTE*, considerando a mesma plataforma. No capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões e sugere o trabalho futuro. No final do documento são incluídos dois anexos com desenvolvimento auxiliar, que tornaria o corpo da dissertação mais denso.

Capítulo 2

Requisitos *LTE*

Neste capítulo faz-se uma breve descrição do sistema de comunicações móveis *LTE*, e apresentam-se os requisitos necessários que conduzam à obtenção da capacidade de tráfego.

2.1 Introdução

A constante necessidade por serviços móveis de maior qualidade impulsiona o desenvolvimento de tecnologias com objectivos cada vez mais centrados nas necessidades dos utilizadores. Por forma a cumprir este objectivo, o LTE surge como o sistema de comunicações móveis mais recente no avanço dos sistemas de telecomunicações móveis.

Neste capítulo aborda-se a evolução dos utilizadores e serviços nas redes de comunicações móveis, e os objectivos propostos no sistema de comunicações móveis LTE de modo a suportar o aumento do tráfego móvel. Apresentam-se as principais características do sistema de comunicações móveis LTE e as técnicas utilizadas na ligação descendente e ascendente, OFDM e SC-FDM (*Single Carrier Frequency-Division Multiplexing*), esquemas de modulação e codificação e sistemas de múltiplas antenas.

2.1.1 Evolução dos utilizadores de comunicações móveis

Por forma a verificar a evolução dos utilizadores de comunicações móveis, apresenta-se na Figura 2.1 a distribuição dos utilizadores no período entre 2001 e 2010 por região do globo na Europa (Central e Ocidental), América do Norte, América Latina, Ásia e África).

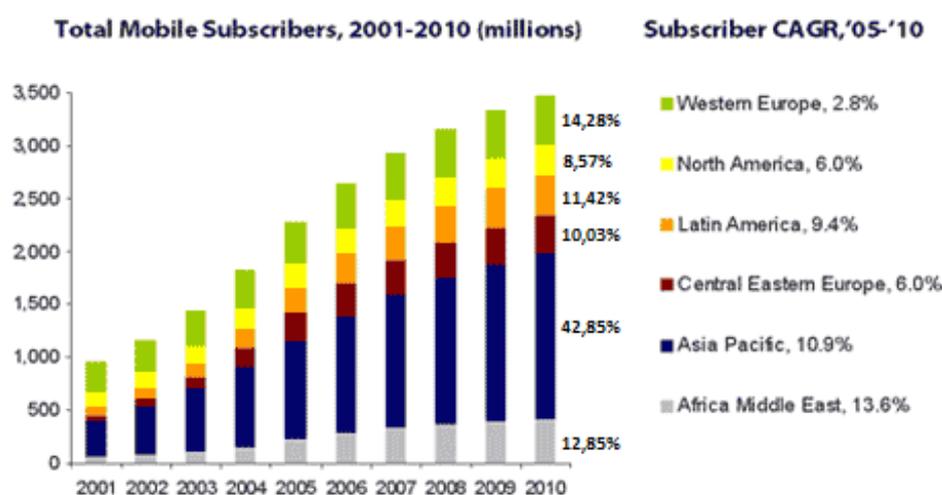


Figura 2.1 - Evolução dos utilizadores móveis [41].

Em 2002 atinge-se o primeiro milhão de utilizadores, em 2005 este valor ultrapassa os dois milhões, e apenas 3 anos depois, em 2008, este valor já ronda os 3 milhões de utilizadores. Na Figura 2.2 também se pode verificar, para as diferentes regiões, a taxa de crescimento anual¹ (CAGR) dada por [2]:

$$CAGR = \left(\frac{\text{Valor final}}{\text{Valor inicial}} \right)^{\left(\frac{1}{N^{\circ} \text{ de anos}} \right)} - 1 \quad (2.1)$$

Entre 2005 e 2010, verifica-se um maior crescimento para a região da África do Médio Oriente, que apresenta uma taxa de crescimento anual de 13,6%, seguido das regiões da Ásia do Pacífico, América Latina, América do Norte, Europa Central e Ocidental.

Segundo [3], a penetração das comunicações móveis no mundo aproxima-se dos 60%, sendo um meio de comunicação preferível para as comunicações móveis. A crescente evolução da capacidade e cobertura das redes, aliada a uma redução dos custos do equipamento terminal, impulsionaram o crescimento das comunicações móveis.

2.1.2 Evolução do tráfego de dados

A evolução para a 2G veio permitir a introdução de tráfego de dados, para além dos serviços de voz já existentes na primeira geração. No entanto, o crescimento das comunicações de dados surge apenas na 3G, chegando mesmo a exceder o volume de tráfego de voz.

Na Figura 2.2 apresenta-se a evolução do tráfego nas regiões evidenciadas na subsecção anterior, evidenciando o crescimento exponencial do tráfego desde 2009 até ao tráfego previsível para 2014, que corresponde a um crescimento médio anual de 108%. Em 2014 é previsível um tráfego de cerca de $3,6 \times 10^6$ TeraBytes por mês, e onde cerca de 66% corresponde ao tráfego de vídeo. Através da evolução do crescimento verifica-se a necessidade de implementar redes de comunicações móveis que consigam suportar as necessidades de tráfego, que são cada vez maiores.

¹ CAGR – *Compound Annual Growth Rate*. Corresponde à taxa de crescimento anual obtida durante um determinado período de tempo.

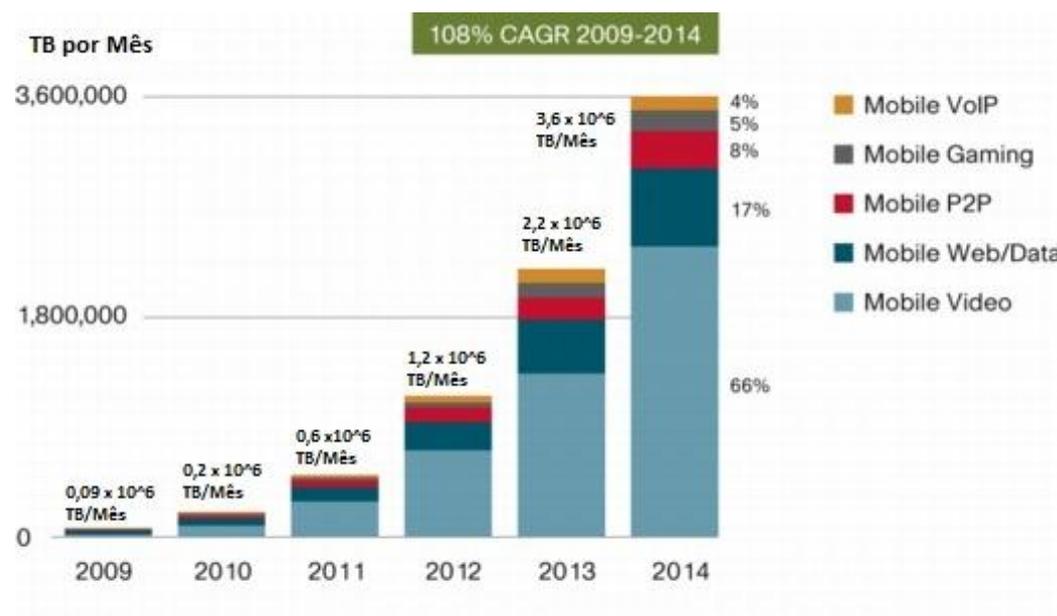


Figura 2.2 – Evolução do tráfego entre 2009 e 2014 [38].

2.1.3 Objectivos do LTE

De modo a que seja possível comportar as enormes transferências de dados, é necessário que existam estruturas suficientes para satisfazer essas necessidades, sendo esse o principal objectivo do LTE. Esta tecnologia apresenta-se como a evolução do UMTS, surgindo como rede de pré quarta geração (4G), capaz de suportar novos serviços multimédia exigentes ao nível de rede.

Com o sistema de comunicações móveis LTE pretende-se atingir débitos binários elevados (100 Mbps para baixa mobilidade), baixa latência (10 ms), optimização da comutação de pacotes, garantindo uma mobilidade elevada e uma largura de banda flexível desde 1,25 MHz até 20 MHz [3].

2.2 Requisitos de Desempenho

Tal como foi referido anteriormente, são as necessidades dos utilizadores e da rede que estimulam o desenvolvimento de novos sistemas e, para se poder atingir essas necessidades, é essencial que alguns requisitos sejam cumpridos, *e.g.*, arquitectura de rede, capacidade, latência, mobilidade, cobertura, flexibilidade espectral e modulação e codificação adaptativa.

2.2.1 Arquitectura

A necessidade de atingir os objectivos propostos pelo *LTE* requer uma evolução da arquitectura de rede existente. É nesse sentido que a *UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network)* evolui para a *E-UTRAN (Evolved – UMTS Terrestrial Radio Access Network)*. A *E-UTRAN* resulta então numa arquitectura mais simples, com menos níveis que a *UTRAN* e baseada em *IP*, permitindo assim obter ritmos de transmissão mais elevados e latências mais baixas.

O objectivo principal da arquitectura é ser o mais simplificada possível de modo a diminuir a quantidade de equipamentos que possam apresentar falhas (reduzindo a indisponibilidade do sistema de comunicações móveis), diminuindo também o custo associado à implementação e, por outro lado, o atraso devido à existência de vários equipamentos na rede.

2.2.2 Capacidade

O sistema de comunicação deverá conseguir suportar *throughputs* na ordem dos 100 Mbps na ligação descendente e 50 Mbps na ligação ascendente, para uma largura de banda de 20 MHz. O sistema deverá ter a capacidade de comportar até 200 utilizadores numa largura de banda de 5 MHz, e 400 utilizadores considerando uma largura de banda de 20 MHz [4].

2.2.3 Latência

A latência é um factor importante para o desempenho de muitas aplicações. Algumas aplicações não requerem elevados débitos binários, mas necessitam de baixos atrasos. A latência é definida como o tempo necessário para transmitir um pequeno pacote *IP* deste o terminal até à estação base. O *LTE* permite uma latência máxima de 5 ms numa rede pouco sobrecarregada, isto é, em células com um terminal [5].

2.2.4 Mobilidade

A mobilidade é bastante importante nas comunicações móveis, pois desempenha um papel relevante para a transmissão de informação. A velocidade a que o terminal

se desloca influência a qualidade do sinal, podendo este apresentar maior degradação quanto maior for a velocidade do terminal. Segundo [6], a rede requer que um utilizador se mantenha ligado com velocidades até 350 km/h, podendo mesmo atingir os 500 km/h para uma largura de banda de 20 MHz.

2.2.5 Cobertura

De modo a poder suportar diversos cenários e atingir os requisitos propostos para o *throughput* e mobilidade, a arquitectura do LTE deverá ser suficientemente flexível. Segundo [7], esta deverá conseguir suportar uma cobertura com uma célula com um raio até 5 km, conseguindo suportar os requisitos propostos para *throughput* e mobilidade, e células com um raio até 30 km podendo considerar alguma degradação do *throughput*.

2.2.6 Flexibilidade Espectral

A gestão do espectro rádio é uma etapa fundamental para o planeamento de uma rede de comunicações móveis. A crescente utilização do espectro pelos diversos serviços de telecomunicações faz com que este seja um dos recursos mais importantes no planeamento deste tipo de serviços, sendo para tal necessário uma gestão eficiente do mesmo.

Uma das grandes vantagens do LTE é permitir flexibilidade da alocação do espectro, uma vez que este pode operar em: 1,25; 2,5; 5; 10; 15 e 20 MHz. O LTE possui à sua disposição alguns esquemas de alocação espectral, podendo operar nos modos *FDD* (*Frequency Division Duplexing*) e *TDD* (*Time Division Duplexing*).

Na Figura 2.3 apresenta-se uma comparação entre os dois modos. O funcionamento no modo FDD requer a utilização de duas bandas de frequência, sendo uma delas para a ligação descendente e a outra para a ligação ascendente, uma vez que o transmissor e o receptor operam com frequências de sub-portadoras diferentes. Este modo pode ser eficiente no caso da utilização de tráfego simétrico, ou seja, tráfego que requer uma quantidade de informação semelhante tanto na ligação descendente como na ligação ascendente (serviços de voz). Outra vantagem deste

modo reside no facto de as estações base vizinhas não interferirem umas com as outras, aumentando a eficiência e facilitando o planeamento celular.

O modo *TDD* apenas utiliza uma banda de frequência para transmissão na ligação descendente e ascendente, permitindo um menor desperdício de largura de banda, uma vez que no caso de existir um *slot* temporal que não esteja a ser utilizado, poderá ser utilizado por outro canal, de modo a aumentar o ritmo de transmissão. Ao contrário do *FDD* este modo é mais eficiente na transmissão de tráfego assimétrico, ou seja, tráfego que requer elevadas taxas de transmissão apenas na ligação descendente, *e.g.*, serviços de multimédia. Ao contrário do modo *FDD*, o *TDD* possui a desvantagem de existir interferência entre estações base vizinhas.

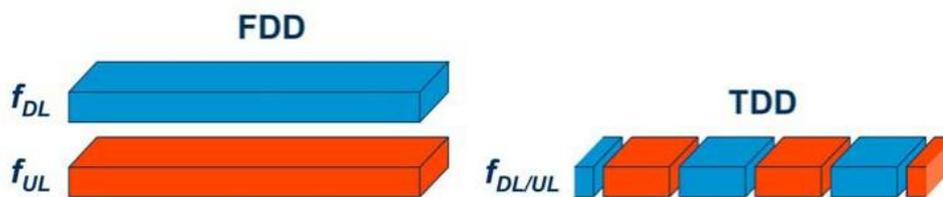


Figura 2.3 – Comparação entre os modos *FDD* e *TDD* [8].

O *LTE* possibilita a utilização dos dois modos em simultâneo, permitindo assim uma melhor gestão de espectro radioelétrico. As duas técnicas podem partilhar a mesma largura de banda, sendo possível utilizar a capacidade total de um sistema de comunicações móveis para poder incluir mais utilizadores por célula.

O *LTE* pode ser implementado com duas bandas de frequência, *i.e.*, na ligação descendente e ascendente, no modo *FDD*, ou com uma banda de frequência, modo *TDD*, onde é utilizada tanto na ligação descendente e ascendente. A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 apresentam as bandas de frequência utilizadas em diferentes regiões, para as técnicas *FDD* e *TDD*, respectivamente.

FDD band	Uplink range (MHz)	Downlink range (MHz)	Main region(s)
I	1920–1980	2110–2170	Europe, Asia
II	1850–1910	1930–1990	Americas (Asia)
III	1710–1785	1805–1880	Europe, Asia (Americas)
IV	1710–1755	2110–2155	Americas
V	824–849	869–894	Americas
VI	830–840	875–885	Japan
VII	2500–2570	2620–2690	Europe
VIII	880–915	925–960	Europe, Asia
IX	1749.9–1784.9	1844.9–1879.9	Japan
X	1710–1770	2110–2170	Americas

Tabela 2.1 - Bandas de frequências para o FDD [5].

TDD band	Frequency range (MHz)	Main region(s) (MHz)
(a)	1900–1920 2010–2025	Europe, Asia
(b)	1850–1910 1930–1990	(Americas)
(c)	1910–1930	(Americas)
(d)	2570–2620	Europe

Tabela 2.2 - Bandas de frequências para o TDD [5].

2.2.7 Modulação e Codificação Adaptativa

Nas comunicações móveis é usual existirem variações significativas nas condições do canal, condicionando a capacidade das ligações. Por este motivo, é necessário lidar com essas variações, realizando adaptações aos parâmetros definidos, de modo a que se possa minimizar os efeitos nos recursos rádio utilizados [5].

Essas modificações são feitas através da técnica *AMC (Adaptive Modulation and Coding)*, onde é possível modificar o esquema de modulação (*QPSK, 16-QAM ou 64-QAM*) ou a taxa de codificação. Esta função permite melhorar o *throughput*, aumentando a capacidade do sistema e diminuindo a probabilidade de erro da ligação.

A selecção do tipo de modulação é realizada através da escolha da taxa de transferência do utilizador e pela relação sinal ruído, *SNR (Signal-to-Noise Ratio)*. Em caso de condições de propagação adversas ou distâncias muito elevadas, é preferível garantir uma comunicação estável, *i.e.*, com menor taxa de erros utilizando um esquema de modulação com menos níveis. Para o caso em que as condições de propagação são favoráveis e é necessário uma maior taxa de transmissão é preferível a utilização de esquemas de modulação de ordem mais elevada.

De forma elucidativa a Figura 2.4 representa os esquemas de modulação a utilizar na célula de acordo com a distância à estação base. O utilizador que se encontra no centro da célula consegue obter débitos binários elevados, com a utilização da modulação *64-QAM*, uma vez que as condições de recepção do sinal são melhores e consequentemente, a taxa de erro é menor, podendo a informação ser enviada com uma eficiência espectral superior. No caso em que o utilizador se encontra no limite da célula, as condições de recepção do sinal são piores, implicando uma maior taxa de erros, sendo por isso utilizada um esquema de modulação mais baixo, que suporta menos bits por símbolo.

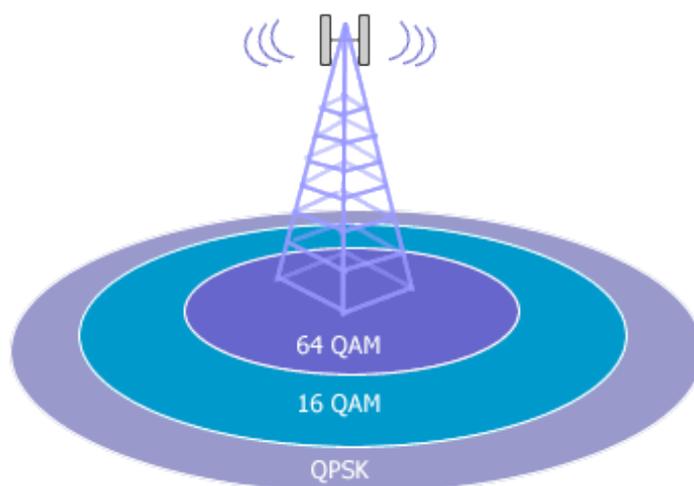


Figura 2.4 - Exemplo de modulação adaptativa [9].

A Tabela 2.3 apresenta os diferentes esquemas de modulações e taxas de codificação, que são utilizadas no *LTE*. A taxa de codificação corresponde à razão entre o número de bits de informação e o número de bits codificados. Quanto maior for a

taxa de codificação utilizada, maior será a taxa de transmissão efectiva disponível, mas menor será a capacidade correctora do código.

Esquema de Modulação	Taxa de Codificação
QPSK	1/3
	1/2
	2/3
	3/4
	4/5
16-QAM	1/3
	1/2
	2/3
	3/4
	4/5
64-QAM	1/3
	1/2
	2/3
	3/4
	4/5

Tabela 2.3 - Esquemas de modulação e codificação [10].

2.3 Camada Física

A camada física do LTE é constituída por blocos que permitem que a transmissão de dados e o controlo de informação entre a estação base e os equipamentos terminais seja eficaz. Nesta secção descrevem-se, de forma sucinta, as diferentes técnicas de multiplexagem para a ligação descendente e ascendente, e os canais físicos, lógicos e de transporte utilizados na camada física.

2.3.1 Ligação Descendente: OFDM

O LTE utiliza o OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) como esquema de multiplexagem na ligação descendente. O OFDM é uma técnica de transmissão digital baseado no conceito de modulação com multiportadoras e que permite atingir elevadas taxas de transmissão [11].

Esta técnica é baseada na *FDM* (*Frequency Division Multiplexing*), bastante utilizada na transmissão de rádio difusão e televisão, onde cada estação é associada a uma frequência. De modo a reduzir a interferência entre canais adjacentes é introduzida uma banda de frequência de guarda. O *OFDM* difere desta técnica pelo facto de utilizar ortogonalidade entre as sub-portadoras permitindo a divisão de uma única transmissão em múltiplos sinais e enviando-os em diferentes frequências (Figura 2.5). No *OFDM* é introduzido um tempo de guarda a cada símbolo de modo a compensar o atraso da propagação do canal, diminuindo a interferência entre símbolos.

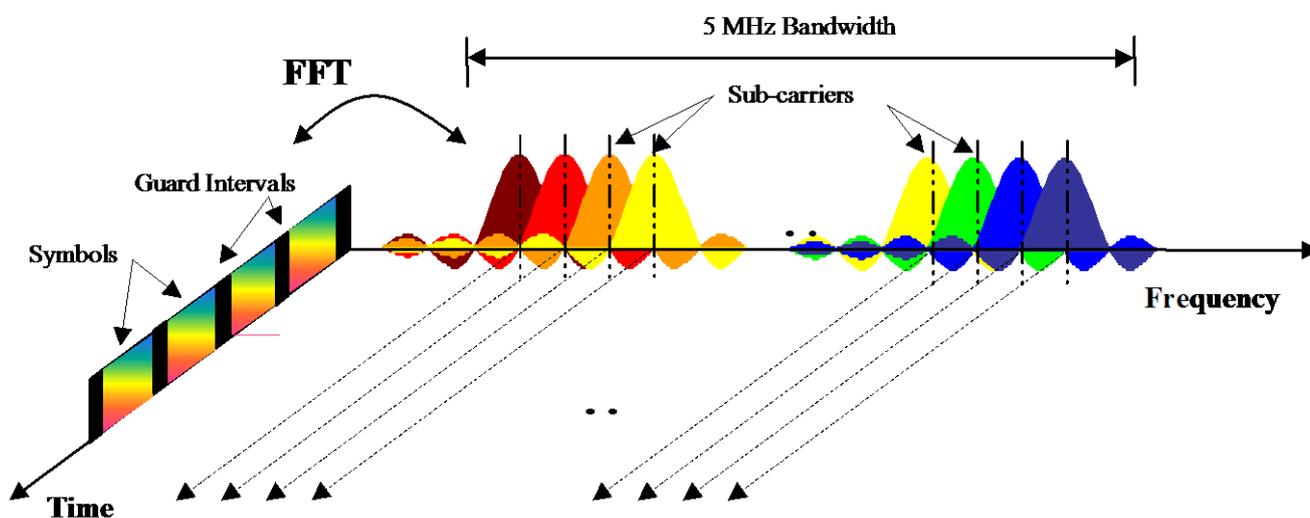


Figura 2.5 – Representação frequência-tempo de um sinal *OFDM* [42].

Na Tabela 2.4 são apresentados os valores por defeito para diversos parâmetros utilizados na transmissão. O *OFDM* utiliza várias sub-portadoras espaçadas 15 KHz entre si, de modo a otimizar a eficiência espectral, evitando assim a sobreposição do espectro. Na Figura 2.6 observa-se a estrutura de uma sub-trama *OFDM*, onde cada bloco de recursos contém 12 sub-portadoras, com 7 ou 6 símbolos para PC (Prefixo Cíclico) curto ou longo, respectivamente. Uma trama tem a duração de 10 ms, sendo estes divididos em 10 sub-tramas de 1 ms cada. Cada sub-trama consiste em 2 slots com duração de 0,5 ms cada.

Largura de Banda		1,25 MHz	2,5 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Tempo <i>slot</i>		0,5 ms					
Espaçamento entre sub-portadoras Δf		15 KHz					
Frequência de Amostragem		1,92 MHz (1/2 x 3,84 MHz)	3,84 MHz	7,68 MHz (2 x 3,84 MHz)	15,36 MHz (4 x 3,84 MHz)	23,04 MHz (6 x 3,84 MHz)	30,72 MHz (8 x 3,84 MHz)
Tamanho FFT		128	256	512	1024	1536	2048
Nº de PRB (<i>Physical Resource Blocks</i>)		6	12	25	50	75	100
Nº Sub-portadoras ocupadas		76	151	301	601	901	1201
PC curto/longo		7/6					
Tamanho PC (μs /amostras)	Curto	$(4.69/9) \times 6,$ $(5.21/10) \times 1$	$(4.69/18) \times 6,$ $(5.21/20) \times 1$	$(4.69/36) \times 6,$ $(5.21/40) \times 1$	$(4.69/72) \times 6,$ $(5.21/80) \times 1$	$(4.69/108) \times 6,$ $(5.21/120) \times 1$	$(4.69/144) \times 6,$ $(5.21/160) \times 1$
	Longo	$(16.67/32)$	$(16.67/64)$	$(16.67/128)$	$(16.67/256)$	$(16.67/384)$	$(16.67/512)$

Tabela 2.4 – Parâmetros OFDM para o esquema de transmissão da ligação descendente [12].

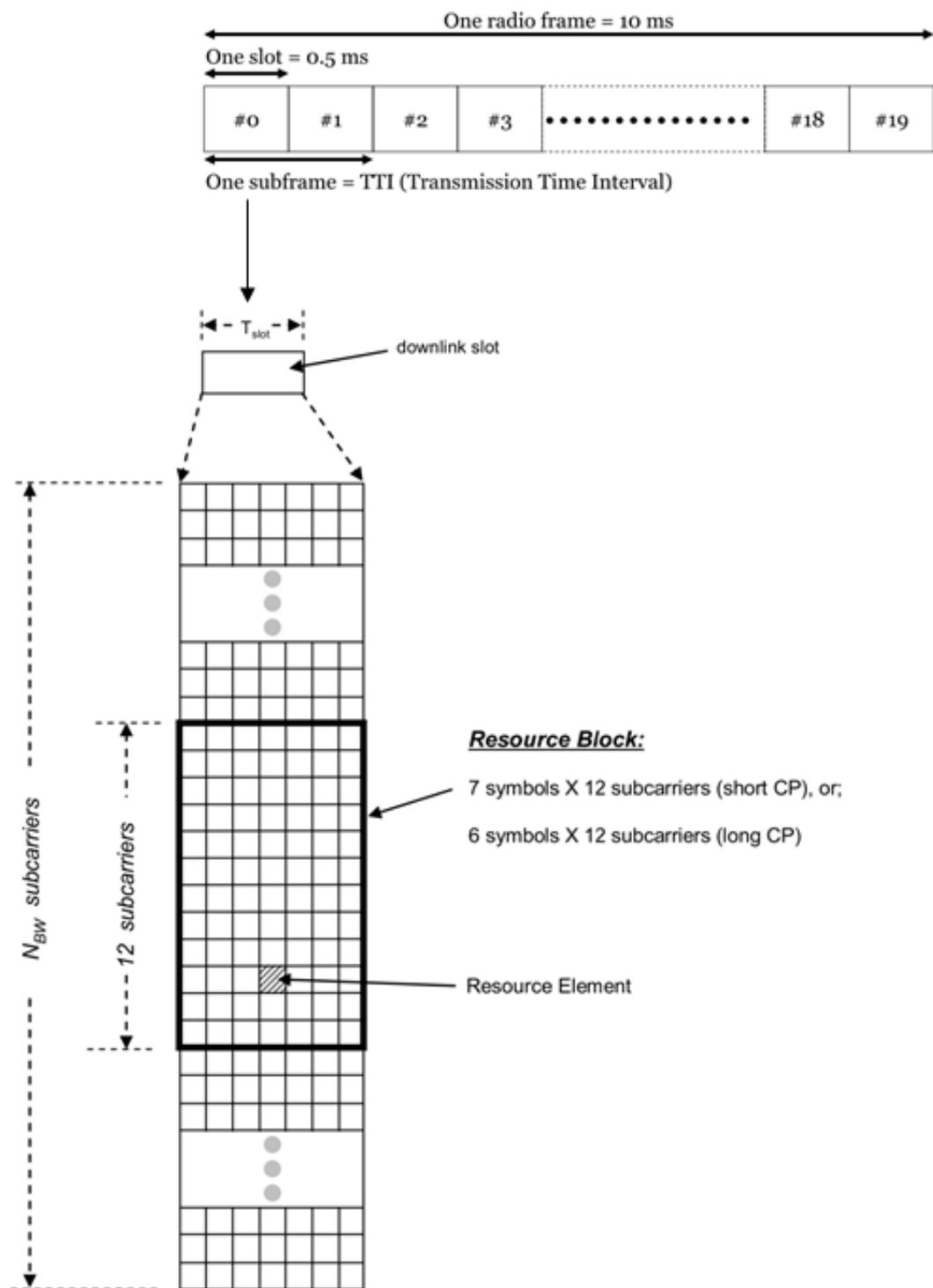


Figura 2.6 – Estrutura de uma sub-trama OFDM [13].

Tal como já foi referido, o LTE fornece elevados débitos binários através da utilização de larguras de banda até 20 MHz e modulações de ordem elevada. O débito binário calcula-se através da expressão (2.2).

$$\text{Débito binário} = \frac{N_{BR} \times N_{sp} \times N_{bits/simb} \times N_{simb} \times Cod}{D_{slot}} \quad (2.2)$$

Onde N_{BR} corresponde ao número de blocos de recursos por sub-trama, N_{sp} corresponde ao número de sub-portadoras por bloco de recursos, $N_{bits/simb}$ representa o número de bits por símbolo (2, 4 e 6 para QPSK, 16-QAM e 64-QAM, respectivamente), N_{simb} corresponde ao número de símbolos por sub-portadoras, Cod representa a taxa de codificação e $D_{Sub-trama}$ representa a duração da sub-trama.

É necessário considerar os *overheads* dos sinais de controlo de referência. Para a ligação descendente são utilizados, pelo PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*), 1 símbolo em cada 14 símbolos. Os sinais de referência da ligação descendente utilizam 2 símbolos em 14, de 3 em 3 sub-portadoras, numa ligação simples, 4 símbolos no esquema MIMO 2x2 e 6 símbolos no esquema MIMO 4x4.

2.3.2 Ligação Ascendente: SC-FDM

Na ligação ascendente é utilizado SC-FDM (*Single Carrier Frequency Division Multiplexing*) como esquema de multiplexagem. A forma básica de SC-FDM pode ser vista como sendo igual à modulação QAM, onde cada símbolo é transmitido um de cada vez, à semelhança do método TDMA (*Time Division Multiple Access*) utilizado em sistemas GSM.

A opção da utilização do SC-FDM, na ligação ascendente, resulta das formas de onda do esquema OFDM apresentarem flutuações de potência, resultando num elevado *Peak to Average Ratio Power (PARP)* [14]. Este factor poderá causar problemas, ao nível da conversão digital para analógico, destruindo a ortogonalidade entre as sub-portadoras, levando assim a uma utilização ineficiente da potência.

Na Figura 2.7 pode-se comparar os dois esquemas de multiplexagem, onde é possível observar o exemplo do envio de uma sequência de símbolos modulados em QPSK.

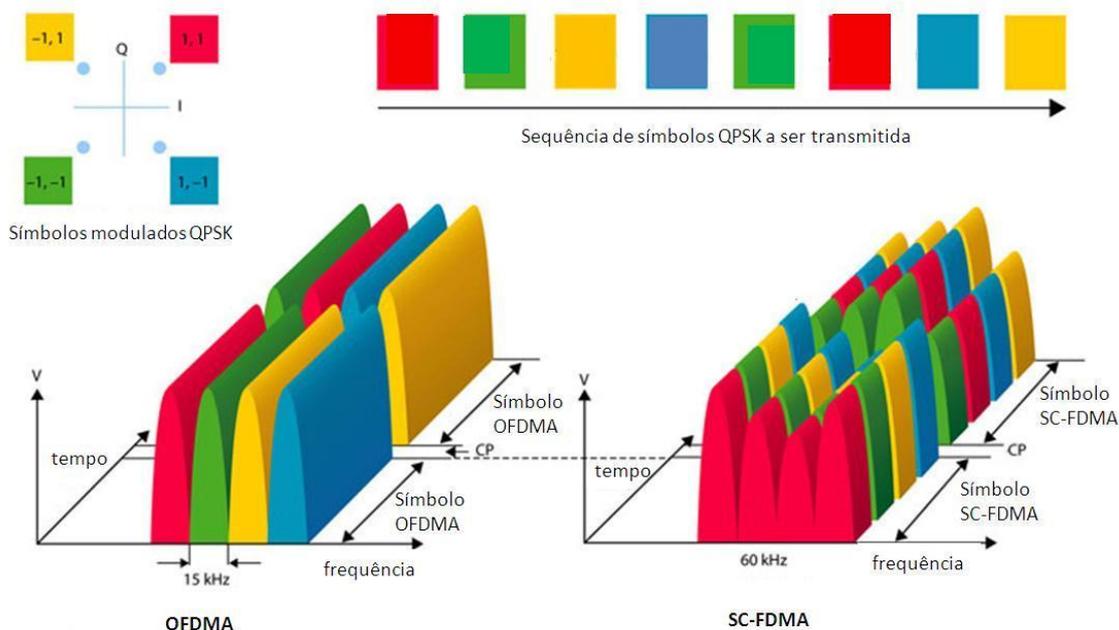


Figura 2.7 – Comparação entre OFDMA e SC-FDMA [15].

O cálculo do débito binário da ligação ascendente calcula-se de um modo semelhante ao da ligação descendente com a diferença da utilização de 1 símbolo em 7 para os sinais de referência da ligação ascendente.

2.3.3 Canais lógicos, de transporte e físicos

A camada de acesso ao meio realiza o mapeamento entre os canais lógicos e os canais de transporte, organizando os acessos dos diferentes terminais e dos serviços que utilizam, tanto na ligação descendente como na ligação ascendente, dependendo das duas prioridades. A Figura 2.8 apresenta o mapeamento dos canais lógicos, de transporte e físicos do LTE.

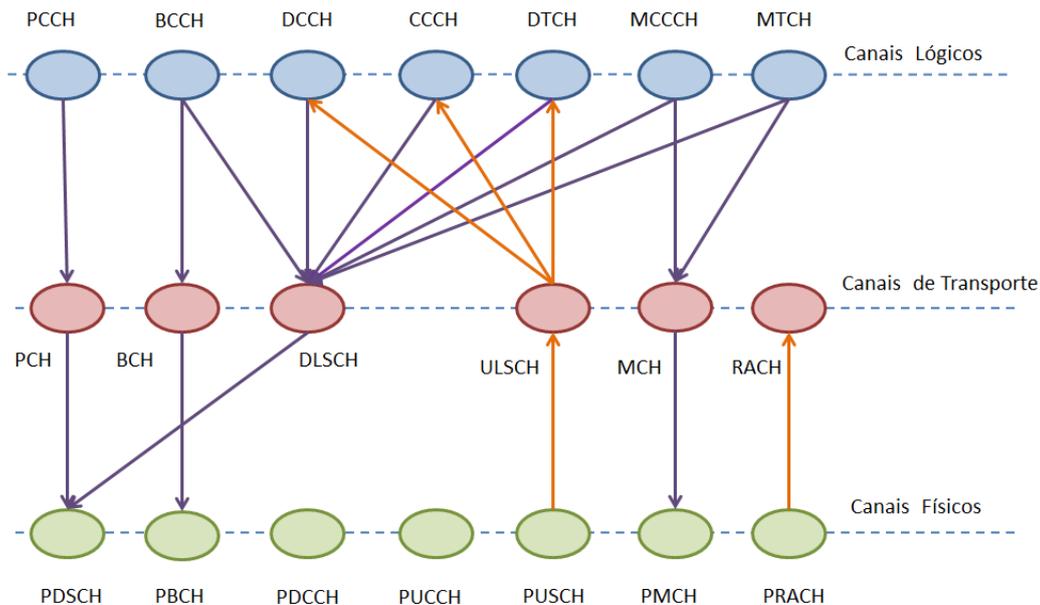


Figura 2.8 – Mapeamento de canais [40].

Os canais físicos transportam a informação das camadas superiores. Estes são mapeados em canais de transporte. Os canais de transporte actuam como uma interface entre a camada de acesso ao meio e a camada física. São definidos para a ligação descendente do LTE os seguintes canais:

- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):** é utilizado para o transporte de informação de dados, sendo então planeado para suportar débitos binários elevados.
- **Physical Broadcast Channel (PBCH):** este canal físico transporta a informação de sistema para os equipamentos dos utilizadores que requerem o acesso à rede.
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** é utilizado para transportar informação de controlo de sinalização para o terminal. É utilizado pelo *eNodeB* e transporta respostas *ACK/NACK* para a ligação ascendente e informação de alocação de recursos para o terminal.
- **Physical Multicast Channel (PMCH):** este canal físico transporta informação de sistema referente a transmissões *multicast*.

- **Physical Random Access Channel (PRACH):** este canal transporta a informação de preâmbulo de acesso aleatório, que consiste no tamanho do PC.
- **Physical Uplink Shared Channel (PUSCH):** transporta a informação de dados do utilizador.
- **Physical Uplink Control Channel (PUCCH):** transporta informação de controlo da ligação ascendente. Desempenha as seguintes funções:
 - ✓ Transporta a informação relativa ao *CQI (Channel Quality Indicators)*;
 - ✓ Pedidos de agendamento;
 - ✓ Transporta respostas *HARQ ACK/NACK* à transmissão da ligação descendente;
 - ✓ Utiliza modulação *QPSK*.

Os canais de transporte são a interface entre a camada de acesso ao meio e a camada física. A camada física necessita de ter capacidade para fornecer a alocação dinâmica de recursos, para taxas de dados variáveis e para a divisão de recursos entre diferentes utilizadores. Considerando [3], os canais de transporte podem ser descritos do seguinte modo:

- **Broadcast Channel (BCH):** é o canal de *broadcast* da ligação descendente que é utilizado para transmitir os parâmetros de sistema necessários para permitir o acesso dos terminais ao sistema, e também para identificar o operador. Os parâmetros do sistema podem incluir, por exemplo, parâmetros de acesso aleatório que informam o terminal quais os elementos de recursos que estão reservados para as operações de acesso aleatório;

- **Downlink Shared Channel (DL-SCH):** é o canal utilizado para transmitir a informação de dados na ligação descendente do LTE, que pode ser partilhado por vários utilizadores.
- **Paging Channel (PCH):** este canal é utilizado para transmitir informação de paginação na ligação descendente, ou seja, quando a rede pretende iniciar as comunicações com um terminal.
- **Uplink Shared Channel (UL-SCH):** transporta os dados do utilizador e informação de controlo originada no terminal na ligação ascendente. Semelhante ao DL-SCH.
- **Random Access Channel (RACH):** é o canal utilizado na ligação ascendente e tem como finalidade responder às mensagens de paginação, ou seja, transportar a informação de controlo do terminal, tais como pedidos de estabelecimento de ligação.
- **Multicast Channel (MCH):** é utilizado para transmitir dados de *multicast* do terminal móvel para a ligação descendente.

Os canais lógicos são caracterizados em canais lógicos de controlo e canais lógicos de tráfego. Os canais lógicos de controlo transportam informação de controlo enquanto que as informações do plano do utilizador são transportados pelo canal lógico de controlo de tráfego. Os canais lógicos utilizados na tecnologia LTE são:

- **Dedicated Control Channel (DCCH):** transmite informação de controlo dedicada de e para um terminal específico.
- **Broadcast Control Channel (BCCH):** difunde informação de controlo do sistema para todos os terminais móveis dentro de uma célula. É necessário que cada terminal móvel possua informação de controlo do sistema antes de aceder ao sistema, de modo a ter conhecimento sobre a configuração deste.

- **Paging Control Channel (PCCH):** transmite informação de controlo de paginação quando a localização do terminal móvel na célula é desconhecida.
- **Common Control Channel (CCCH):** utilizado para transmissão de controlo regular entre o equipamento transmissor e receptor.
- **Multicast Control Channel (MCCH):** utilizado na transmissão de informação de controlo de serviços multimédia desde o terminal até um ou mais canais de tráfego *multicast*. É utilizado em terminais que recebem serviços multimédia.
- **Dedicated Traffic Channel (DTCH):** é utilizado para transmitir informação dedicada do utilizador para um terminal móvel.
- **Multicast Traffic Channel (MTCH):** é utilizado para transmitir dados do utilizador na ligação descendente dos serviços multimédia.

2.4 Sistemas com Múltiplas Antenas

No *LTE* é importante o conceito de técnicas de múltiplas antenas, uma vez que estas são utilizadas para aumentar tanto a cobertura como a capacidade da camada física. A adição de mais antenas a um sistema rádio permite o aumento do desempenho do mesmo devido ao facto de os diversos sinais transmitidos percorrerem caminhos diferentes.

A Figura 2.9 resume as técnicas utilizadas na utilização de um canal de rádio. O *SISO* (*Single Input Single Output*) é o modo de transmissão básico, onde existe apenas uma antena emissora e uma antena receptora. Este é o sistema adoptado por defeito nos sistemas de comunicações móveis.

O esquema *MISO* (*Multiple Input Single Output*) apresenta-se como a evolução do *SISO*, onde o lado emissor possui várias antenas transmissoras. Permite uma melhoria do desempenho da transmissão, mesmo com valores baixos de *SNR*, e aumentar a robustez em relação à degradação do sinal. Este esquema não permite no entanto um aumento do ritmo de transmissão de dados, mas permite economizar energia.

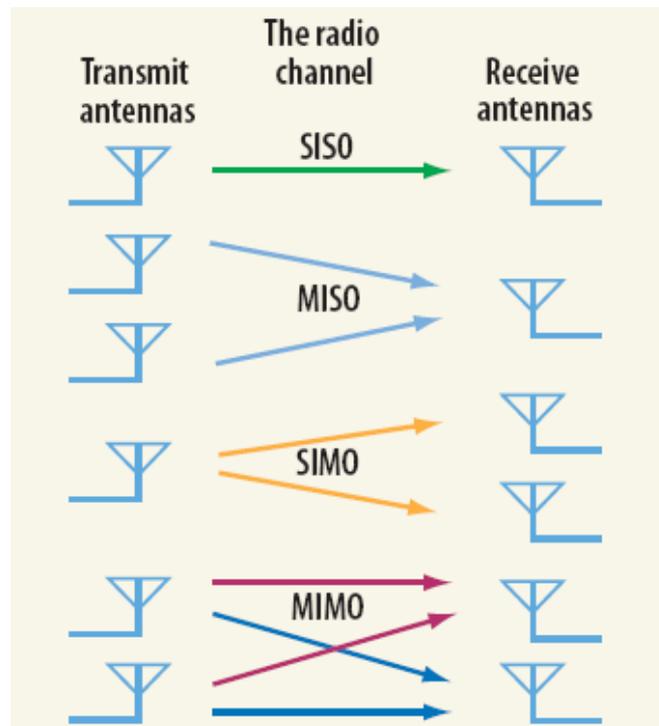


Figura 2.9 – Comparação entre as diferentes técnicas de múltiplas antenas [16].

No esquema *SIMO* (*Single Input Multiple Output*) existem várias antenas receptoras para uma antena emissora, permitindo assim diversidade à transmissão em relação ao lado receptor.

Finalmente o esquema *MIMO* utiliza várias antenas emissoras e receptoras de modo a conseguir atingir taxas de transferência elevadas. É uma tecnologia bastante utilizada nas redes sem fios, uma vez que, para além de atingir elevados débitos binários, consegue fazê-lo sem necessitar de largura de banda adicional.

Então, e com a utilização do esquema *MIMO*, o débito binário, calcula-se através da expressão (2.3) [3].

$$\text{Débito binário} = \frac{N_{BR} \times N_{sp} \times N_{bits/simb} \times N_{simb} \times Cod}{D_{sub-trama}} \times N_{Ae} \quad (2.3)$$

Onde, N_{Ae} corresponde ao número de antenas receptoras do esquema de múltiplas antenas em utilização.

Na Figura 2.10 apresenta-se uma comparação dos diferentes débitos binários teóricos obtidos, combinando diferentes esquemas de modulação e codificação e a técnica MIMO. Considerando [3], assumiu-se 7 símbolos por *slot* de 0,5 ms de duração e 12 sub-portadoras.

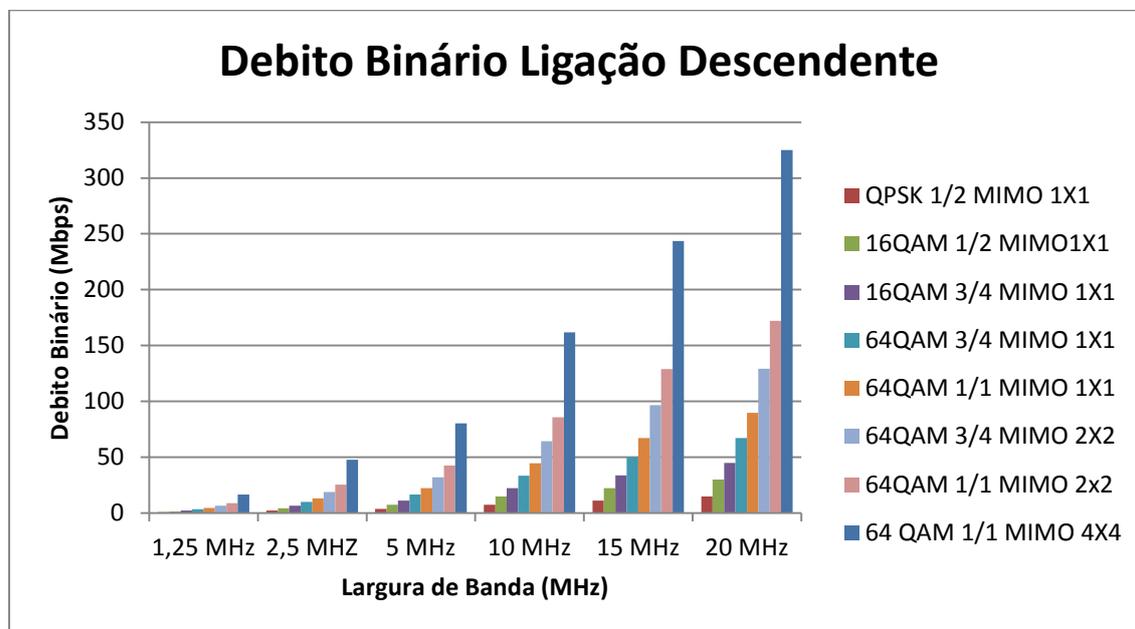


Figura 2.10 – Débito binário teórico da ligação descendente em função dos esquemas de modulação e codificação e MIMO [3].

Através da Figura 2.10 verifica-se a influência da utilização da técnica MIMO aliada a diferentes esquemas de modulação e codificação. O débito binário atinge o seu máximo teórico, para a ligação descendente, de cerca de 325 Mbps, com a utilização da modulação 64-QAM e MIMO 4x4, uma vez que, com esta modulação, é possível transmitir mais bits por símbolo, melhorando assim a eficiência espectral. A técnica MIMO permite enviar o sinal de antenas com diferentes fluxos de dados e, através do processamento de sinal no receptor, estes fluxos de dados são separados, conseguindo assim aumentar o débito binário de um factor de 2 ou 4, no caso de se utilizar o esquema 2x2 ou 4x4, respectivamente [3].

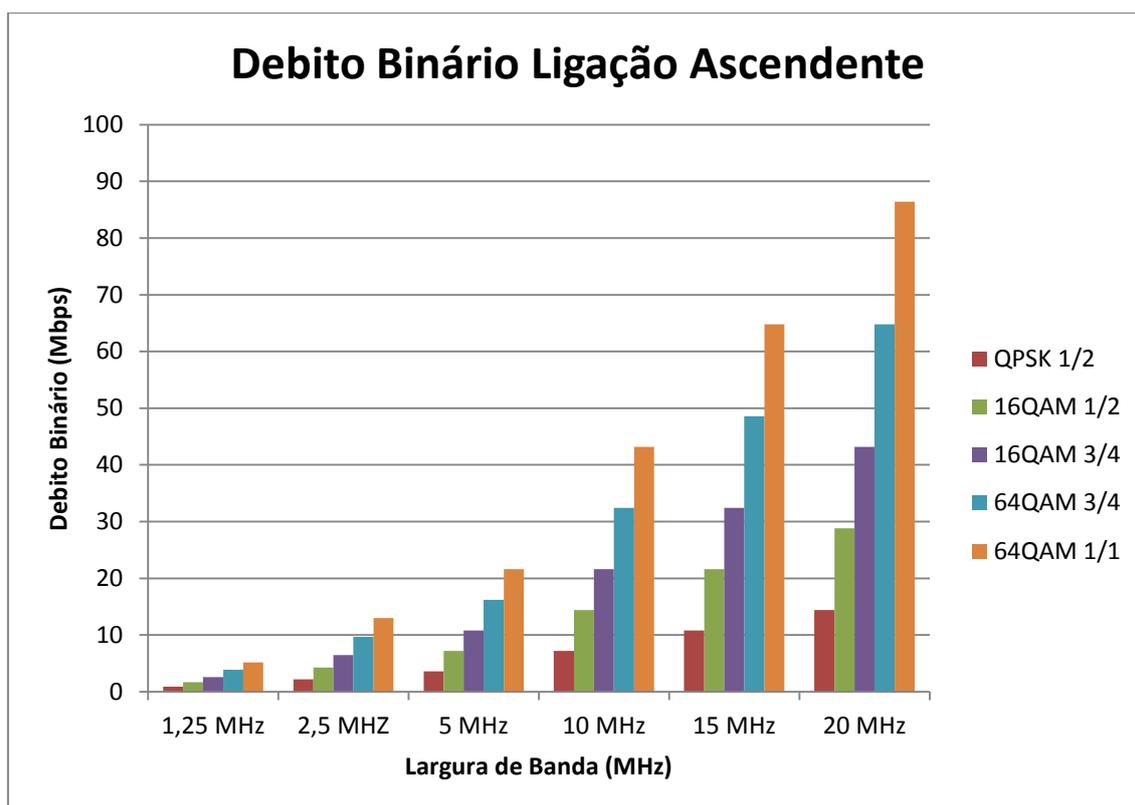


Figura 2.11 - Débito binário teórico da ligação ascendente em função dos esquemas de modulação e codificação [3].

A Figura 2.11 apresenta o débito binário teórico da ligação ascendente em função dos esquemas de modulação e codificação, apresentando um valor máximo de cerca de 86 Mbps para uma largura de banda de 20 MHz, utilizando a modulação 64-QAM.

Outra técnica existente é o *beamforming*, utilizado para a transmissão ou recepção direccional de um sinal. Através da utilização desta técnica é possível direccionar a maior parte da energia de um sinal transmitido numa direcção escolhida (Figura 2.12). O *beamforming* aumenta as taxas de transmissão do utilizador uma vez que concentra toda a transmissão da potência na direcção do utilizador, aumentando consideravelmente o sinal do mesmo. Esta técnica permite grandes benefícios a utilizadores que se encontrem em áreas em que o sinal seja fraco, como por exemplo, no limite da célula.

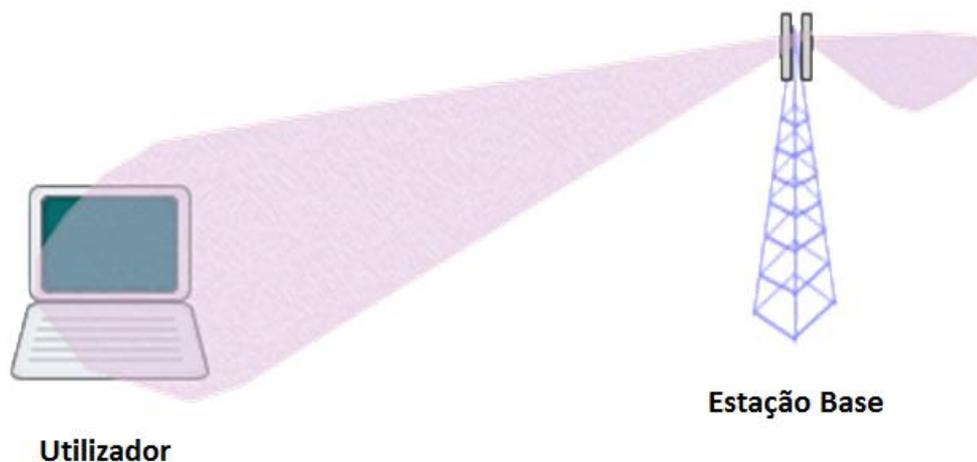


Figura 2.12 – Exemplo da utilização da técnica *beamforming*.

2.5 Conclusão

Neste capítulo apresentam-se e descrevem-se as principais características do sistema de comunicações móveis *LTE*, com principal ênfase na capacidade, e a evolução dos utilizadores e serviços que impulsionaram o desenvolvimento deste sistema. O *LTE* apresenta diversas técnicas que permitem simplificar a rede existente, e aumentar a capacidade do sistema, tais como:

- Arquitectura de rede mais simplificada, com menos níveis e baseada em *IP*;
- Flexibilidade na alocação de espectro;
- Modulação e Codificação Adaptativa;
- Utilização do esquema de multiplexagem *OFDM* e *SC-FDMA* na ligação descendente e ascendente, respectivamente;
- Sistemas de múltiplas antenas.
- *Beamforming*

Tal como foi discutido, o sistema de telecomunicações móveis *LTE* permite a utilização de diferentes técnicas de múltiplas antenas e esquemas de modulação e codificação, permitindo obter um desempenho teórico máximo de 325 Mbps com esquema *MIMO 4x4* e *64-QAM* de modulação para uma largura de banda de 20 MHz.

Capítulo 3

Planeamento de redes móveis celulares

Neste capítulo faz-se uma breve descrição dos aspectos essenciais para o planeamento de uma rede móvel celular, por cobertura e planeamento por capacidade.

3.1 Introdução

O planeamento, implantação e gestão de um sistema celular requer que, desde o início, sejam definidos todos os objectivos desta [17]. Esta abordagem é essencial para se conseguir obter uma boa cobertura, respeitar todos os requisitos de tráfego, capacidades disponíveis e níveis de serviço. O principal objectivo do planeamento de uma rede celular é fornecer aos serviços possibilitados pela rede um nível de qualidade elevado e tendo em atenção o menor custo possível para a implementação e exploração da rede.

Na fase inicial de planeamento celular é efectuado o levantamento de todas as informações necessárias para a implementação da rede. São identificados os principais objectivos e necessidades da infra-estrutura, tais como, a localização das estações base, alterações de tráfego local e optimização de cobertura [18].

O planeamento tem início através da definição da área geográfica onde se pretende implementar a infra-estrutura. Esta classifica-se conforme o tipo de zona (rural, suburbano e urbano), tendo também em consideração a densidade populacional e a topografia do terreno.

Neste capítulo são abordadas as questões referentes ao planeamento, por cobertura e por capacidade, de uma rede móvel celular. A nível do planeamento por cobertura apresentam-se os modelos de propagação do *LTE* propostos como modelos para integrar a ferramenta de planeamento A9155 da Alcatel-Lucent. No planeamento por capacidade são apresentados modelos de agregação de tráfego e algoritmos da probabilidade de bloqueio, para que em função destes parâmetros seja possível definir a capacidade necessária da rede.

3.2 Planeamento por Cobertura

O planeamento por cobertura é importante para garantir que a totalidade da célula recebe o sinal transmitido. Nesta secção são apresentados os modelos de propagação utilizados para o planeamento de redes móveis celulares na faixa de frequência do *LTE*.

3.2.1 Tipos de modelos de propagação

Um modelo de propagação rádio é uma formulação empírica matemática para fazer a caracterização da propagação de ondas de rádio em função da frequência, distância e outros factores. O modelo é desenvolvido para prever o comportamento da propagação de uma onda rádio e tem como objectivo a predição das perdas de percurso, dentro de uma área coberta. Os modelos existentes são utilizados conforme o ambiente (*outdoor* e *indoor*) em que a rede móvel necessita de operar.

3.2.1.1 Modelos *Outdoor*

Os modelos de propagação *outdoor* são utilizados em macro ou micro células para espaços abertos e dividem-se em três categorias:

- **Empíricos:** baseados em medidas que conduzem a relações simples entre a atenuação e a distância. Estes modelos conduzem a curvas e equações que melhor se adaptam às medidas, possuindo a vantagem de considerar todos os factores que afectam a propagação e necessitando de ser sujeitos a validação para locais, frequências e condições diferentes de ambientes e medida.
- **Teóricos:** que necessitam a utilização de bases de dados topográficos e que utilizam os métodos das ligações fixas. Este tipo de modelo possuiu a desvantagem de não considerar todos os factores, nem ter em consideração o ambiente em que o móvel se desloca. Permitem uma fácil alteração dos valores dos parâmetros, mas dependem de informações existentes em base de dados geográficos.
- **Híbridos:** são modelos que contemplam as perspectivas empíricas e teóricas, possuindo alguma flexibilidade, uma vez que podem ser complementados com medidas reais, obtidas através de medidas realizadas nos ambientes de propagação específicos onde são utilizadas.

3.2.1.2 Modelos *Indoor*

Os modelos *indoor* são utilizados para predição em áreas de menor cobertura e depende da arquitectura dos edifícios e dos materiais utilizados na construção dos mesmos. Estes podem ser classificados em quatro categorias diferentes:

- **Estatísticos:** baseado em descrições do tipo de edifício (escritório, hospital, etc.);
- **Empíricos de raio directo:** baseado no caminho directo entre o equipamento transmissor e receptor;
- **Empíricos de multipercurso:** baseado nos múltiplos percursos que o sinal pode seguir;
- **Raios ópticos:** baseado na teoria da propagação de ondas electromagnéticas, considerando os factores de reflexão, difracção e dispersão;

Na Figura 3.1 representam-se vários modelos de propagação para os ambientes *indoor* e *outdoor* em função da faixa de frequências que cada um utiliza.

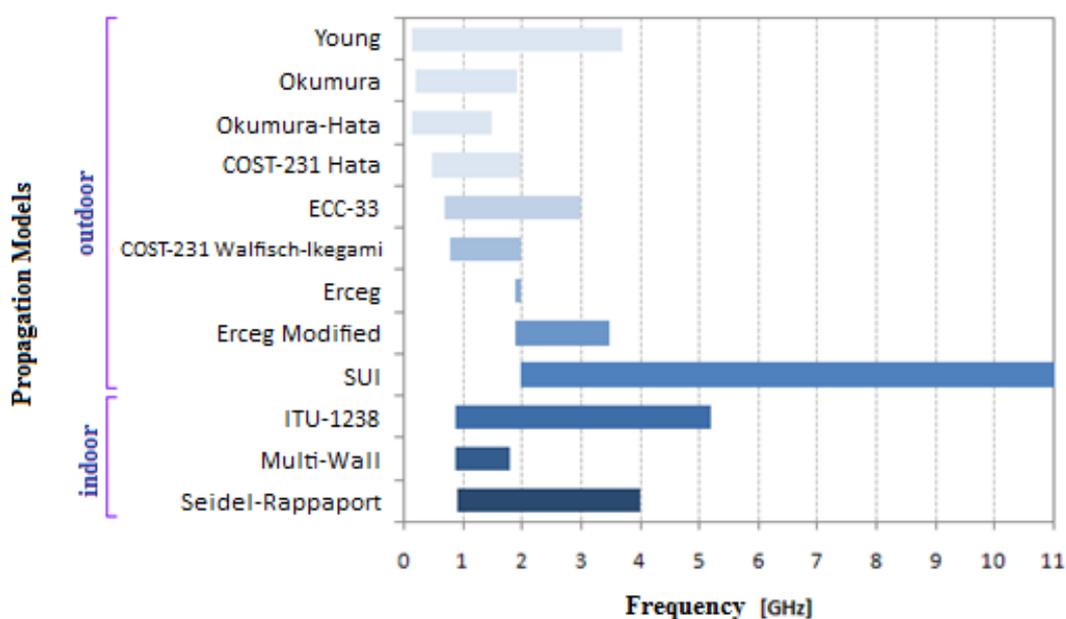


Figura 3.1 – Modelos de propagação (*outdoor* e *indoor*) em função da faixa de frequência [19].

Para além da limitação da frequência, existem também outras limitações que podem influenciar a predição do sinal, tais como, a altura da antena da estação base ou a altura da antena do terminal móvel. As Figura 3.2 e Figura 3.3 apresentam os modelos de propagação adequados de acordo com a variação da altura da antena.. A altura da antena de transmissão influencia a área de cobertura, uma vez que, quanto maior for a altura da antena, maior será a probabilidade de *LoS* (*Line of Sight*) com o terminal de recepção. Em contrapartida, maior será a interferência entre as estações

base de outras células. A altura da antena do terminal móvel também influencia a probabilidade de *LoS* com a antena transmissora, sendo este factor importante na implementação de redes móveis celulares, uma vez que a antena do terminal móvel não se encontra fixo, variando as condições de *LoS* e a altura efectiva desta antena.

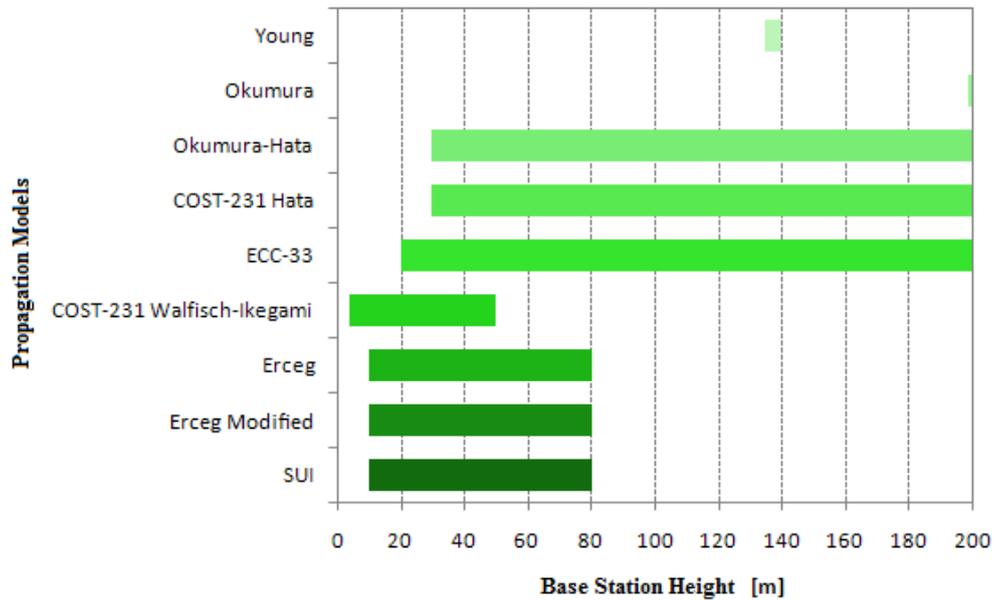


Figura 3.2 – Modelo de propagação (*outdoor*) em função da altura da antena das estações base [19].

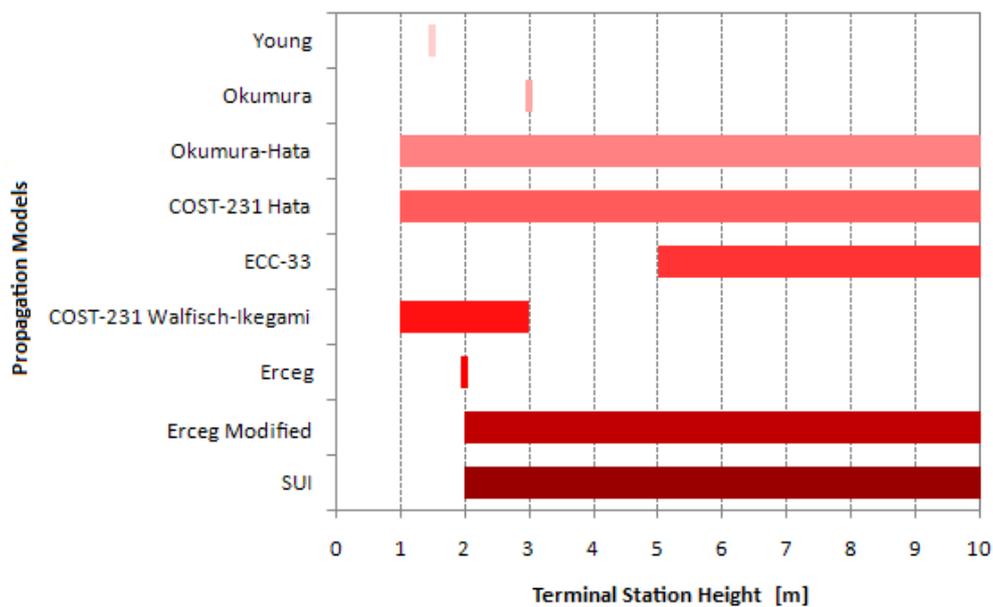


Figura 3.3 – Modelo de propagação (*outdoor*) em função da antena da estação terminal [19].

3.2.2 Modelos de propagação para LTE

De acordo com o apresentado na subsecção 3.2.1, os modelos de propagação apresentam algumas limitações, principalmente ao nível da frequência e da altura das antenas do equipamento da estação base e do terminal móvel. De acordo com [20], o valor médio das perdas de percurso, $PL_{[dB]}$, calculam-se através da expressão (3.1).

$$PL_{[dB]} = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(R_{[km]}) \quad (3.1)$$

Onde, K_1 e K_2 caracterizam o modelo de propagação e $R_{[km]}$ representa a distância, em km, entre a antena transmissora e receptora. Para a cobertura de macro células, são utilizados os seguintes modelos de propagação:

- Para 700, 850 ou 900 MHz é utilizado o modelo *Okumura-Hata*:

$$K_1 = 69,55 + 26,26 \cdot \log_{10}(F_{[MHz]}) - 13,82 \cdot \log_{10}(h_b) - a(h_t) + K_c \quad (3.2)$$

- Para 1,9 GHz ou 2.1 GHz é utilizado o modelo *COST-231 Hata*:

$$K_1 = 46,3 + 33,9 \cdot \log_{10}(F_{[MHz]}) - 13,82 \cdot \log_{10}(h_b) - a(h_t) + K_c \quad (3.3)$$

- Para 2.6 GHz é utilizado o modelo *COST-231 Hata* modificado, uma vez que este se encontra limitado nas frequências entre 500 MHz e 2 GHz. A Alcatel-Lucent propõe as seguintes modificações, baseadas em medições a frequências mais elevadas (3,5 GHz, 2,5 GHz):

$$K_1 = 46,3 + 33,9 \cdot \log_{10}(2000) + 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{F_{[MHz]}}{2000}\right) - 13,82 \cdot \log_{10}(h_b) - a(h_t) - K_c \quad (3.4)$$

Onde, K_2 e $a(h_t)$ são calculados através das expressões (3.5) e (3.6), respectivamente.

$$K_2 = 44,9 - 6,55 \cdot \log_{10}(h_b) \quad (3.5)$$

$$a(h_t) = \begin{cases} [1,1 \cdot \log_{10}(F_{[MHz]}) - 0,7] \cdot h_t - [1,56 \cdot \log_{10}(F_{[MHz]}) - 0,8] & , K_c > -5 \\ 3,2 \cdot [\log_{10}(11,75 \cdot h_t)]^2 - 4,97 & , K_c \leq -5 \end{cases} \quad (3.6)$$

F_{MHz} representa a frequência em MHz, h_b representa a altura da antena emissora e h_t representa a altura da antena do terminal móvel. K_c corresponde ao factor de correcção morfológico e é utilizado conforme o tipo de ambiente, sendo calculado através da expressão (3.7) [20].

$$K_c = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & , \text{ urbano} \\ -2 \left(\log_{10} \left(\frac{F_{[MHz]}}{28} \right) \right)^2 & , \text{ sub-urbano} \\ -4,78 (\log_{10}(F_{[MHz]})^2 + 18,33 \log_{10}(F_{[MHz]})) & , \text{ rural} \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

Uma explicação em detalhe para estes modelos pode ser encontrada nos anexos A.1, A.2 e A.3.

O modelo de propagação LUI (*Lisbon University Institute*) apresenta-se como um modelo unificado e empírico de raio directo, cujo principal objectivo é fazer a predição do sinal para qualquer tipo de ambiente (*outdoor, indoor* ou misto), utilizando diferentes tecnologias (*Wi-Fi - Wireless Fidelity, UMTS, WiMAX*) [19]. Uma explicação mais detalhada deste modelo apresenta-se no Anexo A.4.

A Figura 3.4 apresenta a comparação das perdas de percurso para os diferentes modelos de propagação apresentados.

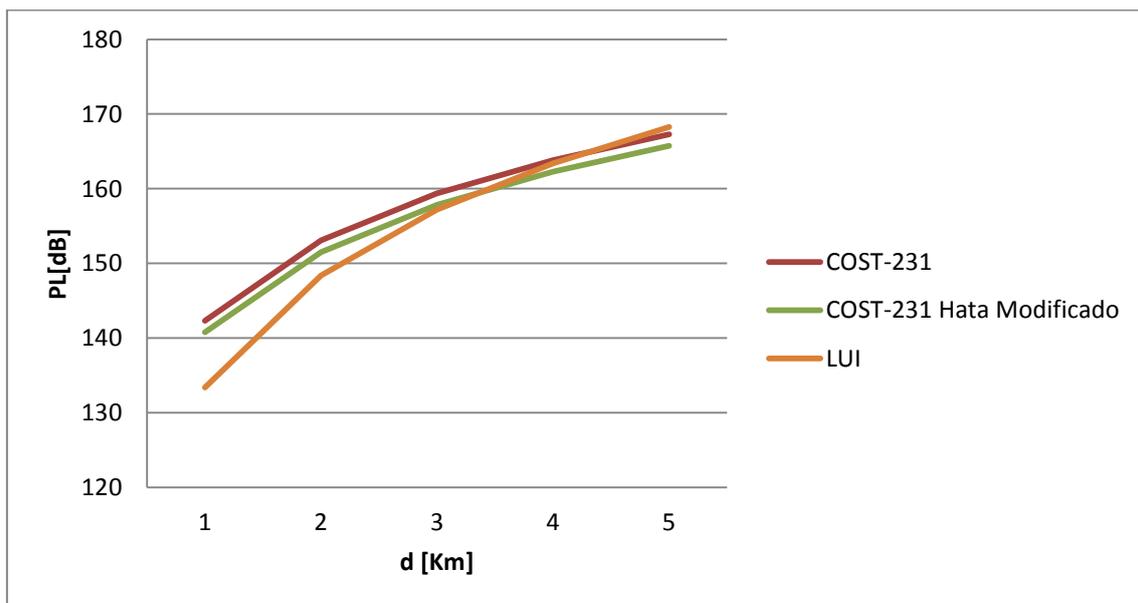


Figura 3.4 – Gráfico comparativo dos diferentes modelos de propagação outdoor.

É considerado para o cálculo das perdas de propagação uma frequência de 2,5 GHz, 25 de metros de altura efectiva da antena transmissora e 1,5 metros de altura efectiva da antena do terminal móvel. É considerado 0 dB para o factor de correcção morfológico K_c .

Para a frequência de 2,5 GHz, os três modelos apresentam um comportamento semelhante. O modelo *LUI* apresenta valores de perdas médias de percurso inferiores ao *COST-231* e *COST-231* modificado, para distâncias inferiores 3 km. Na extremidade da célula os três modelos tendem para o mesmo valor de perdas médias de percurso. A utilização do modelo *LUI* possui como vantagem o facto de poder ser utilizado para determinar as perdas de percursos para qualquer tipo de ambiente (*indoor*, *outdoor* e misto).

3.3 Planeamento por Capacidade

O planeamento por capacidade permite obter uma estimativa dos recursos necessários para suportar uma determinada quantidade de tráfego com um nível específico de *QoS*. Teoricamente a capacidade de uma rede é limitada pelo número de utilizadores ligados à mesma rede. A capacidade de uma célula no *LTE* é influenciada por diversos factores, sendo eles a interferência, os esquemas de modulação e codificação suportados.

Para o planeamento por capacidade é necessário ter em consideração os requisitos:

- Do utilizador (número total e distribuição dos utilizadores, serviços requeridos, distribuição dos serviços);
- Da capacidade permitida pelo sistema de comunicações, considerando uma dada célula.

Fazer o planeamento por capacidade é satisfazer as necessidades dos utilizadores em função dos serviços suportados pelo sistema e utilizados por estes utilizadores. Para cumprir este objectivo é necessário que o sistema permita uma capacidade (tráfego) superior à capacidade exigida pelos utilizadores.

A análise da capacidade da célula consiste em determinar a largura de banda necessária e as características principais (esquemas *MIMO*, direccionalidade das antenas) de modo a poder suportar as necessidades de tráfego.

3.3.1 Caracterização do Tráfego

Na fase inicial do planeamento por capacidade é importante definir as necessidades de tráfego existentes. O perfil dos utilizadores, e os serviços que utilizam influenciam o planeamento de uma rede de comunicações móveis. Para o planeamento de uma rede é essencial o conhecimento da distribuição do tráfego para que o planeamento possa ser feito para conseguir acomodar períodos de tráfego elevados.

Caso se pretenda um planeamento mais conservativo, *i.e.*, deve ser considerando para o *LTE* a caracterização, para cada um dos serviços, o período de maior ocorrência do tráfego para que, durante este período, a rede de comunicações não entre em sobrecarga (*overflow*).

A Figura 3.5 representa a distribuição do tráfego de uma rede móvel ao longo de um dia, efectuado na Dinamarca através da empresa de telecomunicações móveis *Telenor*, para a tecnologia *UMTS*, em 2010 [21]. Na observação desta verifica-se uma maior utilização entre as 17h e as 23h, onde a maior ocorrência é às 21h, correspondendo a cerca de 7% do tráfego total do dia.

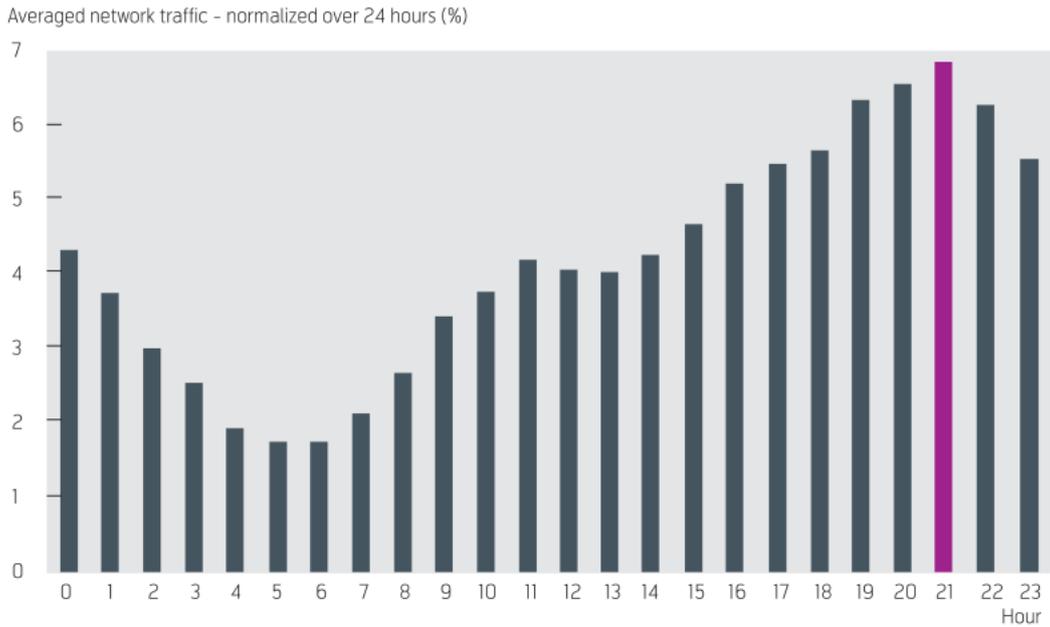


Figura 3.5 – Distribuição típica do tráfego diário numa rede móvel [21].

É necessário também saber quais os tipos de aplicações utilizadas nas horas de ponta. A Figura 3.6 ilustra as principais aplicações utilizadas na hora de ponta. A navegação na Internet é responsável pela maioria do tráfego móvel, totalizando 81,84% do mesmo.

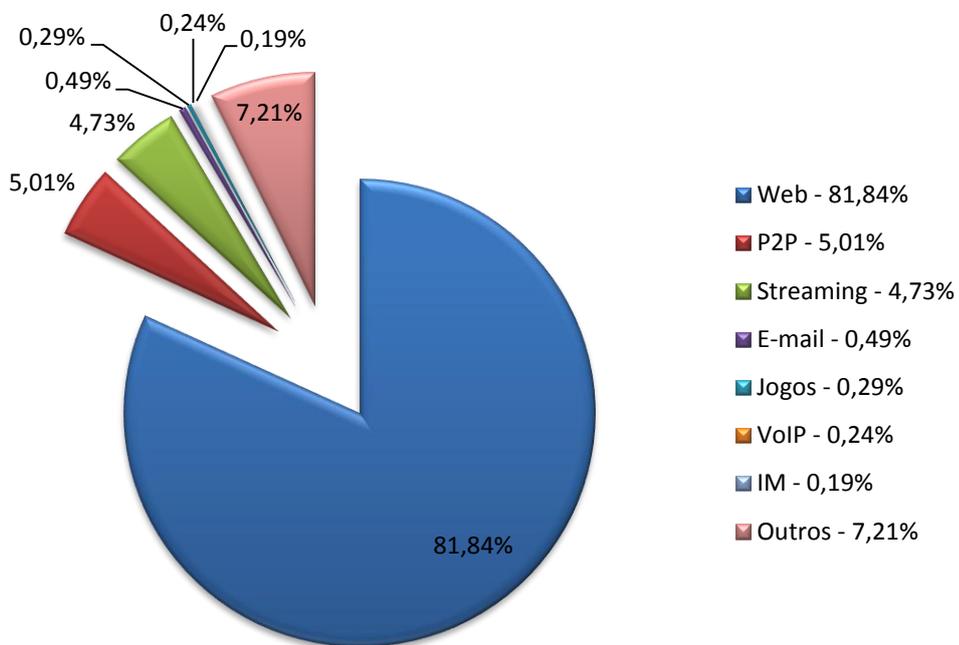


Figura 3.6 - Perfil da utilização das diferentes aplicações móveis no período de maior tráfego [22].

3.3.2 Modelos de Agregação de tráfego

Os modelos de agregação de tráfego têm como objectivo o dimensionamento do número de recursos necessários para suportar uma determinada mistura de tráfego de diferentes serviços. Os diferentes tipos de serviços possuem necessidades e características diferentes [23].

A Figura 3.7 apresenta os *inputs* e *outputs* dos modelos de agregação de tráfego para um sistema de comunicações móveis LTE. O número de recursos necessários para os tipos de serviços variam conforme o número de utilizadores que utilizam os serviços, as necessidades de tráfego por utilizador, o grau de serviço e os recursos necessários para o serviço.

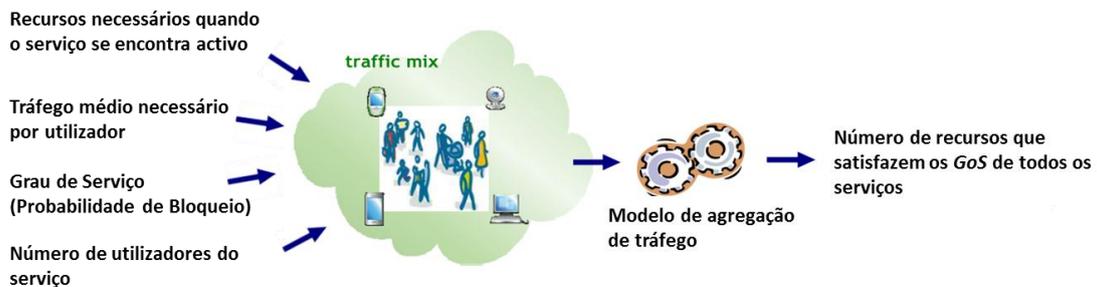


Figura 3.7 – Inputs e outputs dos modelos de agregação de tráfego [23].

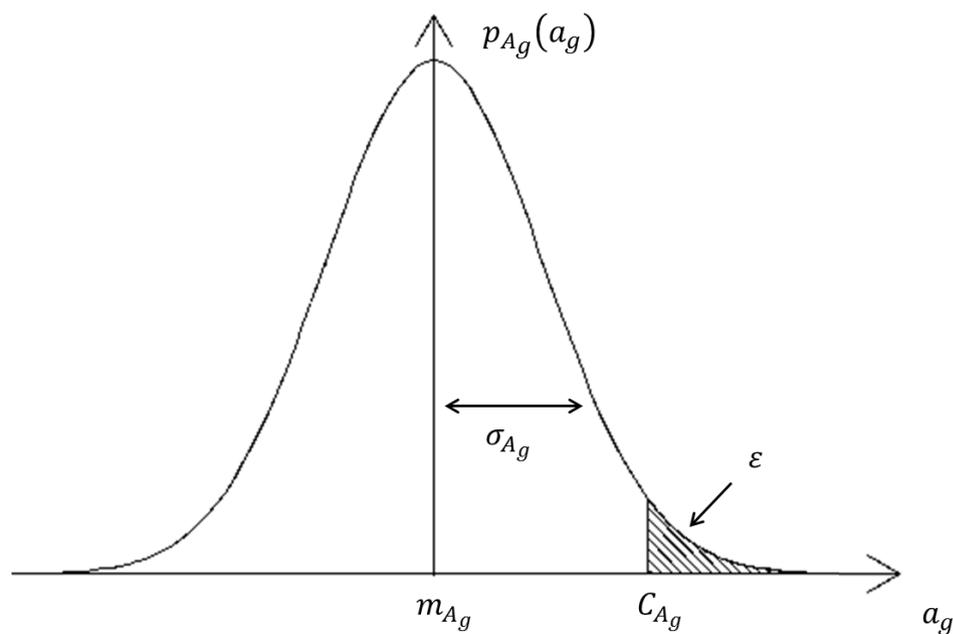


Figura 3.8 - Função de densidade de probabilidade do tráfego agregado.

Para os modelos de agregação de tráfego, devido ao multi-serviço é necessário saber a distribuição de cada um dos serviços para se obter uma distribuição de agregação dos vários serviços a serem utilizados. Numa primeira abordagem e sem pretender simplificar, admitindo que o tráfego agregado resultante do tráfego de vários serviços é uma VA (variável aleatória), A_g , com uma FDP (função densidade de probabilidade) $p_{A_g}(a_g)$ e que o tráfego de cada um dos k -ésimos serviços também é uma VA A_k que são independentes para os diferentes serviços. Conhecendo a FDP, $p_{A_g}(a_g)$ e qual a probabilidade de sobrecarga (*overflow*), ε , que se pretende admitir é possível obter a capacidade agregada necessária (recursos), C_{A_g} , para fornecer os serviços aos utilizadores numa dada célula.

Sabendo que:

$$A_g = \sum_{k=1}^{N_s} A_k \cdot N_k \quad (3.8)$$

Onde, N_s representa o número total de serviços, N_k representa o número de utilizadores do k -ésimo serviço, então,

$$p_{A_g}(a_g) = p_{A_1}(a_g) * p_{A_2}(a_g) * \dots * p_{A_k}(a_g) * \dots \quad (3.9)$$

Se o tráfego apresenta diferentes distribuições para cada um dos serviços é preferível utilizar a função característica (FC), $\Phi_{A_g}(\omega)$, para obter $p_{A_g}(a_g)$, *i.e.*, [24]:

$$p_{A_g}(a_g) = \mathcal{F}^{-1} [\Phi_{A_g}(a_g)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{A_g}(\omega) \cdot e^{-j\omega a_g} \frac{d\omega}{2\pi} \quad (3.10)$$

Onde, (FC) é dada por:

$$\Phi_{A_g}(a_g) = \prod_{k=1}^{N_s} \Phi_{A_k}(a_k) \quad (3.11)$$

Onde, $\Phi_{A_k}(a_k)$ representa a função característica de cada uma das k -ésimas distribuições correspondente a cada um dos serviços. A função característica para cada k -ésimo serviço obtém-se através da expressão (3.12) [25 pp. 153, eq. 5-96]:

$$\Phi_{A_k}(\omega) = E[e^{-j\omega A_g}] = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{A_g}(a_g) \cdot e^{j\omega a_g} da_g \quad (3.12)$$

Sabendo que uma dada probabilidade de *overflow*, ε , é dada por:

$$\varepsilon = 1 - F_{A_g}(C_{A_g}) \quad (3.13)$$

Onde, $F_{A_g}(C_{A_g})$ é a função densidade de probabilidade cumulativa (FDPC) dada por (3.14) [25 pp. 82, eq.4-16]:

$$F_{A_g}(C_{A_g}) = \int_{-\infty}^{C_{A_g}} p_{A_g}(a_g) da_g \quad (3.14)$$

De acordo com a expressão (3.16); Para obter a C_{A_g} é necessário fazer a inversão da FDPC da VA A_g , de acordo com:

$$C_{A_g} = F_{A_g}^{-1}(1 - \varepsilon) \quad (3.15)$$

Dependendo da distribuição para cada k -ésimo serviço a obtenção de C_{A_g} , pode ser uma expressão que não seja facilmente invertível, sendo necessário recorrer a métodos de integração numérica. A distribuição do tráfego para cada um dos k -ésimos serviços ou para o tráfego agregado pode ser obtida através do desenvolvimento apresentado no anexo B.1, B.2 e B.3.

Para completar o cálculo da capacidade do tráfego agregado pode ser necessário recorrer a métodos mais simplificados para modelar o tráfego agregado, *i.e.*, fazer algumas simplificações na caracterização da distribuição do tráfego.

Nas subsecções seguintes apresentam-se algoritmos simplificados de modelação de agregação de tráfego para uma rede móvel *LTE*, baseados na razão *peak*

to average (P2A), uma aproximação Gaussiana da agregação de tráfego e algoritmos simplificados de cálculo da probabilidade de bloqueio.

3.3.2.1 Método baseado na razão *Peak to Average*

Um dos métodos existentes é o método baseado na razão *P2A*, que pode ser aplicado a um tráfego de multi-serviços. Neste método são consideradas as seguintes características:

- m_k - Tráfego médio necessário por utilizador para o k -ésimo serviço;
- N_k - Número de utilizadores para o k -ésimo serviço;
- $P2A_k$ - Indicador do grau de serviço (*GoS – Grade of Service*): neste método é considerado um indicador *GoS* que corresponde à razão *P2A*, que é a razão entre o valor máximo do tráfego e o seu valor médio, *i.e.*, indica a quantidade de recursos necessários para um determinado tráfego agregado médio, considerando o total de utilizadores de um tipo de serviço. Este depende do nível da agregação, *i.e.*, o número de utilizadores que são considerados no tráfego, o *GoS* necessário e a quantidade de tráfego.

A capacidade necessária para o tráfego agregado (C_{A_g}), *i.e.*, o número de recursos necessários que permitem o cumprimento das necessidades do *GoS* para cada serviço, é calculado através da expressão (3.16) [23]:

$$C_{A_g} = \sum_{k=1}^{N_s} N_k \times m_k \times P2A_k \quad (3.16)$$

Onde, N_s representa o número total de tipos de serviços.

3.3.2.2 Método baseado numa aproximação Gaussiana para a agregação de tráfego

O modelo de agregação de tráfego é baseado numa aproximação Gaussiana, e é um modelo que permite o cálculo da capacidade necessária para um tráfego de diferentes fontes, com diferentes características e para uma dada probabilidade de sobrecarga (*overflow*), tal como se encontra representado na Figura 3.9.

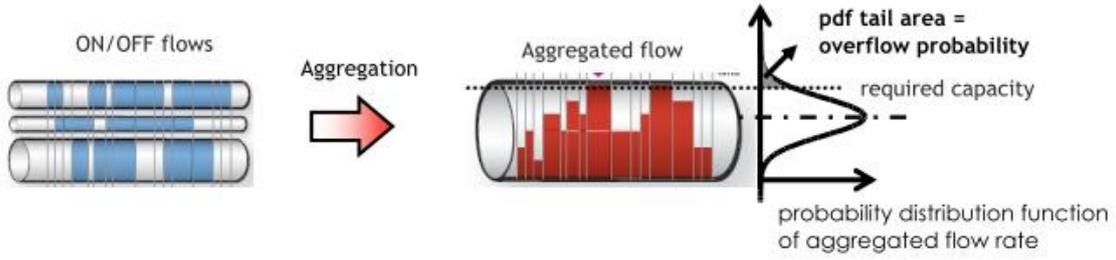


Figura 3.9 – Exemplificação da agregação de tráfego de diferentes fontes [23].

Considerando um conjunto N_s de tipos de serviços e o número de utilizadores que utilizam esses serviços, N_u . Para esse conjunto de utilizadores, cada k -ésimo serviço considera-se:

- a_{A_k} - Quantidade de recursos necessários para o k -ésimo serviço
- m_{A_k} – Quantidade média de recursos utilizados pelo utilizador no k -ésimo serviço;
- p_{u_k} - Percentagem de utilizadores que utilizam o k -ésimo serviço.

O número de utilizadores a utilizar o k -ésimo serviço, N_{u_k} , obtém-se através da expressão (3.17) [23]:

$$N_{u_k} = p_{u_k} \times N_u \quad (3.17)$$

A variância pode ser obtida, para o k -ésimo serviço, através da quantidade de recursos necessários, a_{A_k} e da quantidade média de recursos utilizados para esse serviço, m_{A_k} . Obtém-se através da expressão (3.18) [24 pp. 928, eq. 26.2.57].

$$\sigma_{A_k}^2 = E[a_{A_k}^2] - m_{A_k}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (a_{A_k} - m_{A_k})^2 p_{A_k}(a_{A_k}) da_{A_k} \quad (3.18)$$

As expressões obtidas podem ser utilizadas para calcular o tráfego agregado. A quantidade média de recursos utilizados para o tráfego agregado, m_{A_g} e a variância do tráfego agregado, $\sigma_{A_g}^2$ obtêm-se através das expressões (3.19) e (3.20), respectivamente:

$$m_{A_g} = \sum_{k=1}^{N_{ST}} N_k m_{A_k} \quad (3.19)$$

$$\sigma_{A_g}^2 = \sum_{k=1}^{N_{ST}} N_k \sigma_{A_k}^2 \quad (3.20)$$

Para uma dada probabilidade de *overflow*, ε , e assumindo uma distribuição Gaussiana de ordem 1, a capacidade necessária para o tráfego agregado pode ser calculada através da expressão (3.21) [23].

$$C_{A_g} = m_{A_g} + \alpha_{A_g} \sigma_{A_g} \quad (3.21)$$

Em que, de acordo com o desenvolvimento apresentado no anexo B, para α_{A_k} , α_{A_g} utiliza a mesma expressão, mas neste caso para o tráfego agregado que apresenta uma distribuição Gaussiana tal como a distribuição do tráfego de cada um dos serviços.

$$\alpha_{A_g} = \sqrt{2} \times \text{erfc}^{-1}(2\varepsilon) \quad (3.22)$$

3.3.3 Probabilidade de bloqueio

A probabilidade de bloqueio é um factor a ter em conta no planeamento das redes de telecomunicações móveis. Tal como foi referido no capítulo 2, a evolução das redes móveis permitiu a introdução de diferentes tipos de serviços, passando estes de um ambiente com apenas um serviço (voz) para ambientes de multi-serviços (voz, vídeo, *web*, etc.). Deste modo os modelos de *Erlang-B* deixam de ser aplicáveis nos ambientes mais recentes, sendo necessário adaptar esses modelos.

Nas subsecções seguintes descrevem-se os dois algoritmos para o cálculo da probabilidade de bloqueio. O primeiro é o algoritmo *knapsack*, onde a probabilidade de bloqueio calcula-se através da determinação da probabilidade de ocupação do sistema num dado momento. O segundo é o algoritmo de *Kaufman-Roberts* que

calcula a probabilidade de bloqueio através do cálculo da probabilidade cumulativa dos estados.

3.3.3.1 Algoritmo *knapsack*

O algoritmo *knapsack* pode ser utilizado para calcular a probabilidade de bloqueio para cada serviço. Considerando k serviços, em que cada serviço necessita de b_k recursos, num sistema com capacidade C_{Ag} [23]. Um novo serviço entra no sistema se existir espaço, caso contrário este será bloqueado e perdido. Assumindo que o serviço k segue um processo de chegada *Poisson*² e que chega ao sistema com uma taxa média λ_k e que se admite que o serviço utiliza b_k recursos até que a sua utilização seja terminada e esses recursos sejam libertados, este tempo médio de utilização destes recursos é dado por $\frac{1}{\mu_k}$, obtendo-se assim uma intensidade de tráfego, ρ_k , através da expressão (3.23) [23].

$$\rho_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k} [Erlang] \quad (3.23)$$

A intensidade de tráfego pode também ser expressa através do volume de tráfego por hora V_k , em bits, e do débito binário R_k , em bps, do k -ésimo serviço, sendo obtida pela expressão (3.24) [23].

$$\rho_k = \frac{V_k}{3600 \times R_k} \quad (3.24)$$

A teoria do algoritmo *knapsack* consiste em calcular a probabilidade de ocupação do sistema. O sistema consegue suportar um conjunto de diferentes estados, *i.e.*, diferentes combinações de ocupação de serviços até que a capacidade total do sistema seja atingida. Cada estado tem uma probabilidade de ocorrência diferente [23]. Para o cálculo da probabilidade de bloqueio por serviço, é necessário considerar um conjunto M de estados para os quais a capacidade utilizada é inferior à capacidade total do sistema. Esse conjunto de estados é definido pela expressão (3.25) [23].

² Processo *Poisson*: Processo estocástico em que os eventos ocorrem continuamente e independentes uns dos outros.

$$M = \left\{ n = (n_1, \dots, n_I) \mid \sum_{i=1}^I b_i n_i \leq C \right\} \quad (3.25)$$

De acordo com a teoria de *Markov*³, a probabilidade da ocorrência do estado n pode ser calculada através da expressão (3.26) [26].

$$\pi(n) = \frac{1}{G} \prod_{i=1}^I \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} \quad (3.26)$$

Onde, ρ_i representa a intensidade de tráfego do i -ésimo serviço, n_i o número do i -ésimo serviço, k o número total de serviços e a constante de normalização G obtém-se através da expressão (3.27) [26].

$$G = \sum_{n \in M} \prod_{i=1}^I \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!} \quad (3.27)$$

Um utilizador do k -ésimo serviço que entra no sistema é bloqueado se verifica-se que a adição deste ao estado actual do sistema é superior à capacidade do mesmo, *i.e.*, o utilizador não será admitido caso se verifique a expressão (3.28) [26].

$$\sum_{i=1}^I b_i n_i > C - b_k \quad (3.28)$$

A probabilidade de bloqueio obtém-se através da soma das probabilidades dos estados pertencentes ao conjunto de estados dado pela expressão (3.29) [23].

$$\varepsilon_k = \sum_{n \in M} \pi(n) \quad (3.29)$$

Por exemplo, considerando dois tipos de serviços, em que o serviço 1 ($n_1 = 1$) necessita de $b_1 = 1$ recursos e o serviço 2 ($n_2 = 2$) necessita de $b_2 = 2$ recursos e um sistema com capacidade $C = 4$, a Figura 3.10 representa os 9 estados possíveis de

³ Teoria de *Markov*: os acontecimentos que poderão acontecer no futuro dependem apenas do que ocorre no presente, e não do que ocorreu no passado.

ocupação do sistema. Todas as outras combinações não seriam possíveis porque seriam inferiores à capacidade do sistema.

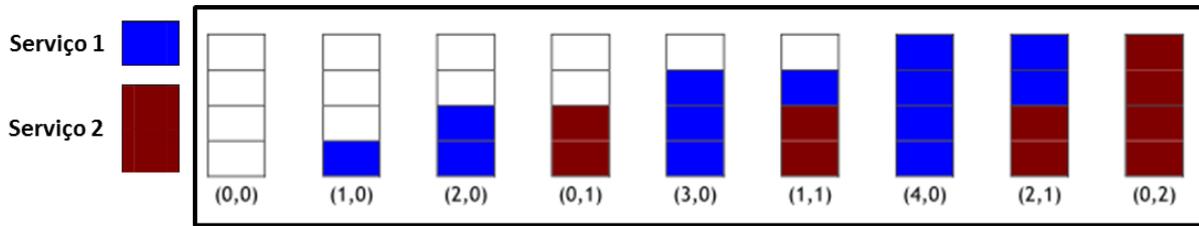


Figura 3.10 – Diferentes estados de ocupação do sistema com capacidade $C = 4$ [23].

Considerando a utilização dos vários serviços, onde os serviços 1 e 2 têm uma intensidade de tráfego por hora $\rho_1 = 0,5$ e $\rho_2 = 0,2$, respectivamente. Através da informação do tráfego é possível calcular a probabilidade de ocorrência de cada estado.

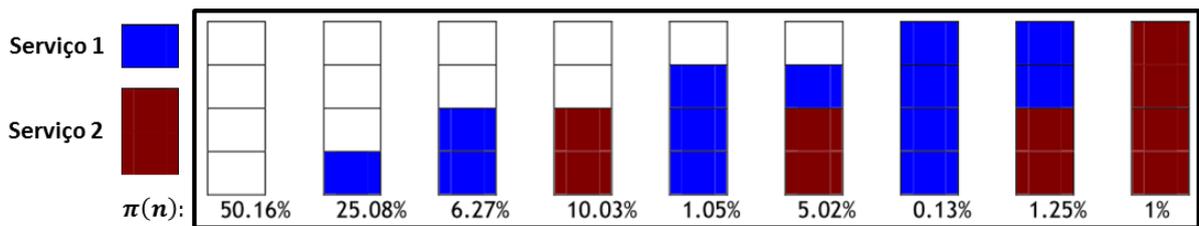


Figura 3.11 – Probabilidades de ocorrência de cada estado [23].

Quando um serviço com $k=1$ entra no sistema não é bloqueado se existe pelo menos um *slot* disponível, *i.e.*, o serviço é bloqueado para os estados em que os recursos estão todos a ser utilizados. A probabilidade de bloqueio para o serviço 1 é dada por:

$$\varepsilon_1 = 0,13\% + 1,25\% + 1\% = 2,38\%$$

No caso do serviço 2, este será bloqueado quando não existe pelo menos 2 *slots* disponíveis, então a probabilidade de bloqueio para o serviço 2 é de:

$$\varepsilon_2 = 1,05\% + 5,02\% + 0,13\% + 1,25\% + 1\% = 8,45\%$$

3.3.3.2 Algoritmo Kaufman-Roberts

O algoritmo de *Kaufman-Roberts* é um algoritmo recursivo que permite calcular a probabilidade de bloqueio de modo menos complexo que o algoritmo de *knapsack*. Em vez de ser calculada a probabilidade de bloqueio para cada estado, o algoritmo de

Kaufman-Roberts permite calcular recursivamente a probabilidade cumulativa dos estados para um dado número de recursos ocupados, tornando mais eficiente o cálculo da probabilidade de bloqueio de um tipo de serviço [23].

A probabilidade de que n estados de um sistema com capacidade C se encontrem ocupados é obtida através da expressão (3.30) [26].

$$P(n, C) = \frac{g(n)}{\sum_{j=0}^C g(j)} \quad (3.30)$$

Onde, a função $g(j)$ calcula-se através da expressão (3.31).

$$g(j) = \begin{cases} 0 & , j < 0 \\ 1 & , j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{i=1}^k \rho_i b_i g(j - b_i) & , j > 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

Onde b_i representa a quantidade de recursos do i -ésimo serviço. A probabilidade de bloqueio do serviço k é obtida através da expressão (3.32) [26].

$$\varepsilon_k = \sum_{i=0}^{b_k-1} P(C - i, C) \quad (3.32)$$

Os dois algoritmos apresentados possibilitam o cálculo da probabilidade de bloqueio para um sistema de múltiplos serviços. Para uma ferramenta de planeamento simples, o algoritmo *Kaufman-Roberts* apresenta-se como uma boa alternativa, uma vez que a complexidade deste algoritmo é menos complicado tornando o processamento mais eficiente.

3.3.3.3 Dimensionamento da capacidade do sistema

Através de uma dada probabilidade de bloqueio é possível obter a capacidade mínima do sistema que satisfaz todas necessidades de recursos de todos os serviços. Por exemplo, considerando dois serviços que requerem uma probabilidade de bloqueio inferior a 2%, o processo consistiria em aumentar progressivamente a

capacidade do sistema e, para cada capacidade, calcular a probabilidade de bloqueio para esses serviços, até que se obtivesse uma probabilidade de bloqueio inferior a 2% para ambos os serviços.

Considerando os serviços do exemplo dado na subsecção 3.3.3.1, a Tabela 3.1 apresenta as diferentes probabilidades de bloqueio dos dois serviços em função da capacidade do sistema. Conforme se pode observar, e para cumprir uma probabilidade de bloqueio inferior a 2% para ambos os serviços, a capacidade mínima que satisfaz as necessidades desses serviços é de 6 recursos, *i.e.*, $C = 6$.

Capacidade	Probabilidade de bloqueio	
	serviço 1	serviço 2
1	33,3%	100%
2	17,8%	45,2%
3	6,2%	22,9%
4	2,4%	8,45%
5	0,7%	3,1%
6	0,2%	0,9%
7	0,06%	0,3%

Figura 3.12 – Probabilidade de bloqueio para diferentes capacidades de sistema.

3.4 QoS Class Identifier

Um dos factores mais importantes na gestão de uma rede de telecomunicações móveis é o QoS (*Quality Of Service*). O QoS é um mecanismo de controlo de recursos de reserva, que permite fornecer diferentes prioridades a diferentes serviços, utilizadores e fluxos de dados. Na Tabela 3.1 são apresentados os diferentes indicadores de classes de QoS definidos pela *release 8* do 3GPP [27].

QCI	Bearer	Prioridade	Atraso	PELR	Exemplo	
1	GBR	2	100 ms	10^{-2}	Conversação de voz	
2		4	150 ms	10^{-3}	Conversação de vídeo	
3		3	50 ms	10^{-3}	Jogos em tempo real	
4		5	300 ms	10^{-6}	Streaming vídeo	
5	Non-GBR	1	100 ms	10^{-6}	Sinalização IMS	
6		6	300 ms	10^{-6}	Streaming vídeo, web, e-mail	
7		7	100 ms	10^{-3}	Voz, vídeo, jogos	
8		8	9	300 ms	10^{-6}	Streaming vídeo, web, e-mail
9						

Tabela 3.1 – Organização dos diferentes identificadores de classe do QoS.

Existem dois tipos de *bearers*: débito binário garantido (*GBR – Guaranteed bit-rate*) e débito binário não garantido (*Non-GBR – Non-guaranteed bit-rate*). Os serviços que utilizam *GBR* assumem que problemas de perdas de pacotes relacionados com congestionamento não ocorrem. Por sua vez, os serviços que utilizam *Non-GBR* têm que estar preparados para problemas de congestionamento e perdas de pacotes [28].

O *GBR* utiliza-se para serviços em que é preferível que o acesso de um utilizador ao serviço seja bloqueado ao invés de se obter uma degradação no desempenho do serviço a ser utilizado pelo utilizador. Este aspecto é relevante em ambientes onde a não é possível garantir a qualidade de utilização desses serviços.

Cada *bearer* é identificado com um identificador de classe QoS (*QCI – QoS Classe Identifier*), onde o identificador é associado a diferentes características, que descrevem o tratamento que o tráfego recebe em termos de prioridade, atrasos e taxas de erro por perdas de pacotes (*PELR – Packet Error Loss Rate*) [28].

3.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as principais características do planeamento de uma rede móvel celular. No planeamento por cobertura foram apresentados os diferentes modelos de propagação e as suas limitações. Foram apresentados os

modelos de propagação utilizados, de acordo com as fontes de orientação da Alcatel-Lucent, para o sistema de comunicações móveis *LTE*, e referido o modelo de propagação unificado.

Relativamente ao planeamento por capacidade foram apresentados modelos de agregação de tráfego e alguns algoritmos para determinar a probabilidade de bloqueio admitido e tendo alguns modelos simplificados para obter a probabilidade de bloqueio. Os sistemas de comunicações móveis *LTE* apresentam diferentes indicadores de classe de *QoS*, sendo estes organizados pelo tipo de *bearer*, prioridade, atraso e probabilidade de erro, devido à taxa de perda de pacotes.

Capítulo 4

Ferramenta de Planeamento

Neste capítulo faz-se uma descrição da ferramenta de planeamento A9155 da Alcatel-Lucent para o planeamento de uma rede móvel *WiMAX*.

4.1 Introdução

Num planeamento orientado à capacidade é fundamental caracterizar todos os intervenientes da rede, e a utilização que fazem desta. É necessário caracterizar os utilizadores, os serviços que estes utilizam, e o ambiente em que estes se encontram. Neste capítulo descrevem-se as características existentes para o planeamento de uma rede *WiMAX* na ferramenta de planeamento A9155, propriedade da Alcatel-Lucent. Esta análise fez-se para o sistema de comunicações móveis *WiMAX*, uma vez que é similar aos sistemas de comunicações móveis *LTE* e que se pretende desenvolver um algoritmo para aplicar na ferramenta de planeamento para os sistemas de comunicações móveis *LTE*.

A descrição da ferramenta tem em conta os *inputs* necessários, *e.g.* Utilizadores, Ambientes e Serviços. Também se refere como se obtém a capacidade e os recursos da célula através do cálculo da capacidade das células e *throughput* dos utilizadores.

4.2 Utilizadores

Os utilizadores desempenham o papel principal nas ligações móveis e, é necessário entender os seus perfis de utilização da rede, de modo a se conseguir maximizar o desempenho da rede. Nesta secção referem-se as características necessárias para a modelação do tipo e perfil dos utilizadores da rede, quando é utilizada a ferramenta de planeamento A9155.

4.2.1 Tipos de Utilizadores

O comportamento do utilizador influencia o tráfego da rede, pelo que é necessário caracterizar o tipo de utilizadores que é previsível e os serviços que estes poderão vir a usufruir.

Pode-se modelar as diferentes variações do comportamento dos utilizadores através da criação de diferentes perfis para diferentes momentos ao longo do dia. Por exemplo, um utilizador pode ser considerado um utilizador empresarial durante o dia, executando tráfego de videoconferência e voz, mas sem a utilização de serviços Web.

No final do dia, o mesmo utilizador poderá não utilizar o mesmo tipo de serviços que utilizou anteriormente.

4.2.2 Mobilidade

A mobilidade do utilizador é um dos factores importantes para o planeamento da capacidade da rede. A informação sobre a mobilidade da estação terminal é necessário para determinar que esquema de modulação e codificação possam ser utilizados. Os terminais móveis utilizados a elevadas velocidades ou pedestre possuem características de qualidade diferentes.

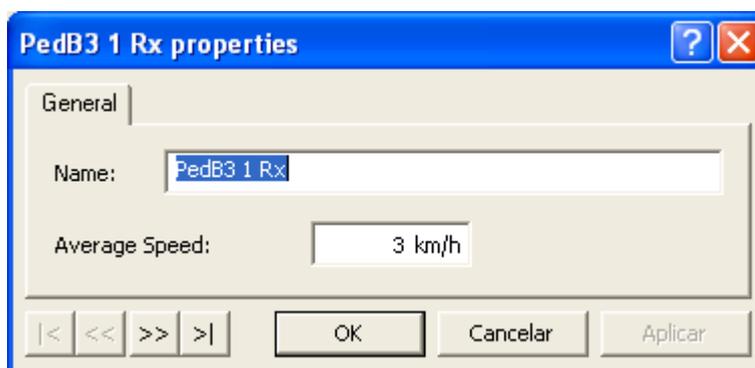


Figura 4.1 – Características da mobilidade dos utilizadores [29].

4.2.3 Modelação do perfil dos utilizadores

Na ferramenta de planeamento A9155, podem ser definidos diferentes tipos de perfis de utilizadores (Figura 4.2), introduzindo, para serviços de voz, o número médio de chamadas por hora, $N_{chamadas}$, e a duração média em segundos, $D_{chamadas}$.

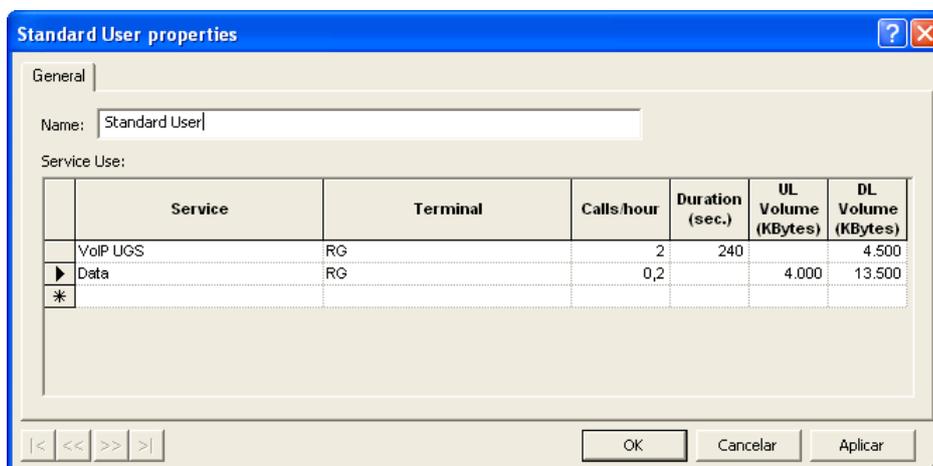


Figura 4.2 – Características dos perfis dos utilizadores [29].

Estes parâmetros são utilizados no cálculo da probabilidade de actividade por hora ρ_{voz} , dada pela expressão (4.1) [29].

$$\rho_{voz} = \frac{N_{chamadas} \times D_{chamadas}}{3600} \quad (4.1)$$

Nos serviços de dados o parâmetro de chamadas por hora é definido como número de sessões por hora, $N_{sessão}$, definido a partir do momento em que utilizador começa a utilização do serviço até que este seja terminado.

A ferramenta de planeamento A9155 calcula a probabilidade de um utilizador estar activo na ligação descendente e ascendente, num determinado instante de tempo, de acordo com as características de utilização dos serviços, descrito no perfil do utilizador (Figura 4.2). O número de utilizadores, de um conjunto total de utilizadores, $N_{utilizadores}$, a tentar aceder ao k -ésimo serviço, N_k , calcula-se através da expressão (4.2).

$$N_k = N_{Utilizadores} \times \rho_{voz} \quad (4.2)$$

Por oposição aos serviços de voz, os serviços de dados não são utilizados continuamente, logo a sua caracterização é feita através do volume de tráfego médio transferido na ligação descendente, V_{DL} , e ascendente, V_{UL} , em *Bytes*. A probabilidade de actividade para serviços de dados é então obtida através da expressão (4.3) e (4.4) para a ligação descendente e ascendente, respectivamente [29].

$$\rho_{dados DL} = \frac{N_{sessão} \times V_{DL} \times 8}{TP_{médio}^{DL} \times 3600} \quad (4.3)$$

$$\rho_{dados UL} = \frac{N_{sessão} \times V_{UL} \times 8}{TP_{médio}^{UL} \times 3600} \quad (4.4)$$

Para o serviço de dados a ser utilizado, $TP_{médio}^{DL}$ e $TP_{médio}^{UL}$ correspondem ao débito binário médio da ligação descendente da ligação ascendente, respectivamente.

4.3 Caracterização de ambientes

Um dos factores a ter em conta para a caracterização do tráfego é o ambiente. É necessário caracterizar o ambiente de modo a se obter a quantidade de utilizadores com o mesmo tipo de perfil numa determinada área geográfica.

Na ferramenta de planeamento, os tipos de ambientes descrevem o ambiente utilizando uma lista de perfis de utilizadores, onde cada um é associado a um tipo de mobilidade e uma dada densidade, *i.e.*, número de utilizadores com o mesmo perfil por km^2 .

De modo a definir uma distribuição de utilizadores apropriada, é necessário definir a classe de cenário, e o seu respectivo peso no ambiente. Na Figura 4.3 encontram-se apresentados os parâmetros utilizados para a modelação de ambientes, que são:

- Perfil de utilizador;
- Tipo de mobilidade;
- Densidade de utilizadores;

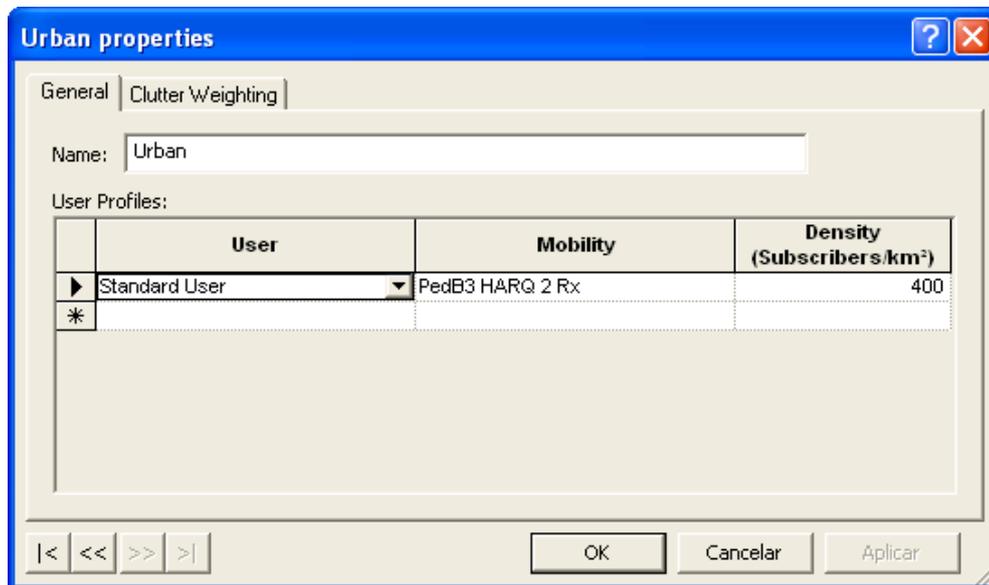


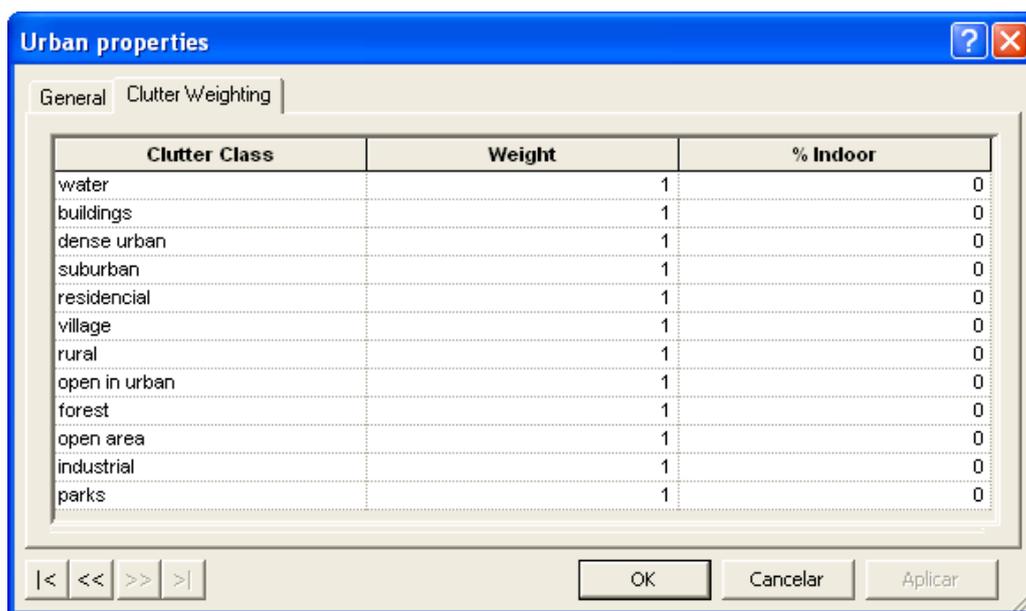
Figura 4.3 – Características da modelação de ambientes [29].

Para cada classe de cenário é definido o seu peso no ambiente total (Figura 4.4), de modo a que se possa calcular a densidade de utilizadores para cada classe de cenário t . Esse cálculo é efectuado através da expressão (4.5).

$$N_t = N_{\text{área}} \times \frac{P_t \times S_t}{\sum_{j=1}^T P_j \times S_j} \quad (4.5)$$

Em que, N_t corresponde ao número de utilizadores da classe de cenário t , $N_{\text{área}}$ o número de utilizadores total da área e P_t ao peso da classe de cenário t e S_t corresponde à área da superfície da classe de cenário t .

Por exemplo, numa área de 10 Km^2 com uma densidade de utilizadores igual a $100/\text{Km}^2$, existem então 1000 utilizadores. Nessa área existem duas classes de cenário: um cenário aberto e outro com edifícios. O peso da classe de cenário aberto é 1 e para a classe de cenário com edifícios é 4. Então, dados os respectivos pesos de cada classe é possível aferir que para a classe de cenário aberto e com edifícios, existem 200 e 800 utilizadores, respectivamente.



Clutter Class	Weight	% Indoor
water	1	0
buildings	1	0
dense urban	1	0
suburban	1	0
residencial	1	0
village	1	0
rural	1	0
open in urban	1	0
forest	1	0
open area	1	0
industrial	1	0
parks	1	0

Figura 4.4 – Características da modelação das classes de cenários [29].

4.4 Caracterização dos serviços

A modelação de serviços no planeamento de uma rede móvel é um factor importante para que esta não seja subdimensionada. É relevante obter a informação do tipo de serviços que um utilizador requer e o volume de utilização do mesmo.

A ferramenta de planeamento apresenta como diferentes tipos de serviços os de voz e de dados. Nos serviços de dados é possível designar o tipo de serviço e o volume de dados que ele requer durante a sua utilização.

Na modelação de serviços são introduzidos os parâmetros necessários para as simulações na ferramenta de planeamento. Na Figura 4.5 são apresentados os parâmetros necessários para modelar os serviços de voz. Estes parâmetros são descritos nas secções seguintes.

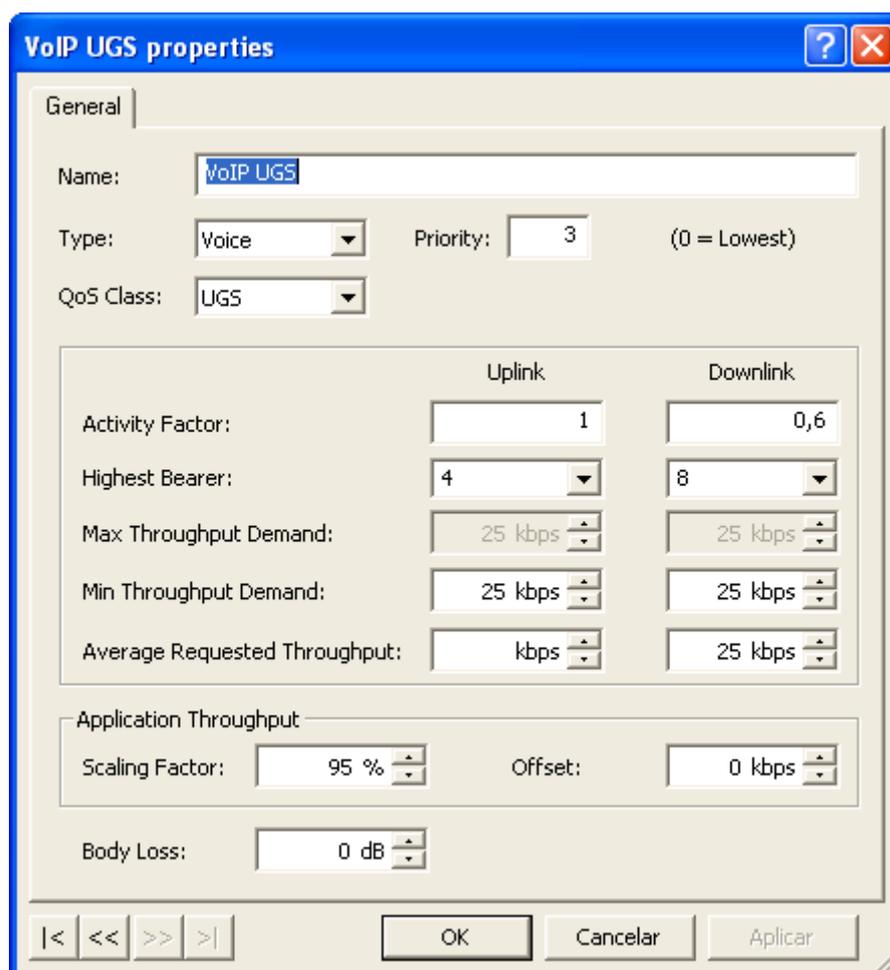


Figura 4.5 - Características dos serviços de voz [29].

O parâmetro *QoS* refere-se à capacidade de fornecer diferentes tipos de prioridades a diferentes aplicações, utilizadores, fluxos de dados, ou para garantir um determinado nível de desempenho dos mesmos. A ferramenta apresenta como opções as seguintes classes de *QoS*:

- *Unsolicited Grant Service (UGS)* – Desenhado para suportar fluxos de serviços em tempo real que geram pacotes de tamanho fixo.
- *real-time Polling Service (rtPS)* – Desenhado para facilitar os fluxos de serviços de tempo real que geram pacotes de tamanho variável. O *rtPS* é mais eficiente que o *UGS*, uma vez que este algoritmo utiliza um processo de solicitação de largura de banda. A desvantagem é que este processo aumenta o atraso em relação ao algoritmo *UGS*.

- *Extended real-time Polling Service (ErtPS)* – Desenhado para permitir tráfego em tempo real, garantindo um determinado nível de qualidade, mas com débitos binários variáveis.
- *Non-real-time Polling Service (nrtPS)* – Desenhado para suportar rajadas de dados de tamanho variável sem ser de tempo real.
- *Best-effort (BE)* – Desenhado para suportar tráfego de serviço em tempo não real como, por exemplo, *HTTP* e *FTP*, que são tolerantes a atrasos e *jitter*.

Os parâmetros *QoS* e prioridade são utilizados para o dimensionamento da gestão de recursos descrito na subsecção 4.5.4.

Os factores de actividade, na ligação ascendente e descendente, são utilizados para determinar a probabilidade dos utilizadores acederem ao serviço de voz. Estes factores são posteriormente utilizados nos cálculos da probabilidade de um utilizador estar activo na ligação. Nos serviços de dados, este factor não é requerido.

No *throughput* são requeridos os valores máximos e mínimos na ligação ascendente e descendente, que um determinado serviço exige. É necessário introduzir também o *throughput* médio do serviço. Estes parâmetros são utilizados no dimensionamento da gestão dos recursos a ser atribuídos a cada terminal móvel, descrito na subsecção 4.5.4.

Os parâmetros factor de escalonamento e *offset* modelam a informação de cabeçalho e outra informação de dados suplementar que não aparece no nível de aplicação.

O parâmetro *body loss* corresponde à perda devido ao corpo do utilizador, sendo considerado o valor de 0 dB para serviços de dados e 3 dB para serviços de voz, uma vez que o terminal móvel se encontra perto da cabeça do utilizador.

É possível escolher o esquema de modulação e codificação que se deseja utilizar para um determinado tipo de serviço. Esse esquema é escolhido de uma lista de esquemas pré-definidos apresentados na Figura 4.6, que depois será utilizado para o cálculo do débito binário do utilizador. Estes parâmetros podem ser modificados.

Radio Bearer Index	Name	Modulation	Channel Coding Rate	Bearer Efficiency (bits/symbol)
1	BPSK1/2	BPSK	0,5	0,5
2	QPSK1/2	QPSK	0,5	1
3	QPSK3/4	QPSK	0,75	1,5
4	16QAM1/2	16QAM	0,5	2
5	16QAM3/4	16QAM	0,75	3
6	64QAM1/2	64QAM	0,5	3
7	64QAM2/3	64QAM	0,67	4
8	64QAM3/4	64QAM	0,75	4,5
9	64QAM5/6	64QAM	0,833	5
*				

Figura 4.6 – Esquemas de modulação e codificação [29].

4.5 Capacidade e recursos da célula

A capacidade da célula é o número de recursos disponíveis na mesma. Esse conjunto total de recursos numa célula pode ser considerado como sendo o número de símbolos disponíveis, em cada trama, para a transmissão de dados [29].

4.5.1 Cálculo da duração de símbolo

A ferramenta de planeamento A9155 calcula a duração do tempo de símbolo, em ms, que corresponde à soma da informação de dados com o tempo do prefixo cíclico, representado na Figura 4.7, e calcula-se através da expressão (4.6) [29].

$$D_{Símbolo} = D_{Símbolo}^{útil} + D_{PC} \tag{4.6}$$



Figura 4.7 – Esquema do símbolo OFDM.

Onde $D_{Símbolo}^{útil}$ representa a duração de tempo útil de símbolo e D_{PC} a duração do prefixo cíclico, sendo estes tempos obtidos através das expressões (4.7) e (4.8), respectivamente [30].

$$D_{\text{Símbolo}}^{\text{Útil}} = \frac{1}{\Delta f} \quad (4.7)$$

$$D_{PC} = \frac{G_{PC/\text{útil}}}{\Delta f} \quad (4.8)$$

onde $G_{PC/\text{útil}}$ representa a razão entre o tempo do prefixo cíclico e o tempo útil, podendo assumir um valor do conjunto $\left\{\frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}\right\}$ [31]. O parâmetro Δf representa o espaçamento entre sub-portadoras, em kHz, e obtém-se através da expressão (4.9) [30].

$$\Delta f = \frac{F_{\text{amostragem}}}{N_{FFT}} \quad (4.9)$$

onde N_{FFT} corresponde ao número total de sub-portadoras por canal e $F_{\text{amostragem}}$ representa a frequência de amostragem e obtém-se através da expressão (4.10) [29].

$$F_{\text{amostragem}} = 8000 \times \text{floor}\left(f_{\text{amostragem}} \times \frac{LB_{\text{canal}} \times 10^6}{8000}\right) \quad (4.10)$$

onde, $f_{\text{amostragem}}$ representa o factor de amostragem e LB_{canal} representa a largura de banda do canal, em MHz. Segundo [32], o factor de amostragem possui um valor por defeito de 8/7, excepto quando a largura de canal é múltiplo de 1,25, 1,5, 2 ou 2,75 MHz, passando esse valor a ser 28/25. A função $\text{floor}(x)$ devolve o maior valor inteiro igual ou inferior a x [33].

Segundo [30], a expressão (4.10) pode ser simplificada, uma vez que a frequência de amostragem é truncada em múltiplos de 8 kHz, obtendo-se a expressão (4.11).

$$F_{\text{amostragem}} = f_{\text{amostragem}} \times LB_{\text{canal}} \quad (4.11)$$

4.5.2 Cálculo da capacidade da célula - TDD

A capacidade da célula corresponde ao número de recursos disponíveis, *i.e.*, o número total de símbolos por sub-trama para a ligação descendente e ascendente, e obtém-se através das expressões (4.12) e (4.13), respectivamente [29].

$$R_{Célula}^{DL} = \left\{ N_{S/ST}^{DL} \times N_{sub-portadoras}^{Dados} \times \left(1 - \frac{O_{Variável}^{DL}}{100} \right) \right\} \quad (4.12)$$

$$R_{Célula}^{UL} = \left\{ N_{S/ST}^{UL} \times N_{sub-portadoras}^{Dados} \times \left(1 - \frac{O_{Variável}^{UL}}{100} \right) \right\} \quad (4.13)$$

onde, $O_{Variável}^{DL}$ e $O_{Variável}^{UL}$ correspondem ao *overhead* variável da ligação descendente e ascendente, respectivamente, e $N_{sub-portadoras}^{Dados}$ corresponde ao número de sub-portadoras de dados por canal. O número de símbolos na sub-trama da ligação descendente, $N_{S/ST}^{DL}$ e na sub-trama da ligação ascendente, $N_{S/ST}^{UL}$ obtém-se através das expressões (4.14) e (4.15), respectivamente [29].

$$N_{S/ST}^{DL} = \left(N_{símbolos/Trama}^{útil} \times r_{DL-Trama}^{TDD} \right) - O_{Fixo}^{DL} \quad (4.14)$$

$$N_{S/ST}^{UL} = \left(N_{símbolos/Trama}^{útil} \times (1 - r_{DL-Trama}^{TDD}) \right) - O_{Fixo}^{UL} \quad (4.15)$$

onde, $r_{DL-Trama}^{TDD}$ corresponde à razão da sub-trama da ligação de descendente em relação à trama completa, e O_{Fixo}^{DL} e O_{Fixo}^{UL} correspondem ao *overhead* fixo da ligação descendente e ascendente, respectivamente. O número de símbolos úteis existentes na trama,, $N_{símbolos/Trama}^{útil}$, obtém-se através da expressão (4.16) [29].

$$N_{DS/Trama}^{útil} = floor \left(\frac{D_{Trama}^{útil}}{D_{Símbolo}} \right) \quad (4.16)$$

Onde, $D_{Trama}^{útil}$ representa o tempo útil da trama, em ms. As sub-tramas da ligação descendente e ascendente de uma trama TDD são separadas no tempo pelos tempos de guarda recebido, $D_{TG_r}^{TDD}$, em ms, e transmitido, $D_{TG_t}^{TDD}$, em ms. Então a duração do tempo útil de trama é dada através da subtração dos tempos de guarda recebidos e transmitidos ao tempo total de trama, de acordo com a expressão (4.17).

$$D_{Trama}^{útil} = D_{Trama} - D_{TG_r}^{TDD} - D_{TG_t}^{TDD} \quad (4.17)$$

4.5.3 Cálculo da capacidade da célula - FDD

Nas redes FDD os cálculos da capacidade da célula são iguais para a ligação descendente e ascendente. Não existem tempos de guarda transmitidos e recebidos, pelo que a duração da sub-trama da ligação descendente e ascendente são iguais à duração da trama, ou seja, $D_{Sub-trama} = D_{Trama}$.

O número total de símbolos na ligação descendente ou ascendente, e após a remoção do *overhead*, O , obtém-se através da expressão (4.18).

$$R_{Célula} = \left\{ N_{S/ST} \times N_{SC}^{Dados} \times \left(1 - \frac{O}{100} \right) \right\} \quad (4.18)$$

O número de símbolos por sub-trama obtém-se através expressão (4.19).

$$N_{S/TS} = \left(\frac{D_{Sub-trama}}{D_{Símbolo}} \right) \quad (4.19)$$

O *throughput* de pico do canal, TP_{Canal}^{Pico} , em Mbps, determina-se para todos os recursos da célula alocados no terminal móvel, de acordo com a expressão (4.20), para a ligação descendente e ascendente, através da multiplicação do número de símbolos disponíveis, ou seja, os recursos da célula, $R_{Célula}$, pela eficiência espectral, ε_{esp} , e dividindo pelo tempo de duração da trama, D_{Trama} .

$$TP_{Canal}^{Pico} = \frac{R_{Célula} \times \varepsilon_{esp}}{D_{Trama}} \quad (4.20)$$

Onde ε_{esp} obtém-se de acordo com os esquemas de modulação e codificação apresentados na subsecção 2.2.7.

4.5.4 Gestão de recursos

A ferramenta de planeamento A9155 faz a gestão dos recursos a alocar para cada terminal móvel, conforme as necessidades do serviço que este utiliza. Se a distribuição de utilizadores gerar um número de utilizadores, $N_{Gerados}$, inferior ao número máximo de utilizadores definido para cada célula, $N_{Utilizadores}^{Célula}$, então $N_{Utilizadores} = N_{Gerados}$, caso contrário o número de utilizadores calcula-se através da expressão (4.21).

$$N_{Utilizadores} = \text{Min}(N_{Utilizadores}^{Célula}, N_{Gerados}) \quad (4.21)$$

Cada terminal móvel, $M_i \in N_{utilizadores}$, seleccionado para a gestão de recursos, tem as seguintes características:

- A classe *QoS*;
- A prioridade do serviço;
- O *throughput* mínimo necessário do serviço para a ligação descendente, TP_{min}^{DL} ;
- O *throughput* mínimo necessário do serviço para a ligação ascendente, TP_{min}^{UL} ;
- O *throughput* máximo necessário do serviço para a ligação descendente, TP_{max}^{DL} ;
- O *throughput* máximo necessário do serviço para a ligação ascendente, TP_{max}^{UL} ;

O real *throughput* máximo necessário, *i.e.*, o *throughput* resultante necessário após serem satisfeitos todas as necessidades mínimas de *throughput*, obtém-se através das expressões (4.22) e (4.23), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente.

$$TP_{resultante}^{DL} = TP_{max}^{DL} - TP_{min}^{DL} \quad (4.22)$$

$$TP_{resultante}^{UL} = TP_{max}^{UL} - TP_{min}^{UL} \quad (4.23)$$

4.5.4.1 Alocação de recursos para as necessidades mínimas de *throughput*

Para as classes de *QoS* de serviço *UGS*, *rtPS*, *ErtPS* e *nrtPS*, a ferramenta de planeamento A9155 organiza os terminais móveis $M_i \in N_{utilizadores}$ por ordem decrescente de prioridade de serviço, p (Tabela 4.1).

M_i	QoS	p
1	UGS	$p = n$
2		$p > 0$
.		$p = 0$
.	rtPS	$p = n$
.		$p > 0$
.		$p = 0$
.	ErtPS	$p = n$
.		$p > 0$
.		$p = 0$
.	nrtPS	$p = n$
N-1		$p > 0$
N		$p = 0$

Tabela 4.1 – Organização dos terminais móveis em função do QoS e da prioridade [29].

A percentagem de recursos a alocar, para cada terminal móvel, calcula-se através da expressão (4.24) e (4.25), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente.

$$R_{min}^{DL} = \frac{TP_{min}^{DL}}{TP_{Canal-DL}^{Pico}} \tag{4.24}$$

$$R_{min}^{UL} = \frac{TP_{max}^{UL}}{TP_{Canal-UL}^{Pico}} \tag{4.25}$$

A alocação de recursos é concluída assim que se verificarem as expressões (4.26) e (4.27) para a ligação descendente e ascendente, respectivamente, *i.e.*, quando todos os recursos disponíveis são utilizados enquanto as necessidades mínimas de *throughput* são satisfeitas.

$$\sum_{M_i} R_{min}^{DL} = 100\% \tag{4.26}$$

$$\sum_{M_i} R_{min}^{UL} = 100\% \quad (4.27)$$

No caso de todos os recursos disponíveis já terem sido alocados e se verifique as expressões (4.28) e (4.29), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente, a ferramenta de planeamento A9155 aloca os recursos para o terminal móvel, de modo a satisfazer as necessidades máximas de *throughput*. Os recursos restantes calculam-se através das expressões (4.30) e (4.31), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente.

$$\sum_{M_i} R_{min}^{DL} < 100\% \quad (4.28)$$

$$\sum_{M_i} R_{min}^{UL} < 100\% \quad (4.29)$$

$$R_{res}^{DL} = 100\% - \sum_{M_i} R_{min}^{DL} \quad (4.30)$$

$$R_{res}^{UL} = 100\% - \sum_{M_i} R_{min}^{UL} \quad (4.31)$$

4.5.4.2 Alocação de recursos para as necessidades máximas de *throughput*

A ferramenta de planeamento A9155 calcula o número total de utilizadores pertencentes às classes *QoS* de serviços *rtPs*, *ErtPS*, *nrtPS* e *BE*. Então, para esse número de utilizadores $N \in M_i$, a ferramenta A9155 divide os recursos restantes equitativamente entre estes, i.e., R_{res}^{DL}/N e R_{res}^{UL}/N para a ligação descendente e ascendente, respectivamente.

No caso de, para cada qualquer utilizador, se verificar a expressão (4.32) e (4.34), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente, a ferramenta de

planeamento A9155 aloca os recursos calculados, para a ligação descendente e ascendente, através das expressões (4.33) e (4.35), respectivamente.

$$\frac{R_{res}^{DL}}{N} > \frac{TP_{resultante}^{DL}}{TP_{Canal-DL}^{Pico}} \quad (4.32)$$

$$R_{max}^{DL} = \frac{TP_{resultante}^{DL}}{TP_{Canal-DL}^{Pico}} \quad (4.33)$$

$$\frac{R_{res}^{UL}}{N} > \frac{TP_{resultante}^{UL}}{TP_{Canal-UL}^{Pico}} \quad (4.34)$$

$$R_{max}^{UL} = \frac{TP_{resultante}^{UL}}{TP_{Canal-UL}^{Pico}} \quad (4.35)$$

Caso as expressões (4.32) e (4.34) não se verifiquem, a percentagem de recursos alocada a cada terminal móvel, de modo a satisfazer as suas necessidades máximas de *throughput*, obtém-se através das expressões (4.36) e (4.37), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente.

$$R_{max}^{DL} = \frac{\%R_{res}^{DL}}{N} \quad (4.36)$$

$$R_{max}^{UL} = \frac{\%R_{res}^{UL}}{N} \quad (4.37)$$

Os restantes recursos são reservados num *buffer* e obtêm-se através das expressões (4.38) e (4.39), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente.

$$\frac{R_{res}^{DL}}{N} - \frac{TP_{resultante}^{DL}}{TP_{Canal-DL}^{Pico}} \quad (4.38)$$

$$\frac{R_{res}^{UL}}{N} - \frac{TP_{resultante}^{UL}}{TP_{Canal-UL}^{Pico}} \quad (4.39)$$

A ferramenta de planeamento A9155 calcula a quantidade de recursos em excesso guardados no *buffer*, através das expressões (4.40) e (4.41), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente.

$$R_{buffer}^{DL} = \sum_{M_i} \left(\frac{R_{res}^{DL}}{N} - \frac{TP_{resultante}^{DL}}{TP_{Canal-DL}^{Pico}} \right) \quad (4.40)$$

$$R_{buffer}^{UL} = \sum_{M_i} \left(\frac{R_{res}^{UL}}{N} - \frac{TP_{resultante}^{UL}}{TP_{Canal-UL}^{Pico}} \right) \quad (4.41)$$

A alocação de recursos para os utilizadores com necessidades máximas de *throughput* é efectuada até que não existam mais recursos para alocar, *i.e.*, até que se verifiquem as expressões (4.42) e (4.43), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente, ou até que todas as necessidades de *throughput* estejam satisfeitas.

$$R_{buffer}^{DL} = 0 \quad (4.42)$$

$$R_{buffer}^{UL} = 0 \quad (4.43)$$

Finalmente, a ferramenta de planeamento A9155 aloca os recursos para cada terminal móvel M_i , sendo a percentagem total de recursos alocados obtida através das expressões (4.44) e (4.45), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente.

$$R^{DL} = R_{min}^{DL} + R_{max}^{DL} \quad (4.44)$$

$$R^{UL} = R_{min}^{UL} + R_{max}^{UL} \quad (4.45)$$

Por sua vez, a carga de tráfego de cada terminal móvel calcula-se através das expressões (4.46) e (4.47), para a ligação descendente e ascendente, respectivamente.

$$TL^{DL} = R^{DL} \quad (4.46)$$

$$TL^{UL} = R^{UL} \quad (4.47)$$

O *throughput* do utilizador determina-se através dos recursos alocados no terminal móvel. Os *throughputs* de pico do utilizador, para a ligação descendente e ascendente, calculam-se através das expressões (4.48) e (4.49).

$$TP_{Utilizador-DL}^{Pico} = R^{DL} \times TP_{Canal-DL}^{Pico} \quad (4.48)$$

$$TP_{Utilizador-UL}^{Pico} = R^{UL} \times TP_{Canal-UL}^{Pico} \quad (4.49)$$

4.6 Conclusões

Neste capítulo foram descritos os *inputs* e o processamento da ferramenta de planeamento A9155 da Alcatel-Lucent, dando ênfase às características necessárias para o planeamento por capacidade e modelação de tráfego de uma rede *WiMAX*.

Descrevem-se a modelação de ambientes, utilizadores e serviços, e todos os *inputs* necessários para a modelação dos mesmos, para o planeamento de uma rede *WiMAX*.

Para obter a capacidade e recursos da célula foram apresentados os algoritmos utilizados para o cálculo dos recursos disponíveis na célula, para as técnicas *TDD* e *FDD*, e o cálculo do débito binário do canal e do utilizador e o algoritmo de gestão de recursos a alocar a cada terminal móvel para que sejam cumpridas todas as necessidades de tráfego de uma rede *WiMAX*.

Capítulo 5

Algoritmo proposto para a ferramenta de planeamento para o sistema de comunicações móveis *LTE*

Neste capítulo é proposto o algoritmo para a ferramenta de planeamento por capacidade para os sistemas de comunicações móveis *LTE* utilizando a mesma plataforma da ferramenta A9155 da Alcatel-Lucent.

5.1 Introdução

A fase de planeamento de uma rede celular, tal como foi referido anteriormente, é importante para um bom desempenho da mesma. Para tal é necessário compreender os requisitos das tecnologias envolvidas, e fazer uma estimativa da utilização da rede e dos perfis dos utilizadores que nela se encontram.

Após a análise do sistema de comunicações móveis *LTE* e da ferramenta de planeamento A9155 da Alcatel-Lucent descrevem-se, neste capítulo, as modificações e apresentam-se os algoritmos a aplicar à ferramenta de planeamento para o planeamento por capacidade de uma rede *LTE*. Este capítulo apresenta uma breve comparação entre os sistemas *WiMAX* e *LTE*, cujo objectivo é efectuar uma análise sumária das diferenças e semelhanças com o objectivo de compreender as alterações necessárias a aplicar à ferramenta de planeamento estudada para poder fazer o planeamento para os sistemas de comunicações móveis *LTE*. Para o algoritmo proposto descrevem-se os *inputs* necessários para o processamento e os *outputs* esperados para obter os resultados do planeamento.

5.2 *WiMAX* versus *LTE*

Os sistemas de comunicações móveis *WiMAX* e *LTE* são muito semelhantes, existindo no entanto algumas particularidades que diferem entre estes sistemas. A Tabela 5.1 apresenta uma comparação entre as principais características do *WiMAX* e do *LTE*.

	<i>WiMAX</i>	<i>LTE</i>
Arquitectura Rede	Baseado em <i>IP</i>	Baseado em <i>IP</i>
Tecnologia de Acesso	Ligação descendente: <i>OFDM</i> Ligação ascendente: <i>OFDM</i>	Ligação descendente: <i>OFDM</i> Ligação ascendente: <i>SC-FDMA</i>
Largura Banda Canal [MHz]	1,25; 3,5; 5; 10; 20	1,25; 2,5; 5; 10; 15; 20
Técnicas Duplexagem	<i>TDD</i> e <i>FDD</i> ; Preferencialmente <i>TDD</i>	<i>TDD</i> e <i>FDD</i> ; Preferencialmente <i>FDD</i>

Espaçamento entre sub-portadoras [kHz]	Varia entre 7 a 20 kHz. Valor típico de 10 kHz para WiMAX móvel.	15 kHz (Fixo)
Tamanho Prefixo Cíclico	Variável: 1/32; 1/16, 1/8, e 1/4	Curto: 5,21 μ s Longo: 16,67 μ s
Bandas de Frequência [GHz]	2,3; 2,5; 3,5 GHz	Existentes: 800, 900, 1800, 1900 MHz Novas frequências: Entre 800 MHz a 2,62 GHz
Modulação	<i>QPSK, 16-QAM, e 64-QAM</i>	<i>QPSK, 16-QAM e 64-QAM</i>
Débito Binário	Ligação descendente: 75 Mbps Ligação ascendente: 25 Mbps	Ligação descendente: 100 a 325 Mbps Ligação ascendente: 50 a 86,4 Mbps
Raio da Célula	2 a 7 km	5 km
Capacidade da Célula	100 a 200 utilizadores	> 200 utilizadores (até 5 MHz) > 400 utilizadores (superior a 5 MHz)
MIMO	Ligação descendente: 2x2; 2x4; 4x2; 4x4 Ligação ascendente: 1x2; 1x4	Ligação descendente: 2x2; 2x4; 4x2; 4x4 Ligação ascendente: 1x2; 1x4; 2x2; 2x4
Mobilidade	Até 120 km/h	Até 350 km/h
Herança de Rede	<i>IEEE 802.16a para IEEE 802.16d</i>	<i>GSM, GPRS, UMTS, HSPA</i>

Tabela 5.1 – Comparação entre as tecnologias *WiMAX* e *LTE* [4].

O sistema de comunicações móveis *LTE* utiliza *SC-FDMA* na ligação ascendente, enquanto o *WiMAX* utiliza *OFDM* como método de acesso. A utilização da técnica *SC-FDMA* representa uma vantagem para o *LTE*, uma vez que esta resolve o problema de *PAPR* que a técnica *OFDM* apresenta.

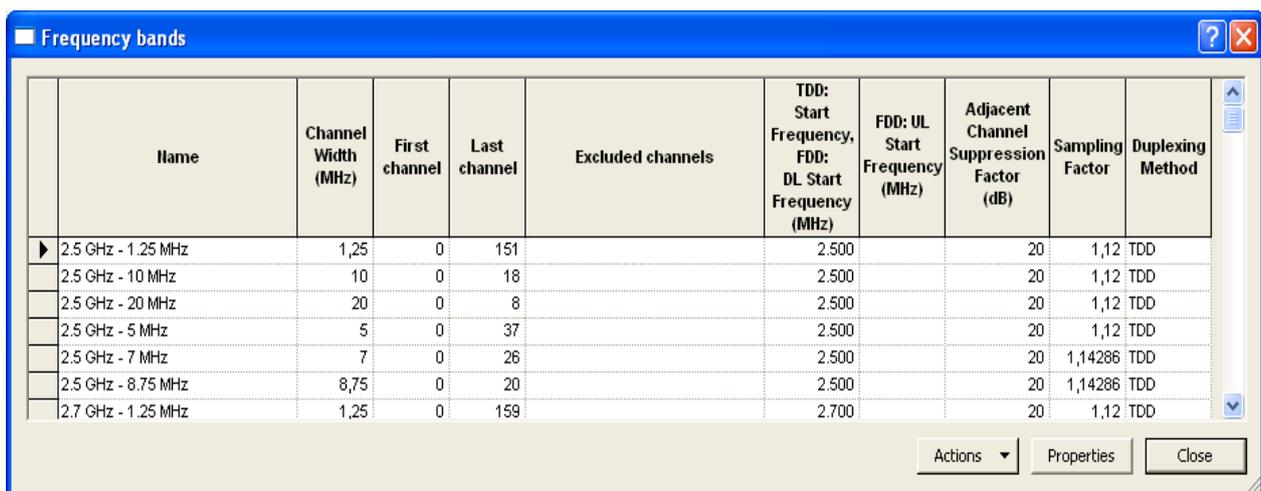
Ao nível do débito binário, o *LTE* consegue obter um débito binário superior, nas ligação descendente e ascendente, devido ao facto de poder suportar esquemas MIMO, em ambas as ligações, por oposição à tecnologia WiMAX que apenas suporta esquemas MIMO na ligação descendente.

5.3 Inputs necessários

Nesta subsecção são descritos os *inputs* necessários, a introduzir na ferramenta de planeamento, nomeadamente bandas de frequência, modelos de propagação, sistemas *MIMO*, estrutura da trama, esquemas de modulação e codificação, características de serviços e perfil dos utilizadores.

5.3.1 Bandas de Frequência

Uma das diferenças o sistema de comunicações móveis *LTE* em relação ao sistema de comunicações móveis *WiMAX* são as bandas de frequência. Na subsecção 2.2.6 apresentam-se as frequências para o *LTE*. Na Figura 5.1 apresenta-se para o *LTE* a janela da ferramenta de planeamento onde são introduzidos os *inputs* relativos às bandas de frequências. É possível definir a largura de banda do canal, o primeiro e último canal a ser utilizado, os canais excluídos, e a banda de frequência inicial a ser utilizada para a técnica *TDD* e *FDD*. O campo factor de amostragem deixa de ser necessário, uma vez que, para o *LTE*, a frequência de amostragem não é calculada.



Name	Channel Width (MHz)	First channel	Last channel	Excluded channels	TDD: Start Frequency, FDD: DL Start Frequency (MHz)	FDD: UL Start Frequency (MHz)	Adjacent Channel Suppression Factor (dB)	Sampling Factor	Duplexing Method
2.5 GHz - 1.25 MHz	1,25	0	151		2.500		20	1,12	TDD
2.5 GHz - 10 MHz	10	0	18		2.500		20	1,12	TDD
2.5 GHz - 20 MHz	20	0	8		2.500		20	1,12	TDD
2.5 GHz - 5 MHz	5	0	37		2.500		20	1,12	TDD
2.5 GHz - 7 MHz	7	0	26		2.500		20	1,14286	TDD
2.5 GHz - 8.75 MHz	8,75	0	20		2.500		20	1,14286	TDD
2.7 GHz - 1.25 MHz	1,25	0	159		2.700		20	1,12	TDD

Figura 5.1 – Caracterização das bandas de frequência [34].

5.3.2 Modelo de propagação

Os modelos de propagação, apresentados na subsecção 3.2.2, e utilizados no LTE para o cálculo das perdas de percurso, (*Okumura-Hata* e *COST-231 Hata*), encontram-se implementados na ferramenta de planeamento, sendo apenas necessário adaptar os parâmetros dos modelos à tecnologia LTE, tal como é apresentado no exemplo da Figura 5.2.

Em relação ao modelo de propagação unificado *LUI*, este apresenta-se como uma boa opção para incluir na ferramenta de planeamento, uma vez que contempla diversos ambientes (*indoor*, *outdoor* e misto).

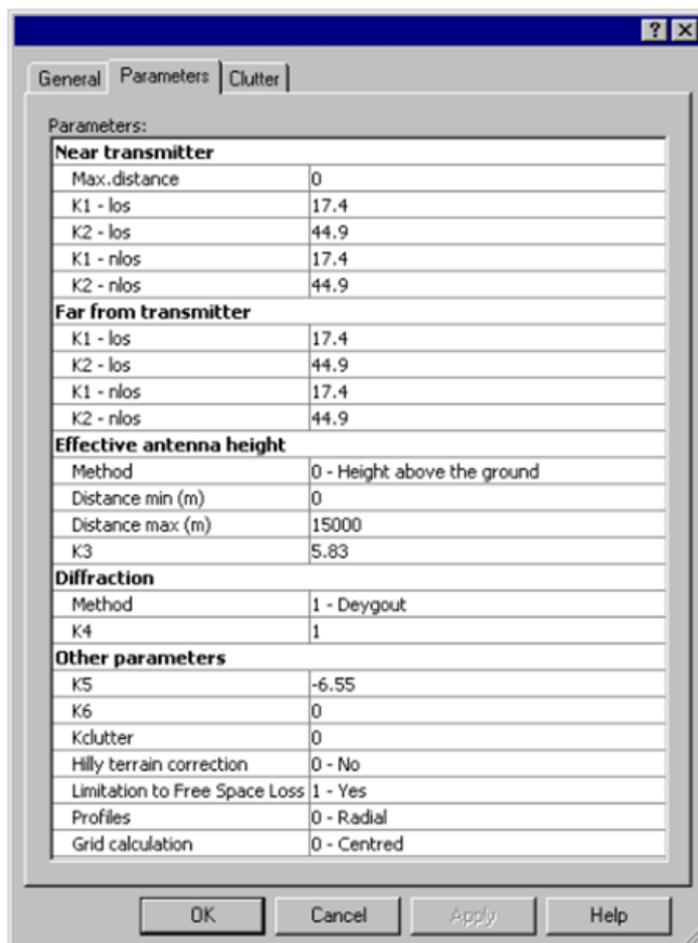


Figura 5.2 – Parâmetros de um modelo de propagação [34].

5.3.3 MIMO

Os sistemas de múltiplas antenas representam um recurso relevante para o aumento da capacidade de uma célula. Tal como foi apresentado na subsecção 2.4 a

utilização da técnica *MIMO* permite aumentar consideravelmente o débito binário da célula, sendo por isso um parâmetro de *input* fundamental para o algoritmo proposto. A Figura 5.3 apresenta a janela das características de um *site* onde é possível definir o número de antenas transmissoras e emissoras a serem utilizadas.

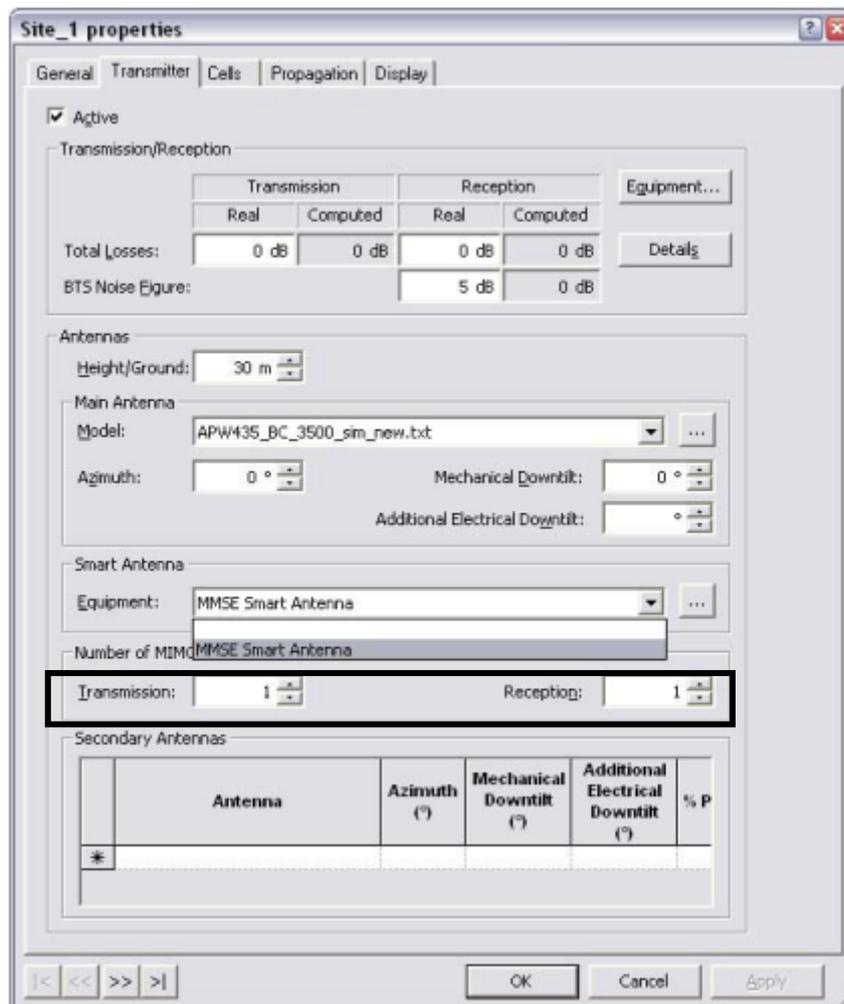


Figura 5.3 – Características do *site* [34].

5.3.4 Estrutura da trama

Relativamente à estrutura da trama também se verificam diferenças. Tal como foi referido na subsecção 2.3.1, a sub-trama do *LTE* tem um tamanho fixo de 1 ms, sendo dividida em dois *slots* de 0,5 ms cada. A trama *LTE*, representada na Figura 5.4, tem um tamanho total de 10 ms.

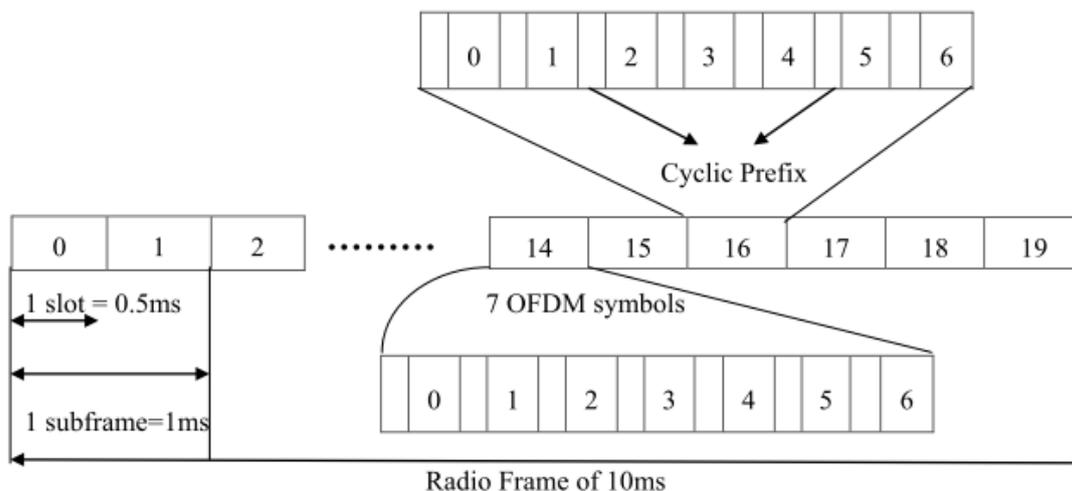


Figura 5.4 – Estrutura da trama LTE.

Os parâmetros da janela das propriedades do transmissor são apresentados na Figura 5.5. Para o *LTE* as modificações são as seguintes:

- **Duração trama (*Frame duration*):** este parâmetro deixa de existir uma vez que a duração de uma trama *LTE* tem um valor fixo de 10 ms;
- **Razão do prefixo cíclico (*Cyclic Prefix Ratio*):** este parâmetro tem duas opções para o prefixo cíclico:
 - Curto: onde é definido como tempo de prefixo cíclico o valor de $5,21 \mu s$ e considerado 7 símbolos OFDM por *slot* da trama *LTE*;
 - Longo: onde seria definido como tempo de prefixo cíclico o valor de $16,67 \mu s$ e considerado 6 símbolos OFDM por *slot* da trama *LTE*;
- **Overhead fixo e variável:** este parâmetro deixa de existir para a rede *LTE*;
- **Parâmetros *TDD* (*TDD Parameters*):** apesar do *LTE* utilizar preferencialmente a técnica *FDD*, onde é utilizada a mesma largura de banda para a ligação descendente e ascendente, existe a possibilidade de utilizar *TDD*. Nesse caso é necessário indicar a relação entre o tamanho da sub-trama utilizada na ligação descendente e ascendente, e os tempos de guarda utilizados na recepção e transmissão dessas mesmas sub-tramas;

- **Configuração canal (*Channel Configuration*):** estes parâmetros são apenas utilizados para o *WiMAX* fixo, uma vez que para o *LTE* o número total de sub-portadoras e o número de sub-portadoras usadas e de dados variam conforme a largura de banda disponível para o canal. As informações relativas ao número de sub-portadoras utilizadas são incluídas na janela da Figura 5.1 da subsecção 5.3.1.

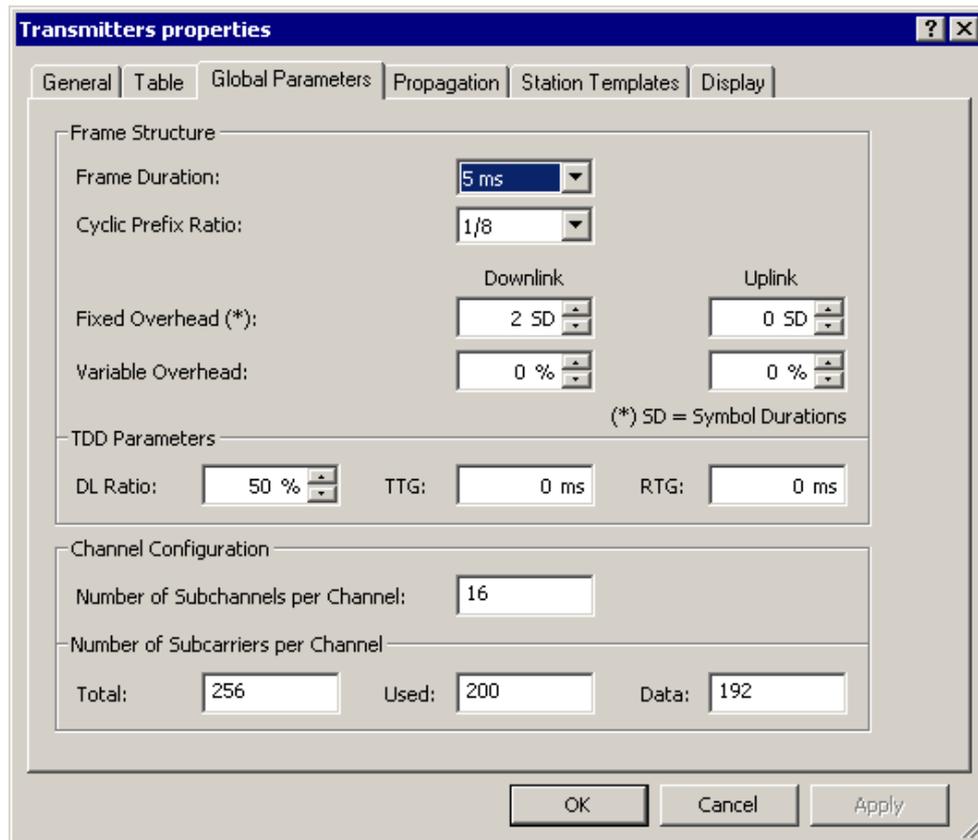


Figura 5.5 – Características da estrutura da trama *WiMAX* [35].

5.3.5 Características dos serviços

Na caracterização dos serviços, apresentados na subsecção 5.3.5, é necessário a introdução dos parâmetros apresentados na Figura 5.6. Em relação ao *LTE* existem parâmetros de *input* que diferem da tecnologia *WiMAX*. As alterações aos *inputs* dos serviços da ferramenta de planeamento serão descritas nas subsecções seguintes.

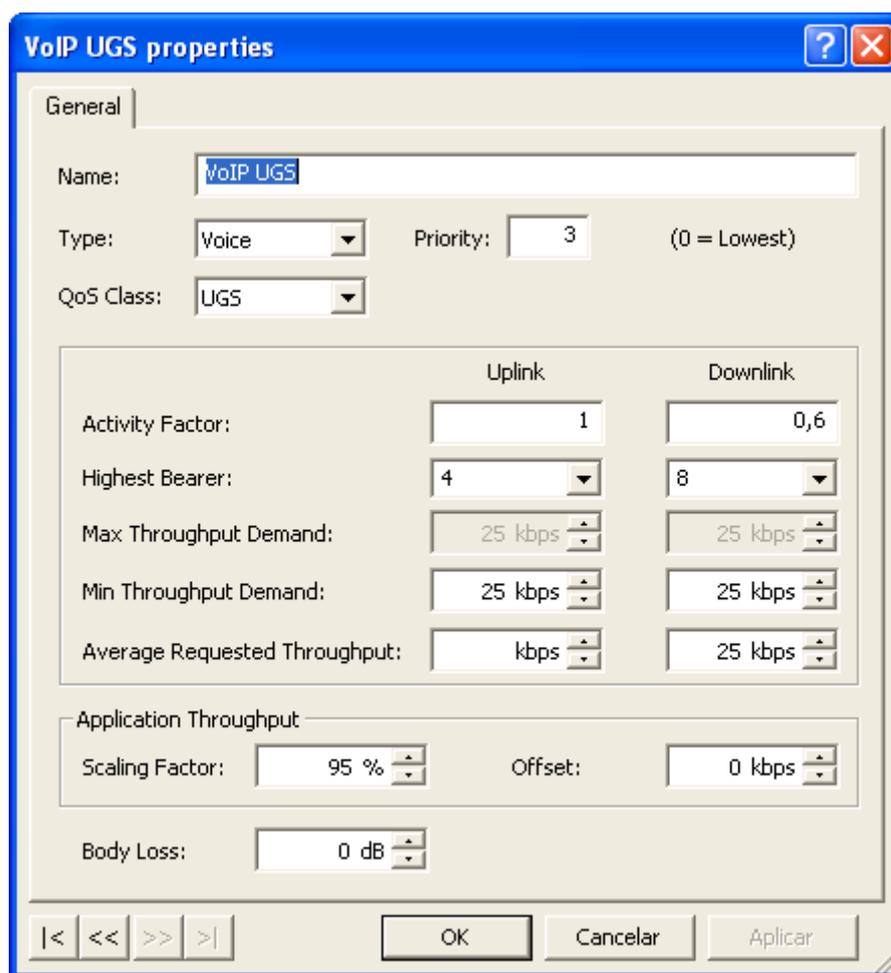


Figura 5.6 – Características dos serviços.

5.3.5.1 Classe QoS

De acordo com o apresentado na subsecção 3.4 e 4.5.4.1, as classes de QoS para as tecnologias *WiMAX* e *LTE* diferem. Para o *LTE* são definidos diferentes identificadores de classes de qualidade de serviços, organizados por dois tipos de *bearers* e tendo em conta a prioridade, atraso e probabilidade de erros de bloco dos diferentes tipos de serviços.

A adaptação das diferentes classes de QoS a aplicar à ferramenta de planeamento A9155 para o planeamento de uma rede *LTE* passaria por alterar os valores definidos para os parâmetros *QoS Class* e *Priority* apresentados na Figura 5.6, substituindo-os pelos valores seguintes:

- **QoS Class:** *GBR* e *Non-GBR*;
- **Priority:** conjunto de valores {1 a 9};

5.3.5.2 Probabilidade de bloqueio

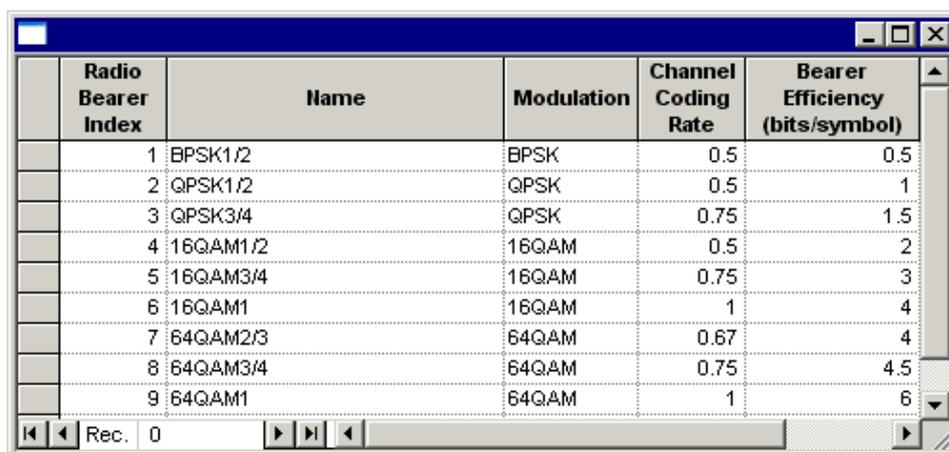
Num sistema ideal todos os utilizadores conseguirão aceder ao serviço que pretendem utilizar. Na realidade tal não acontece e é necessário dimensionar a rede de modo a que se consiga prever o impacto da afluência de tráfego no sistema. O processamento para obter a probabilidade de bloqueio é uma forma de prever esse impacto.

Na secção 3.3.3 foram descritos dois algoritmos (*Knapsack* e *Kaufman-Roberts*) para obter a probabilidade de bloqueio para uma rede com múltiplos serviços. Verifica-se que o algoritmo de *Kaufman-Roberts* apresenta um processamento mais eficiente, para aplicar a uma ferramenta de planeamento.

O parâmetro factor de actividade (*activity factor*) passa a ser substituído pelo parâmetro da probabilidade de bloqueio do serviço.

5.3.5.3 Esquemas de modulação e codificação

Os esquemas de modulação e codificação utilizados no *LTE*, descritos na subsecção 2.2.7, podem ser acrescentados na janela da ferramenta de planeamento, conforme representado na Figura 5.7. Nesta janela, os diferentes esquemas de modulação e codificação são organizados por um índice (*Radio Bearer Index*), e são referidas a modulação, codificação e eficiência espectral utilizadas naquele esquema. Na janela apresentada na Figura 5.6 este parâmetro mantém-se.



Radio Bearer Index	Name	Modulation	Channel Coding Rate	Bearer Efficiency (bits/symbol)
1	BPSK1/2	BPSK	0.5	0.5
2	QPSK1/2	QPSK	0.5	1
3	QPSK3/4	QPSK	0.75	1.5
4	16QAM1/2	16QAM	0.5	2
5	16QAM3/4	16QAM	0.75	3
6	16QAM1	16QAM	1	4
7	64QAM2/3	64QAM	0.67	4
8	64QAM3/4	64QAM	0.75	4.5
9	64QAM1	64QAM	1	6

Figura 5.7 – Esquemas de modulação e codificação.

5.3.5.4 Parâmetros de *throughput*

Os parâmetros de *input* dos valores máximo, mínimo e médio de *throughput* não necessitam de alterações, pois serão utilizados para a gestão dos recursos a ser atribuídos a cada terminal móvel, à semelhança do que ocorre na ferramenta de planeamento, para o *WiMAX* e descrito na subsecção 4.5.4.

5.3.6 Perfis dos utilizadores

No capítulo 4 foram apresentados os dados necessários para a modelação dos perfis dos utilizadores, onde são introduzidos o volume de tráfego para os serviços de dados, o número médio de chamadas por hora e a sua duração, para os serviços de voz, apresentada na Figura 5.8. Na modelação de ambientes, apresentada na Figura 5.9 são introduzidos a densidade de utilizadores. Estes parâmetros de *input* são posteriormente utilizados no cálculo da probabilidade de bloqueio de serviço.

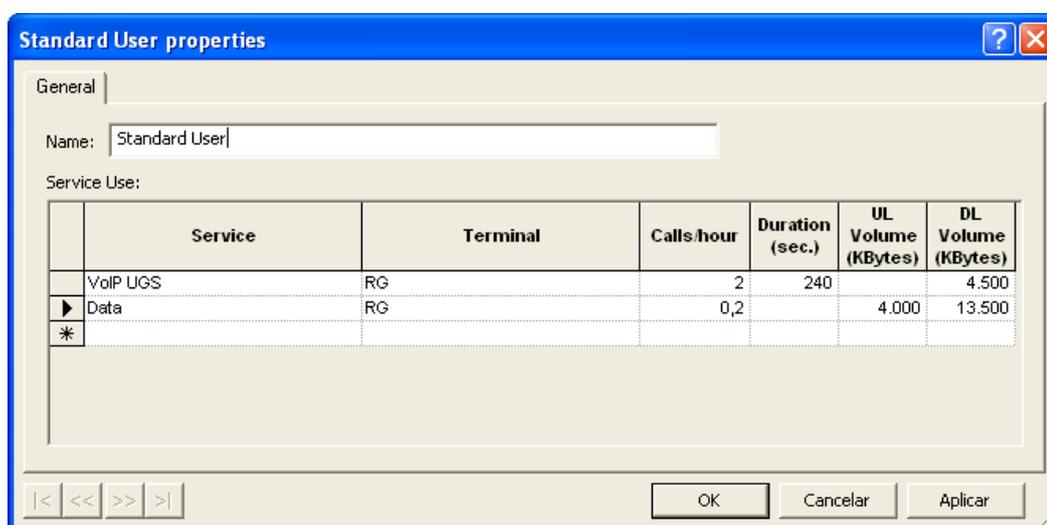


Figura 5.8 – Características do perfil dos utilizadores.

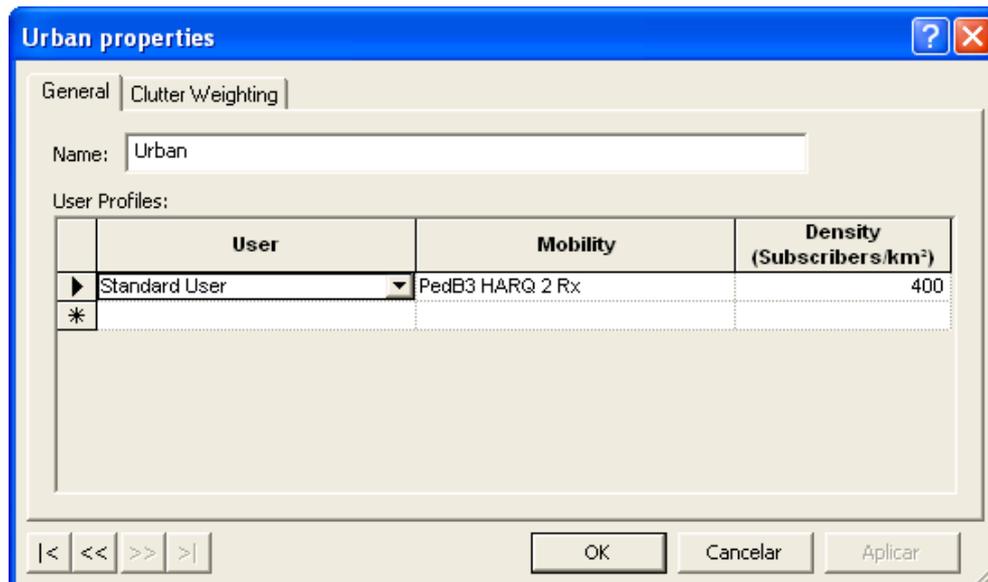


Figura 5.9 - Características da modelação de ambientes [29].

5.4 Outputs esperados

Nesta secção descrevem-se os outputs que se espera atingir do algoritmo proposto para a ferramenta de planeamento. Sendo o objectivo do planeamento por capacidade o dimensionamento de um sistema de comunicações móveis é necessário considerar, o número de utilizadores na célula, os serviços suportados, utilização da técnica *MIMO*, esquemas de modulação e codificação e a tecnologia utilizada.

O algoritmo proposto permite obter a capacidade que satisfaz todos os serviços utilizados, e compreender se a célula permite satisfazer essas necessidades.

5.5 Algoritmo proposto

Nesta secção apresenta-se e descreve-se o algoritmo a ser aplicado a uma ferramenta de planeamento, em função dos *inputs* recebidos e indicando quais os outputs que serão obtidos. Inicialmente apresenta-se um diagrama geral do algoritmo, sendo posteriormente, descritos os principais métodos que o constituem.

5.5.1 Diagrama geral do algoritmo

A Figura 5.10 apresenta o diagrama geral do algoritmo proposto para o *LTE*.

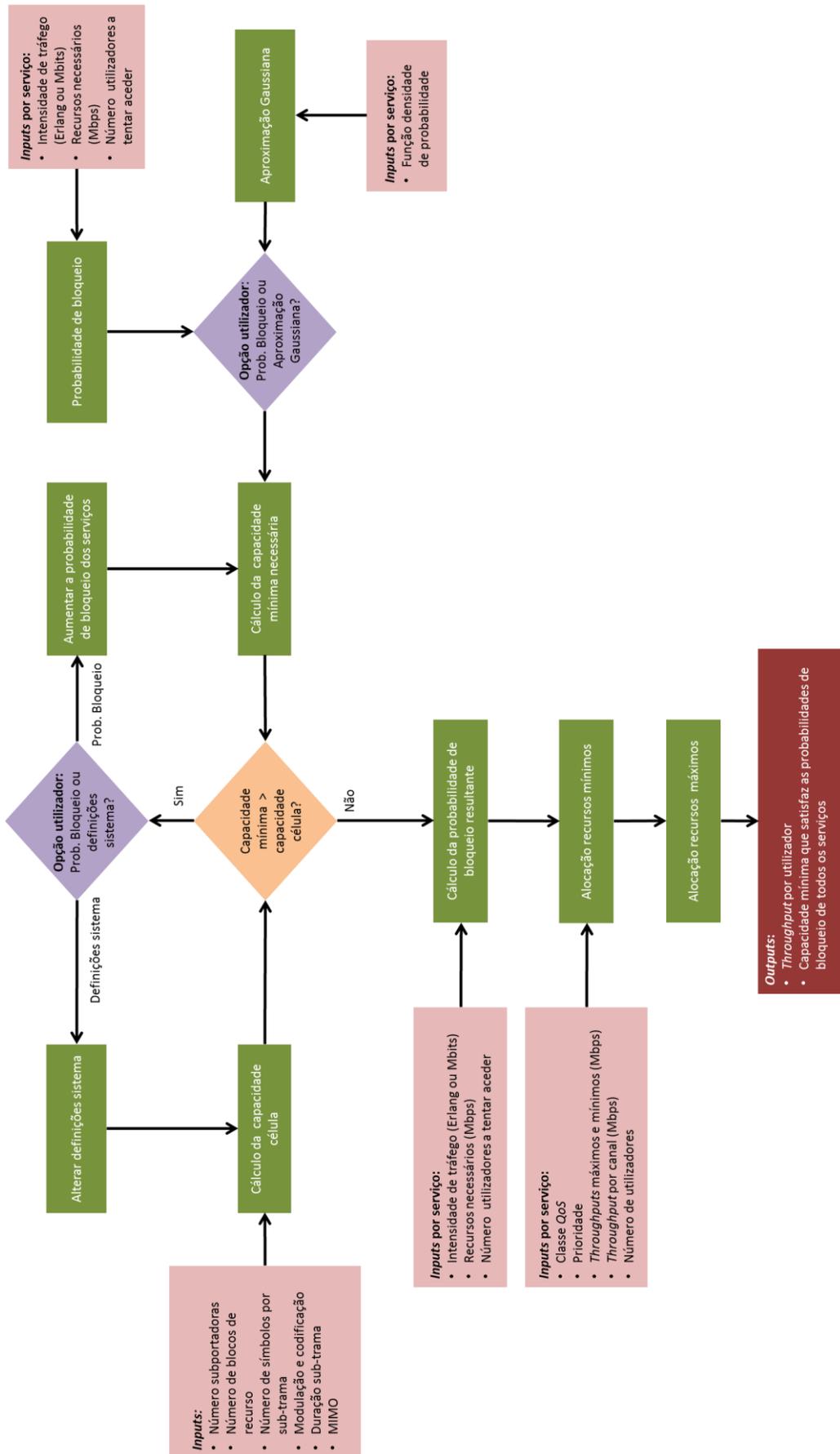


Figura 5.10 – Diagrama geral do algoritmo proposto.

Inicialmente é efectuado o cálculo da capacidade da célula, *i.e.*, o *throughput* da célula. De seguida é calculado a capacidade do tráfego agregado. Existem duas opções de cálculo da capacidade, através da probabilidade de bloqueio dos serviços ou através do método de aproximação Gaussiana para a distribuição do tráfego.

No caso da capacidade do tráfego agregado seja superior à capacidade fornecida pela estação base da célula, é necessário fazer algumas considerações de modo a se conseguir uma capacidade da célula capaz de suportar as necessidades dos utilizadores.

Uma das opções a considerar será a de alterar as configurações da célula recorrendo à técnica *MIMO* que não incrementa o custo do sistema, ou com a sectorização ou a micro células, conseguindo assim aumentar a capacidade da célula através da adição de mais equipamento, mas aumentando também os custos da rede. Outra opção é a de aumentar a probabilidade de bloqueio dos serviços, conseguindo assim diminuir a capacidade do tráfego agregado. Esta é uma opção que não aumenta os custos da rede, mas por oposição, prejudica os utilizadores da célula, uma vez que irá existir um maior número de utilizadores que não vai conseguir aceder aos serviços que pretendem utilizar.

Assim que a capacidade da célula consegue ser superior à capacidade do tráfego agregado, são dimensionados os recursos (mínimos e máximos) a alocar aos terminais móveis, conseguindo obter-se o *throughput* por utilizador.

5.5.2 Cálculo da capacidade do tráfego agregado

A capacidade do tráfego agregado consiste no débito binário mínimo que a célula necessita de fornecer para satisfazer todos os serviços que estão a ser utilizados. Existem dois métodos de cálculo da capacidade mínima necessária, sendo o primeiro baseado numa aproximação Gaussiana e o segundo através da probabilidade de bloqueio dos serviços.

5.5.2.1 Método da aproximação Gaussiana

O método da aproximação Gaussiana, tal como foi apresentado na subsecção 3.3.2.2, consiste em considerar, para cada serviço, uma função de densidade de

probabilidade, com um dado *overflow*. Através de alguma manipulação matemática é obtém-se a função de densidade de probabilidade do tráfego agregado e, por consequentemente, a capacidade do tráfego agregado.

Este método apesar de ser uma abordagem mais realista dos fluxos de tráfego, a em processamento é menos eficiente.

5.5.2.2 Método da probabilidade de bloqueio

A capacidade do tráfego agregado, que satisfaz todos os requisitos de *GoS* para todos os serviços, pode ser derivada através de uma dada probabilidade de bloqueio. A Figura 5.11 ilustra esse algoritmo, que consiste num processo iterativo onde, para cada incremento da capacidade do tráfego agregado, são calculados as probabilidades de bloqueio para todos os serviços. Caso as probabilidades de bloqueio calculadas não respeitem as probabilidades de bloqueio definidas para esses serviços, o valor da capacidade é incrementado e o ciclo reinicia-se. Caso contrário, esse valor de capacidade é definido como o valor da capacidade do tráfego agregado que é necessário fornecer.

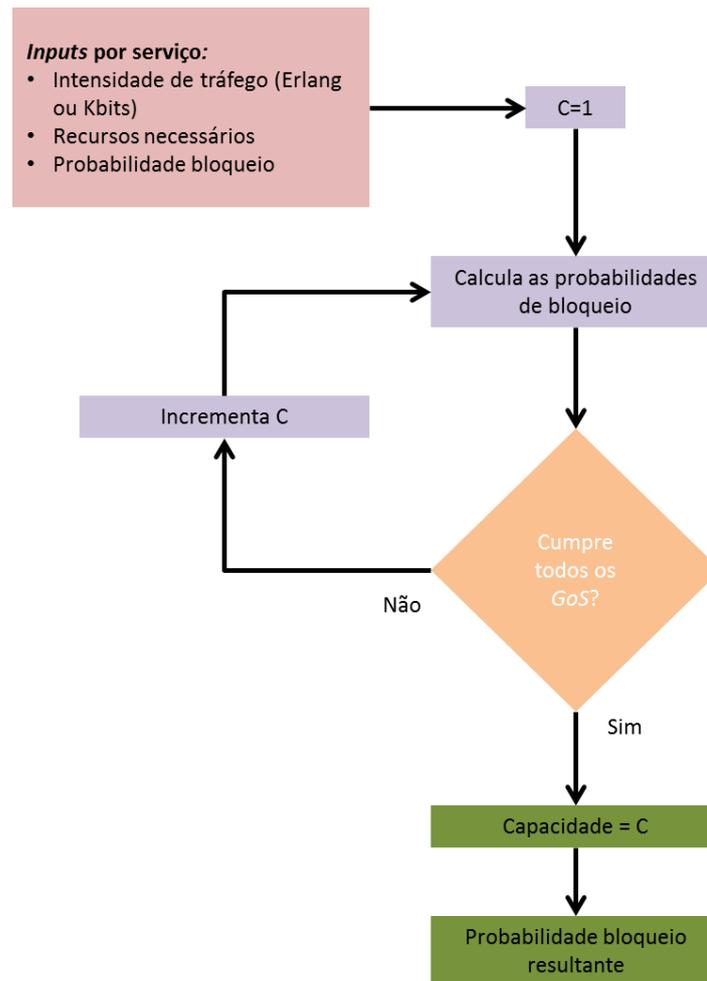


Figura 5.11 – Diagrama do algoritmo de dimensionamento da capacidade da célula para uma dada probabilidade de bloqueio de serviços.

5.5.3 Gestão de recursos

O algoritmo de gestão de recursos da ferramenta de planeamento, descrito na subsecção 4.5.4, apresenta-se como um método eficaz de gerir os recursos disponíveis. Nestas subsecções apresenta-se e descreve-se o algoritmo de gestão de recursos adaptado para o *LTE*, e cujo objectivo é obter o *throughput* por utilizador.

5.5.3.1 Alocação de recursos para as necessidades mínimas de *throughput*

A principal diferença para a tecnologia *LTE* prende-se com a organização das classes de *QoS*, apresentada na subsecção 3.4. No algoritmo de gestão de recursos apresentado na subsecção 4.5.4, a organização dos terminais móveis em função do *QoS* e da prioridade passa a ter o formato da Tabela 5.2.

M_i	QoS	p
1	GBR	$p = n$
2		$p > 0$
·	Non-GBR	$p = n$
·		$p > 0$
N-1		$p > 0$
N		

Tabela 5.2 - Organização dos terminais móveis em função do QoS e da prioridade.

A Figura 5.12 representa o algoritmo de alocação de recursos para as necessidades mínimas de throughput dos utilizadores, e requer como dados de *input* a classe QoS, a prioridade do serviço utilizado, as necessidades máximas e mínimas de *throughput* dos serviços utilizados, o *throughput* de canal e o número de utilizadores activos.

O algoritmo consiste em alocar TP_{min}/TP_{canal} a cada terminal móvel. Quando todos os recursos se encontrem alocados para todos os terminais móveis, é calculado a percentagem de recursos resultantes, *i.e.*, os recursos que sobram. Esses recursos são posteriormente utilizados no algoritmo de alocação de recursos para satisfazer as necessidades máximas de *throughput*.

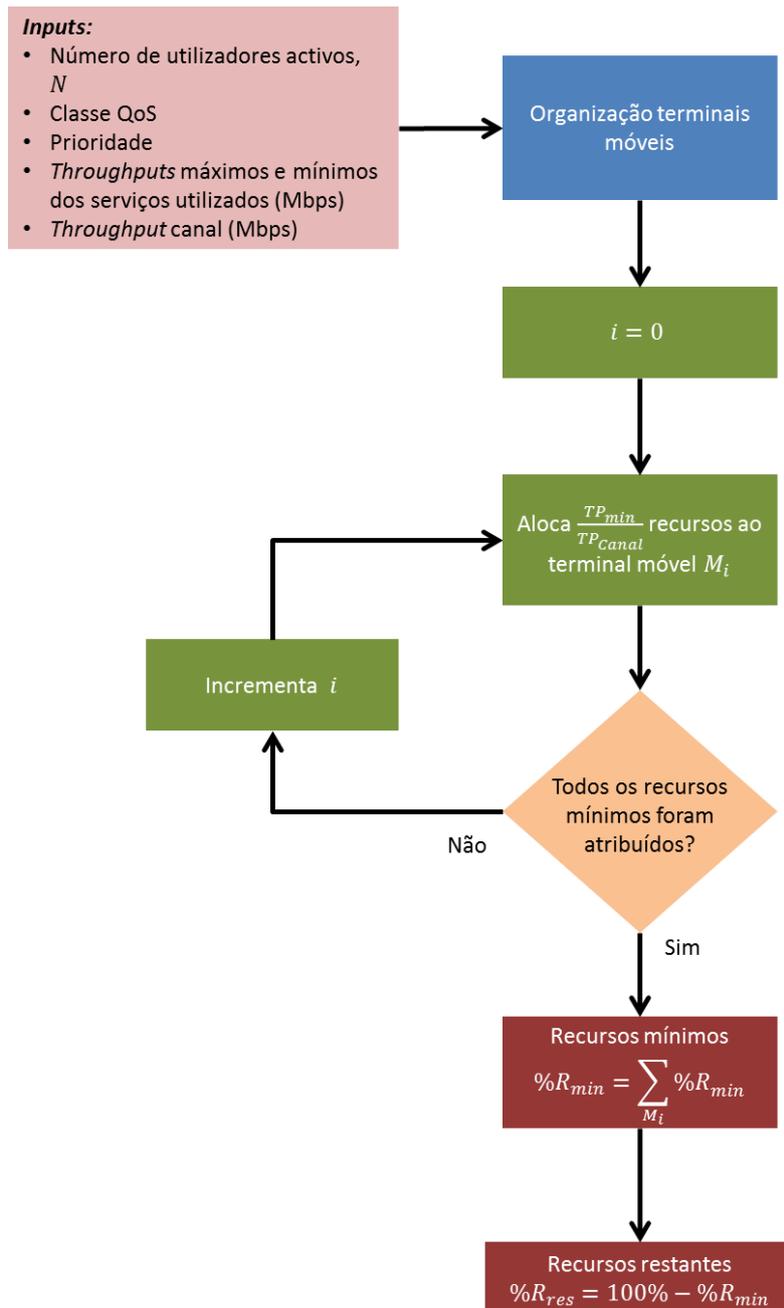


Figura 5.12 – Diagrama do algoritmo de alocação de recursos para as necessidades mínimas de throughput.

5.5.3.2 Alocação de recursos para as necessidades máximas de throughput

Após a alocação dos recursos para as necessidades mínimas de throughput são alocados os recursos máximos. Este algoritmo recebe como inputs do algoritmo anterior a organização dos terminais móveis, a percentagem de recursos resultantes, o throughput do canal e o throughput resultante, i.e., a diferença entre o throughput máximo e mínimo. A Figura 5.13 representa o algoritmo de alocação de recursos para as necessidades máximas de throughput. Para todos os terminais móveis verifica-se se

os recursos resultantes a dividir por todos os terminais móveis é superior à razão entre o *throughput* resultante e o *throughput* do canal, i.e., se $\%R_{res}/N > TP_{resultante}/TP_{canal}$. Caso seja, é alocado ao terminal móvel $TP_{resultante}/TP_{canal}$, caso contrário aloca $\%R_{res}/N$.

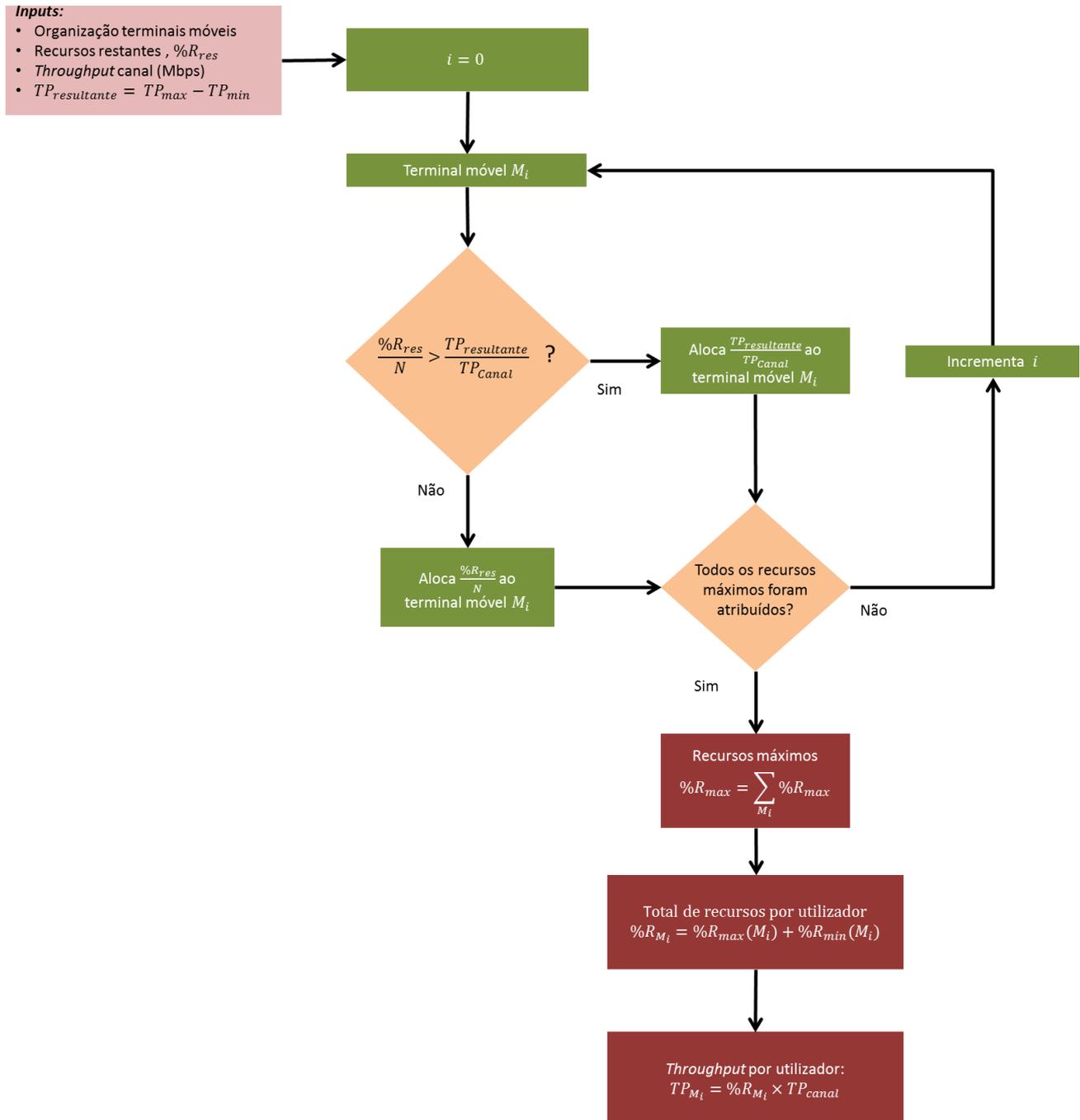


Figura 5.13 - Diagrama do algoritmo de alocação de recursos para as necessidades máximas de *throughput*.

Quando todos os recursos que satisfazem as necessidades máximas de *throughput* forem alocados, calcula-se a percentagem de recursos alocados a cada terminal e obtém-se o *throughput* por utilizador.

5.6 Conclusões

Neste capítulo apresentou-se e descreveu-se o algoritmo proposto para a ferramenta de planeamento. Foram apresentados os parâmetros de *input* necessários e os *outputs* esperados do algoritmo, bem como os métodos neles incluídos.

Para os métodos de cálculo de tráfego agregado foram apresentadas duas alternativas, tendo em conta uma abordagem do tráfego mais realista, e por sua vez mais complexa computacionalmente, através do método de aproximação Gaussiana, ou uma abordagem mais eficiente através das probabilidades de bloqueio dos serviços.

Para o cálculo da capacidade da célula, no caso de esta ser insuficiente para satisfazer as necessidades dos utilizadores, são consideradas duas abordagens, tendo em conta os custos dos equipamentos da rede, recorrendo a técnicas *MIMO*, sectorização ou a micro-células, ou, por outro lado, tendo em conta o aumento da probabilidade de bloqueio.

Finalmente são dimensionados os recursos a alocar a cada terminal móvel, conforme o *QoS* e o *throughput* de cada serviço e calculado o *throughput* necessário por cada utilizador.

Capítulo 6

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões desta dissertação, sendo também sugerido algum trabalho futuro.

6.1 Principais conclusões

Sendo o principal foco desta dissertação propor um algoritmo para uma ferramenta de planeamento por capacidade para os sistemas de comunicações móveis *LTE*, então foi necessário analisar este sistema e os seus requisitos relativamente à capacidade. Assim, foram analisadas as técnicas de acesso *OFDM* para a ligação descendente e *SC-FDMA* para a ligação ascendente, os esquemas de modulação e codificação e técnicas de múltiplas antenas.

Posteriormente foram identificados os modelos de propagação, *indoor* e *outdoor*, e o modelo de propagação unificado *LUI*. Foram também analisados os vários modelos de tráfego multi-serviço e escolhido o algoritmo mais eficiente para a aplicação numa ferramenta de planeamento que utiliza a mesma plataforma da ferramenta Alcatel-Lucent para o sistema *WiMAX*.

Foram identificadas as principais características do planeamento de uma rede *WiMAX*, considerando a ferramenta de planeamento da Alcatel-Lucent para identificar as possíveis alterações a considerar para um planeamento de uma rede *LTE*.

Finalmente foi proposto o algoritmo de planeamento a efectuar para ferramenta para o planeamento por capacidade, com a identificação dos conteúdos das janelas da ferramenta, *inputs* e *outputs*, não descurando a eficiência e o “*user-friendly*” da ferramenta. Este algoritmo foi aferido tendo em conta as características da célula de uma rede *LTE*, os perfis dos utilizadores e os serviços por eles utilizados.

6.2 Trabalho Futuro

Ao longo do trabalho desenvolvido para esta dissertação, foram surgindo vários aspectos que podem ser estudados e analisados no futuro. As sugestões a seguir apresentadas são directivas que podem ser utilizadas para expandir o trabalho apresentado:

- Implementação da ferramenta de planeamento considerando o algoritmo proposto;
- Desenvolvimento de uma base de dados com informações de custo dos equipamentos utilizados, de modo a fornecer ao operador, um custo final

da rede dando a possibilidade de durante o planeamento poder analisar o impacto entre a capacidade da rede/probabilidade de bloqueio e o impacto do custo da rede.

- Desenvolver um método semelhante, mas considerando uma distribuição espacial dos utilizadores com a respectiva distribuição dos serviços dos utilizadores em cada zona da célula.

Anexos

Anexo A - Modelos de propagação

A.1. Modelo de Obumbra

O modelo de Obumbra é amplamente utilizado para áreas urbanas, uma vez que é um modelo empírico baseado em medidas experimentais. Este modelo foi desenvolvido por Obumbra em 1968 para o intervalo de frequência entre 200 a 1920 MHz. O modelo pode ser definido pela expressão (A.1) [36].

$$PL_{[dB]} = L_F + A_{mu} + h_b + h_t \quad (A.1)$$

onde, $PL_{[dB]}$ é a atenuação mediana da propagação do sinal, L_F corresponde à atenuação em espaço livre entre o transmissor e o receptor, em dB, A_{mu} corresponde à função apresentada na Figura A.1. h_b e h_t correspondem, respectivamente, aos factores de ganho da altura da antena da estação base (Figura A.2) e da altura da antena móvel (Figura A.3).

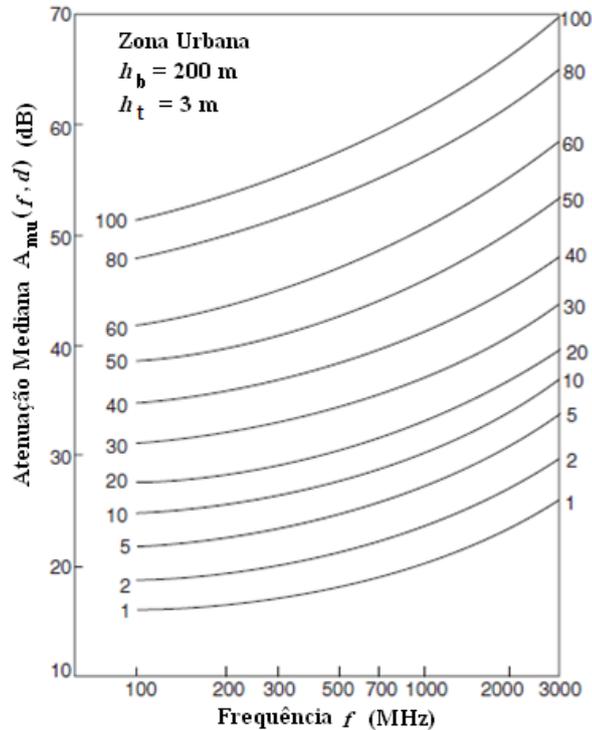


Figura A.1 – Gráfico de A_{mu} em função da frequência e distância [36].

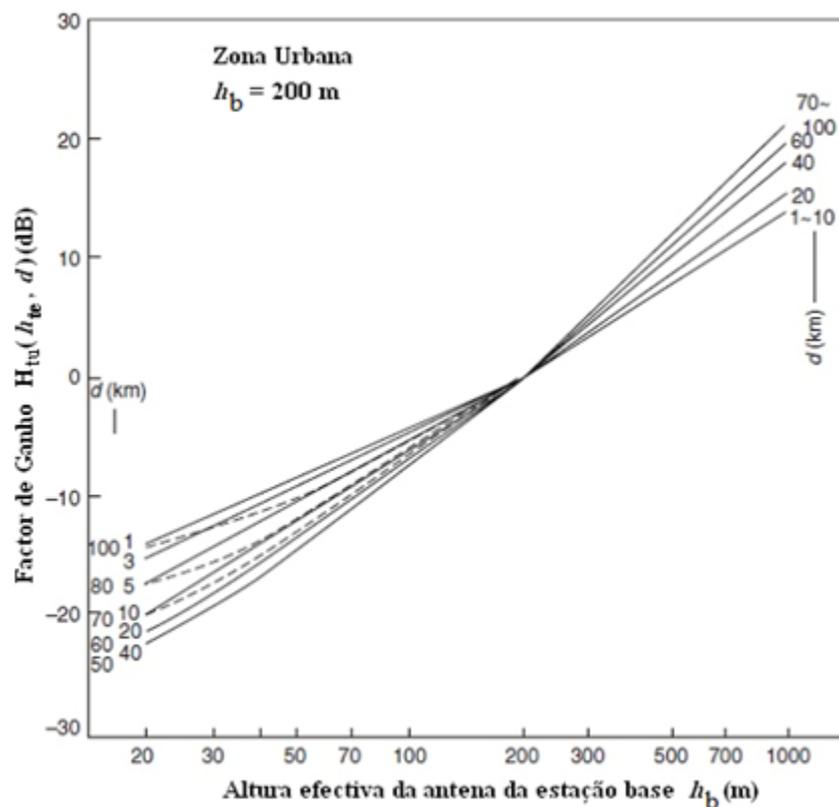


Figura A.2 – Factor de correcção da altura da antena da estação base [36].

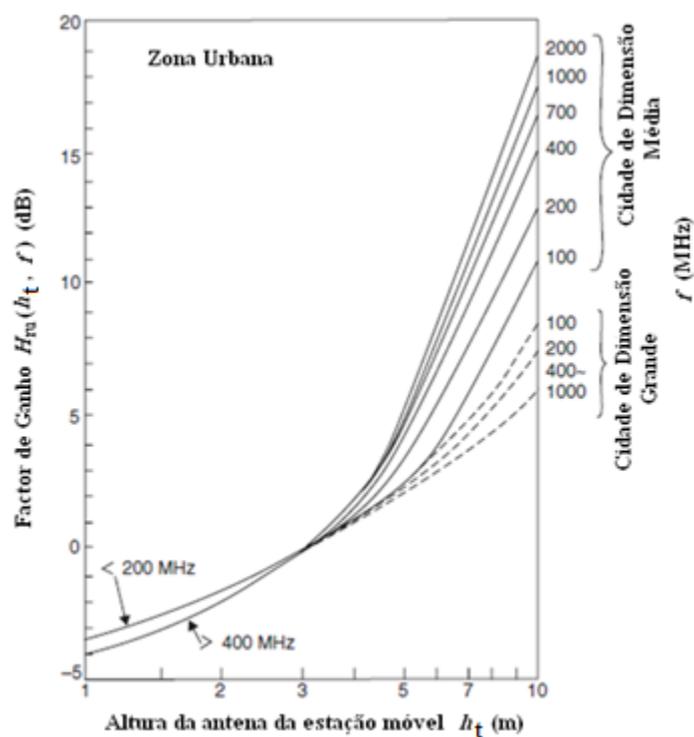


Figura A.3 – Factor de correcção da altura da antena do terminal móvel [36].

A.2. Modelo de Hata

Em 1980, Hata transformou a informação gráfica do modelo de propagação de Obumbra em expressões matemáticas. As perdas de percurso são obtidas através da expressão (A.2), para ambientes urbanos [36].

$$LP_{[dB]} = 69,55 + 26,16 \cdot \log_{10}(f_{[MHz]}) - 13,82 \cdot \log_{10}(h_b) + [44,90 - 6,55 \cdot \log_{10}(h_t)] \cdot \log_{10}(d_{[km]}) - a(h_t) \quad (A.2)$$

Onde, f representa a frequência, em MHz, h_b corresponde à altura efectiva da antena transmissora, em metros, h_t corresponde à altura efectiva da antena receptora, em metros, d a distância entre a estação base receptora, em km e $a(h_t)$ representa o factor de correcção da altura da antena móvel e calcula-se através da expressão (A.3) [29].

$$a(h_t) = \begin{cases} (1,1 \cdot \log_{10}(f) - 0,7) \cdot h_t - (1,56 \cdot \log_{10}(f) - 0,8) & \text{para cidades pequenas/médias} \\ 3,2 \cdot (\log_{10}(11,75 \cdot h_t))^2 - 4,97, & f \leq 400 \text{ MHz para cidades grandes} \end{cases} \quad (A.3)$$

Para valores de:

- $f \in [150, 1500]$ MHz
- $d \in [1, 20]$ Km
- $h_b \in [30, 200]$ m
- $h_t \in [1, 10]$ m

As perdas de percurso, para ambientes suburbanos e rurais, calculam-se através das expressões (A.4) e (A.5), respectivamente [29].

$$PL_{[dB]} = PL_{Urbano} - 4,78 \cdot (\log(f))^2 + 18,33 \cdot \log(f) - 40,94 \quad (A.4)$$

$$PL_{[dB]} = PL_{Urbano} - 2 \cdot \left(\log\left(\frac{f}{28}\right) \right)^2 - 5,4 \quad (A.5)$$

A.3. Modelo COST-231 Hata

O modelo COST-231 Hata é uma extensão do modelo de Hata para uma gama de frequências entre os 500 MHz e os 2000 MHz, sendo um modelo definido para ambientes urbanos, sub-urbanos e rurais, recorrendo a factores correctivos conforme o ambiente em que este é utilizado. As perdas de percurso deste modelo são calculadas através da expressão (A.6).

$$PL_{[dB]} = 46,30 + 33,90 \cdot \log_{10}(f_{[MHz]}) - 13,82 \cdot \log_{10}(h_b) - a(h_t) + [44,90 - 6,55 \cdot \log_{10}(h_b)] \cdot \log_{10}(d_{[km]}) + K_c \quad (A.6)$$

Onde, f representa a frequência utilizada, d a distância entre o transmissor e o receptor, em Km, h_b a altura efectiva da antena da estação base, em metros. O parâmetro K_c representa o factor de correcção morfológico, sendo utilizado conforme o tipo de ambiente (urbano, sub-urbano ou rural). O parâmetro $a(h_t)$ calcula-se através da expressão (A.7) para ambientes urbanos e através da expressão (A.8) para ambientes sub-urbanos ou rurais, onde h_t representa a altura efectiva da antena receptora, em metros.

$$a(H_t) = 3,2 \cdot \log_{10}(11,75 \cdot h_t)^2 - 4,97 \quad (A.7)$$

$$a(H_t) = [1,1 \cdot \log_{10}(f_{[MHz]}) - 0,7] \cdot h_t - [1,56 \cdot \log_{10}(f_{[MHz]}) - 0,89] \quad (A.8)$$

A.4. Modelo LUI

O modelo de propagação LUI (*Lisbon University Institute*) apresenta-se como um modelo unificado e empírico de raio directo, cujo principal objectivo é fazer a predição do sinal para qualquer tipo de ambiente (*outdoor*, *indoor* ou misto) [19].

O modelo é baseado em quatro características:

- Predição do sinal em ambientes *outdoor*;
- Predição do sinal em ambientes *indoor*;
- Predição das perdas do sinal devido a vegetação;
- Predição das perdas do sinal devido à penetração ou transição entre ambientes.

Segundo [19], o modelo *LUI* é descrito através da expressão (A.9), em que as perdas de percurso apresentam-se como a atenuação média, em dB, entre o transmissor e qualquer ponto a uma distância deste, em metros.

$$PL(d)_{[dB]} = \left\{ \begin{array}{l} 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot d_0}{\lambda} \right) + 10 \cdot \gamma_1 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \cdot u(d_{bp} - d) + \\ + ENV \cdot \left[X_f + X_h + VEG \cdot A_{\max} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-d_{depth} \cdot \beta}{A_m} \right) \right] \right] + \\ + u[NE - 2] \cdot [W_e + W_{GE} \cdot (1 - \sin \theta)^2 - G_f] \cdot u(d - d_{bp}) + \\ + (1 - ENV) \cdot \left[\begin{array}{l} u[1 - NE] \cdot \left(10 \cdot \gamma_1 \cdot \log_{10} \left(\frac{d_{bp}}{d_0} \right) + \frac{WAF_{bp}}{\sin \theta_H} + \right. \\ \left. + \frac{FAF_{bp}}{\sin \theta_V} + \sum_{floor=2}^{NF} \frac{FAF(floor)}{\log_{10}(10 \cdot floor)} \right) + \\ \left. + 10 \cdot \gamma_2 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_{bp}} \right) + \sum_{wall=2}^{NW} \frac{WAF(wall)}{\log_{10}(10 \cdot wall)} \right) \end{array} \right] \cdot u(d - d_{bp}) \end{array} \right\} \quad (A.9)$$

Onde:

- *NE* (*Number of Enviromments*): $NE \in \{1,2\}$ e representa o número de ambientes envolvidos no percurso do sinal entre o transmissor e o receptor.
- *ENV*: representa o tipo de ambiente, onde é utilizado $ENV = 0$ para ambientes *indoor* e $ENV = 1$ para *outdoor*.
- *VEG*: representa o tipo de vegetação, onde $VEG = 1$ se existir vegetação e $VEG = 0$, caso não exista.
- $u[NE - 2]$ e $u[1 - NE]$: representam funções escalão de valores discretos e as parcelas pelos quais são multiplicados, podem ou não ser anuladas, dependendo do valor obtido, através das expressões (A.10) e (A.11), respectivamente.

$$u[NE - 2] = \begin{cases} 0, & \text{se } NE = 1 \\ 1, & \text{se } NE = 2 \end{cases} \quad (A.10)$$

$$u[1 - NE] = \begin{cases} 1, & \text{se } NE = 1 \\ 0, & \text{se } NE = 2 \end{cases} \quad (A.11)$$

- $u(d - d_{bp})$ e $u(d_{bp} - d)$: apresentam o mesmo objectivo que as funções escalões anteriores, onde d corresponde à distancia entre o transmissor e o receptor, e d_{bp} corresponde à distância de *breakingpoint*, que pode ter dois significados:
 - Se a antena transmissora se encontrar num ambiente *outdoor*, a distância de *breakingpoint* representa a distância entre a antena transmissora e a interface do ambiente *indoor*.
 - Se a antena transmissora se encontrar num ambiente *indoor*, esta é normalmente colocada num espaço desobstruído de raio de 5 a 20 metros e é possível caracterizar essa zona como sendo uma zona em que a propagação é feita em espaço livre. Após essas distâncias, a probabilidade de existir obstruções de paredes ou outros objectos de maior dimensão aumenta. A distância a que se encontra o primeiro obstáculo é denominada por distância de *breakpoint*. Este primeiro obstáculo, que normalmente se caracteriza por uma parede, atenua muito a potência do sinal.

As funções escalão calculam-se através das expressões (A.12) e (A.13).

$$u(d - d_{bp}) = \begin{cases} 0, & \text{se } d < d_{bp} \\ 1, & \text{se } d \geq d_{bp} \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

$$u(d_{bp} - d) = \begin{cases} 1, & \text{se } d \leq d_{bp} \\ 0, & \text{se } d > d_{bp} \end{cases} \quad (\text{A.13})$$

- X_f e X_h são factores correctivos para a frequência f , e para a altura efectiva da antena receptora, h_t , e calculam-se através das expressões (A.14) e (A.15) respectivamente. k_{TEC} representa uma constante relativamente à dimensão da célula e, consequentemente de acordo com a tecnologia utilizada, apresentando o valor de 24 para a tecnologia *Wi-Fi*, 10,8 para o *UMTS* e 20 para o *WiMAX* [19].

$$X_{f[\text{dB}]} = 6 \cdot \log\left(\frac{f_{[\text{MHz}]}}{2000}\right) \quad (\text{A.14})$$

$$X_{h_{[\text{dB}]}} = -k_{TEC} \cdot \log\left(\frac{h_t [m]}{2}\right) \quad (\text{A.15})$$

- A_{max} , d_{depth} e β : correspondem ao cálculo da atenuação adicional causado por uma estrutura ou zona vegetativa, que ocorre quando o terminal se encontra dentro da mesma. O parâmetro d_{depth} representa a longitude do trajecto dentro da zona vegetativa, em metros; β representa a atenuação específica para trajectos curtos, em dB/m e A_m representa a atenuação máxima quando um terminal está dentro de um determinado tipo de vegetação, em dB.
- d_0 : representa a distância de referência que, na parcela onde é utilizada normaliza a perda de percurso que ocorre a uma distância, d_0 , do transmissor para que os efeitos da propagação sejam contabilizados posteriormente. Esta distância pode adquirir diferentes valores conforme o tamanho da célula, sendo considerado $d_0 = 100$ metros para macro células, $d_0 = 25$ metros para micro células e $d_0 = 1$ metro para pico células [19].
- γ_1 e γ_2 : correspondem ao expoente da perda de percurso. Estes valores variam conforme o ambiente de propagação:
 - Para ambientes mistos, γ_1 representa o expoente de perda de percurso *outdoor*, enquanto que γ_2 representa o de *indoor*.
 - Para ambientes *indoor*, γ_1 representa o expoente de perda de percurso antes do primeiro obstáculo e γ_2 representa o expoente de perdas depois do obstáculo.
 - Para ambientes *outdoor* apenas γ_1 é utilizado.

Para o caso das tecnologias *UMTS* e *WiMAX*, em que a estação base é implementada num ambiente *outdoor*, γ_1 calcula-se através da expressão (A.16), onde a , b e c , correspondem às constantes que caracterizam o tipo de cenário envolvido (urbano, sub-urbano ou rural). Os valores para a , b e c são apresentados na

- Tabela A.1, onde A corresponde ao ambiente urbano, B ao ambiente sub-urbano e C ao ambiente rural.

$$\gamma_1 = a - b_{[m^{-1}]} \times h_{b[m]} + \frac{c_{[m]}}{h_{b[m]}} \quad (\text{A.16})$$

γ_1	Categoria do Terreno		
	A	B	C
a	5,15	4,0	3,6
b	0,0075	0,0065	0,0050
c	14,6	17,1	20,0

Tabela A.1 – Valores para os parâmetros de γ_1 [19].

- G_f : representa o ganho da penetração do sinal em edifícios. Depende da altura do terminal no edifício, da existência de LoS entre o terminal e o receptor, no tipo de interface e na frequência utilizada, entre outros factores.
- W_e , W_{GE} , θ , θ_H , θ_V : representam a penetração em edifícios, onde W_e representa as perdas, em dB, relativamente à parte iluminada pelo transmissor de forma perpendicular ($\theta = 90^\circ$). W_{GE} representa as perdas adicionais, em dB, das paredes iluminadas pelo transmissor, mediante o ângulo produzido por ambos num eixo horizontal, sendo que θ varia entre 0° e 90° . A Figura A.4 demonstra a aplicação do valor de θ . Para cenários com dois ambientes, este valor tem em conta o transmissor e a interface onde penetra o sinal em direcção ao terminal de recepção. Para um cenário com apenas ambiente *indoor*, este valor representa o ângulo num eixo horizontal entre o transmissor e a parede ou obstáculo, θ_H , ou ângulo num eixo vertical entre o transmissor e a superfície inferior ou superior que dá acesso ao andar inferior ou superior, respectivamente, θ_V .

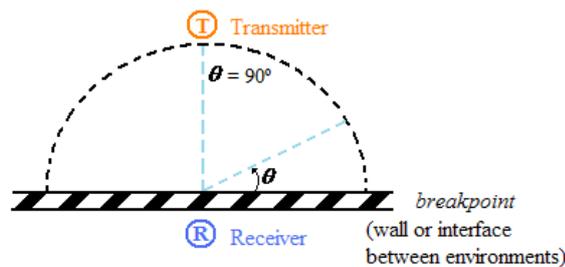


Figura A.4 – Aplicação do valor de θ [19].

- *NF* (*Number of Floors*) e *NW* (*Number of Walls*): representam, respectivamente, o número de andares e o número de paredes pelo qual o sinal terá que atravessar entre o transmissor e o receptor.
- *FAF* (*Floor Attenuation Factor*) e *WAF* (*Wall Attenuation Factor*): o parâmetro *FAF* representa a atenuação causada pelas superfícies superiores, ou inferiores, de cada piso quando estas estão entre um transmissor e um receptor. O parâmetro *WAF* representa a atenuação causada por paredes.

Anexo B – Desenvolvimento de expressões auxiliares para o cálculo do tráfego

B.1. Pontos para a estimativa de tráfego para o k-ésimo serviço

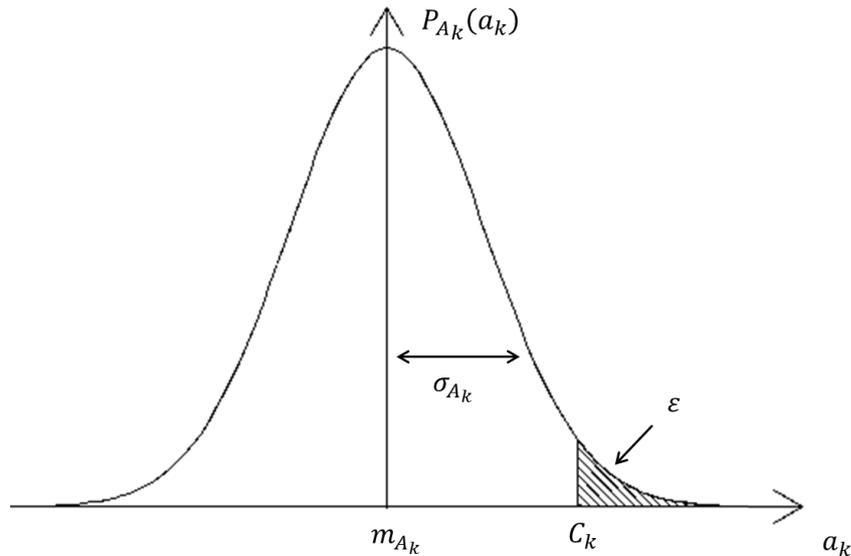


Figura B.5 - Função de densidade de probabilidade do tráfego agregado do k-ésimo serviço.

Sendo A_k , uma variável aleatória, a sua média é dada por [25 pp. 104, eq. 5-21]:

$$m_{A_k} = E[A_k] = \int_{-\infty}^{+\infty} A_k \cdot p_{A_k}(a_k) da_k \quad (\text{B.1})$$

Considerando A_k na VA com distribuição Gaussiana, a sua FDP é dada por [37 pp. 69, eq. 2.19]:

$$p_{A_k}(a_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{A_k}} \cdot \exp\left[-\frac{(a_{A_k} - m_{A_k})^2}{2 \cdot \sigma_{A_k}^2}\right] \quad (\text{B.2})$$

O momento de segunda ordem é dado por [25 pp. 146, eq. 5-67]:

$$E[A_k^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} A_k^2 \cdot p_{A_k}(a_k) da_k \quad (\text{B.3})$$

Com algum desenvolvimento matemático obtém-se:

$$E[A_k^2] = \sigma_{A_k}^2 + m_{A_k}^2 \quad (\text{B.4})$$

Então, a variância é dada por [25 pp. 145, eq. 5-61]:

$$\sigma_{A_k}^2 = E[A_k^2] - m_{A_k}^2 \quad (\text{B.5})$$

Para obter o *skewness* de $p_{A_k}(a_k)$, calcula-se o momento de terceira ordem [25 pp. 146, eq. 5-67]:

$$E[A_k^3] = \int_{-\infty}^{+\infty} A_k^3 \cdot p_{A_k}(a_k) da_k \quad (\text{B.6})$$

Com alguma manipulação matemática obtém-se:

$$\gamma_{1,k} = E[A_k^3] = m_{A_k} \cdot (3 \cdot \sigma_{A_k}^2 + m_{A_k}^2) \quad (\text{B.7})$$

B.2. Valor de C_k para uma probabilidade de *overflow*

Através da probabilidade de *overflow*, ε_k , é possível obter o valor de α_{A_k} para o qual se obtém a probabilidade de *overflow*. Considerando $p_{A_k}(a_k)$, então:

$$\varepsilon_k = \int_{C_k}^{+\infty} p_{A_k}(a_k) da_k \quad (\text{B.8})$$

Considerando:

$$C_{A_k} = m_{A_k} + \alpha_{A_k} \cdot \sigma_{A_k} \quad (\text{B.9})$$

E substituindo a expressão (B.2) do Anexo B.1, e com alguma manipulação matemática obtém-se:

$$\varepsilon_k = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{C_{A_k} - m_{A_k}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{A_k}} \right) \quad (\text{B.10})$$

De acordo com [24 pp. 297, eq. 7.1.2], $\operatorname{erfc}(x)$ é dado por :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (\text{B.11})$$

Através da expressão (B.10) tem-se:

$$\frac{C_{A_k} - m_{A_k}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{A_k}} = \operatorname{erfc}^{-1}(2\varepsilon) \quad (\text{B.12})$$

Então,

$$C_{A_k} = \sqrt{2} \cdot \sigma_{A_k} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}(2\varepsilon) + m_{A_k} \quad (\text{B.13})$$

Comparando a expressão (B.13) com a expressão (B.9):

$$\alpha_{A_k} = \sqrt{2} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}(2\varepsilon) \quad (\text{B.13})$$

B.3. Valor de C_{A_g} para uma probabilidade de *overflow*

Uma vez que as distribuições para cada um dos serviços podem não apresentar funções de densidade de probabilidade Gaussiana, então para o tráfego agregado pode-se utilizar a seguinte expressão para obter a capacidade do tráfego agregado:

$$C_{A_g} = m_{A_g} + \alpha_{asym} \cdot \sigma_{A_g} \quad (\text{B.14})$$

Onde o α_{asym} é diferente do α . Para o tráfego agregado a probabilidade de *overflow* é dada por:

$$\varepsilon = \int_{C_{A_g}}^{+\infty} p_{A_g}(a_g) da_g \quad (\text{B.15})$$

Sendo o $p_{A_g}(a_g)$ dado por:

$$p_{A_g}(a_g) = \mathcal{F}^{-1}[\Phi_{A_g}(a_g)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{A_g}(\omega) \cdot e^{-j\omega a_g} \frac{d\omega}{2\pi} \quad (\text{B.16})$$

onde [24 pp. 927-928, eq. 26.1.12]:

$$\ln \Phi_{A_g}(t) = \sum_{k_n=0}^{+\infty} k_n \frac{(it)^n}{n!} \quad (\text{B.17})$$

onde k_n são os n -ésimos cumulantes [25 pp. 155, eq. 5-111] são dados por:

$$k_1 = m_{A_g} \quad (\text{B.18})$$

$$k_2 = \sigma_{A_g}^2 \quad (\text{B.19})$$

$$k_3 = \mu_3 = \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} (-1)^{n-j} u_j' m_{A_g}^{n-j} \quad (\text{B.20})$$

Sendo μ_3 o momento central de 3ª ordem e o u_j' o momento sobre a origem de ordem j , dado por [25 pp. 147, eq. 5-68]:

$$u_j' = \int_{-\infty}^{+\infty} a_g^j p_{A_g}(a_g) da_g \quad (\text{B.21})$$

$$u_0' \int_{-\infty}^{+\infty} p_{A_g}(a_g) da_g = 1 \quad (\text{B.22})$$

$$u_1' = \int_{-\infty}^{+\infty} a_g p_{A_g}(a_g) da_g = m_{A_g} \quad (\text{B.23})$$

$$u_2' = \int_{-\infty}^{+\infty} a_g^2 p_{A_g}(a_g) da_g = \sigma_{A_g}^2 + m_{A_g} \quad (\text{B.24})$$

$$u_3' = \int_{-\infty}^{+\infty} a_g^3 p_{A_g}(a_g) da_g \quad (\text{B.25})$$

Substituindo as expressões (B.22), (B.23), (B.24) e (B.25) em (B.20) obtém-se:

$$k_3 = 2m_{A_g}^3 - 3m_{A_g} (\sigma_{A_g}^2 + m_{A_g}^2) + E[A_g^3] \quad (\text{B.26})$$

Onde [25 pp. 146, eq. 5-67],

$$E[A_g^3] = \int_{-\infty}^{+\infty} a_g^3 p_{A_g}(a_g) da_g \quad (\text{B.27})$$

Considerando a expressão (B.17) e com alguma simplificação matemática e o desenvolvimento até à terceira ordem, obtém-se:

$$\Phi_{A_g}(t) = \exp \left[-\frac{1}{2} t^2 \sigma_{A_g}^2 + j \left(t m_{A_g} - \frac{1}{6} t^3 k_3 \right) \right] \quad (\text{B.28})$$

Para obter $p_{A_g}(a_g)$, utiliza-se [24 pp. 927-928, eq. 26.1.10]:

$$p_{A_g}(a_g) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-it a_g) \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} t^2 \sigma_{A_g}^2 + j \left(t m_{A_g} - \frac{1}{6} t^3 k_3 \right) \right] dt \quad (\text{B.29})$$

Substituindo a expressão (B.29) em (B.15) tem-se:

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \int_{C_{A_g}}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-it a_g) \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}t^2 \sigma_{A_g}^2 + j\left(tm_{A_g} - \frac{1}{6}t^3 k_3\right)\right] dt da_g \quad (\text{B.30})$$

Referências

1. **Forsk**, “*Atoll Overview*”, <http://www.forsk.com/web/EN/11-atoll-overview.php>, acessado em Setembro 2010
2. **Investopedia**, “*Investopedia*”, <http://www.investopedia.com/terms/c/cagr.asp>, acessado em Junho de 2010.
3. **Holma, Harri e Toskala, Antti**, “*LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*”, United Kingdom : John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
4. **Bhandare, Tejas**, “*LTE and WiMAX Comparisson*”, Santa Clara University, 2008.
5. **Dahlman, Erik, et al**, “*3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*”, UK : Elsevier Ltd, 2007.
6. **Pierre, Lescuyer e Thierry, Lucidarme**, “*Evolved Packet System: The LTE and SAE Evolution of 3G*”, England : John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
7. **3GPP**, “*Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)*”, TR 25.913 v8.0.0, Janeiro 2009, www.3gpp.org.
8. **Ericsson**, “*Long Term Evolution (LTE): An Introduction*”, White Paper, Outubro 2007.
9. **Fernandes, Ivo**, “*Tecnologia WiMAX*”, Página Pessoa de Ivo Fernandes, <http://paginas.fe.up.pt/~ee99207/Tecnologias/WMAN/WIMAXtec.html>, acessado em Março 2010
10. **Yu, Chen, et al**, “*Research on the Modulation and Coding Scheme in LTE TDD Wireless Network*”, Chengdu : Industrial Mechatronics and Automation, Maio 2009.
11. **Correia, Américo**, “*O Princípio Básico do OFDM.*”, Cadeira de Comunicação Digital, ISCTE-IUL, 2009.
12. **Rasquete, Gonçalo**, “*Transmissão de Serviços Multimédia através do HSDPA nas Futuras Redes LTE*”, 2009.
13. **Zyren, Jim**, “*Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer*”, Freescale Semiconductor, 2007.
14. **Elayoubi, S-E., Ben Haddada, O. e Fourestie, B**, “*Performance Evaluation of Frequency Planning Schemes in OFDMA-based Networks*”, Wireless Communications, Vol. 7, nº 5, 2008.
15. **Carvalho, Gonçalo Alves**, “*LDPC Codes For Future Wireless Networks*”, 2009.

16. **Technologies, Agilent**, “*Agilent 3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development, and Test Challenge*”, Application Note, Maio 2008.
17. **Zhang, Yan**, “*WiMAX Network Planning and Optimizations*”, Auerbach Publications, 2008.
18. **Amzallag, D., et al.**, “*Cell Planning of 4G Cellular Networks: Algorithmic Techniques and Results*”, Washington, DC : Israel Institute of Technology, 2005. 6th IEEE International Conference.
19. **Varela, Frederico, Velez, Fernando J. e Rodrigues, António**, “*Unified Propagation Model for Wi-fi, UMTS and WiMAX Planning in Mixed Scenarios*”, 2009.
20. **Alcatel-Lucent**, “*LTE Dimensioning Guidelines - Outdoor Link Budget*”, Abril 2010.
21. **Micallef, Gilbert**, “*Methods for Reducing the Energy Consumption of Mobile Broadband Networks*”, Telektronikk, 2010.
22. **Breaking Point**, “*Mobile Broadband Network 2010 - An aggregated view of wireless application and network traffic for global mobile network operators*”, Breaking Point, 2010.
23. **Alcatel-Lucent**, “*LTE Dimensioning Guides - Traffic Aggregation Modeling*”, Abril 2010.
24. **Abramowitz, M. e Stegun, I.A.**, “*Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*”, Washington: National Bureau of Standards, 1972.
25. **Papoulis, Athanasios**, “*Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*”, McGraw-Hill, 1984.
26. **Berezner, S. A. e Krzesinski, A. E.**, “*An efficient stable recursion to compute multiservice blocking probabilities*”, Australia : Elsevier, 21 de Agosto de 2000, Performance Evaluation, Vol. 43, pp. 151-164.
27. **Ghadialy, Zahid**, “*LTE QCI and End-to-End bearer QoS in EPC*”, 3G and 4G Wireless Blog, <http://3g4g.blogspot.com/2009/06/lte-qci-and-end-to-end-bearer-qos-in.html>, acessado em Setembro de 2010.
28. **Hannes Ekstrom, Ericsson**, “*QoS Control in the 3GPP Evolved Packet System*”, Communications Magazine, IEEE, 2, 2009, Vol. 47.
29. **Alcatel-Lucent**, “*A9155 Radio Network Planning Tool: Technical Reference Guide*”, 2007.
30. **Nuaymi, Loutfi**, “*WiMAX Technology for Broadband Wireless Access*”, England : John Wiley & Sons, Ltd., 2007.

31. **Andrews, Jeffrey G**, “*Fundamentals of WiMAX - Understanding Broadband Wireless Networking*” Prentice Hall, 2007.
32. **Ergen, Mustafa**, “*Mobile Broadband - Including WiMAX and LTE*”, Springer, 2009.
33. **Weisstein, Eric**, Wolfram Math World, <http://mathworld.wolfram.com/FloorFunction.html>, acessado em Outubro de 2010.
34. **Alcatel-Lucent**, “*A9155 User Manual*”, 2007.
35. **Alcatel-Lucent**, “*Modeling WiMAX Networks within A9155 RNP Tool*”, 2007.
36. **Varela, Frederico**, “Desenvolvimento de um modelo de propagação unificado para o planeamento de redes wi-fi, UMTS e WiMAX”, ISCTE-IUL, 2009.
37. **Helstrom, Carl W**, “*Probability and Stochastic Processes for Engineers*”, Macmillan, 1984.
38. **Cisco**, http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html, acessado em Fevereiro de 2010.
39. **Wood, Maury**, “*Achieving Sample Synchronization Among Data Converters*”, France : Microwave Europe Engineering, Vol. Novembro, 2009.
40. **Tripathi, Suyash, Kulkarni, Vinay e Kumar, Alok**, “*LTE E-UTRAN and its Access Side Protocols*”, Continuous Computing, <http://www.ccpu.com/articles/2009/lte-e-utran-access-side-protocols/>, acessado em Junho de 2010.]
41. **Motorola**, Motorola eZine, <http://ezine.motorola.com/government?a=18>, acessado em Outubro de 2007.
42. **Correia, Américo**, “Evolução da Tecnologia WCDMA”, Cadeira de Comunicação Digital, 2009.

