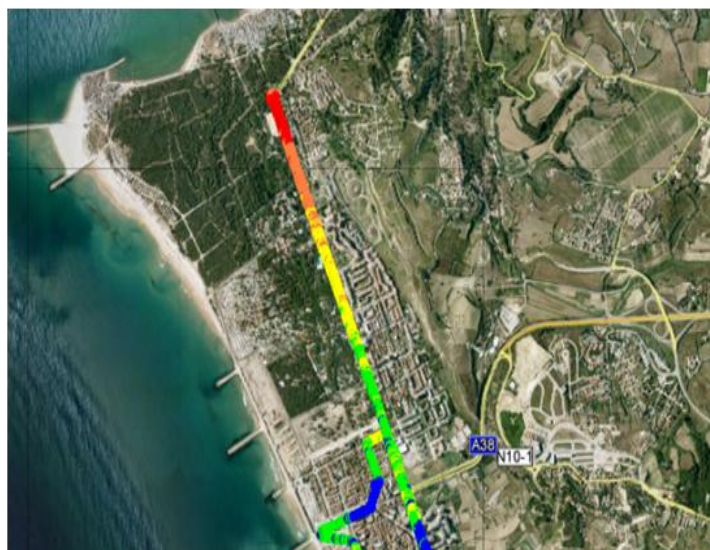


## **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE E DESEMPENHO DE SERVIÇOS EM REDES LTE**



**CARLOS FILIPE ROCHA RODRIGUES**

Trabalho final de Mestrado para Obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações

Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e  
Telecomunicações e de Computadores

Presidente do Júri:	Prof. Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira
Vogal Orientador:	Prof. António João Nunes Serrador
Vogal Arguente:	Prof. Nuno António Fraga Juliano Cota

Novembro 2012



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor António Serrador pela supervisão semanal e por todo o apoio e incentivo dado ao longo do desenvolvimento da tese. Os seus conhecimentos e conselhos foram essenciais para ultrapassar os vários obstáculos que foram surgindo ao longo do tempo de realização desta dissertação. Quero agradecer à minha família por estarem sempre presentes, e por terem proporcionado as melhores condições possíveis para a realização deste trabalho. Quero agradecer a todos os meus colegas de curso e de trabalho pelo apoio, disponibilidade e encorajamento sem os quais a realização deste trabalho teria sido uma tarefa muito mais difícil.



Tratando-se o LTE de uma nova tecnologia, existe ainda pouca informação no que confere a resultados em redes comerciais, ou seja dados reais, sendo que os dados atualmente existentes referem-se a simulações.

De forma a verificar se os resultados das simulações traduzem a experiência do cliente nas redes comerciais foram realizados vários testes nas bandas de frequência dos 800MHz com largura de banda de 10 MHz. Destes testes foram extraídas equações analíticas que modelam alguns parâmetros de desempenho da interface rádio oferecendo aos operadores a relação entre cobertura, capacidade e interferência, os quais são fundamentais para um bom domínio do planejamento celular em LTE.

Fazendo a comparação entre o débito binário e o SINR dos dados das simulações em cenário veicular com os dados obtidos em redes comerciais observa-se que os resultados são muito semelhantes para ambos os canais descendente e ascendente. O mesmo não se constatou para o cenário pedestre havendo um enorme afastamento no SINR na ordem dos 5 dB superiores ao longo de toda a linha dos dados reais para o canal descendente. Já no canal ascendente o desfasamento é superior estando na ordem dos 5 a 10 dB mas inferior à linha teórica.

## Palavras-chave

LTE, Capacidade, Cobertura, Débito, QoS

## Abstract

Since LTE is a new technology there is still little information on what concerns to results from live networks, i.e. real data, because the current data available refers to simulations.

In order to verify if the simulation results reflects the customer experience in commercial networks, several tests were performed in the 800MHz spectrum with a bandwidth of 10 MHz. From these tests analytical equations were extracted, which will model some performance parameters of the radio interface offering operators the relationship between coverage, capacity and interference, which are fundamental for a good domain in the LTE cellular planning.

Making a comparison between the SINR data from the simulations in the vehicular scenario with the data obtained in commercial networks we observe that DL values are very similar in both directions DL and UL. The same don't happen for the pedestrian scenario where there is an offset around 5 dB higher when compared with commercial networks results. For the uplink channel the offset is even higher around 5 to 10 dB but below off the theoretical line.

## Keywords

LTE, Capacity, Coverage, Throughput, QoS

## Índice Geral

Agradecimentos.....	iii
Resumo .....	v
Palavras-chave.....	v
Abstract .....	vi
Keywords.....	vi
Índice Geral .....	vii
Lista de Figuras .....	ix
Lista de Tabelas .....	xii
Lista de Símbolos .....	xiii
Lista de Acrónimos .....	xiv
Lista de Software e Hardware .....	xvii
1 Introdução.....	1
1.1. Visão Global.....	1
1.2 Enquadramento .....	3
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
2 Estado da Arte.....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Arquitetura da rede.....	5
2.2.1 E-UTRAN .....	7
2.2.2 EPC.....	8
2.2.3 Interfaces .....	9
2.3 Requisitos do LTE .....	10
2.4 Camada Física LTE.....	11
2.4.1 Ligação Descendente .....	11
2.4.2 Ligação Ascendente.....	13
2.5 Cobertura e Capacidade .....	14

2.6 Modulação Adaptativa e Codificação .....	16
2.7 Análise de Desempenho .....	18
3 Modelos Teóricos .....	21
3.1 Parâmetros de Desempenho.....	21
3.1.1 <i>Reference Signal Reference Power</i> .....	21
3.1.2 <i>Reference Signal Reference Quality</i> .....	22
3.1.3 <i>Multiple Input Multiple Output</i> .....	23
3.1.4 <i>Channel Quality Indicator</i> .....	26
3.2 Cálculo do SNR.....	27
3.3 Cálculo de Débito Binário.....	31
3.4 Cálculo do Débito Máximo .....	33
4 Análise de Resultados .....	37
4.1 Descrição dos cenários .....	37
4.2 Análise dos resultados obtidos no DL .....	38
4.2.1 Análise dos dados em cenário Veicular .....	39
4.2.2 Análise dos dados em cenário Pedestre.....	48
4.3 Análise dos resultados obtidos no UL .....	51
4.3.1 Análise dos dados em cenário Veicular .....	51
4.3.2 Análise dos dados em cenário Pedestre.....	57
5 Conclusões.....	59
Anexos .....	63
A. Estrutura de trama e Canais físicos, de transporte e lógicos em LTE .....	63
B. Bandas de Frequência e Espectro no LTE .....	73
C. Definições das classes e categorias de Terminais LTE .....	79
Bibliografia.....	83

## Lista de Figuras

FIGURA 1-1 CRESCIMENTO DO TRÁFEGO DE DADOS MÓVEIS (EXTRAÍDO DE [1]).	2
FIGURA 1-2 VOLUME DE TRÁFEGO DE VOZ E DADOS NO UMTS-HSPA (EXTRAÍDO DE [2]).	3
FIGURA 2-1 REDE EPS (EXTRAÍDO DE [2]).	6
FIGURA 2-2 INTERFACES UTILIZADOS NO LTE (EXTRAÍDO DE [3]).	9
FIGURA 2-3 SÍMBOLOS OFDM NO TEMPO (EXTRAÍDO DE [3]).	12
FIGURA 2-4 ESTRUTURA DE UMA SUB-TRAMA OFDM (EXTRAÍDO DE [4]).	13
FIGURA 2-5 COMPARAÇÃO ENTRE OFDMA E SC-FDMA (EXTRAÍDO DE [5]).	14
FIGURA 2-6 EFICIÊNCIA ESPETRAL NO LTE EM FUNÇÃO DO <i>GEOMETRY FACTOR</i> (EXTRAÍDO DE [2]).	19
FIGURA 3-1 PROBLEMAS DE COBERTURA E INTERFERÊNCIA NO LTE (EXTRAÍDO DE [11]).	23
FIGURA 3-2 SISTEMAS DE ACESSO DE MÚLTIPLAS ANTENAS (EXTRAÍDO DE [12]).	24
FIGURA 3-3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODOS 2 E 3 DO MIMO (EXTRAÍDO DE [14]).	26
FIGURA 3-4 MODELO MAPEADO DE SNR - CQI (EXTRAÍDO DE [15]).	27
FIGURA 3-5 DÉBITO PARA UM $R_B$ USANDO MIMO COM TAXA DE CODIFICAÇÃO $\frac{1}{2}$ E MODULAÇÃO DE 16-QAM NO DL EM FUNÇÃO DO SNR.	28
FIGURA 3-6 DÉBITO PARA UM $R_B$ USANDO MIMO COM TAXA DE CODIFICAÇÃO $\frac{3}{4}$ E MODULAÇÃO DE 64-QAM NO DL EM FUNÇÃO DO SNR.	29
FIGURA 3-7 DÉBITO PARA UM $R_B$ USANDO MIMO COM TAXA DE CODIFICAÇÃO $\frac{3}{4}$ E MODULAÇÃO DE 16-QAM NO UL EM FUNÇÃO DO SNR.	30
FIGURA 3-8 DÉBITO PARA UM $R_B$ USANDO MIMO COM TAXA DE CODIFICAÇÃO $\frac{5}{6}$ E MODULAÇÃO DE 64-QAM NO UL EM FUNÇÃO DO SNR.	31
FIGURA 3-9 MIMO COM TAXA DE CODIFICAÇÃO $\frac{1}{2}$ E MODULAÇÃO DE 16-QAM NO DL EM FUNÇÃO DO $R_B$ .	32
FIGURA 3-10 MIMO COM TAXA DE CODIFICAÇÃO $\frac{3}{4}$ COM MODULAÇÃO DE 64-QAM NO DL EM FUNÇÃO DO $R_B$ .	33
FIGURA 4-1 ÁREA DA RECOLHA DE MEDIDAS DL EM AMBIENTE SUB-URBANO NUM CENÁRIO VEICULAR.	39
FIGURA 4-2 ESTATÍSTICAS DAS MEDIDAS NO CENÁRIO VEICULAR NO DL EM AMBIENTE SUB-URBANO.	40
FIGURA 4-3 DISTRIBUIÇÃO DO SINR [DB] NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.	40
FIGURA 4-4 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO SINR NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.	41
FIGURA 4-5 COMPARATIVO ENTRE OS DADOS TEÓRICOS E OS REAIS NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.	42
FIGURA 4-6 DISTRIBUIÇÃO DO RSRP [DBM] NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.	42
FIGURA 4-7 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO RSRP NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.	43
FIGURA 4-8 DISTRIBUIÇÃO DO RSRQ [DB] NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.	43

FIGURA 4-9 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO RSRQ NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.....	44
FIGURA 4-10 CQI EM FUNÇÃO DO SINR NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO. ....	44
FIGURA 4-11 MAPEAMENTO TEÓRICO DO CQI EM COMPARAÇÃO COM O CQI DA REDE COMERCIAL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.....	45
FIGURA 4-12 DISTRIBUIÇÃO DO CQI NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.....	45
FIGURA 4-13 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO CQI NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.....	46
FIGURA 4-14 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO MCS NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.....	46
FIGURA 4-15 DISTRIBUIÇÃO DO MCS NO DL EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO. ....	47
FIGURA 4-16 SINR EM FUNÇÃO DOS INDEX DE MCS .....	47
FIGURA 4-17 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO SINR (MIMO) EM CENÁRIO VEICULAR SUB-URBANO.....	48
FIGURA 4-18 DISTRIBUIÇÃO DO SINR NO DL EM CENÁRIO PEDESTRE SUB-URBANO. ....	49
FIGURA 4-19 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO SINR NO DL EM CENÁRIO PEDESTRE SUB-URBANO.....	49
FIGURA 4-20 COMPARATIVO ENTRE OS DADOS TEÓRICOS E OS REAIS NO DL EM CENÁRIO PEDESTRE SUB-URBANO. ....	50
FIGURA 4-21 ÁREA DA RECOLHA DE MEDIDAS UL EM AMBIENTE URBANO NUM CENÁRIO VEICULAR. ....	51
FIGURA 4-22 ESTATÍSTICAS DAS MEDIDAS NO CENÁRIO VEICULAR NO UL EM AMBIENTE URBANO.....	52
FIGURA 4-23 DISTRIBUIÇÃO DO SINR NO UL EM CENÁRIO VEICULAR URBANO. ....	52
FIGURA 4-24 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO SINR NO UL EM CENÁRIO VEICULAR URBANO.....	53
FIGURA 4-25 COMPARATIVO ENTRE OS DADOS TEÓRICOS E OS REAIS NO UL EM CENÁRIO VEICULAR URBANO.....	54
FIGURA 4-26 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO RSRP NO UL EM CENÁRIO VEICULAR URBANO.....	54
FIGURA 4-27 DISTRIBUIÇÃO DO RSRP NO UL EM CENÁRIO VEICULAR URBANO.....	55
FIGURA 4-28 DISTRIBUIÇÃO DO RSRQ NO UL EM CENÁRIO VEICULAR URBANO. ....	55
FIGURA 4-29 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO RSRQ NO UL EM CENÁRIO VEICULAR URBANO.....	56
FIGURA 4-30 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO MCS UL EM CENÁRIO VEICULAR URBANO. ..	56
FIGURA 4-31 DISTRIBUIÇÃO DO MCS NO UL EM CENÁRIO VEICULAR URBANO.....	57
FIGURA 4-32 DISTRIBUIÇÃO DO SINR NO UL EM CENÁRIO PEDESTRE URBANO.....	57
FIGURA 4-33 DÉBITO BINÁRIO EM FUNÇÃO DO SINR NO UL EM CENÁRIO PEDESTRE URBANO.....	58

FIGURA 4-34 COMPARATIVO ENTRE OS DADOS TEÓRICOS E OS REAIS NO UL EM CENÁRIO PEDESTRE. ....	58
FIGURA A-1 ESTRUTURA DE TRAMA FDD (EXTRAÍDO DE [24]). ....	63
FIGURA A-2 ESTRUTURA DE TRAMA TDD (EXTRAÍDO DE [24]). ....	64
FIGURA A-3 DISPOSIÇÃO DOS CANAIS FÍSICOS. ....	69
FIGURA A-4 DISPOSIÇÃO DOS CANAIS DE TRANSPORTE. ....	70
FIGURA A-5 DISPOSIÇÃO DOS CANAIS LÓGICOS. ....	72
FIGURA B-1 DEFINIÇÃO DA BANDA DE FREQUÊNCIA NO LTE (EXTRAÍDO DE [5]).	74
FIGURA C-1 PEN UTILIZADA PARA A RECOLHA DE MEDIDAS. ....	80

## Lista de Tabelas

TABELA 2-1 INTERFACES DO LTE E SUA FUNÇÃO. ....	10
TABELA 2-2 PARÂMETROS E BENEFÍCIOS DO LTE.....	11
TABELA 2-3 PARÂMETROS CHAVE PARA CADA LARGURA DE BANDA DO CANAL. ....	13
TABELA 2-4 DÉBITOS DE PICO DA CAMADA FÍSICA PARA DL (ADAPTADO DE [7]).....	15
TABELA 2-5 DÉBITOS DE PICO DA CAMADA FÍSICA PARA UL (ADAPTADO DE [7]).....	16
TABELA 2-6 COMBINAÇÃO DE ESQUEMAS DE MODULAÇÃO, EFICIÊNCIA ESPETRAL, TAXA DE CÓDIGOS E MCS EM LTE (ADAPTADO DE [29]). ....	18
TABELA 3-1 MAPEAMENTO DO RSRP (ADAPTADO DE [11]). ....	21
TABELA 3-2 MAPEAMENTO DO RSRQ (ADAPTADO DE [11]).....	22
TABELA 3-3 MATRIZ DE DECISÃO PARA OS PRINCIPAIS MODOS MIMO NO LTE (ADAPTADO DE [13]). ....	25
TABELA 3-4 MODELOS DOS CANAIS USADOS EM TERMOS DA FREQUÊNCIA DE DOPPLER E DO ESPALHAMENTO DE ATRASO (EXTRAÍDO [14]).....	27
TABELA 3-5 RESULTADOS TEÓRICOS DOS DÉBITOS MÁXIMOS NO DL CALCULADOS COM O ALGORITMO DESCRITO ACIMA.....	34
TABELA 3-6 RESULTADOS TEÓRICOS DOS DÉBITOS MÁXIMOS NO UL CALCULADOS COM O ALGORITMO DESCRITO ACIMA.....	35
TABELA 4-1 PARÂMETROS UTILIZADOS DURANTE OS ENSAIOS. ....	38
TABELA 4-2 MÉDIAS OBTIDAS AO LONGO DO PERCURSO NO DL. ....	39
TABELA 4-3 MÉDIAS OBTIDAS AO LONGO DO PERCURSO NO UL. ....	51
TABELA A-1 FORMATAÇÃO DAS SUB-TRAMAS NO TDD.....	65
TABELA A-2 DIFERENTES FORMATOS DO CANAL PUCCH. ....	68
TABELA B-1 FREQUÊNCIA ADQUIRIDAS PELOS OPERADORES NACIONAIS (ADAPTADO DE [27]). ....	75
TABELA B-2 BANDAS DE FREQUÊNCIA DO LTE E LARGURAS DE BANDA SUPORTADAS POR CADA BANDA FDD (EXTRAÍDO DE [3]). ....	76
TABELA B-3 BANDAS DE FREQUÊNCIA DO LTE E LARGURAS DE BANDA SUPORTADAS POR CADA BANDA TDD (EXTRAÍDO DE [3]). ....	77
TABELA C-1 PARÂMETROS DAS CATEGORIAS. ....	80
TABELA C-2 ESPECIFICAÇÕES DA PEN DE BANDA LARGA UTILIZADA (ADAPTADO DE [28]). .	81

## Lista de Símbolos

$\Delta f$	Largura de banda da sub-portadora
$\varepsilon_b$	Energia necessária por bit de informação
$\eta_{SNR}$	Eficiência SNR
$\eta_{\text{Sync\_DL}}$	Eficiência do sinal de sincronização
$\rho_{IN}$	Signal to Interference-plus-Noise Ratio
$\rho_N$	Signal-to-noise ratio
$\delta$	Channel Quality Indicator
$\tau$	Modulation and Coding Scheme
$\gamma_s$	Atividade de sub-portadora com um fator de célula $s$
$B_w$	Largura de banda do sistema
$m$	Ordem da modulação considerada
$N_0$	Densidade espectral de potência de ruído
$N_{PRB}$	Número de bloco de recursos físicos
$N_{RF}$	Potência de ruído
$N_{SC}^{DL}$	Número de sub-portadoras no DL
$N_{SC}^{RB}$	Número de sub-portadoras por <i>resource block</i>
$N_{RB}^u$	Número de <i>resources blocks</i> utilizados por um utilizador
$N_{\text{symb}}^{SF}$	Número de símbolos por sub-trama
$N_{\text{streams}}$	Número de <i>streams</i> , em caso de utilização de MIMO
$T_{SF}$	Período da sub-trama
$P_{DSCH}$	Potência recebida no DSCH
$P_{\text{inter,max } s}$	Potência máxima de interferência entre células no limite da célula $s$
$R_{bDL}$	Débito binário de um bloco de recurso no DL
$R_{bUL}$	Débito binário de um bloco de recurso no UL
$R_{bTDL}$	Débito binário total no DL
$R_{bTUL}$	Débito binário total no UL
$T_{\text{slot}}$	Tempo de um <i>slot</i>

## Lista de Acrónimos

2G	2 <sup>nd</sup> Generation of Mobile Network
3G	3 <sup>rd</sup> Generation of Mobile Network
3GPP	3 <sup>rd</sup> Generation Partnership Project
4G	4 <sup>th</sup> Generation of Mobile Network
ACK	ACKnowledgement
AMC	Adaptive Modulation and Coding
AWGN	Additive White Gaussian Noise
AWS	Advanced Wireless Services
BLER	BLock Error Rate
BS	Base Station
CLSM	Closed Loop Spatial Multiplexing
CP	Cyclic Prefix
CPE	Customer Premises Equipment
CQI	Channel Quality Indicator
CSQ	Closed Subscriber Group
DCS	Digital Cellular System
DFT	Discrete Fast Fourier
DL	Downlink
DRX	Discontinuous Reception
DVB	Digital Video Broadcasting
DVBT	Digital Video Broadcasting Terrestrial
DVBH	Digital Video Broadcasting Handheld
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution
eNodeB	Evolved Node B
EPA	Extended Pedestrian A
EPC	Evolved Packet Core
ETU	Extended Typical Urban
EVA	Extended Vehicular A
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
FST	Frame Structure Type
GIS	Geographical Information System
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HLR	Home Location Register
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access

HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
ICI	InterChips Interference
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMS	Internet Protocol Multimedia Subsystem
IMT	International Mobile Telecommunications
ISI	Inter Symbol Interference
ITU	Internacional Telecommunication Union
LB	Largura de Banda
LTE	Long Term Evolution
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIB	Master Informatio Block
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MME	Mobility Management Entity
MR	Measurements Reports
NACK	Negative ACKnowledgement
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OLSM	Open Loop Spatial Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection
PGW	Packet Data Network Gateway
PSCH	PrimarySynchronization Channel
PAR	Peak Average Ratio
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator CHannel
PCI	Physical Channel Indicator
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PCS	Personal Communications Service
PDC	Personal Digital Cellular
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDP	Packet Data Protocol
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PMI	Precoding Matrix Indicators
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Resource Blocks
PSK	Phase Shift Keying
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service

RAN	Radio Access Network
RB	Resource Block
RF	Rádio Frequência
RI	Rank Indicator
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RS	Reference Signal
RSRP	Reference Signal Reference Power
RSRQ	Reference Signal Reference Quality
RTT	Round Trip Time
Rx	Antenas de Recepção
SGW	Serving Gateway
SSCH	Secondary Synchronization Channel
SC	Single Carrier
SC - FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SFBC	Spatial Frequency Block Codes
SGSN	Serving GPRS Support Node
SIM	Subscriber Identity Module
SIMO	Single Input Multiple Output
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SIP	Session Initiation Protocol
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
SON	Self Organizing Networks
SP	Service Pack
SU	Single User
TBS	Transport Block Size
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TRI	Transmit Rank Indication
TTI	Time Transmission Interval
TU	Typical Urban
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VoIP	Voice over Internet Protocol
VLR	Visitor Location Register
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

## Lista de Software e Hardware

Mapinfo Professional v 7.5	<i>Software</i> GIS
Google Earth	<i>Software</i> GIS
TEMS Investigation 13.2.1	<i>Software</i> de recolha de medidas
Actix Software V4.05.266.502	<i>Software</i> de processamento de medidas
Microsoft Word 2007	Editor de Texto
Microsoft Excel 2007	Ferramenta de cálculo
Portatil para recolha de medidas	HP
PEN Banda Larga ZTE - MF820 D	Placa de Banda Larga



# 1 Introdução

Neste capítulo faz-se uma breve descrição do trabalho desenvolvido, apresentando uma visão global da evolução da banda larga e a motivação que esteve na origem desta tese. Por fim apresenta-se a estrutura da Dissertação.

## 1.1. Visão Global

A banda larga móvel já é uma realidade. Este facto deve-se essencialmente à geração da Internet a qual quer disfrutar da banda larga móvel onde quer que esteja, não apenas em casa ou no escritório. Atualmente muitos navegadores já utilizam cartões *sim card* instalados no próprio pc, desistindo dos *modems* DSL fixos, permitindo uma mobilidade com a qual, os utilizadores já enviam e recebem músicas, vídeos, acedem ao *facebook* entre outras ações. Com o *Long Term Evolution* (LTE), a experiência do utilizador vai ser ainda melhor, pois vai aumentar a procura por aplicações mais exigentes como a TV interativa, jogos *online* e serviços profissionais as quais até há pouco tempo atrás só estavam ao alcance da banda larga fixa.

O LTE vem trazer vários benefícios importantes não só para os consumidores bem como para as operadoras, as quais com as novas funcionalidades de *Plug-and-play*, autoconfiguração e auto otimização vão reduzir os custos na construção e na gestão da rede.

Com o LTE além dos telemóveis, muitos computadores e dispositivos eletrónicos, tais como portáteis, *tablets*, consolas de jogos já serão vendidos ao público com os módulos LTE incorporados.

A Ericsson prevê um aumento de dez vezes no tráfego de dados móveis nos próximos quatro anos, o qual será impulsionado principalmente pelo vídeo. Em 2016, a Ericsson também prevê assinaturas de banda larga móvel superior a 5 mil milhões, Figura 1-1. A fonte desta informação [1] baseia-se em medições de móveis tanto em voz como em dados, adquiridos pela Ericsson em mais de 180 países ao longo de vários anos.

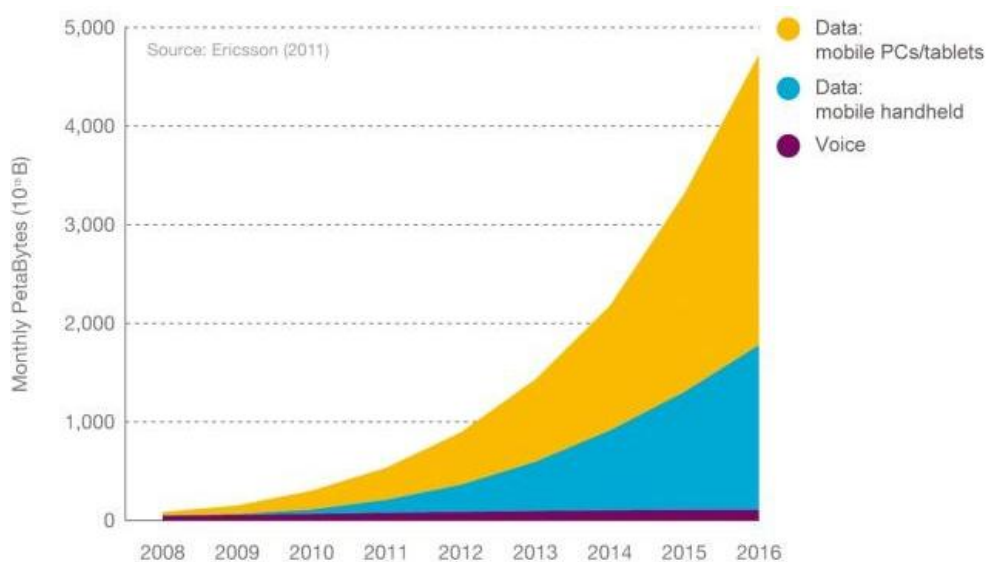


Figura 1-1 Crescimento do tráfego de dados móveis (extraído de [1]).

Os consumidores apreciam cada vez mais os benefícios da banda larga móvel, estando esta já massificada pelos *smartphones* e cada vez mais nos computadores portáteis/*tablets*. Observou-se que quando os operadores oferecem boa cobertura, tarifários e terminais atrativos a banda larga móvel dispara, um bom exemplo disto foi com o *High Speed Packet Access* (HSPA).

O tráfego de dados ultrapassou o tráfego de voz em maio de 2007, na maioria das redes *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA) em todo o mundo. Este aumento deveu-se essencialmente à introdução do HSPA nas redes, Figura 1-2.

Com a entrada do LTE a banda larga móvel vai competir fortemente com a banda larga fixa, pois o preço, o desempenho, a segurança vão ser muito semelhantes e adicionalmente tem ainda uma grande vantagem que é a mobilidade. Cada vez mais existem empresas de *software* que desenham aplicações onde o principal foco é a utilização das mesmas mas em mobilidade, como é o caso das aplicações de presença, etc. Os próprios utilizadores estão a criar cada vez mais conteúdos e querem coloca-los logo *online* na Internet, como por exemplo vídeos no *youtube*, fotos no facebook. Este facto está a resultar numa alteração nos padrões de tráfego levando a que o UL seja cada vez mais importante. O LTE vai trazer um valor acrescentado dada as suas características de alto débito, baixa latência o que para aplicações em tempo real, IPTV, jogos *online* e VoIP são excelentes.

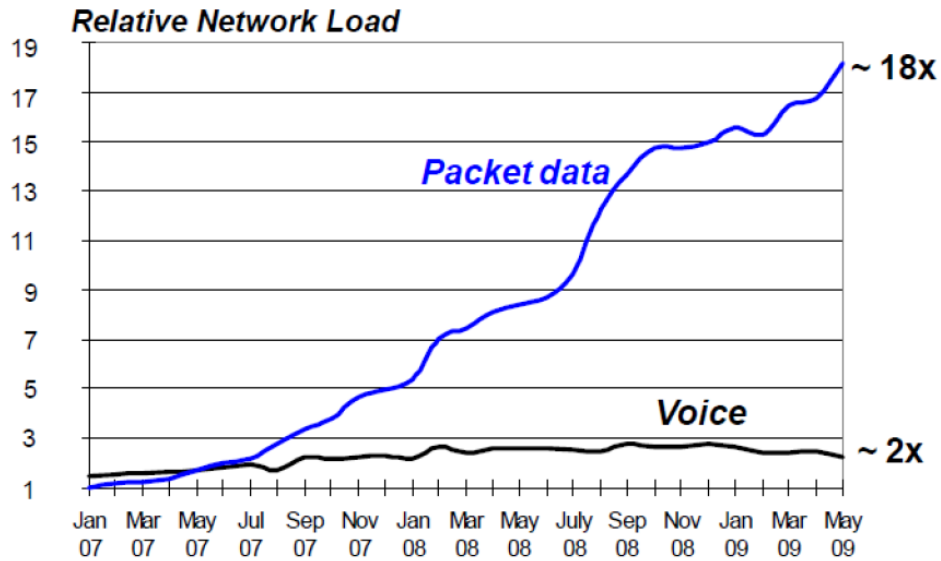


Figura 1-2 Volume de tráfego de voz e dados no UMTS-HSPA (extraído de [2]).

## 1.2 Enquadramento

Sempre que surgem novas tecnologias, neste caso o LTE é necessário desenvolver novas metodologias quantitativas que avaliem a qualidade e o desempenho dos serviços tanto de dados como de voz, estratégias de gestão de mobilidade e de recursos rádio através de testes intrusivos estáticos e em mobilidade.

Irão ser analisados diversos parâmetros os quais têm um enorme impacto no desempenho, tais como, o tipo de canal, a largura de banda, o número de antenas de emissão e de receção (tecnologia MIMO), entre outros. No final, irá ser analisado o impacto da variação desses parâmetros no débito gerado com dados reais recolhidos de uma rede LTE comercial em comparação com as medidas obtidas através de simulações.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta por cinco capítulos, sendo que o primeiro é o presente capítulo onde se apresentam os objetivos para a elaboração de uma Tese de Mestrado neste tema e onde também é apresentada a estrutura de toda a dissertação. Começa-se por apresentar uma visão global sobre a evolução do número de utilizadores das comunicações móveis a nível mundial. No capítulo 2 apresenta-se uma descrição da arquitetura de rede. O capítulo 3 descreve-se os

principais parâmetros que influenciam o débito e faz-se uma análise às equações teóricas. No capítulo 4 são demonstrados os resultados obtidos numa rede comercial LTE em comparação com os resultados obtidos da análise das equações teóricas. No capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões e sugere-se o trabalho futuro. Para além destes cinco capítulos existem ainda 3 anexos, onde se apresentam informações adicionais ao LTE que não foram apresentadas pormenorizadamente ao longo do texto por serem um pouco específicas, no entanto, colocaram-se em anexo para uma melhor compreensão das mesmas.

## 2 Estado da Arte

### 2.1 Introdução

O LTE é o nome dado pelo projeto 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) para melhorar as normas da Terceira Geração Móvel - Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) tendo como objetivos:

- Escalabilidade da Largura de Banda - existem várias larguras de banda conforme a necessidade (1.4MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz);
- Baixar os custos;
- Simplificação e minimização do número de interfaces;
- Aumentar a eficiência e melhorar a capacidade;
- Melhorar o desempenho de serviço;
- Otimização na fronteira da célula.

O termo LTE é usado de uma forma livre para indiferenciadamente nos referirmos à *Evolved – Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) ou *Evolved Universal Terrestrial Radio Access* (E-UTRA) que começou a partir da *Release 8*. Um dos principais objetivos definidos para o LTE é que haja inter-operacionalidade com os outros sistemas 3GPP. O resultado do projeto LTE foi a normalização de uma nova rede de acesso rádio, denominada E-UTRAN. O LTE pode operar em várias regiões do espectro radioelétrico com diferentes larguras de banda. Pode nomeadamente posicionar-se no espectro atualmente ocupado pelo 2G e 3G.

### 2.2 Arquitetura da rede

Existe também um projeto do 3GPP em paralelo com o LTE chamado *Service Architecture Evolution* (SAE) que tem como objetivo a evolução ou migração dos sistemas da rede core 3GPP para que se possa obter:

- Maior débito na transmissão;
- Menor latência;
- Rede de pacotes mais eficientes.

O resultado do projeto SAE foi a normalização de uma nova rede core, o *Evolve Packet Core* (EPC) All-IP, que garante a coexistência entre as várias redes de acesso 3GPP e não 3GPP.

O *User Equipment* (UE), conjuntamente com a rede de acesso E-UTRAN e a rede core EPC, designa-se *Evolved Packet System* (EPS). A Figura 2-1 é a representação do EPS.

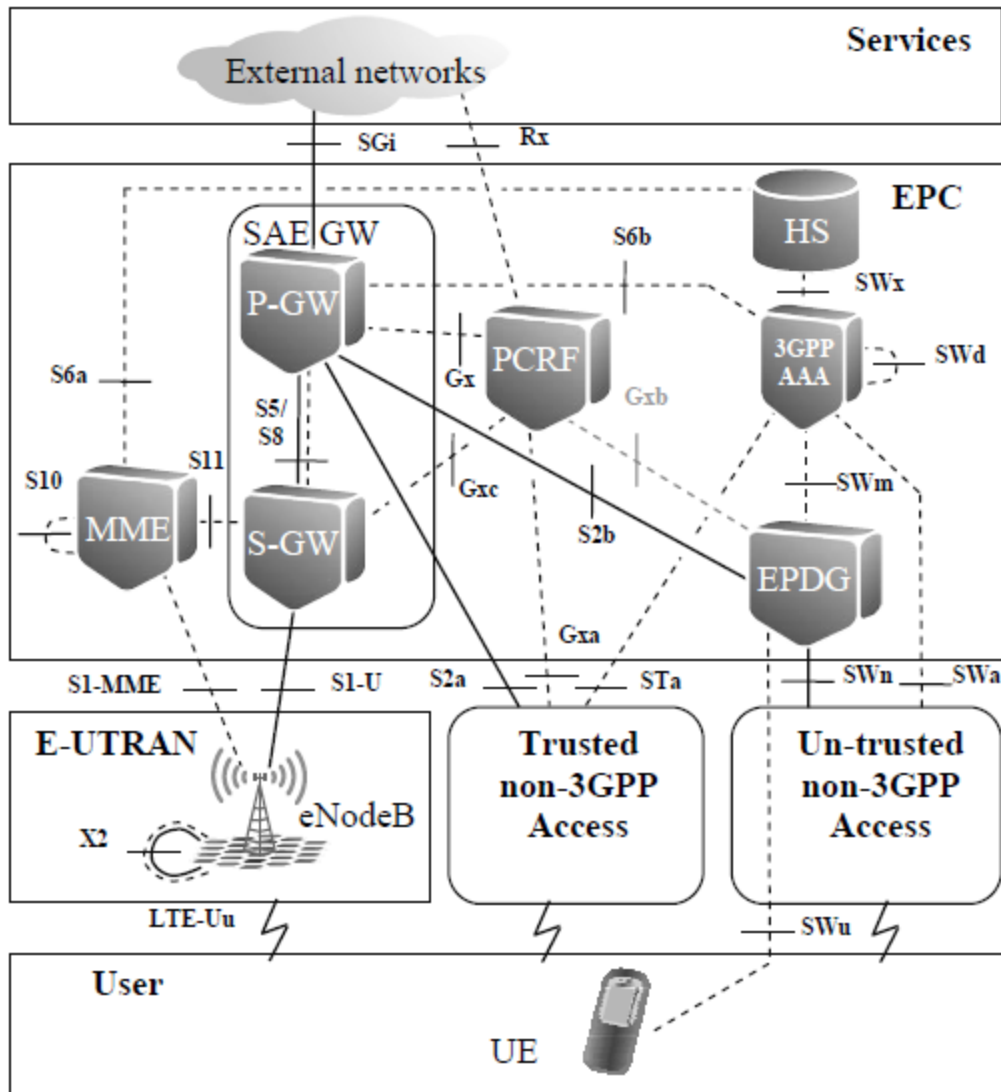


Figura 2-1 Rede EPS (extraído de [2]).

O ponto mais relevante relativamente às gerações anteriores é a simplificação da arquitetura. A rede core está agora toda assente em redes IP, tendo abandonado a componente de comutação de circuitos herdada da segunda geração (GSM). Na rede de acesso rádio E-UTRAN existe uma única entidade de rede o *Evolved Node*

*B* (eNB), ao contrário das duas entidades das gerações anteriores: *Base Transceiver Station* (BTS) e *Base Station Controller* (BSC) no GSM e *Node B* e *Radio Network Controller* (RNC) no UMTS.

O UE faz a interface entre o utilizador e a rede. É através do UE que o utilizador tem acesso aos seus serviços móveis, tais como acesso à Internet ou chamadas de voz suportadas sobre o IP - Voice over Internet Protocol (VoIP).

### 2.2.1 E-UTRAN

A E-UTRAN é constituída por um conjunto de *Evolved Node B* interligados entre si. Quando comparado com as redes 3G, observa-se que as funções do RNC e dos Node B estão agora juntas, isto é, os eNB passaram a ter toda a gestão dos recursos rádio.

As principais funcionalidades do eNB são:

- Transmissão dos dados – A transmissão e receção de dados é feita através da interface rádio. Os utilizadores usam a interface rádio para se ligarem à rede EPS, garantindo assim o acesso aos seus serviços em qualquer lugar. O eNB é responsável pela modulação e desmodulação dos sinais, bem como pela codificação e decodificação do canal rádio.
- Coordenação da interferência *Inter-cell* – Esta função tem como objetivo efetuar a gestão dos recursos rádio de forma a manter controlada a interferência entre diferentes células. Para isso é necessária a troca de informação do estado dos diferentes canais rádios associadas às diferentes células.
- Balanceamento da carga – Esta funcionalidade faz a gestão de tráfego de forma a garantir um balanceamento da carga entre as diferentes células. Assim, baseado no estado atual da rede, podem ser tomadas decisões que levam à decisão de *handover* de forma a redistribuir o tráfego. Desta forma, consegue-se otimizar a utilização dos recursos rádio, garantindo uma *Quality of Service* (QoS) aos utilizadores. Simultaneamente assegura-se a diminuição da probabilidade de queda de chamadas.
- Sincronização - Para garantir a sincronização da rede EPS, cada eNB tem uma porta lógica para possibilitar a receção do relógio de uma forma independente do método de sincronismo escolhido.

- Mobilidade – Esta funcionalidade gere a mobilidade do terminal enquanto este permanece no estado ativo. Caso o terminal esteja em modo *idle*, a gestão é efetuada pelo *core network*. Para a correta execução desta funcionalidade, é necessário a existência de medidas da qualidade do sinal rádio bem como, a existência de algoritmos de *handover* que determinem o momento em que o *handover* deverá ser executado e definam a célula alvo.
- *Paging* – A função de *Paging* permite pedir a um específico UE que contate a E-UTRAN quando o terminal está no modo *idle* ou ser endereçado de uma mensagem de aviso (PWS) quando o UE está no modo *connected*.

### 2.2.2 EPC

A EPC é uma nova rede core baseada em IP, desenvolvida para suportar os requisitos dos serviços em tempo real de alto débito, assegurando uma melhor *Quality of Experience* (QoE) aos utilizadores. O domínio *Circuit Switch* (CS) deixa de existir, sendo todos os serviços, real-time ou não real-time, suportados pela rede de pacotes definida no domínio *Packet Switch* (PS).

A EPC é constituída por quatro elementos principais:

- *Mobility Management Entity* (MME): É o equivalente ao *Mobile Switching Center* (MSC) e ao *Visitor Location Register* (VLR) na rede UMTS. O MME lida com a sinalização e controlo, a gestão da mobilidade e o modo inativo manipulando a distribuição da paginação das mensagens para o eNodeB. Estas funcionalidades facilitam a otimização das redes implementadas e permite flexibilidade total na ampliação da capacidade. O MME também faz a gestão do acesso do UE à rede através da interação com o *Home Subscriber Server* (HSS) de forma a autenticar os utilizadores e também com a verificação dos perfis lá definidos. Fornece a função do plano de controlo para permitir a mobilidade contínua entre o LTE e as redes móveis 3G/2G. O MME é ainda o elemento de rede que suporta as interações legais de sinalização.
- *Serving-Gateway* (S-GW): Atua como o ponto de terminação entre a rede de acesso rádio (E-UTRAN) e a rede *Core*. Encaminha os pacotes de dados de e para o eNodeB e também para o P-GW. O S-GW é responsável pela contabilização e o controlo dos dados do utilizador. Também serve de âncora de

mobilidade local para os *handovers* entre eNodeBs ou para a passagem entre redes 3GPP (Figura 2-1) e informa o tráfego do utilizador no caso de intercepção legal.

- *Packet Data Network Gateway (P-GW)*: Serve como ponto de entrada e de saída do tráfego de dados do UE, de interface entre as redes LTE e as redes de pacotes de dados tais como a *Internet* com origem nas redes fixas ou móveis as quais são baseadas em *Session Initiation Protocol (SIP)* ou em *IP Multimedia Subsystem (IMS)*. Realiza a execução de políticas através da aplicação das regras definidas pelo operador para a atribuição e utilização de recursos. O P-GW faz a gestão da atribuição de endereços IP e suporta a filtragem de pacotes para cada utilizador. Ainda oferece suporte à tarifação e serve de âncora para a mobilidade entre redes 3GPP e redes não 3GPP (Figura 2-1).
- *Policy and Charging Rules Function (PCRF)*: Dá permissão ou rejeita pedidos de multimédia. Cria e faz a atualização do *PDP context activation (PDP)* e controla a atribuição de recursos. Também fornece as regras de tarifação com base no fluxo de serviços de dados para o P-GW.

### 2.2.3 Interfaces

A ligação entre os vários nós descritos acima é realizada através de interfaces as quais podem ser separadas em dois grupos e podem ser visualizadas na Figura 2-2 e descritas na Tabela 2-1.

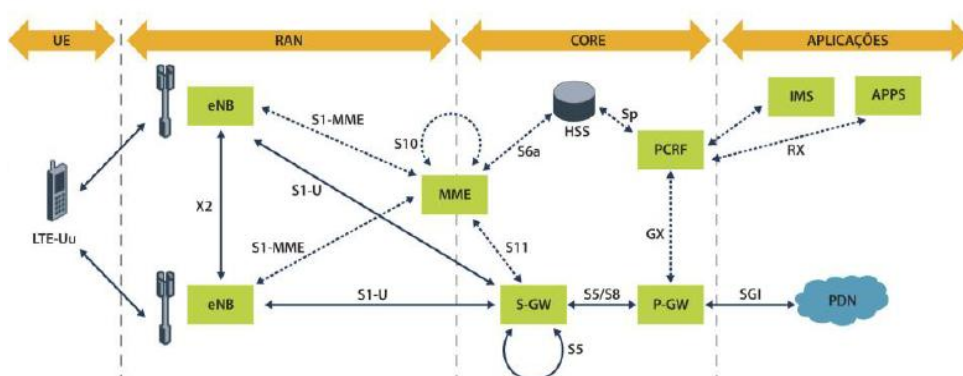


Figura 2-2 Interfaces utilizados no LTE (extraído de [3]).

Tabela 2-1 Interfaces do LTE e sua função.

Interfaces Plano de Controlo	Função
S1-MME	Ponto de referência entre a <i>E-Utran</i> e o <i>MME</i> para troca de sinalização. O protocolo de sinalização entre o eNB e o <i>MME</i> é o S1AP (S1 Protocolo Aplicacional)
Gx	É através desta interface que o PCRF transfere as políticas de qualidade de serviço e de tarifação para o P-GW.
Rx	Interface entre o PCRF e o IMS P-CSCF
S6a	Interface entre o MME e o HSS que permite a transferência de dados de subscrição e de autenticação;
Interfaces Plano de Utilizador	Função
X2	Esta interface é definida entre os eNB's possibilitando a transferência de dados do utilizador. É também através deste ponto de referência que é efetuada a gestão da carga das antenas bem como a coordenação dos <i>handovers</i> . Utiliza o protocolo X2AP (X2 Protocolo Aplicacional) para troca de sinalização entre os eNB's.
S1-U	Ponto de referência entre a E-UTRAN e o S-GW para o fluxo de dados do utilizador.
S11	Este é o ponto de referência entre o MME e o S-GW. É usado para troca de sinalização.
S5	Este ponto de referência permite a transferência de dados do utilizador entre o S-GW e o P-GW.
SGI	Esta interface liga a rede EPS às redes externas de pacotes, permitindo o acesso à internet.
S10	Ponto de referência entre diferentes MME usado para a reatribuição de MME.

### 2.3 Requisitos do LTE

O LTE foi desenhado para ser bastante competitivo nos próximos anos e de forma a garantir isso os requisitos foram bastante ambiciosos, Tabela 2-2.

A flexibilidade espectral permite que o LTE seja implementado conforme as necessidades, em bandas atribuídas para o efeito, como os 2.6 GHz, ou no espectro radioelétrico libertado por outros sistemas. Por exemplo, com a terminação da televisão analógica em Portugal o espetro dos 800 MHz ficou livre para a utilização no LTE.

Por esse motivo é requerido que o LTE opere numa grande variedade de bandas de frequência, larguras de banda e dois métodos de duplexing TDD e FDD (Anexo B).

Utiliza-se 15kHz no espaçamento da sub-portadora pois reduz a complexidade de um sistema que utiliza largura de banda com múltiplos canais.

Tabela 2-2 Parâmetros e Benefícios do LTE.

Parâmetros	Benefícios
Débitos de Pico (Espectro a 20 MHz) DL: 100 Mbps / UL: 50 Mbps	Suporta interatividade em tempo real e aplicações ricas em multimédia
Latência Baixa Plano de Controlo: <100 ms (inativo para ativo) Plano de Utilizador: <5 ms Latência do Utilizador: <10 ms	Suporta web browsing, FTP, video streaming, VoIP, jogos online
Mobilidade	Suporta passagem para outras tecnologias, Suporta velocidades até 350 km/h, mas a otimização é feita para velocidades baixas (0 até 15 km/h)
Flexibilidade e escalabilidade do Espectro - 1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz	O LTE pode ser implementado em qualquer das larguras de banda apresentadas, cabendo ao operador a escolha de largura de banda, podendo começar por uma largura pequena e caso exista necessidade ir aumentando-a.
QoS otimizada	São criados mecanismos que garantem a diferenciação entre os pacotes através de requisitos de QoS

## 2.4 Camada Física LTE

É pela camada física que o LTE transmite dados e informações de controlo entre a estação base E-UTRAN e equipamento do utilizador de forma eficaz. Nesta secção descrevem-se, de forma sucinta, as diferentes técnicas de multiplexagem para a ligação descendente e ascendente, utilizados na camada física.

### 2.4.1 Ligação Descendente

O LTE utiliza o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) como esquema de multiplexagem na ligação descendente. O OFDM, é uma técnica de transmissão

digital baseado no conceito de modulação com multi-portadoras, o que permite atingir elevadas taxas de transmissão.

O OFDM tira partido da ortogonalidade entre as sub-portadoras permitindo a divisão de uma única transmissão em múltiplos sinais e enviando-os em diferentes frequências, Figura 2-3. 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.

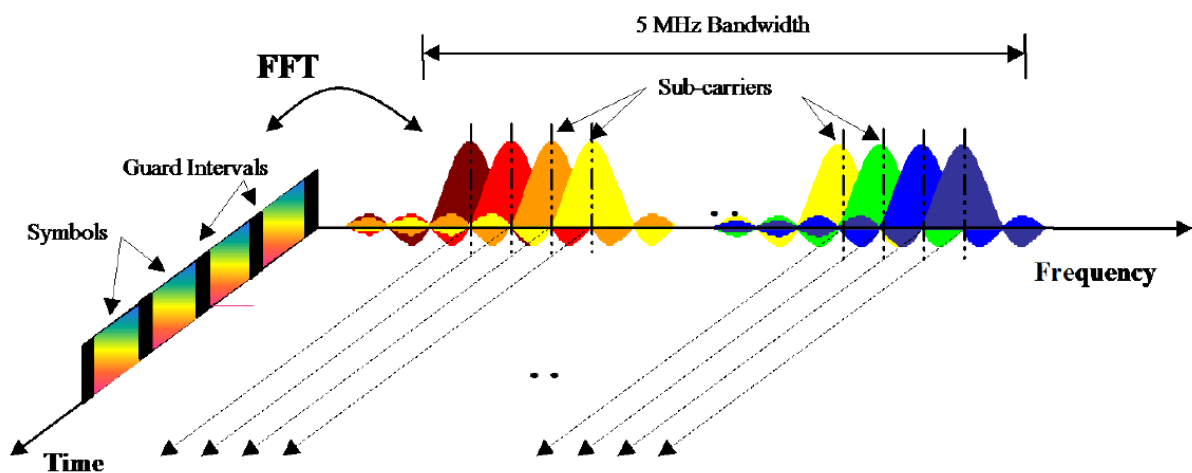


Figura 2-3 Símbolos OFDM no tempo (extraído de [3]).

Na Tabela 2-3 são apresentados os valores por defeito para diversos parâmetros utilizados na transmissão. O *OFDM* utiliza várias sub-portadoras espaçadas de 15 kHz entre si, de modo a otimizar a eficiência espectral, evitando assim a sobreposição do espectro. Na Figura 2-4 observa-se a estrutura de uma sub-trama OFDM, onde cada bloco de recursos contém 12 sub-portadoras, com 7 ou 6 símbolos para o *Cyclic Prefix* (CP) curto ou longo, respetivamente. 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.

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.

Tabela 2-3 Parâmetros chave para cada largura de banda do canal.

Parâmetros	Valores					
Largura de Banda [MHz]	1,4	3	5	10	15	20
Sub-Trama (TTI[ms])	1					
Número de Blocos de Recursos	6	15	25	50	75	100
Espaçamento da Sub-Portadora [kHz]	15					
Amostragem [MHz]	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Sub-Portadoras	72+1	180+1	300+1	600+1	900+1	1200+1
Símbolos por trama	4 com CP curto e 6 com CP longo					
Prefixo Cíclico	4,69 $\mu$ s com CP curto e 16,67 $\mu$ s com CP longo					

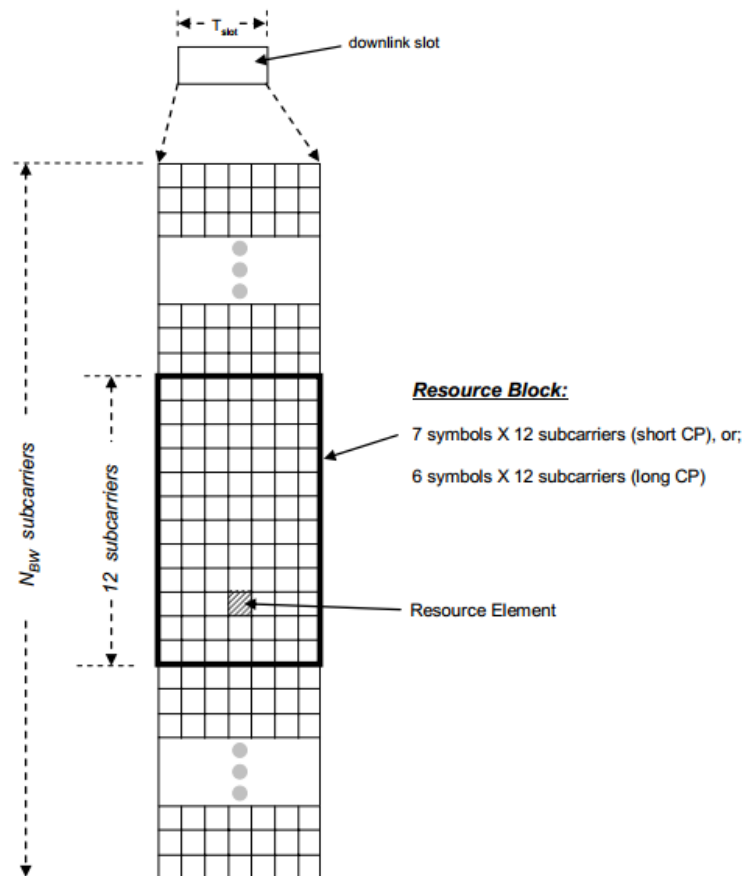


Figura 2-4 Estrutura de uma sub-trama OFDM (extraído de [4]).

### 2.4.2 Ligação Ascendente

Na ligação ascendente é utilizado *Single Carrier Frequency Division Multiplexing* (SC-FDM) como esquema de multiplexagem. A forma básica de SC-FDM pode ser

vista como sendo igual à modulação *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), onde cada símbolo é transmitido um de cada vez, à semelhança do método *Time Division Multiple Access* (TDMA) 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) [4]. Este fator 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 2-5 pode-se comparar os dois esquemas de multiplexagem, onde é possível observar o exemplo do envio de uma sequência de símbolos modulados em QPSK.

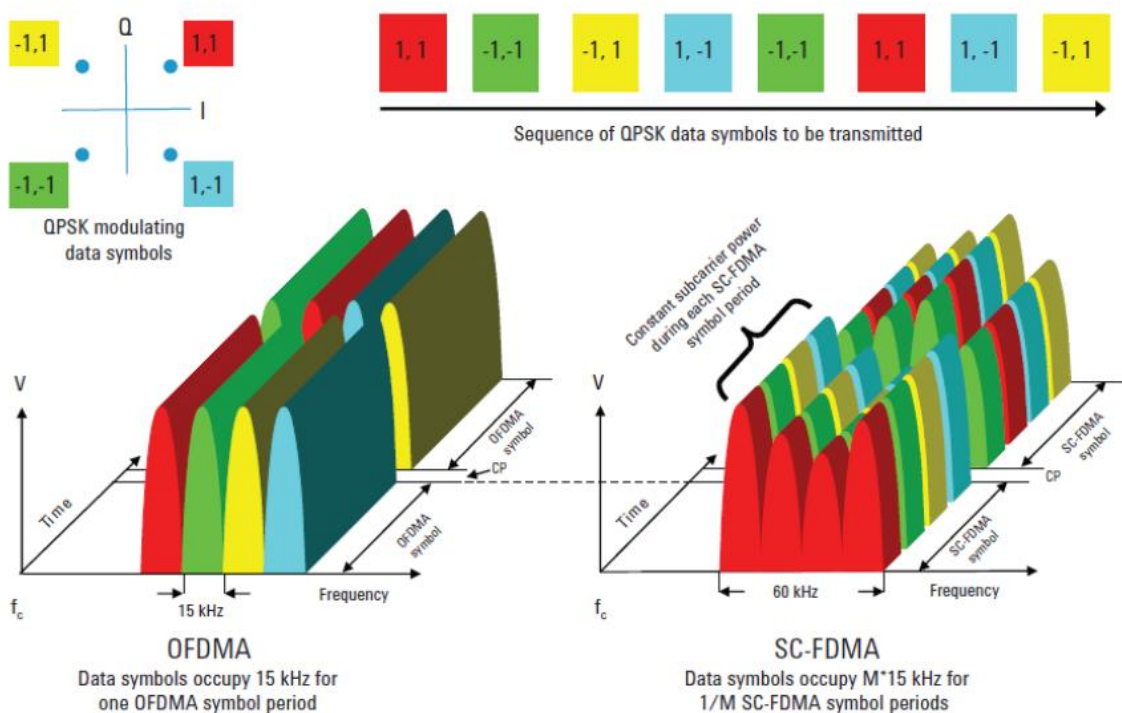


Figura 2-5 Comparação entre OFDMA e SC-FDMA (extraído de [5]).

## 2.5 Cobertura e Capacidade

O débito obtido pelo utilizador final depende de vários parâmetros, tais como, o tipo de modulação usada, o rácio de código do canal, a configuração das antenas se é

MIMO e qual o modo, quantidade de utilizadores na célula, incluindo se é utilizado o CP curto ou longo e o número de RBs atribuídos por largura de banda. O débito binário pode ser calculado da seguinte forma para o DL.

$$R_b[\text{Mbps}] = \frac{N_{SC}^{RB} \times N_{RB}^u \times N_{symb}^{SF} \times \log_2 m \times N_{streams}}{10^3 \times T_{SF}[\text{ms}]} \quad (2.1)$$

onde:

- $N_{SC}^{RB}$  número de sub-portadoras por *resource block* (assume-se 12 para um espaçamento por sub-portadora de 15kHz);
- $N_{RB}^u$  número de *resources blocks* utilizados por um utilizador;
- $N_{symb}^{SF}$  número de símbolos por sub-trama (14 símbolos para o Prefixo Cíclico Normal e 12 para o Prefixo Cíclico Longo);
- $m$  ordem da modulação considerada;
- $N_{streams}$  número de *streams*, em caso de utilização de MIMO;
- $T_{SF}$  período da sub-trama, 1ms.

Como a dimensão de um RB é igual e independentemente da largura de banda que se esteja a utilizar, calculou-se o número de RBs por cada largura de banda (Tabela 2-3) e os débitos binário de pico atingidos para o DL, Tabela 2-4. Note-se que estes valores são apenas atingidos em condições ideais de rádio, [6].

Tabela 2-4 Débitos de pico da camada física para DL (adaptado de [7]).

Débitos de pico da camada física para DL [Mbps]							
Modulação e Codificação		Número de sub-portadoras / Largura de Banda [MHz]					
		72/1,4	180/3	300/5	600/10	900/15	1200/20
QPSK ½	Single Stream	0,9	2,2	3,6	7,2	10,8	14,4
16-QAM ½		1,7	4,3	7,2	14,4	21,6	28,8
16-QAM ¾		2,6	6,5	10,8	21,6	32,4	43,2
64-QAM ¾		3,9	9,7	16,2	32,4	48,6	64,8
64-QAM 1/1		5,2	13,0	21,6	43,2	64,8	86,4
64-QAM ¾	2X2	7,8	19,4	32,4	64,8	97,2	129,6
64-QAM 1/1	MIMO	10,4	25,9	43,2	86,4	129,6	172,8
64-QAM 1/1	4X4 MIMO	16,6	47,7	80,3	160,6	240,9	321,2

As modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM têm respetivamente 2, 4 e 6 bits por símbolo e o uso de MIMO permite duplicar o valor do débito obtido. Desta forma, para QPSK com uma taxa de código de  $\frac{1}{2}$  obtém-se 1 bps/Hz e para 64-QAM sem codificação e com MIMO 2x2 obtém-se 12 bps/Hz. Na Tabela 2-5 é apresentado o débito binário de pico atingível para o UL. O débito binário de pico é inferior no UL face ao DL devido às limitações dos terminais (Anexo C).

Tabela 2-5 Débitos de pico da camada física para UL (adaptado de [7]).

Débitos de pico da camada física para UL [Mbps]							
Modulação e Codificação		Número de sub-portadoras / Largura de Banda [MHz]					
		72/1.4	180/3	300/5	600/10	900/15	1200/20
QPSK $\frac{1}{2}$	SISO	0,9	2,2	3,6	7,2	10,8	14,4
16-QAM $\frac{1}{2}$		1,7	4,3	7,2	14,4	21,6	28,8
16-QAM $\frac{3}{4}$		2,6	6,5	10,8	21,6	32,4	43,2
16-QAM 4/4		3,5	8,6	14,4	28,8	43,2	57,6
64-QAM $\frac{3}{4}$		3,9	9,0	16,2	32,4	48,6	64,8
64-QAM 4/4		5,2	13,0	21,6	43,2	64,8	86,4

A largura de banda é incluída no cálculo através do correspondente número de sub-portadoras existindo para 1.4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz respetivamente 72, 180, 300, 600, 900 e 1200 sub-portadoras. Para a realização do cálculo assume-se ainda 13 símbolos para dados por trama de 1 ms [7]. As especificações ainda são cautelosas acerca do MIMO num utilizador ou em múltiplos utilizadores, aproveitando a vantagem das diferentes antenas dos utilizadores.

## 2.6 Modulação Adaptativa e Codificação

Nos sistemas de comunicações móveis, a qualidade do sinal recebido pelo terminal, depende da qualidade do canal da célula servidora, do nível de interferência de outras células e do nível de ruído. Para otimizar a cobertura e a capacidade para uma dada potência de transmissão, o transmissor tem de comparar a informação de débito de cada utilizador conforme for a variação do sinal recebido [8]. Este procedimento é normalmente referido como adaptação do canal sendo baseado na *Adaptive Modulation and Coding* (AMC). A AMC consiste na adaptação ao canal dos níveis de modulação e dos códigos de canal.

Os esquemas de modulação de baixa ordem (poucos bits por símbolo, como é o caso do QPSK) são mais robustos e toleram níveis de interferência mais altos mas fornecem débitos de transmissão mais baixo. Com as modulações de ordem mais alta (modulação 64-QAM) acontece exatamente o oposto, o UE está mais suscetível às interferências, ruído, mas com débitos de transmissão mais elevados. Este último tipo de modulação só é utilizado quando o SINR é suficientemente alto.

Relativamente aos códigos de canal para uma dada modulação, é escolhida uma determinada taxa de códigos consoante as condições rádio. Se o SINR for baixo é atribuído uma taxa de código baixa mas se o SINR for alto é atribuído uma taxa de código elevada.

Em LTE, nas transmissões de dados no DL, o eNodeB tipicamente seleciona a *Modulation and Coding Scheme* (MCS) dependendo do *feedback* que é transmitido pelo terminal no UL no *Channel Quality Indicator* (CQI). O *feedback* do CQI é uma indicação de qual poderá ser a taxa de dados suportada pelo canal, na qual é tida em conta o SINR e as características do terminal do utilizador. Na resposta ao *feedback* do CQI podem ser escolhidas as seguintes esquemas de modulações: QPSK, 16-QAM e 64-QAM aos quais podem estar associados diferentes taxas de códigos.

Nas transmissões em UL, o processo de adaptação do canal é similar ao do DL, com a seleção dos MCS a estarem ainda sob o controlo do eNodeB. Também no UL existem esquemas de modulação que podem ser selecionados conforme for as condições rádio: QSPK e 16-QAM.

Um método simples, segundo o qual o terminal pode escolher um valor apropriado de CQI é se for baseado nos intervalos de *Block Error Rate* (BLER). O terminal irá reportar os valores de CQI correspondentes ao MCS que garanta que o  $BLER \leq 10\%$  tendo por base as medidas de qualidade recebidas. Na Tabela 2-6 pode-se observar os esquemas de modulação e as taxas de códigos referentes aos valores de CQI os quais estão suportados pelos padrões do 3GPP LTE.

Tabela 2-6 Combinação de esquemas de modulação, eficiência espectral, taxa de códigos e MCS em LTE (adaptado de [29]).

CQI idx	Spectral Efficiency [bps/Hz]	Number of Symbols/ Modulation	Approximate Code Rate	MCS idx	
1	0,152344	2 - QPSK	0,08	1	
	0,193359		0,10	2	
2	0,234375		0,12	3	
	0,305664		0,15	4	
3	0,376953		0,19	5	
	0,489258		0,24	6	
4	0,601563		0,30	7	
	0,739258		0,37	8	
5	0,876953		0,44	9	
	1,026367		0,51	10	
6	1,175781		0,59	11	
	1,326172		0,33	12	
7	1,476563		4 – 16-QAM	0,37	13
	1,695313			0,42	14
8	1,914063			0,48	15
	2,160156	0,54		16	
9	2,40625	0,60		17	
	2,568359	0,64		18	
10	2,730469	6 – 64-QAM		0,46	19
	3,026367			0,50	20
11	3,322266		0,55	21	
	3,612305		0,60	22	
12	3,902344		0,65	23	
	4,212891		0,70	24	
13	4,523438		0,75	25	
	4,819336		0,80	26	
14	5,115234		0,85	27	
	5,334961		0,89	28	
15	5,554688		0,93	29	

## 2.7 Análise de Desempenho

Como seria de esperar, os débitos máximos apenas são conseguidos com condições rádio excelentes, para isso, tem de se evitar a interferência de outras células e o ruído. No LTE, o SNIR  $\rho_{IN}$  *Downlink Shared Channel* (DSCH) é utilizado como um indicador de desempenho, e é representado simplesmente como uma função de interferência e de ruído [9].

$$\rho_{IN} = \frac{P_{DSCH[W]}}{\sum_{S=1}^S \gamma_S \times P_{Inter,max\ s[W]} + N_{RF[W]}} \quad (2.2)$$

onde:

- $P_{DSCH}$  potência recebida no DSCH;
- $\gamma_S$  atividade de sub-portadora com um fator de célula  $s$ ;
- $P_{Inter,max\ s}$  potência máxima de interferência entre células no limite da célula  $S$ ;
- $N_{RF}$  potência de ruído.

A partir de (2.2) podemos observar a troca entre a capacidade da rede limitada pela interferência causadas pelas células. O SINR está assim diretamente correlacionado com o débito médio obtido.

Na prática, tanto a modulação adaptativa como a codificação, bem como a frequência do escalonador de pacotes, dependem das informações de estado do canal. A adaptação do caminho no DL é primeiramente ponderada pelo *feedback* do CQI, que é enviado pelos utilizadores que se encontram na célula, enquanto no UL o *Channel State Information* (CSI) é estimado a partir dos sinais de referência transmitidos pelo utilizador. Além disso o *Rank Indicator* (RI) e o *Pre-coding Matrix Indicator* (PMI) são essenciais para utilização de MIMO, os quais apenas devem ser considerados quando o SINR está abaixo dos 10 dB [9].

Como foi definido nos requisitos iniciais, o LTE fornece uma eficiência espectral elevada, Figura 2-6, apesar de a capacidade de *Shannon* prometer, este não pode ser alcançado na prática, devido a vários problemas de implementação.

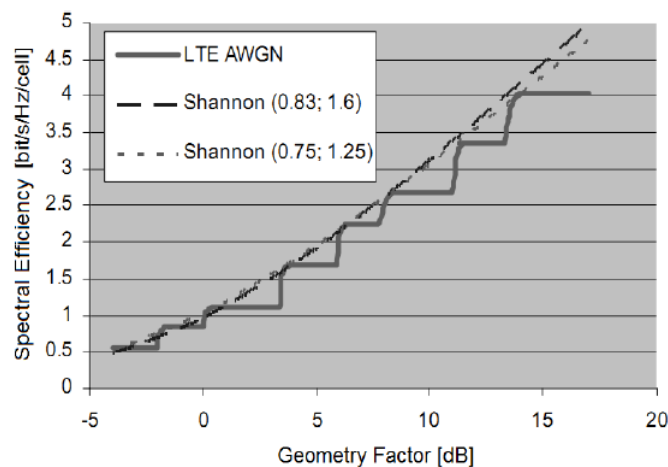


Figura 2-6 Eficiência Espectral no LTE em função do *Geometry Factor* (extraído de [2]).

Em conjunto, os requerimentos relativos ao espaço vazio entre canais adjacentes e a implementação de filtros práticos reduzem a ocupação da largura de banda para 90%. Adicionalmente, o CP, o *pilot overhead* para a estimação do canal e as duas antenas para transmissão reduzem ainda mais a eficiência da largura de banda para 83% [2]. Ainda assim consegue-se obter uma eficiência espectral elevada em ambos os canais (DL/UL). Apesar de o *Link Budget* no DL em LTE ter várias semelhanças com o UMTS no UL existem várias diferenças, como por exemplo, as interferências são mais pequenas devido à ortogonalidade dentro da célula e o ganho obtido devido à possibilidade de utilização de MIMO. Assim, o LTE por si só não fornece um aumento na cobertura ou no desempenho em débitos baixos mais do que se consegue com o UMTS [10].

## 3 Modelos Teóricos

### 3.1 Parâmetros de Desempenho

Os parâmetros que têm impacto no débito binário estão fortemente dependentes das condições rádio e da carga existente na rede. Neste capítulo estes parâmetros são identificados e caracterizados de forma a construir-se um modelo de referência.

#### 3.1.1 Reference Signal Reference Power

O *Reference Signal Reference Power* (RSRP) é usado para medir a cobertura LTE no DL. O equipamento terminal vai enviando *Radio Resource Control Measurements Reports (RRC MR)* para o eNB os quais incluem os valores de RSRP. O mapeamento encontra-se na Tabela 3-1. Os valores de RSRP estão compreendidos entre os -140 e os -44 dBm com um 1 dB de resolução. É através do RSRP que é determinado qual é a melhor célula no DL da interface rádio o que faz com que esta célula seja escolhida para um acesso aleatório ou para a realização de *handover* em LTE. Claro que todos estes MR com valores de RSRP serão enviados para o eNB mas de uma forma controlada pois existem critérios para que tal aconteça, [11].

Tabela 3-1 Mapeamento do RSRP (adaptado de [11]).

Valor Reportado	Valor Medido [dBm]
RSRP_00	RSRP < -140
RSRP_01	$-140 \leq \text{RSRP} < -139$
RSRP_02	$-140 \leq \text{RSRP} < -139$
...	
RSRP_95	$-46 \leq \text{RSRP} < -45$
RSRP_96	$-45 \leq \text{RSRP} < -44$
RSRP_97	$-44 \leq \text{RSRP}$

Existe uma correlação entre o RSRP e a QoS no plano do utilizador. Podendo ser classificados os valores de RSRP em 3 categorias. Se o RSRP for maior do que -75 dBm é considerado que o QoS é excelente. Se os valores estiverem entre -95 e -75 dBm pode-se esperar que o QoS sofra uma ligeira degradação sendo esperado que o débito binário tenha um decréscimo entre os 30 a 50%. Se o RSRP for inferior a -

95 dBm o QoS torna-se inaceitável, tendendo o débito binário para zero quando se entra no intervalo dos -108 a -100 dBm. Na secção 4.2, utilizando os dados das redes comerciais chegamos a conclusão que estes intervalos não estão bem definidos.

### 3.1.2 Reference Signal Reference Quality

Tal como no RSRP o *Reference Signal Reference Quality* (RSRQ) é usado para determinar a melhor célula LTE num determinado local geográfico, e também serve de critério para a escolha da célula para acesso aleatório como para *handover*. Como pode ser observado na

Tabela 3-2 o RSRQ é definido entre os -19.5 e os -3 dB, com uma resolução de 0.5 dB.

Tabela 3-2 Mapeamento do RSRQ (adaptado de [11])

Valor Reportado	Valor Medido [dB]
RSRQ_00	RSRQ < -19.5
RSRQ_01	-19.5 ≤ RSRQ < -19
RSRQ_02	-19 ≤ RSRQ < -18.5
...	
RSRQ_32	-4 ≤ RSRQ < -3.5
RSRQ_33	-3.5 ≤ RSRQ < -3
RSRQ_34	-3 ≤ RSRQ

Quando se comparam os resultados medidos (tem de ser no mesmo local geográfico) para o RSRQ e RSRP, no *protocol trace* utiliza-se por exemplo uma correlação no tempo como é a data e hora. Assim é possível determinar se existem problemas de cobertura ou de interferência para aquele determinado local, Figura 3-1. Se um terminal móvel muda de posição ou se as condições rádio mudam devido a outras razões e o RSRP se mantém estável ou fica melhor do que estava enquanto o RSRQ se degrada, isto significa interferência. Se por outro lado tanto o RSRP como o RSRQ se degradam ao mesmo tempo isto é um claro sinal de falta de cobertura. Esta avaliação é muito importante para descobrir qual a causa de queda de chamadas devido a problemas rádio.

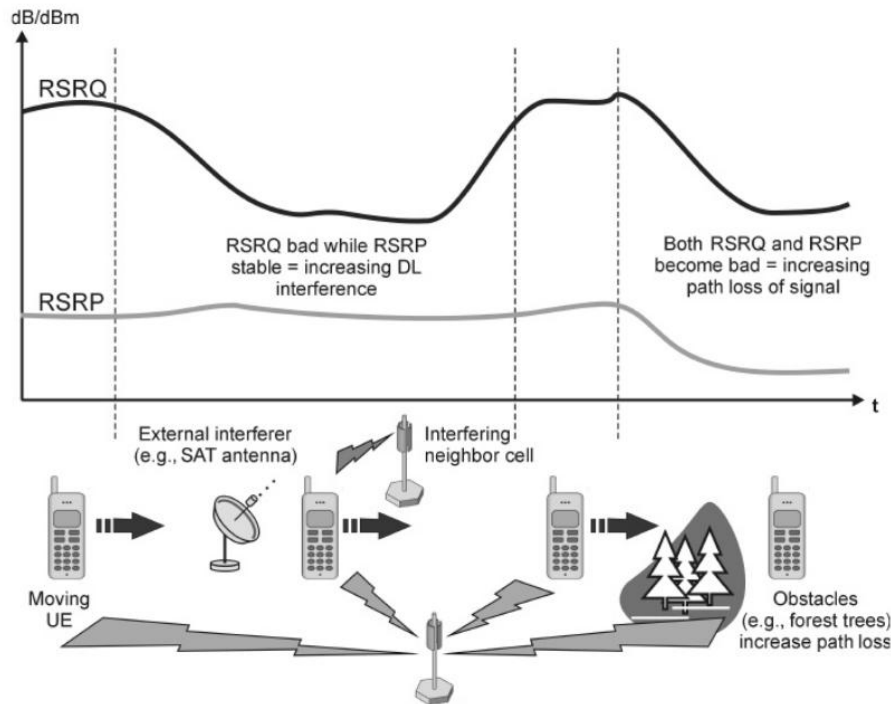


Figura 3-1 Problemas de cobertura e interferência no LTE (extraído de [11]).

Tal como foi descrito para o RSRP, também o RSRQ pode ser definido em 3 intervalos, mas devido à pouca carga que ainda existe nas redes estes intervalos ainda precisam de monitorização para serem mais concretos. Apesar de tudo pode-se afirmar que se o RSRQ for superior a -9 dB o utilizador terá uma boa experiência. Se o intervalo estiver entre -12 e -9 dB irá começar-se a sentir uma degradação no QoS mas no geral o utilizador ainda estará satisfeito com os resultados obtidos. Abaixo dos -13 dB os débitos obtidos são muito fracos podendo mesmo levar a que ocorram quebras nas ligações ou passagem para outras redes como é o caso do UMTS ou GSM [11].

### 3.1.3 Multiple Input Multiple Output

O sistema LTE foi desenhado de forma a fornecer débitos elevados, na ordem das centenas de megabits por segundo, o que representa um aumento substancial face aos débitos oferecidos atualmente pelo 3G os quais situam-se na ordem dos 42 Mbps utilizando a funcionalidade de *Dual Carrier*. As redes móveis estão sujeitas a interferências, multipercurso e canais com baixas características de propagação, o que limita o débito binário. A utilização das técnicas de MIMO possibilita o aumento dos débitos binários através da exploração das características de multipercurso dos

canais móveis. Este aumento é conseguido com a utilização de diversas antenas para transmissão (Tx) e receção (Rx) dos sinais, o que reforça a dimensão espacial resultante da utilização de múltiplas antenas distribuídas espacialmente (daí o termo *Multiple Input Multiple Output* – MIMO). Quando os sinais são combinados corretamente no recetor, a qualidade do sinal e o débito binário para cada utilizador de MIMO é melhorado, Figura 3-2.

Um fator preponderante no desempenho do MIMO é o número de “camadas espaciais” (“*spatial layers*”) do canal móvel, o que determina a capacidade de melhorar a eficiência espectral. As camadas espaciais formam-se fora do ambiente de multipercurso e dispersão, entre os transmissores e os recetores. Outro fator é o número de antenas de transmissão e de receção. O aumento do débito binário de um sistema MIMO é linearmente proporcional ao número mínimo de antenas de transmissão e receção sujeitas ao limite do “*rank*” da estimativa de propagação do canal. O rank é a medida do número independente de camadas espaciais. Ou seja, um sistema MIMO com 4 antenas de transmissão (4Tx) e 2 antenas de receção (2Rx) oferece o dobro do débito binário [i.e.,  $\min(4,2) = 2$ ] uma vez que existem duas camadas espaciais ( $\text{rank} = 2$ ) no canal móvel. Em condições de linha de vista, o rank da matriz do canal é igual a um portanto, mesmo com 4 antenas não é possível aumentar a eficiência espectral do canal.

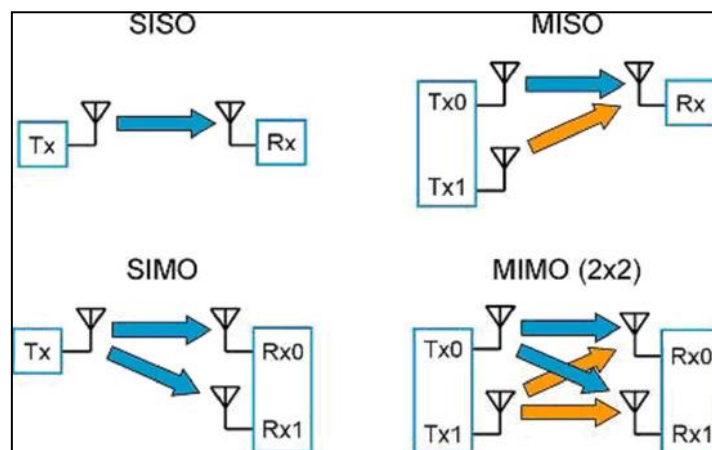


Figura 3-2 Sistemas de Acesso de Múltiplas Antenas (extraído de [12]).

Dos 7 modos MIMO definidos no DL para LTE [13] apenas se descreve os Modos 2 e 3 pois foram os únicos que foram detetados durante as recolhas de medidas nas redes comerciais.

Modo 2 – *Transmit-Diversity*: Este modo envolve transmitir o mesmo fluxo de informação em múltiplas antenas (o LTE suporta a opção de duas ou quatro antenas). O fluxo de informação é codificado de forma diferente para cada antena utilizando “*Space-Frequency Block Codes*” (SFBC). Ao contrário do “*Space-Time Block Codes*” de Alamouti, onde os símbolos são repetidos no tempo, o SFBC repete os símbolos em diferentes sub-portadoras em cada antena.

Este modo é utilizado no LTE por omissão para os canais comuns tal como para os canais de controlo e de transmissão. Uma vez que se trata de uma “transmissão de camada única”, não aumenta o débito binário. Por sua vez, a qualidade do sinal torna-se mais robusta e um SINR mais baixo chega para decodificar o sinal.

Modo 3 – *Open Loop Spatial Multiplexing* (OL-SM): Neste modo são transmitidos dois fluxos de informação (duas palavras de código) através de duas ou mais antenas (até 4 no LTE). Não existe nenhuma informação de retorno por parte do terminal móvel, no entanto, um *Transmit Rank Indication* (TRI) é transmitido pelo terminal e este é utilizado pela estação base, eNodeB, de forma a selecionar o número de camadas espaciais.

Como são transmitidos múltiplas palavras de código, este modo oferece picos de débito mais elevados que o Modo 2. Este modo é mais fácil de implementar e é atualmente um dos principais modos de MIMO a ser implementado nos sistemas de LTE.

Na Tabela 3-3 resume-se a matriz de decisão para selecionar os modos MIMO mais aconselháveis para cada cenário. Com a variação do cenário e das características do canal móvel, é possível adaptar-se dinamicamente entre certos modos.

Tabela 3-3 Matriz de Decisão para os Principais Modos MIMO no LTE (adaptado de [13]).

Modo MIMO	Qualidade de Sinal (SINR)	Velocidade	Dispersão	Adaptação dinâmica
Modo 2 - <i>Transmit Diversity</i>	Baixa	Alta	Baixa	Nenhuma
Modo 3 - <i>Open Loop Spatial Multiplexing</i>	Alta	Alta	Alta	Modo 2 - <i>Transmit Diversity</i>

Na Figura 3-3 observa-se a diferença que existe entre os Modos 2 e 3. Neste caso a simulação foi executada para uma largura de banda de 5 MHz com uma configuração MIMO 2x2.

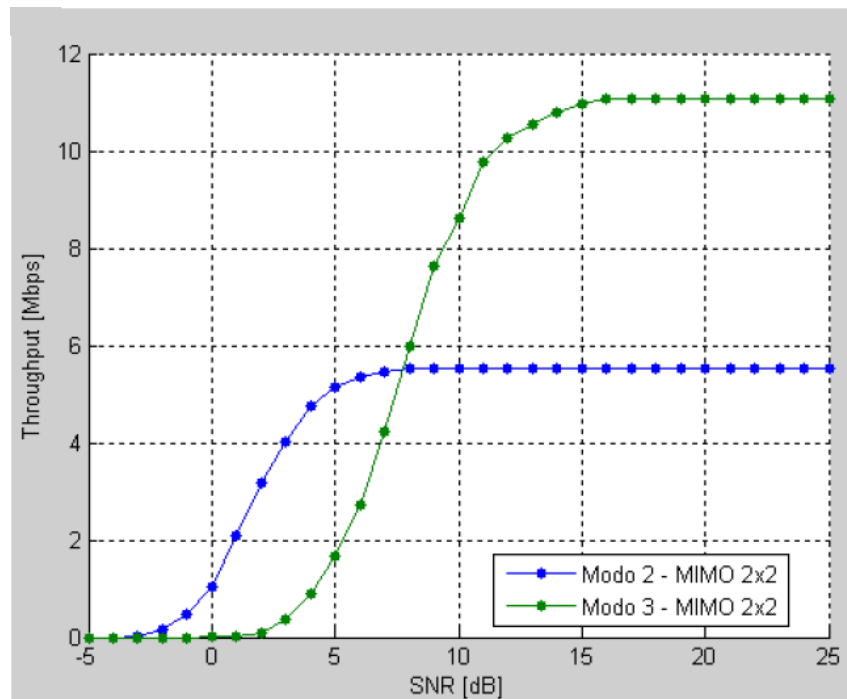


Figura 3-3 Comparação entre os Modos 2 e 3 do MIMO (extraído de [14]).

### 3.1.4 Channel Quality Indicator

Um UE pode ser configurado para enviar informação acerca do CQI de forma a auxiliar o eNodeB na seleção do MCS a utilizar apropriado para a transmissão no DL. Essa informação do valor do CQI é derivada da qualidade do sinal recebido, normalmente baseada em medições do sinal de referência do DL. O UE informa qual é o maior MCS que pode decodificar com uma probabilidade de taxa de erros de blocos transportados não superior a 10%. Assim, a informação recebida pelo eNB leva em linha de conta as características do recetor do UE e não apenas a qualidade dos canais rádio existentes. Desta forma, um UE que utilize algoritmos avançados de processamento de sinal (ex.; utilizando técnicas de cancelamento de interferência) pode informar que tem uma qualidade superior do canal e, dependendo das características de escalonamento do eNB, pode receber um débito binário superior. Na Figura 3-4 observa-se o mapeamento teórico do SNR-CQI.

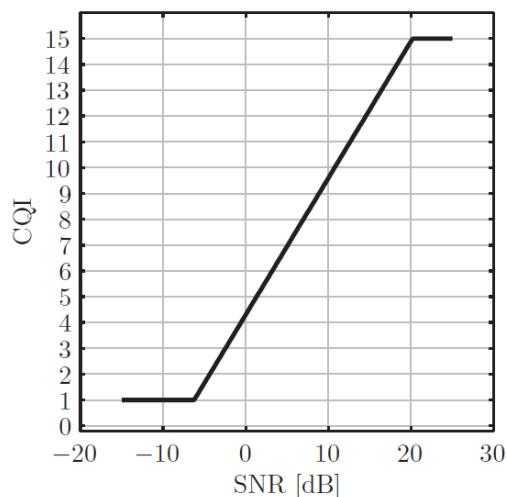


Figura 3-4 Modelo mapeado de SNR - CQI (extraído de [15]).

### 3.2 Cálculo do SNR

Nesta secção encontram-se modelos de LTE baseados em configurações MIMO 2X2 com modulações de 16 e 64-QAM de forma a determinar o SNR e o débito binário em cenários veiculares e pedestres tanto para ligações ascendentes como descendentes. Estes modelos serão depois comparados com os dados obtidos em redes comerciais no capítulo 4.

As equações que são apresentadas de seguida são derivações do débito na camada física e do SNR. A base destas equações foi obtida através de medidas recolhidas as quais se encontram documentadas no 3GPP. Os modelos dos canais escolhidos são caracterizados em termos da máxima frequência de Doppler e do máximo espalhamento de propagação. Foi assumido que a largura da banda é de 10 MHz e se está a usar um prefixo cíclico normal com canais *Extended Pedestrian A* (EPA) e *Extended Typical Urban* (ETU), Tabela 3-4.

Tabela 3-4 Modelos dos canais usados em termos da frequência de Doppler e do espalhamento de atraso (extraído [14]).

Modelo do Canal	Frequência de Doppler [Hz]	Espalhamento do Atraso [ns]
EPA 5Hz	5 (baixa)	43 (baixa)
ETU 70 Hz	70 (média)	991 (alta)

Como na parte prática apenas temos acesso a equipamento que permite configuração MIMO 2X2, são essas as equações que se encontram representadas nesta dissertação.

Para o MIMO 2X2, com uma taxa de codificação de 1/2 e uma modulação de 16-QAM no DL, o SNR é obtido através dos resultados de [16], [17], [18] e [19]:

- EPA 5Hz

$$\rho_{N[\text{dB}]} = \begin{cases} 683.8R_b^3 - 399.4R_b^2 + 115.8R_b - 7.195, & 0.0819 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.2619 \\ 5.149 \times 10^4 R_b^5 - 1.056 \times 10^5 R_b^4 + 8.561 \times 10^4 R_b^3 \\ - 3.43 \times 10^4 R_b^2 + 6812R_b - 528, & 0.2619 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.5272 \\ 2740 R_b^2 - 2868 R_b + 766.7, & 0.5272 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.5507 \\ 2.851 \times 10^4 R_b^2 - 3.105 \times 10^4 R_b + 8472, & 0.5507 \leq R_b[\text{Mbps}] \leq 0.5531 \end{cases} \quad (3.1)$$

- ETU 70Hz

$$\rho_{N[\text{dB}]} = \begin{cases} 23.21R_b^2 + 27.73R_b - 0.7635, & 0.0278 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.2337 \\ 1.765 \times 10^4 R_b^3 - 1.391 \times 10^4 R_b^2 + \\ + 3675R_b - 317.4, & 0.2337 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.3024 \\ 1.019 \times 10^4 R_b^4 - 1.595 \times 10^4 R_b^3 + \\ + 9329R_b^2 - 2396R_b + 237.4, & 0.3024 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.5155 \\ 197.8R_b - 85.95, & 0.5155 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.5261 \\ (3.909R_b^2 - 4.0689R_b + 1.059) \times 10^5, & 0.5261 \leq R_b[\text{Mbps}] \leq 0.5232 \end{cases} \quad (3.2)$$

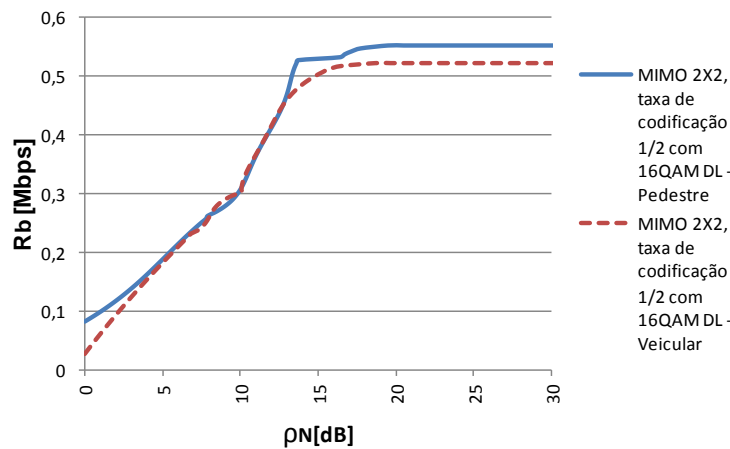


Figura 3-5 Débito para um  $R_b$  usando MIMO com taxa de codificação  $\frac{1}{2}$  e modulação de 16-QAM no DL em função do SNR.

A Figura 3-5 representa graficamente as expressões resultantes de (3.1) e (3.2). Observa-se que não existe grande diferença entre os cenários pedestre e veicular.

Para o MIMO 2X2, com uma taxa de codificação de 3/4 e uma modulação a 64-QAM no DL, o SNR é obtido através dos resultados de [16]:

- EPA5Hz

$\rho_N[\text{dB}]$

$$= \begin{cases} 1.071 \times 10^5 R_b^3 - 1.023 \times 10^4 R_b^2 + 337.1 R_b + 2.201, & 0.0006 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.0510 \\ -1475 R_b^4 + 1090 R_b^3 - 283.9 R_b^2 + 52.07 R_b + 4.943, & 0.0510 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.3522 \\ 97.69 R_b^3 - 179 R_b^2 + 118.4 R_b - 10.72, & 0.3522 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.7042 \\ 158.6 R_b^3 - 418.5 R_b^2 + 380.9 R_b - 98.1, & 0.7042 \leq R_b[\text{Mbps}] < 1.0780 \\ (3.49 R_b^3 - 11.55 R_b^2 + 12.75 R_b - 4.689) \times 10^4, & 1.0780 \leq R_b[\text{Mbps}] \leq 1.1434 \end{cases} \quad (3.3)$$

- ETU70Hz

$\rho_N[\text{dB}] =$

$$\begin{cases} 3.69 \times 10^4 R_b^3 - 5182 R_b^2 + 269 R_b + 0.8425, & 0 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.0710 \\ -10.14 R_b^3 + 5.678 R_b^2 + 24.37 R_b + 5.248, & 0.0710 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.858 \\ 243.1 R_b^3 - 675.3 R_b^2 + 643.7 R_b - 184.8, & 0.858 \leq R_b[\text{Mbps}] \leq 1.1452 \end{cases} \quad (3.4)$$

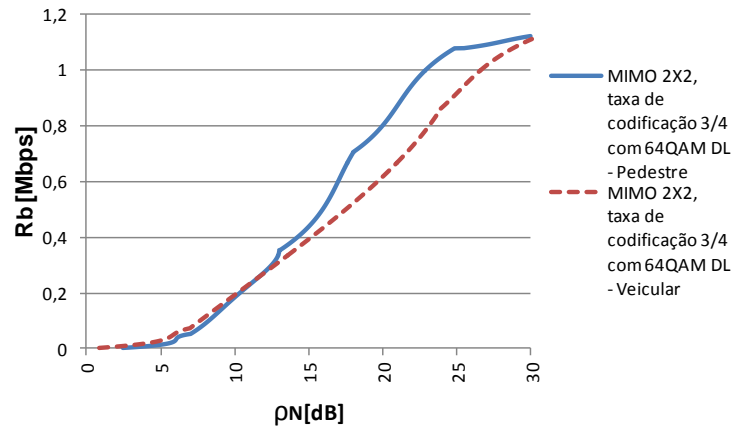


Figura 3-6 Débito para um  $R_b$  usando MIMO com taxa de codificação  $\frac{3}{4}$  e modulação de 64-QAM no DL em função do SNR.

O comportamento no cenário veicular é mais linear do que quando o UE está no cenário pedestre.

No caso do UL os resultados das configurações MIMO 2X2 usados em [20] foram atualizados em alguns casos com os resultados documentados no 3GPP. Similarmente, para o MIMO 2X2, com uma taxa de codificação de  $\frac{3}{4}$  e uma modulação a 16-QAM no UL, o SNR é dado por:

- EPA5Hz

$$\rho_{N[\text{dB}]} = \begin{cases} 88.31R_b^3 - 92.67R_b^2 + 59.18R_b - 2.797, & 0.0512 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.3351 \\ 4.633 \times 10^4 R_b^3 - 5.37 \times 10^4 R_b^2 + \\ 2.077 \times 10^4 R_b - 2670, & 0.3351 \leq R_b[\text{Mbps}] \leq 0.4291 \end{cases} \quad (3.5)$$

- ETU70Hz

$$\rho_{N[\text{dB}]} = \begin{cases} (3.039R_b^5 - 3.477R_b^4 + 1.484R_b^3) \times 10^4 - 2901R_b^2 \\ + 301.9R_b - 11.58 & 0.1181 \leq R_b[\text{Mbps}] \leq 0.4197 \end{cases} \quad (3.6)$$

A Figura 3-7 representa graficamente as expressões resultantes de (3.5) e (3.6).

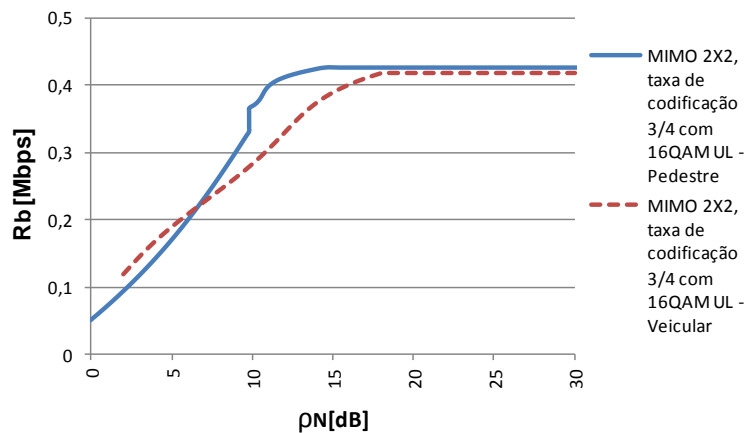


Figura 3-7 Débito para um  $R_b$  usando MIMO com taxa de codificação  $\frac{3}{4}$  e modulação de 16-QAM no UL em função do SNR.

Na Figura 3-7 observa-se que a partir dos 6 dB o débito binário por bloco de recurso no cenário pedestre ultrapassa o débito binário do cenário veicular, voltando a juntar-se nos 17 dB. O débito binário no cenário pedestre estabiliza mais cedo que no cenário veicular.

Para o MIMO 2X2, com uma taxa de codificação de  $\frac{5}{6}$  e uma modulação a 64-QAM no UL, o SNR é dado por:

- EPA5Hz

$$\rho_{N[\text{dB}]} = \begin{cases} 349.5R_b - 0.04397, & 0.0001 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.0087 \\ 17.51R_b^2 + 22.23R_b + 2.654, & 0.0087 \leq R_b[\text{Mbps}] < 0.3914 \\ (3.567R_b^5 - 9.618R_b^4 + 10.29R_b^3 - 5.447R_b^2 + 1.43R_b) \times 10^4 \\ -1474, & 0.3914 \leq R_b[\text{Mbps}] \leq 0.716 \end{cases} \quad (3.7)$$

- ETU70Hz

$$\rho_{N[\text{dB}]} = \begin{cases} (3.698R_b^5 - 5.411R_b^4 + 2.953R_b^3) \times 10^4 - 7377R_b^2 + \\ +880.9R_b - 36.38 & 0.1244 \leq R_b[\text{Mbps}] \leq 0.4952 \end{cases} \quad (3.8)$$

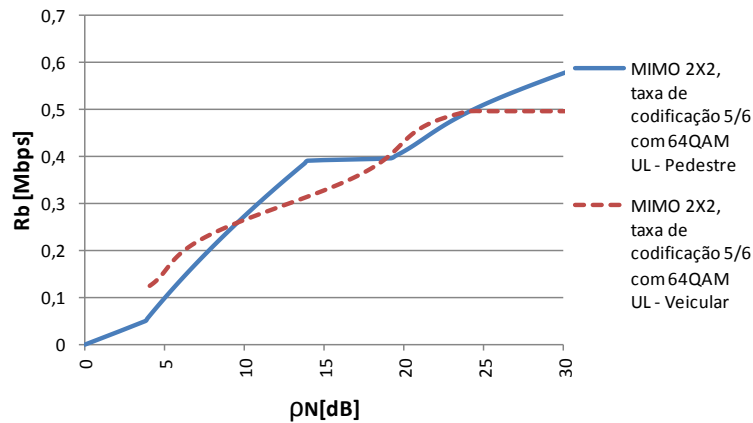


Figura 3-8 Débito para um  $R_b$  usando MIMO com taxa de codificação  $5/6$  e modulação de 64-QAM no UL em função do SNR.

No cenário pedestre, o débito binário atinge quase os 30 Mbps (multiplicando o débito binário de um  $R_b$  por 50) para os 30 dB de SNR enquanto o débito para o cenário veicular estabiliza nos 25 Mbps aos 23 dB.

### 3.3 Cálculo de Débito Binário

Considerando o débito na camada física em função do SNR no LTE, as seguintes equações foram extrapoladas apenas para o cenário pedestre e em DL.

Para o MIMO 2X2, com uma taxa de codificação de  $1/2$  e uma modulação de 16-QAM no DL, o débito é baseado nos resultados dados por [16], [17], [18] e [19], Figura 3-9:

- EPA5Hz

$R_b[\text{bps}]$

$$= \begin{cases} (-0.0348\rho_N^3 - 0.0922\rho_N^2 + 2.045\rho_N + 8.1909) \times 10^4, & -4 \leq \rho_N[\text{dB}] < 2 \\ (0.0023\rho_N^2 + 2.4658\rho_N + 6.4636) \times 10^4, & 2 \leq \rho_N[\text{dB}] < 8 \\ (-0.0049\rho_N^2 + 0.1405\rho_N + 1.8086) \times 10^5, & 8 \leq \rho_N[\text{dB}] < 10 \\ (3.8501\rho_N - 9.1235) \times 10^4, & 10 \leq \rho_N[\text{dB}] < 16 \\ 412.3468\rho_N^3 - 2.4976 \times 10^4 + 5.0302 \times 10^5 - 2.8162 \times 10^6, & 16 \leq \rho_N[\text{dB}] \leq 22 \\ 552524, & \rho_N[\text{dB}] > 22 \end{cases} \quad (3.9)$$

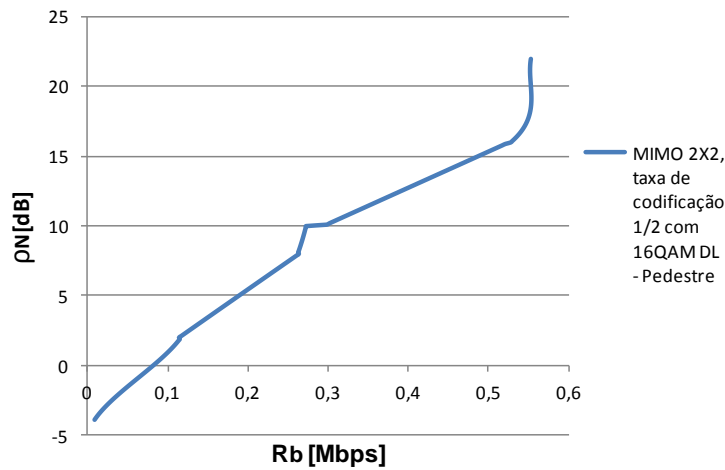


Figura 3-9 MIMO com taxa de codificação  $\frac{1}{2}$  e modulação de 16-QAM no DL em função do  $R_b$

Para o MIMO 2X2, com uma taxa de codificação de  $\frac{3}{4}$  e uma modulação a 64-QAM no DL, o débito é baseado nos resultados dados por [16], Figura 3-10:

- EPA5Hz

$R_b[\text{bps}]$

$$= \begin{cases} (0.1853\rho_N^2 - 0.8564\rho_N + 1.0352) \times 10^4, & 2 \leq \rho_N[\text{dB}] < 6 \\ (0.0005738\rho_N^4 - 0.02762\rho_N^3 + 0.4778\rho_N^2 - 3.088\rho_N + 6.81) \times 10^5, & 6 \leq \rho_N[\text{dB}] < 13 \\ (0.0893\rho_N^2 - 2.0808\rho_N + 15.3841) \times 10^5, & 13 \leq \rho_N[\text{dB}] < 19 \\ (0.010304\rho_N^2 + 0.16608\rho_N - 1.247) \times 10^5, & 19 \leq \rho_N[\text{dB}] < 24 \\ -4424\rho_N^2 + 281800\rho_N - 3344000, & 24 \leq \rho_N[\text{dB}] \leq 30 \\ 1143420, & \rho_N[\text{dB}] > 30 \end{cases} \quad (3.10)$$

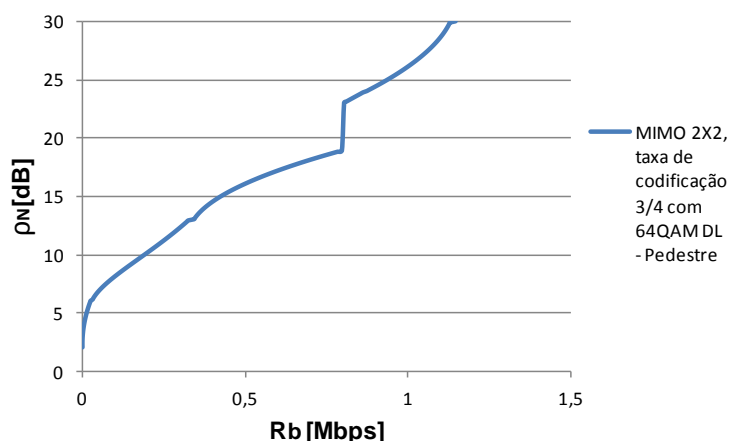


Figura 3-10 MIMO com taxa de codificação  $\frac{3}{4}$  com modulação de 64-QAM no DL em função do  $R_b$

### 3.4 Cálculo do Débito Máximo

Nesta secção, é calculado tanto no DL como no UL o débito máximo tendo por base o 3GPP [22]. De modo a ter em conta toda a sobrecarga bem como o MCS exato e o índice do *Transport Block Size* (TBS), foram realizados os seguintes cálculos de forma a conseguir os débitos máximos de DL no LTE [23]:

1. Com um porto de antena Tx, assume-se um bloco de transporte, o qual é mapeado por uma palavra de código. Utilizando os métodos descritos no passo 2, mas sem multiplicar por dois devido a ter sido considerado apenas uma antena.
2. Com dois portos de antenas Tx e transmissão com Rank=2, temos duas palavras de código sendo que cada palavra de código é associado a um TB e mapeado a uma camada. Por exemplo, se considerarmos a largura de banda de 10 MHz a qual tem 50 blocos de recursos físicos ( $N_{PRB}$ ), este mapeamento encontra-se na Tabela 2-3. Em [22] encontramos o valor do TBS referente ao  $N_{PRB} = 50$ . Para este valor de  $N_{PRB}$  como para outros valores de  $N_{PRB}$  existem 27 filas com ITBS o qual vai de 0 a 26, é aqui também que encontramos o mapeamento entre o MCS e o ITBS. A modulação (MQAM) pode ser 2, 4, e 6 o que significa as modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM respetivamente. Escolhendo o ITBS=26, significa que irá ter uma modulação de 64-QAM. Com o máximo do ITBS =26 o TBS dá 36696 bits por palavra de código com a

modulação a 64-QAM. Assim sendo o débito máximo é  $2 \times 36696 / 1\text{ms} = 73392$  kbps com a modulação a 64-QAM.

- Com quatro portos de antena Tx e com um Rank = 4, temos duas palavras de código sendo que cada palavra de código é associado a um TB e mapeado em duas camadas. O índice do TBS para as duas camadas podem ser obtidas em [22]. Usando uma vez mais os 10 MHz de largura de banda à qual está associado 50 PRB os quais pertencem ao intervalo em [1, 55], assim o TBS mais alto com duas camadas pode ser obtido com  $[2 \times N_{\text{PRB}}]$  resultando num TBS de 75376 bits com a modulação a 64-QAM. Assim o débito máximo é  $2 \times 75376 = 150752 / 1\text{ms} = 150752$  kbps com 64-QAM. Se a largura de banda for de 15 MHz com os 75 blocos de recursos o TBS = 55056 bits com 64-QAM e usando o mapeamento definido o resultado final é  $110136 \times 2 / 1\text{ms} = 220272$  kbps.

O mesmo algoritmo aplica-se para o cálculo do débito máximo no UL. Como o MIMO não é usado no UL no 3GPP Release 8, foi considerado uma antena Tx na configuração com os 64-QAM como opcional. Os resultados podem ser verificados nas Tabela 3-5 e Tabela 3-6.

Tabela 3-5 Resultados teóricos dos débitos máximos no DL calculados com o algoritmo descrito acima.

Esquemas de MIMO	Modulação	Débitos máximos no DL [Mbps]					
		1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
		6	15	25	50	75	100
1X1	QPSK	0,936	2,344	4,008	7,992	11,832	15,840
	16-QAM	1,800	4,584	7,736	15,264	22,920	30,576
	64-QAM	4,392	11,064	18,336	36,696	55,056	75,376
2X2	QPSK	1,872	4,688	8,016	15,984	23,664	31,680
	16-QAM	3,600	9,168	15,472	30,528	45,840	61,152
	64-QAM	8,784	22,128	36,672	73,392	110,112	150,752
4X4	QPSK	3,728	9,552	15,984	31,680	47,376	63,408
	16-QAM	7,248	18,288	30,528	61,152	90,704	123,328
	64-QAM	17,520	44,304	73,392	150,752	220,272	299,552

Tabela 3-6 Resultados teóricos dos débitos máximos no UL calculados com o algoritmo descrito acima.

Modulação	Débitos máximos no UL [Mbps]					
	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
	6	15	25	50	75	100
QPSK	0,936	2,344	4,008	7,992	11,832	15,840
16-QAM	1,800	4,584	7,736	15,264	22,920	30,576
64-QAM	4,392	11,064	18,336	36,696	55,056	75,376



## 4 Análise de Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos da campanha de medidas realizadas numa rede comercial em Portugal tendo como referência os parâmetros definidos no capítulo 3, assim como os modelos analíticos por estas deduzidos.

### 4.1 Descrição dos cenários

As medidas de campo que são apresentadas foram recolhidas em redes comerciais LTE as quais se encontram a operar em Portugal.

Dado que se tratam de redes comerciais não é possível testar cenários onde não exista carga na rede. Verificou-se mais tarde por dados de redes e pela percentagem de RB (100%) que as medidas foram recolhidas sem outros utilizadores na rede. As medidas foram recolhidas em ambientes sub-urbano e urbano. Ambos os cenários incluem os efeitos das perdas de percurso e interferência das células vizinhas.

As medidas foram recolhidas de duas formas:

- Modo Pedestre – neste cenário os testes foram realizados em modo pedestre nas ruas circundantes ao eNodeB a uma velocidade de 3 km/h.
- Modo Veicular – medidas recolhidas no interior de um carro em movimento (até 50 km/h).

Em ambos os casos não foi usada antena adicional ligada à placa de dados.

A recolha de medidas para o ambiente sub-urbano foi realizada na Costa da Caparica e para o ambiente urbano foi na área de Algés, Miraflores e Carnaxide.

Os testes realizados nas redes LTE foram de DL e UL de ficheiros utilizando um serviço de FTP, de forma a recolher a informação, do débito binário, SINR, CQI, modos MIMO utilizados, com o objetivo de recolher estatísticas dos parâmetros para extração das suas relações analíticas. Foi utilizado um filtro de forma a retirar débitos abaixo dos 0.5 Mbps devido aos procedimentos de *Handover* e ao estabelecimento de ligações.

Dado que os operadores a atuarem em Portugal apenas se encontram a utilizar, à data da recolha de medidas, as larguras de banda de 10 e 20 MHz e como os dados teóricos têm sempre em conta os 10 MHz de largura de banda optou-se apenas por realizar o estudo para esta largura de banda. Na Tabela 4-1 encontramos os principais parâmetros utilizados durante o ensaio.

Tabela 4-1 Parâmetros utilizados durante os ensaios.

Parâmetros	LTE
Potência de Transmissão da Estação Base[dBm]	46
Potência de Transmissão do terminal móvel [dBm]	23
Banda de Frequência [MHz]	800
Largura de Banda [MHz]	10
Modulações	QPSK, 16QAM, 64QAM
Configuração das antenas	2x2 MIMO
UE	Categoria 3

O material usado para a recolha de medidas foi um portátil HP, uma Pen Banda Larga 4G ZTE MF820D, um GPS de forma a poder ser feito o geo-posicionamento das medidas e o *software TEMS Investigation* com o qual foi recolhida a informação da rede comercial. Para o pós processamento foi o utilizado o *TEMS Investigation* [30] e o *Actix Software* [31].

#### 4.2 Análise dos resultados obtidos no DL

As medidas foram recolhidas ao longo de vários dias e em locais diferentes de forma a estudarem-se os ambientes sub-urbano e urbano. Ao longo desta secção iremos analisar qual o comportamento do débito para os dois cenários (pedestre e veicular) em comparação com as simulações estudadas no capítulo 3 e a relação que existe entre os principais parâmetros que influenciam o desempenho.

#### 4.2.1 Análise dos dados em cenário Veicular

Na Figura 4-1 podemos observar o local onde foram recolhidas as medidas com a largura de banda de 10 MHz bem como a representação SINR ao longo do percurso. O local onde foram realizadas as medidas foi na cidade da Costa da Caparica, tratando-se de um ambiente sub-urbano.



Figura 4-1 Área da recolha de medidas DL em ambiente sub-urbano num cenário veicular.

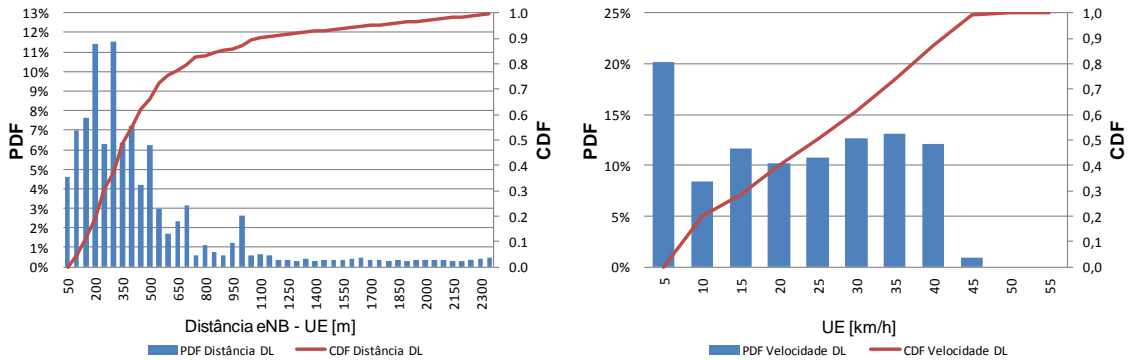
As médias do RSRP, RSRQ e SINR obtidas ao longo do percurso podem ser observadas na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 Médias obtidas ao longo do percurso no DL.

Largura de Banda	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	SINR [dB]
10 MHz	-82,75	-9,05	16,44

A Figura 4-1 (a) representa o histograma da distância medidas com GPS entre o eNodeB e o UE e a Figura 4-1 (b) representa a velocidade a que o UE se deslocou durante o ensaio. No total do percurso foram detetados 4 células sendo que a cada se refere um *Physical Channel Identity* (PCI) diferente. A recolha de medidas em modo veicular não se basearam apenas em ruas juntas aos eNodeB de forma a

poder ser observado qual o comportamento do débito binário em função de diferentes condições de propagação. Durante o ensaio não foi possível atingir velocidades acima dos 45 km/h.



a) Distância para a célula servidora

b) Velocidade durante o ensaio

Figura 4-2 Estatísticas das medidas no cenário veicular no DL em ambiente sub-urbano.

Na Figura 4-3 observa-se a distribuição do SINR obtido durante o percurso em cenário veicular no DL. A maior percentagem de amostras encontra-se no intervalo de 22 dB, estando a mediana no intervalo dos 20 dB de SINR. Utilizando a Figura 4-16 verifica-se que a alteração de modulação ocorre nos 17 dB, ou seja mais de 50% das amostras utilizaram a modulação de 64-QAM.

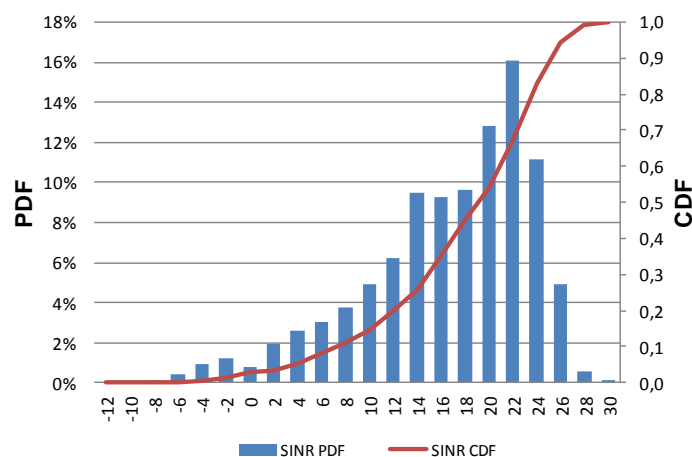


Figura 4-3 Distribuição do SINR [dB] no DL em cenário veicular sub-urbano.

Na Figura 4-4 podemos observar o débito binário na camada física no canal descendente e sem outros utilizadores presentes na rede. Na mesma figura são

apresentadas as médias os máximos e os mínimos atingidos. Nos valores máximos a velocidade chega aos 70 Mbps muito perto do máximo teórico.

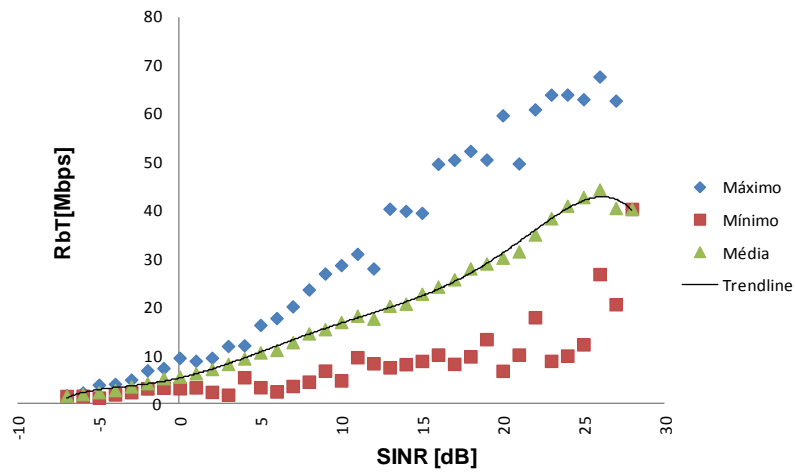


Figura 4-4 Débito Binário em função do SINR no DL em cenário veicular sub-urbano.

Após o processamento dos dados recolhidos (débito binário e SINR) utilizou-se a ferramenta Excel 2007, para gerar uma linha e respetiva equação de correspondência polinomial que relacione o SINR com o débito binário total  $R_{bTDL}$  tendo sido obtida a equação analítica (4.1).

$$R_{bTDL}[\text{Mbps}] = -0,0024\rho_{INDL}^6 + 0,162\rho_{INDL}^5 - 3,9231\rho_{INDL}^4 + 40,88\rho_{INDL}^3 - 155,95\rho_{INDL}^2 + 1131,8\rho_{INDL} - 5431,1 \quad (4.1)$$

Observa-se que conforme o SINR vai aumentando também o débito binário aumenta. Antes de compararmos os resultados obtidos em redes comerciais com os dados das simulações é necessário ter-se em conta que na simulação é possível parametrizar para o cenário completo sempre a mesma modulação situação que em redes comerciais é impossível. Ao compararmos para a modulação 16-QAM que se encontra na Figura 3-5, verifica-se que os dados são muito semelhantes. Quando o SINR se encontra nos 11 dB (Figura 4-4) o débito está nos 17,5 Mbps o mesmo se passa para os 11dB da Figura 3-5. Outro exemplo é para 13 dB o qual se encontra nos 20 Mbps. Como se usa a largura de banda de 10 MHz e nas simulações apenas está o valor para um bloco de recurso, existe a necessidade de multiplicar por 50. Na Figura 3-6 para os 64-QAM também se verifica que a simulação é semelhante

até aos 26 dB de SINR, a partir daí deixa de ser fiável. Na Figura 4-5 encontramos o comparativo dos dados teóricos com os reais.

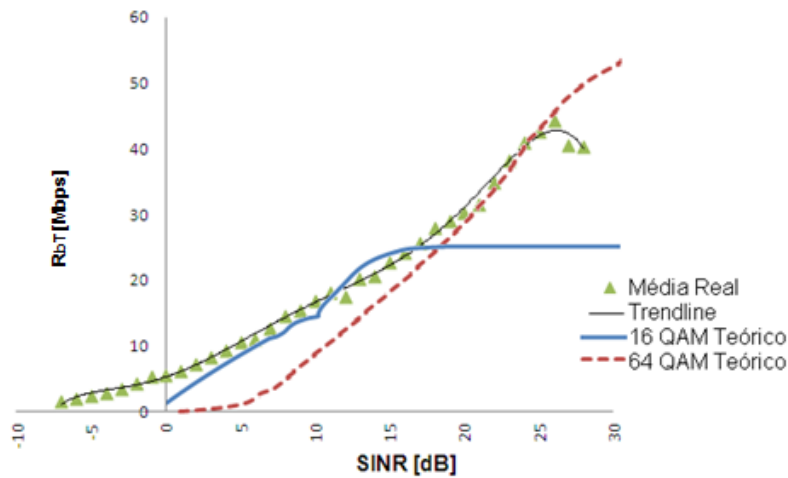


Figura 4-5 Comparativo entre os dados teóricos e os reais no DL em cenário veicular sub-urbano.

Na Figura 4-6 pode-se observar a distribuição das medidas de RSRP obtidas durante o percurso com uma média de 82,75 dBm. Na secção 3.1.1 segundo [11], o RSRP pode ser definido em 3 categorias. Verifica-se que para os dois primeiros pontos, RSRP maior do que -75 dBm e RSRP entre -95 e -75 dBm pode-se esperar um decréscimo no débito binário entre dos 30 a 50%, está correto, no entanto o mesmo não se passa para os outros dois pontos. Quando o RSRP é inferior a -95 dBm ainda é possível atingir valores acima dos 20 Mbps ao contrário do que se encontra descrito [11]. Entre o intervalo de -108 a -100 dBm ainda se obtém débitos binários entre os 10 e 20 Mbps, Figura 4-7.

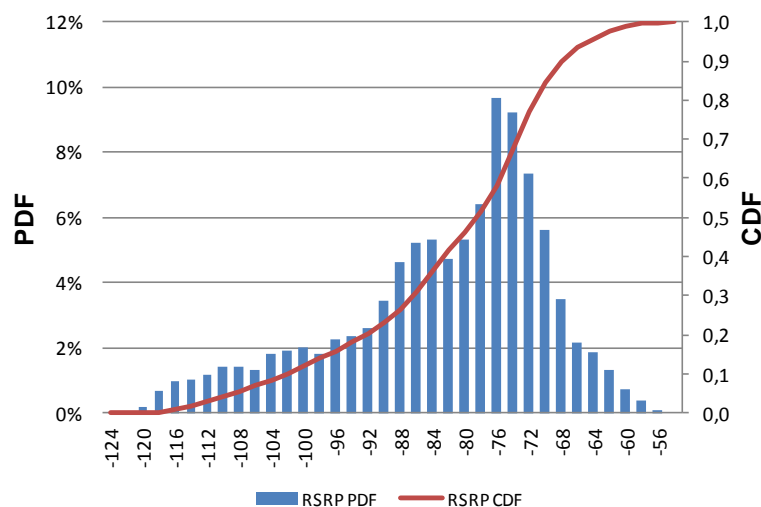


Figura 4-6 Distribuição do RSRP [dBm] no DL em cenário veicular sub-urbano.

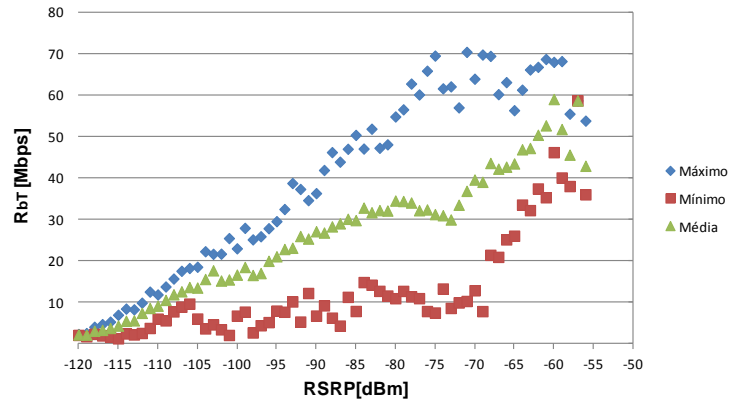


Figura 4-7 Débito Binário em função do RSRP no DL em cenário veicular sub-urbano.

Na Figura 4-8 pode-se observar a distribuição das medidas de RSRQ obtidas durante o percurso com uma média de -9,05 dB. Também aqui os intervalos descritos em [11] não reportam o que se verifica com as medidas recolhidas nas redes comerciais. A maioria das medidas encaixa no intervalo de -12 a -9, intervalo no qual iria começar-se a sentir uma degradação no entanto o que se observa é que foi neste intervalo onde se obteve o melhor débito binário, Figura 4-9.

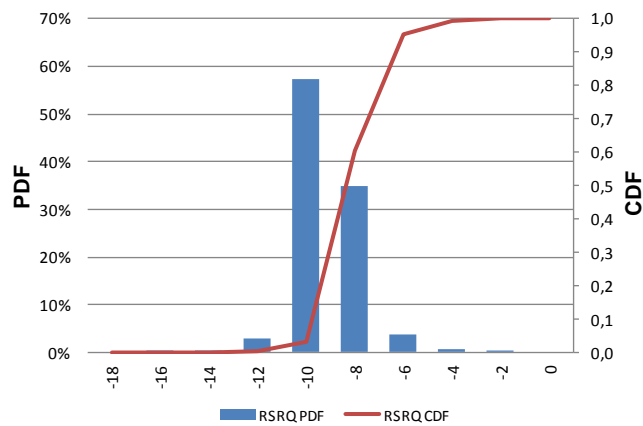


Figura 4-8 Distribuição do RSRQ [dB] no DL em cenário veicular sub-urbano.

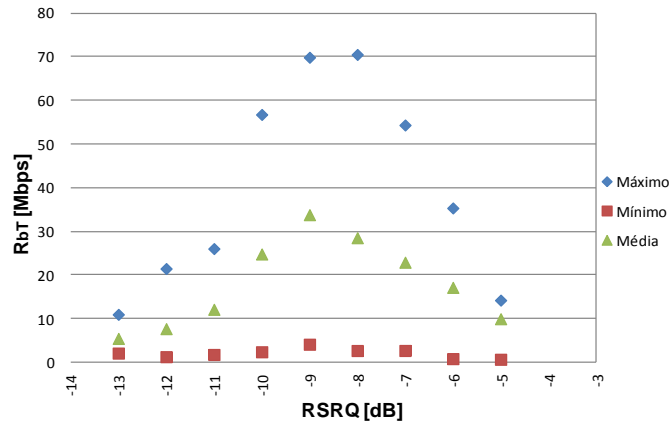


Figura 4-9 Débito Binário em função do RSRQ no DL em cenário veicular sub-urbano.

Tendo por base a Figura 3-4 tentou-se averiguar se o mapeamento do CQI com o SINR seria igual nas redes comerciais. O resultado obtido através das medidas recolhidas em cenário veicular no DL pode ser observado na Figura 4-10.

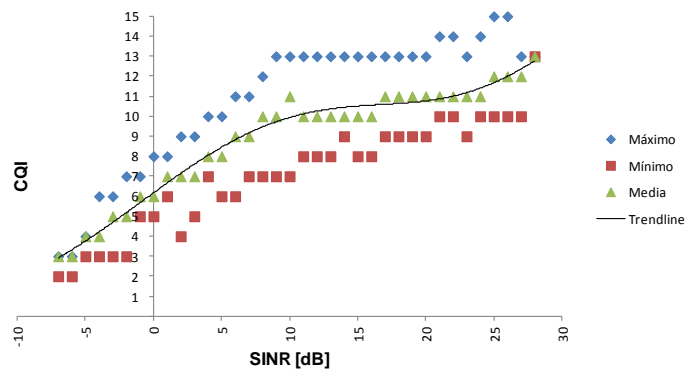


Figura 4-10 CQI em função do SINR no DL em cenário veicular sub-urbano.

A expressão (4.2) é a linha de correspondência polinomial retirada da Figura 4-10.

$$\begin{aligned}
 CQI = & 9 \times 10^{-7} \times \rho_{NDL}^6 - 7 \times 10^{-5} \rho_{NDL}^5 + 0.0025 \rho_{NDL}^4 - 0.0386 \rho_{NDL}^3 + 0.2558 \rho_{NDL}^2 \\
 & - 0.1565 \rho_{NDL} + 6.3558
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Na Figura 4-11 faz-se o comparativo do mapeamento teórico do CQI com o resultado obtido na rede comercial. Verifica-se que existe um afastamento de 2 níveis na escala do CQI mantendo-se as duas linhas quase paralelas até aos 10 dB de SINR. A partir dos 10 dB a linha teórica continua a sua reta até aos 20 dB. Já a linha obtida através das medidas recolhidas em redes comerciais deixa de subir de uma forma linear havendo vários valores de SINR com o mesmo valor de CQI até

chegar aos 30 dB. Com uma maior representação de amostras a linha real será mais linear.

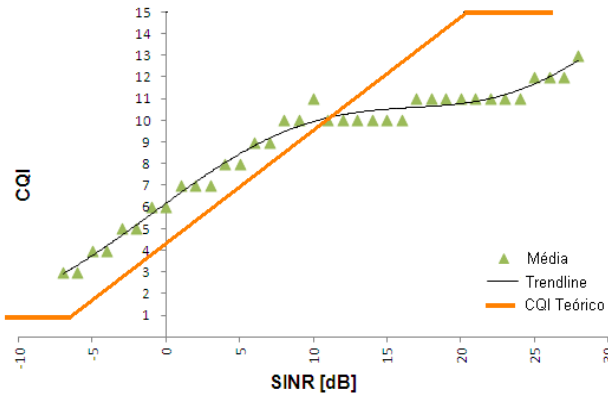


Figura 4-11 Mapeamento teórico do CQI em comparação com o CQI da rede comercial em cenário veicular sub-urbano.

Na Figura 4-12 encontra-se a distribuição do CQI das medidas recolhidas. Constatase que a maior percentagem de amostras está entre os 10 e 11 de CQI, estando a mediana nos 11.

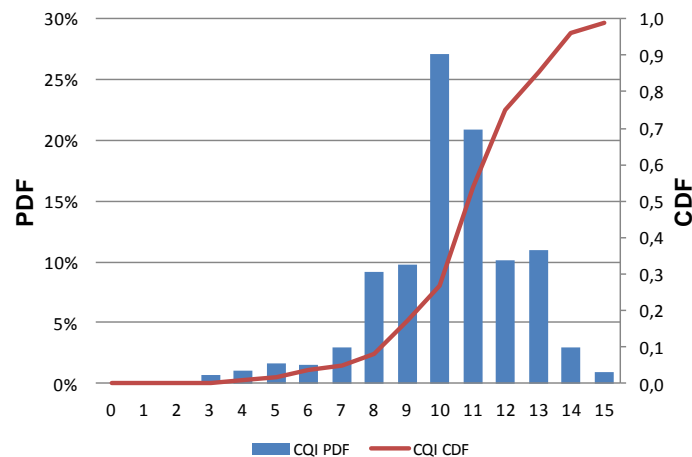


Figura 4-12 Distribuição do CQI no DL em cenário veicular sub-urbano.

Da Figura 4-13 extraiu-se a expressão polinomial (4.3) que dá o débito binário em função do CQI ( $\delta$ ). Conforme o CQI vai aumentando também o débito aumenta. Foram recolhidas poucas amostras para o valor 15 de CQI daí o resultado estar um pouco diferente dos outros valores, ou seja não acompanha a subida de uma forma uniforme.

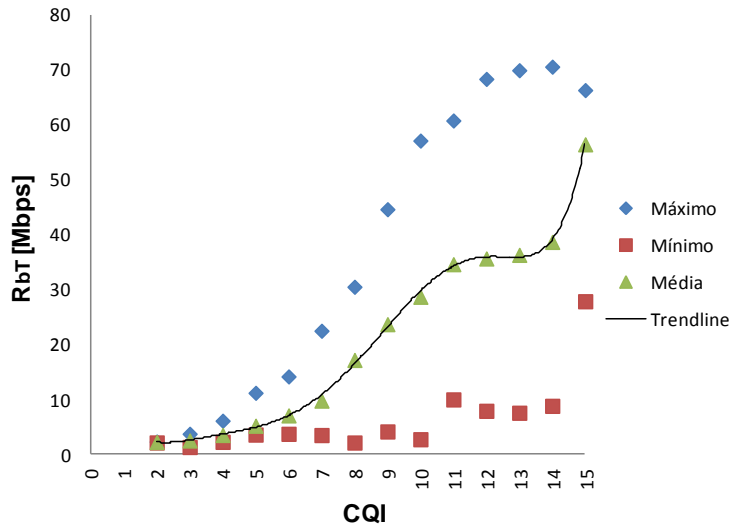


Figura 4-13 Débito Binário em função do CQI no DL em cenário veicular sub-urbano.

$$R_{bTDL}[\text{Mbps}] = 0,4176\delta^6 - 16,667\delta^5 + 239,76\delta^4 - 1500,1\delta^3 + 4116,9\delta^2 - 3043,9\delta + 89,001 \quad (4.3)$$

Dada a estreita relação entre o CQI e o MCS a qual pode ser observada na Tabela 2-6 foi construída a expressão (4.4) que calcula o débito binário em função do index MCS ( $\tau$ ). Na Figura 4-14 podemos comprovar que a expressão polinomial de segundo grau coincide com os dados obtidos.

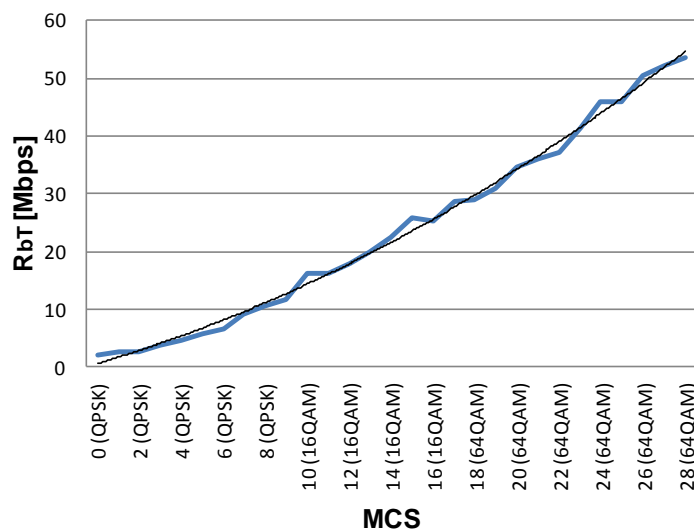


Figura 4-14 Débito Binário em função do MCS no DL em cenário veicular sub-urbano.

$$R_{bT}[\text{Mbps}] = 30,759\tau^2 + 1007,5\tau - 476,6 \quad (4.4)$$

Na Figura 4-15 podemos ver a distribuição do MCS no DL com a maioria das amostras centradas entre os 13 e os 23 com a mediana em 19 (64-QAM).

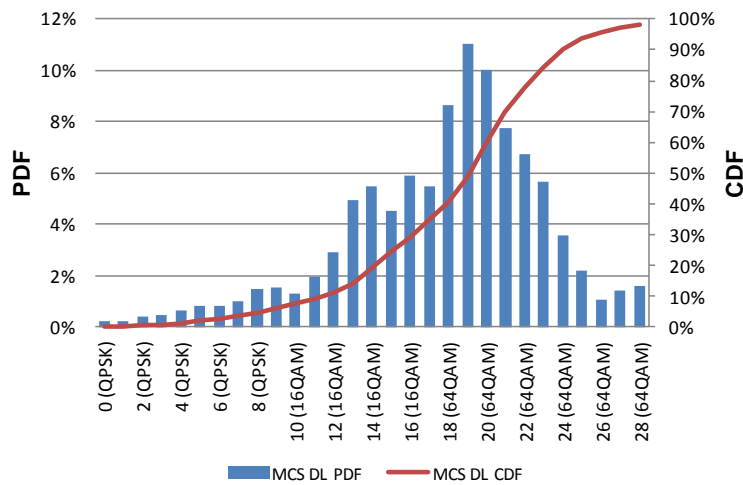


Figura 4-15 Distribuição do MCS no DL em cenário veicular sub-urbano.

Analisando a Figura 4-16 constata-se onde existe a alteração de modulação em função do SINR. A mudança de QPSK para os 16-QAM centra-se nos 8 dB enquanto a alteração dos 16-QAM para os 64-QAM ocorre nos 17 dB.

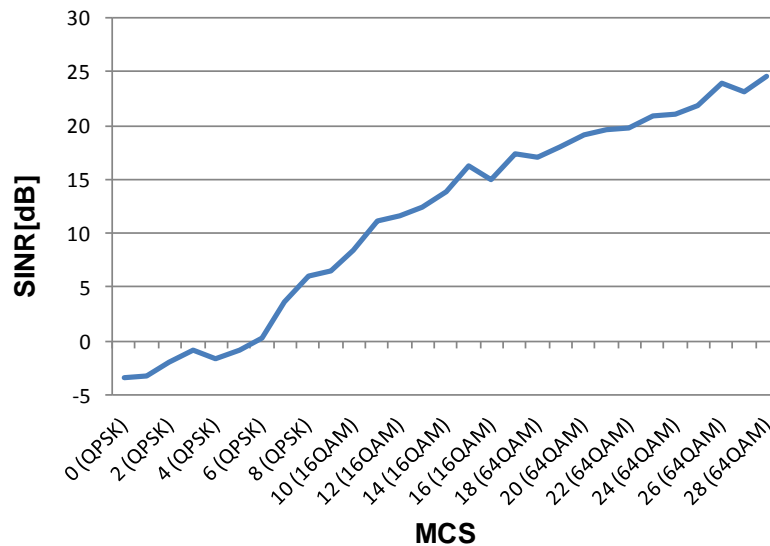


Figura 4-16 SINR em função dos index de MCS

Durante o capítulo 3, foi descrito os dois Modos de MIMO 2 e 3, os quais foram os únicos modos detetados durante o ensaio. Pretende-se agora verificar se o resultado teórico obtido para os dois modos se verifica da mesma forma nas redes comerciais. Na Figura 4-17 é representado os dois modos MIMO 2 e 3.

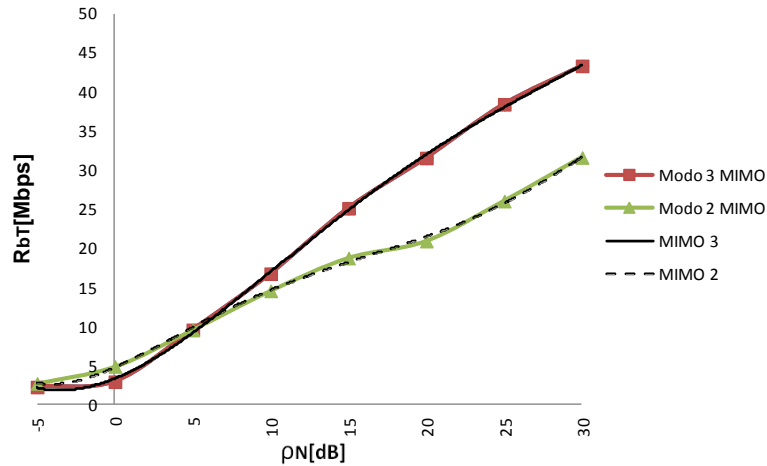


Figura 4-17 Débito binário em função do SINR (MIMO) em cenário veicular sub-urbano.

Da Figura 4-17 foi possível extrair as seguintes expressões as quais representam o débito binário em função do SINR com base nos dois Modos MIMO.

$$\begin{aligned}
 R_{bTDL}[\text{Mbps}] &= \begin{cases} 0,0116\rho_N^4 - 1,4183\rho_N^3 + 38,741\rho_N^2 + 1149,5\rho_N + 2917,2 & , \text{MIMO 3} \\ -0,0097\rho_N^5 + 0,7784\rho_N^4 - 21,136\rho_N^3 + 216,97\rho_N^2 + 259,81\rho_N + 4881,8 & , \text{MIMO 2} \end{cases} \\
 & \hspace{20em} (4.5)
 \end{aligned}$$

Fazendo uma comparação com a Figura 3-3, de notar que existe uma diferença na largura de banda (teoria 5 MHz – real 10 MHz) verifica-se que o Modo 3 obtém débitos mais altos que o Modo 2 como era esperado, no entanto o débito nunca chega a ser o dobro entre os dois Modos. Observa-se que para SNR mais baixos o Modo 2 tem um débito mais alto que o Modo 3. A transição entre modos ocorre nos 7 dB de SNR para a teoria mas nos dados reais acontece aos 5 dB de SNR.

#### 4.2.2 Análise dos dados em cenário Pedestre.

Nesta secção encontra-se as expressões analíticas do débito binário em função do SINR para o cenário pedestre. As medidas foram recolhidas na mesma área que o percurso veicular, tendo sido esta recolha agora mais junta aos eNB e nas ruas circundantes a uma velocidade de cerca de 3 km/h.

Na Figura 4-18 observa-se a distribuição do SINR obtido durante o percurso em ambiente urbano em cenário pedestre no DL. A mediana encontra-se no intervalo dos 26 dB de SINR bem como a maior percentagem de amostras, todas elas com

modulação de 64-QAM. Em comparação com o cenário veicular observa-se que como o UE está mais perto das células os valores obtidos para o SINR são melhores.

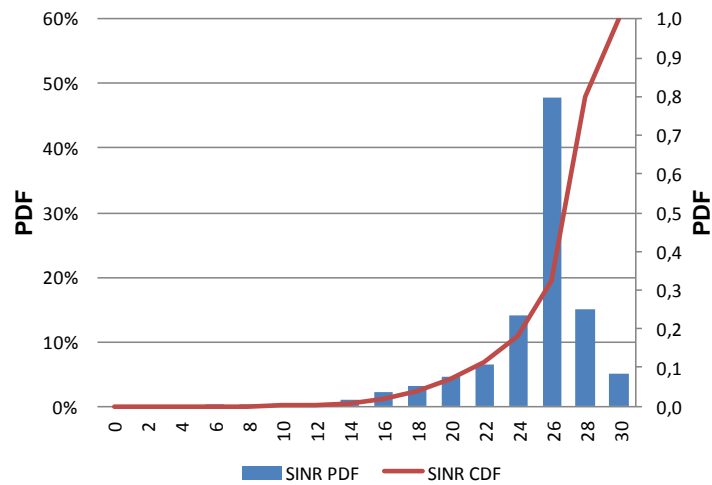


Figura 4-18 Distribuição do SINR no DL em cenário pedestre sub-urbano.

Na Figura 4-19 podemos observar o débito binário na camada física no canal descendente sem outros utilizadores presentes na rede. Na mesma figura são apresentadas as médias os máximos e os mínimos atingidos. Quando comparado com os resultados obtidos em cenário veicular constata-se que no cenário pedestre as medidas recolhidas apenas começam a reportar dados de SINR aos 8 dB pois o UE está próximo das células, no entanto o débito em cenário pedestre só é superior quando o SINR está nos 26 e 27 dB.

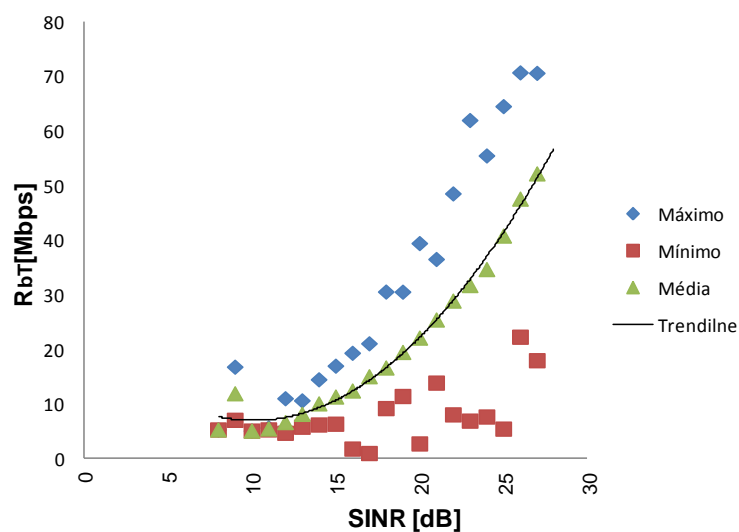


Figura 4-19 Débito Binário em função do SINR no DL em cenário pedestre sub-urbano.

A expressão (4.6) é a linha de correspondência resultante dos testes realizados em DL num cenário pedestre. Observa-se que os valores máximos chegam quase ao limite previsto na teoria, Tabela 3-5. A partir dos 27 dB de SINR não foram registadas amostras.

$$R_{bTDL}[\text{Mbps}] = 88,244\rho_{INDL}^2 - 639,67\rho_{INDL} + 1548 \quad (4.6)$$

A comparação entre os dados reais e os modelos teóricos pode ser observado na Figura 4-20.

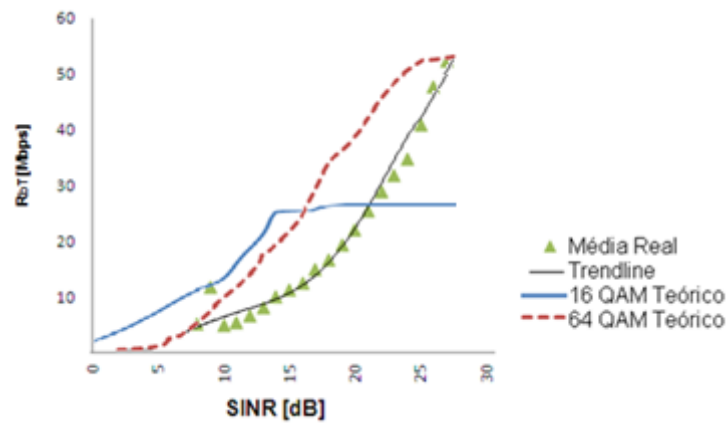


Figura 4-20 Comparativo entre os dados teóricos e os reais no DL em cenário pedestre sub-urbano.

Constata-se que as linhas dos 16-QAM e dos 64-QAM acompanham a linha de correspondência conforme a modulação que está a ser utilizada no entanto existe um afastamento da teoria para a realidade. Para os 16-QAM o afastamento situa-se entre os 5-7 dB enquanto para os 64-QAM o afastamento está entre os 4-5 dB no eixo do SINR.

Se compararmos os dois cenários pedestre e veicular verifica-se que não existe diferenças nos dados teóricos tanto nos 16-QAM como nos 64-QAM, no entanto o mesmo não se passa na realidade com o cenário veicular a obter sempre valores superiores até aos 25 dB sendo suplantado pelo cenário pedestre apenas para os valores 26 e 27 de SINR.

### 4.3 Análise dos resultados obtidos no UL

Os mesmos pressupostos que foram usados para o DL são agora aplicados na análise aos resultados do UL.

#### 4.3.1 Análise dos dados em cenário Veicular

Para o UL a análise foi realizada num ambiente considerado urbano, mantendo a mesma largura de banda de 10 MHz. A zona onde foram recolhidas as medidas da rede comercial foi na área de Algés, Miraflores e Carnaxide. Na Figura 4-21 podemos ver a área dos *drivetestes* bem como a representação do SINR durante o percurso. As médias do RSRP, RSRQ e SINR obtidas ao longo do percurso podem ser observadas na Tabela 4-3.

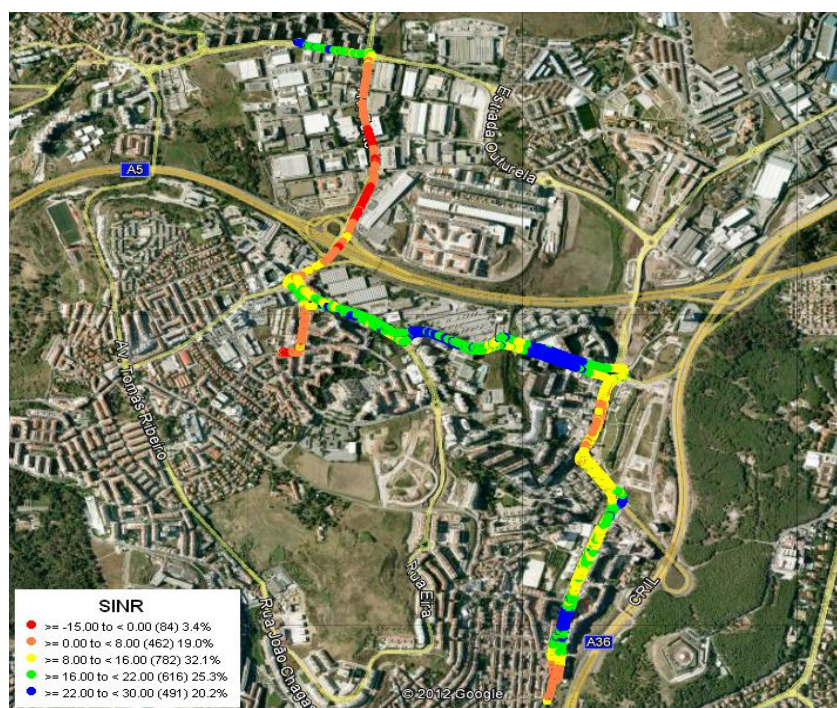


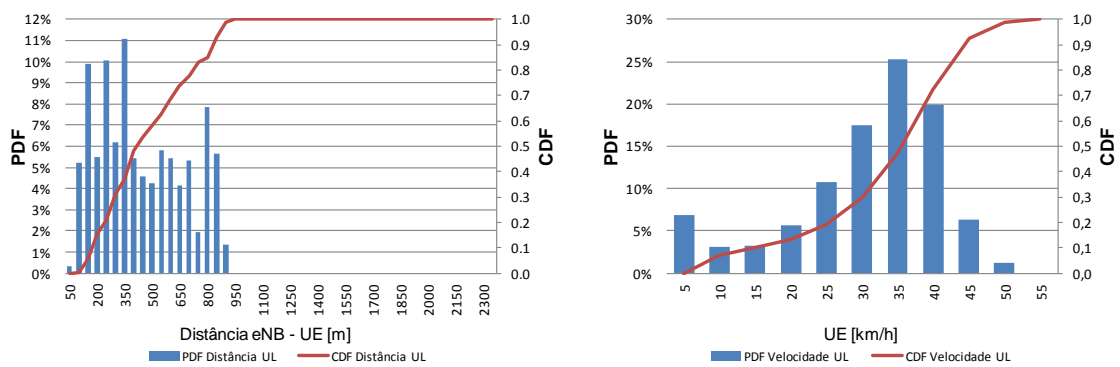
Figura 4-21 Área da recolha de medidas UL em ambiente urbano num cenário veicular.

Tabela 4-3 Médias obtidas ao longo do percurso no UL.

Largura de Banda	RSRP [dBm]	RSRQ [dB]	SINR [dB]
10 MHz	-85,6	-5,3	14,4

A Figura 4-22 (a) representa o histograma da distância medidas com GPS entre o eNodeB e o UE e a Figura 4-21 (b) representa a velocidade a que o UE se deslocou durante o ensaio. No total do percurso foram detetados 9 células sendo que a cada se refere um *Physical Channel Identity* (PCI) diferente. O trajeto para a recolha de medidas no DL é o mesmo que foi utilizado no UL. Durante o ensaio não foi possível atingir velocidades acima dos 50 km/h.

Como a densidade celular é maior neste cenário naturalmente que as distâncias do UE aos eNodeB são mais pequenas, situação típica em ambientes urbano. Na Figura 4-23 apresenta-se a distribuição do SINR para a recolha de medidas para o UL.



a) Distância para a célula servidora

b) Velocidade durante o ensaio

Figura 4-22 Estatísticas das medidas no cenário veicular no UL em ambiente urbano.

Observa-se que as amostras estão bastantes distribuídas e de uma forma quase uniforme pois trata-se de um ambiente urbano e o UE encontra-se mais perto das células servidoras do que num ambiente sub-urbano. A mediana encontra-se nos 16 dB de SINR.

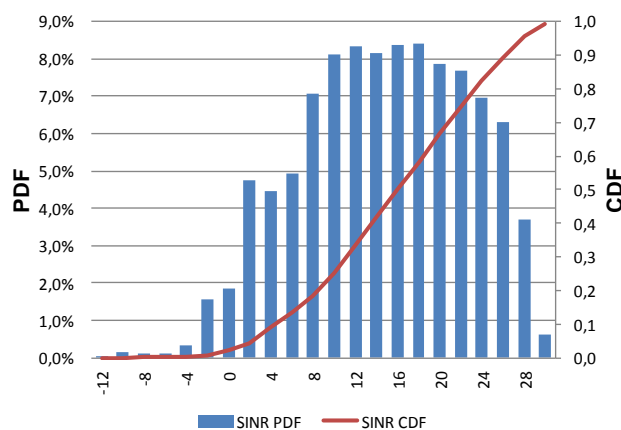


Figura 4-23 Distribuição do SINR no UL em cenário veicular urbano.

Na Figura 4-24 podemos observar o débito binário na camada física no canal ascendente sem outros utilizadores presentes na rede. Na mesma figura são apresentadas as médias os máximos e os mínimos atingidos. Constata-se que mesmo para valores baixos de SINR consegue-se obter débitos binários altos e que a partir dos 15 dB a média permanece inalterável nos 21 Mbps. No UL não se verificou o que passou com o DL onde se obtiveram valores muito próximo dos máximos teóricos.

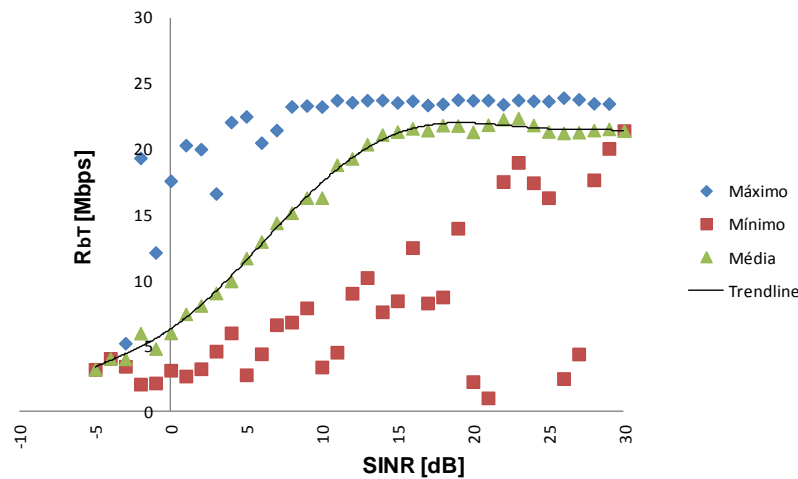


Figura 4-24 Débito Binário em função do SINR no UL em cenário veicular urbano.

Após o processamento dos dados recolhidos utilizou-se o débito binário e o SINR para escrever a expressão polinomial (4.7) que descreve a linha de correspondência da Figura 4-24:

$$R_{bTUL}[\text{Mbps}] = 0,1073\rho_{INUL}^4 - 6,2225\rho_{INUL}^3 + 79,087\rho_{INUL}^2 + 849,19\rho_{INUL} + 6107,4 \quad (4.7)$$

Quando comparamos o resultado das medidas da rede comercial da Figura 4-24 com os resultados teóricos da Figura 3-7 para a modulação dos 16-QAM verifica-se que a curva é semelhante mas encontra-se afastada cerca de 2 dB a 3 dB da relação SINR. Para os 64-QAM a curva dos dados reais começa a estabilizar mais cedo que na curva teórica.

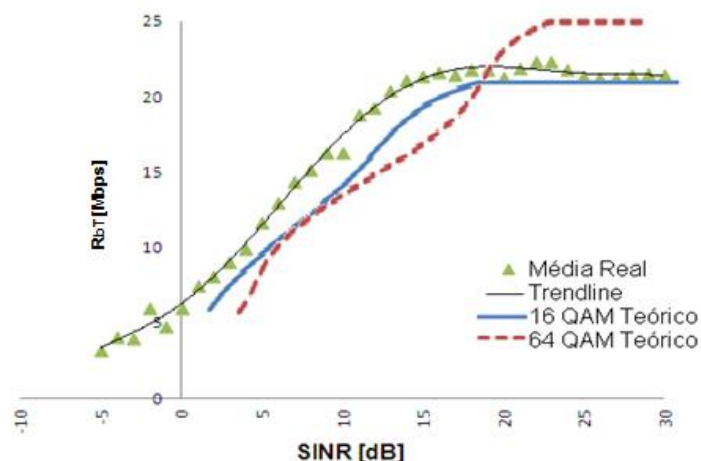


Figura 4-25 Comparativo entre os dados teóricos e os reais no UL em cenário veicular urbano.

No canal ascendente observa-se que os valores referidos na secção 3.1.1 para o RSRP também não são iguais. Na Figura 4-26 observa-se que o débito mantém-se estável no UL, muito perto dos 25 Mbps até aos -85 dBm e só depois começa a decrescer. Se compararmos com o DL (Figura 4-7) a descida do débito é mais tarde, no entanto mais acentuada.

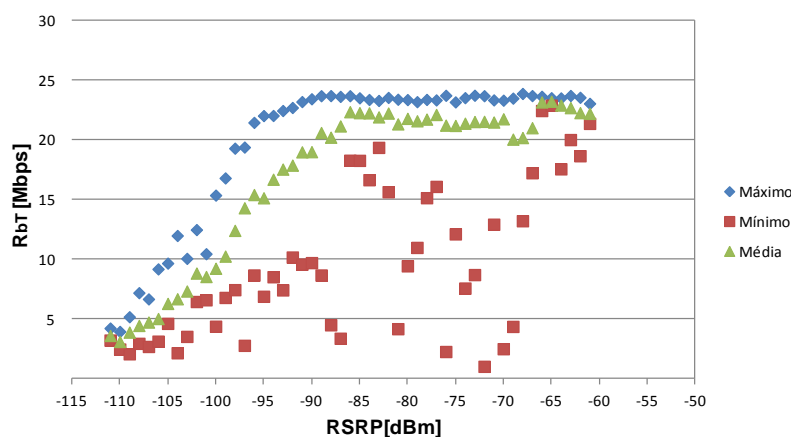


Figura 4-26 Débito Binário em função do RSRP no UL em cenário veicular urbano.

A distribuição das amostras do RSRP no UL encontra-se na Figura 4-27. A mediana encontra-se nos -92 dBm, tendo sido medida a maior percentagem de amostras nos -76 dBm de RSRP.

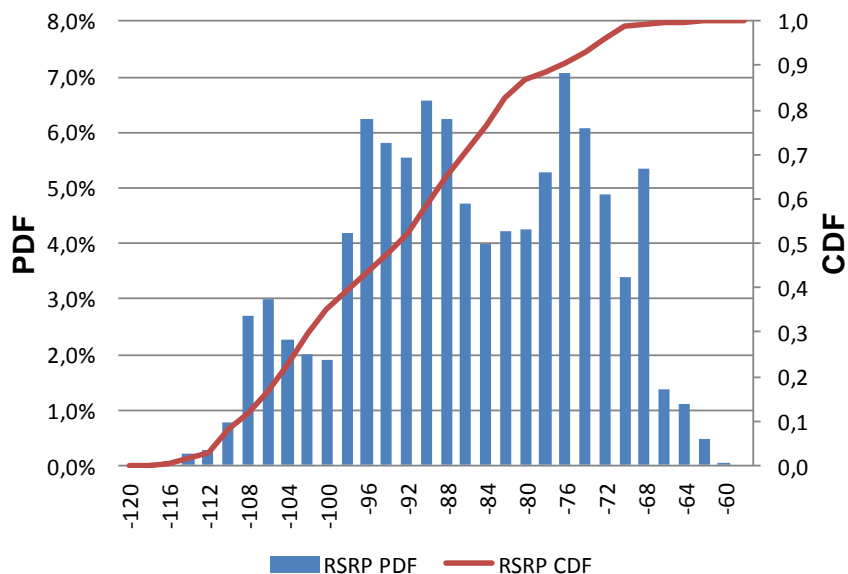


Figura 4-27 Distribuição do RSRP no UL em cenário veicular urbano.

As medidas recolhidas no cenário para o RSRQ no UL mostra que em comparação com o DL tem melhor qualidade mas isto deve-se ao facto do ambiente ser diferente e o UE não estar sempre tão afastado do eNodeB, Figura 4-28. Também aqui o que se encontra descrito na secção 3.1.2 não se verifica, no entanto existem poucas amostras abaixo dos -10dB para se tirar uma conclusão.

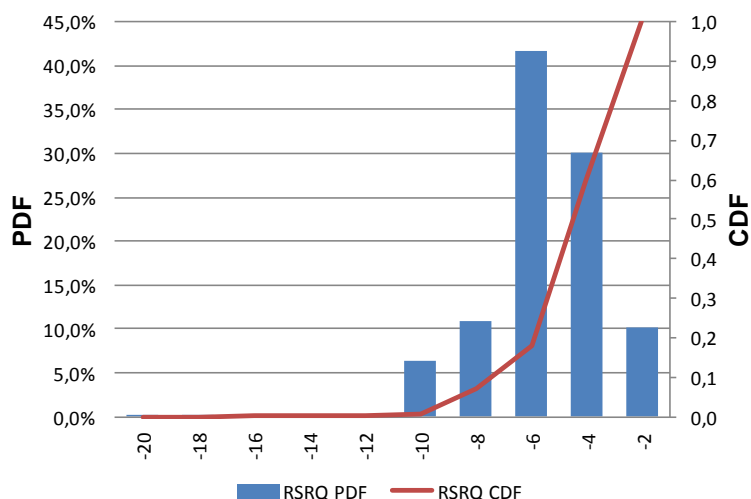


Figura 4-28 Distribuição do RSRQ no UL em cenário veicular urbano.

Na Figura 4-29, constata-se que entre os valores de -11 a -3 dB débito encontra-se entre os 13 e os 20 Mbps. Após os -11 dB de RSRQ o débito binário desce consideravelmente.

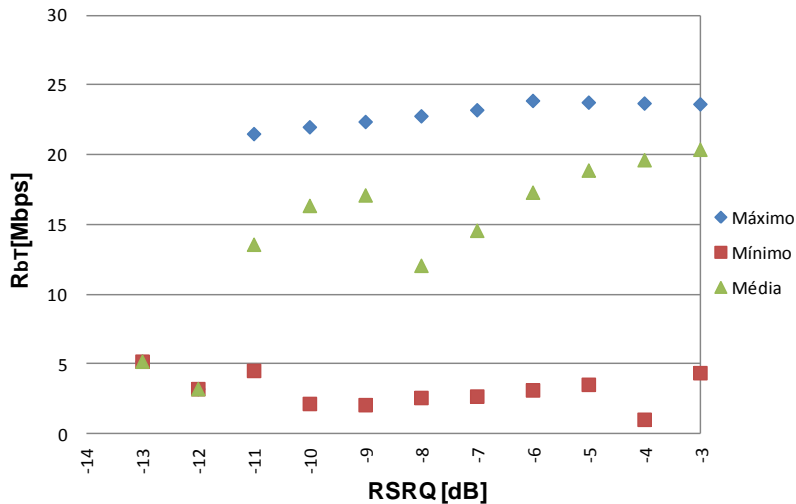


Figura 4-29 Débito Binário em função do RSRQ no UL em cenário veicular urbano.

No UL o comportamento do débito binário em função do MCS pode ser observado na Figura 4-30, de onde foi retirada a expressão analítica (4.8). Ao contrário do DL onde se chegou a obter amostras no index 28 de MCS no UL apenas se recolheu dados até ao index 23 de MCS.

$$R_{bTUL}[\text{Mbps}] = 23,296\tau^2 + 293,88\tau + 1492,1 \quad (4.8)$$

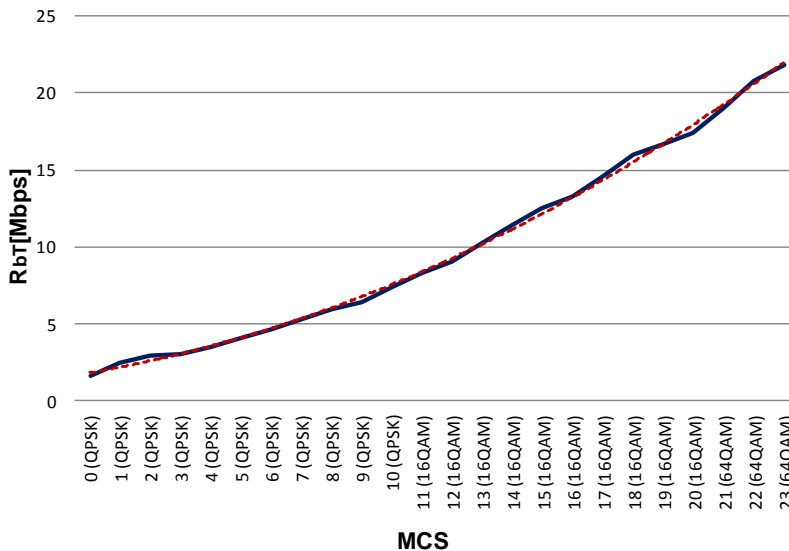


Figura 4-30 Débito Binário em função do MCS UL em cenário veicular urbano.

Na Figura 4-31 podemos ver a distribuição do MCS no UL com a maioria das amostras centradas entre os 22 e os 23 com a mediana no índice 23 de MCS, ou seja com mais de 65 das amostras com modulação nos 64-QAM.

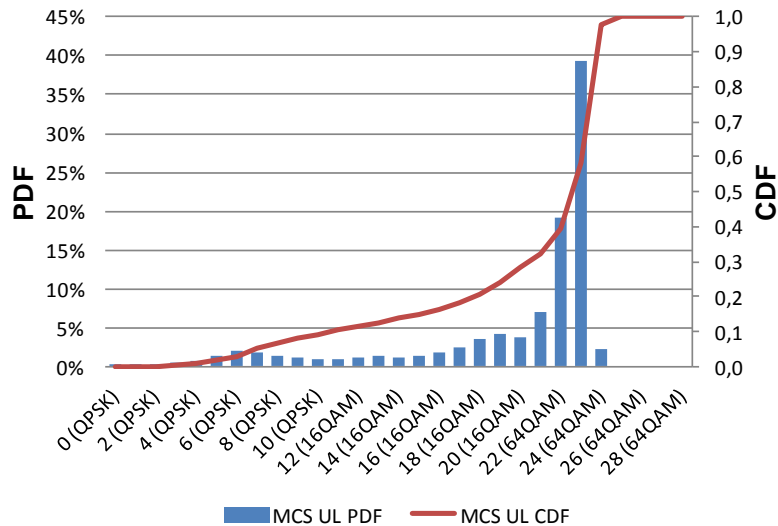


Figura 4-31 Distribuição do MCS no UL em cenário veicular urbano.

#### 4.3.2 Análise dos dados em cenário Pedestre

Nesta secção serão utilizados os mesmos pressupostos que foram empregues no cenário pedestre em DL. Na Figura 4-32 podemos observar a distribuição das amostras recolhidas para o SINR. A mediana está nos 14 dB.

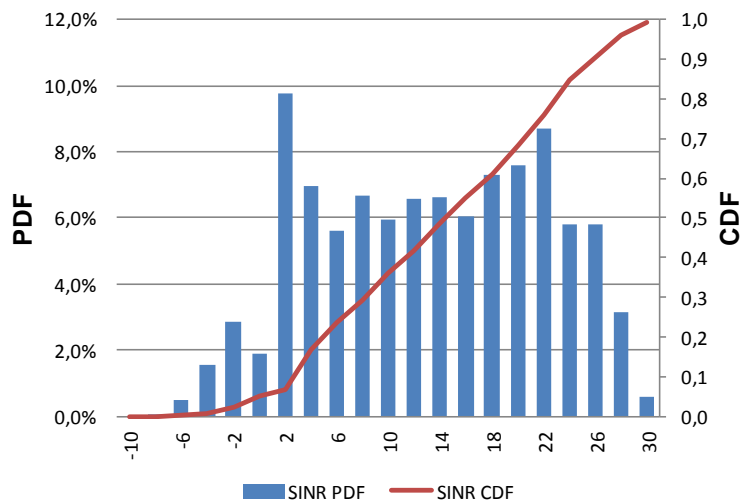


Figura 4-32 Distribuição do SINR no UL em cenário pedestre urbano.

Na Figura 4-33 é possível extrair a seguinte expressão (4.9) que representa o débito binário em função do SINR.

$$R_{bTUL}[\text{Mbps}] = 0,0013\rho_{INUL}^6 - 0,1087\rho_{INUL}^5 + 3,3897\rho_{INUL}^4 - 45,636\rho_{INUL}^3 + 230,21\rho_{INUL}^2 + 135,32\rho_{INUL} + 16157 \quad (4.9)$$

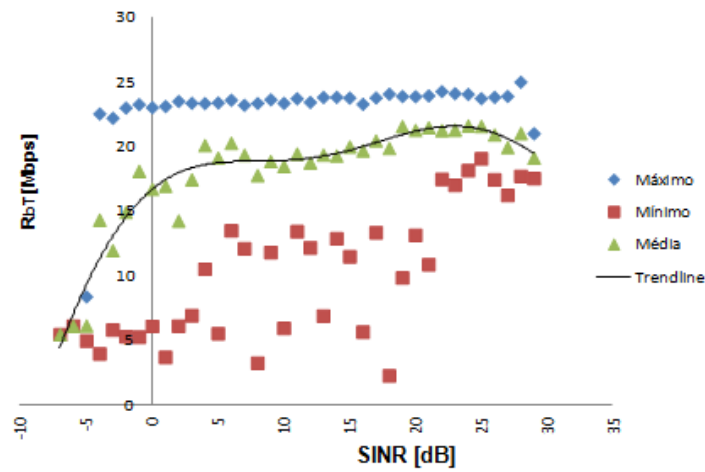


Figura 4-33 Débito Binário em função do SINR no UL em cenário pedestre urbano.

A Figura 4-34 representa a comparação entre os dados reais e os dados das simulações estudadas no capítulo 3. Observa-se que nas medidas reais mesmo quando o SINR apresenta valores negativos o débito binário já se encontra acima dos 5 Mbps.

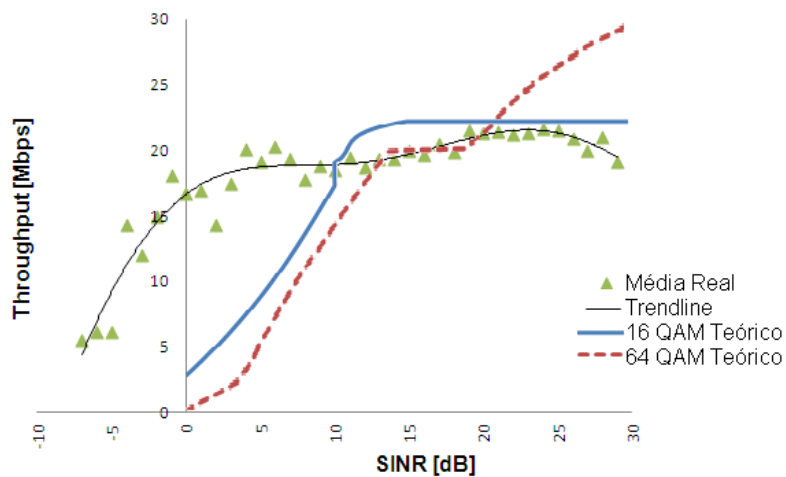


Figura 4-34 Comparativo entre os dados teóricos e os reais no UL em cenário pedestre.

Comparando o DL com o UL verifica-se que o UE consegue obter melhores débitos no UL quando os valores de SINR são baixos.

## 5 Conclusões

O objetivo principal desta tese é abordar o estudo dos parâmetros de desempenho da rede LTE comparando a campanha de medidas realizada, tanto em cenários de veicular como pedestre, com os resultados da literatura. Para além disso foram gerados modelos empíricos a partir das medidas tendo estes sido comparados com os modelos teóricos/simulados.

Os valores de débitos binários obtidos em ambos os cenários correspondem às expectativas criadas de que a banda larga móvel irá ter todos requisitos para poder substituir a banda larga fixa.

Com o LTE, praticamente houve uma revolução no equipamento utilizado nas redes móveis. A arquitetura de rede é agora toda em IP, sendo abandonada a componente de comutação de circuitos herdada da segunda geração (GSM). O eNodeB na rede LTE desempenha as funções que anteriormente tinham de ser desempenhadas por dois nós, as estações base (BTS e Node B) e as estações controladoras (BSC e RNC). Com o LTE é possível utilizar diferentes bandas do espectro com diferentes larguras de banda o que irá permitir aos operadores poderem “jogar” conforme for a morfologia do terreno e o ambiente como por exemplo se é urbano ou rural. Para a transmissão em LTE foi introduzido o OFDM que é uma técnica de transmissão digital baseado no conceito de modulação com multi-portadoras e que permite atingir elevadas taxas de transmissão.

No capítulo 3 foram identificados os principais parâmetros que influenciam o débito binário como é o caso do RSRP e do MIMO. Para o primeiro verificou-se que os valores apresentados na literatura não correspondem ao que acontece nas redes comerciais de LTE essencialmente nos valores inferiores a -95 dBm. Em [11] é afirmado que quando o valor passa os -95 dBm o débito já é muito baixo sendo já quase zero entre os -108 e 100 dBm. Este facto não se verificou com as medidas recolhidas. Com o RSRP inferior a -95 dBm ainda é possível atingir valores acima dos 20 Mbps (com uma largura de banda de 10 MHz) e para o intervalo de -108 a -100 dBm ainda se obtém débitos binários entre os 10 e 20 Mbps. No que respeita ao MIMO verificou-se que o débito é superior ao utilizar o Modo 3 face ao Modo 2, no

entanto não se verificou que fosse o dobro como se observa nas simulações teóricas.

As campanhas de medidas foram realizadas em dois ambientes diferentes com uma largura de banda de 10 MHz. Um foi em ambiente sub-urbano onde foram realizadas as medidas de DL na Costa da Caparica e o outro em ambiente urbano onde foram recolhidas medidas em UL nas áreas de Algés, Miraflores e Carnaxide. Estas medidas foram recolhidas sem outros utilizadores na rede. Em ambos os ambientes foram realizadas medidas em dois cenários, veicular e pedestre.

No cenário veicular em DL, foi possível ficar muito próximo dos 70 Mbps de débito binário, o que quer dizer que em boas condições rádio é quase possível atingir o máximo teórico de 73392 kbps para a largura de banda de 10 MHz, com MIMO utilizando o Modo 3. Observa-se que a linha das curvas teóricas para os 16 e 64-QAM fica sobreposta sobre a linha de correspondência criada através das medidas realizadas na rede comercial. No cenário pedestre, observa-se o mesmo que no cenário veicular, isto é, que o débito binário chega muito perto dos máximos teóricos, já a comparação entre a teoria e a realidade não é tão exata havendo um afastamento entre os 5-7 dB para os 16-QAM enquanto para os 64-QAM o afastamento está entre os 4-5 dB no eixo do SINR.

No cenário veicular em UL, não se atingiu os valores máximos teóricos tendo os valores da rede comercial ficado um pouco abaixo dos 25 Mbps. A linha de correspondência que foi criada é um pouco diferente das curvas teóricas, pois apesar do desfasamento existente na escala do SINR a linha de correspondência acompanha a curva dos 16-QAM até ao final não se verificando os débitos que a curva dos 64-QAM representa. No cenário pedestre para o UL, as curvas são muito diferentes, tendo sido interessante verificar que mesmo com um SINR baixo o débito máximo atingido andou muito próximo dos 25 Mbps.

Fazendo uma comparação entre o resultado obtido para os dois Modos de MIMO detetados ao longo do ensaio com a teoria Figura 3-3, verifica-se que o Modo 3 obtém débitos mais altos que o Modo 2, o qual já era esperado, no entanto o débito nunca chega a ser o dobro entre os dois Modos.

Verificou-se que o mapeamento do SNR - CQI teórico em comparação com o SNR-CQI das medidas reais é muito parecido até ao valor 10 de CQI que é sensivelmente 10 dB de SNR havendo apenas um desfasamento de 2 dB entre ambas as curvas. A partir dos 10 dB, a curva deixa de ser linear como até então.

Em termos de perspectivas para trabalho futuro, pensa-se que seria interessante realizar mais testes em redes comerciais em outros ambientes como o rural. Continuar o estudo do comportamento do débito binário com o SINR mas para outros serviços que não o FTP, como o caso do UDP e VoIP. Estes estudos deverão ter em conta apenas um utilizador e vários utilizadores para ver qual como se comporta o débito binário.



## Anexos

### A. Estrutura de trama e Canais físicos, de transporte e lógicos em LTE

#### A.1 Estrutura da Trama

Para que o sistema LTE possa manter a sua sincronização e seja capaz de gerir os diferentes tipos de informação que precisam de ser transportados entre o eNB e o terminal, foi definido uma trama e uma sub-trama para o e-UTRA, ou seja, a interface ar do LTE.

As estruturas das tramas para o LTE diferem, caso estejamos a falar de FDD ou TDD, pois ambas têm requisitos diferentes para a transmissão dos dados.

Existem dois tipos de estrutura de trama:

- Tipo 1: utilizada em sistemas FDD - A trama tipo 1 tem um comprimento de 10 ms. Esta é depois dividida em 20 *slots* individuais de 0.5 ms. As sub-tramas são a junção de dois slots, ou seja, dentro de uma trama existem 10 sub-tramas.

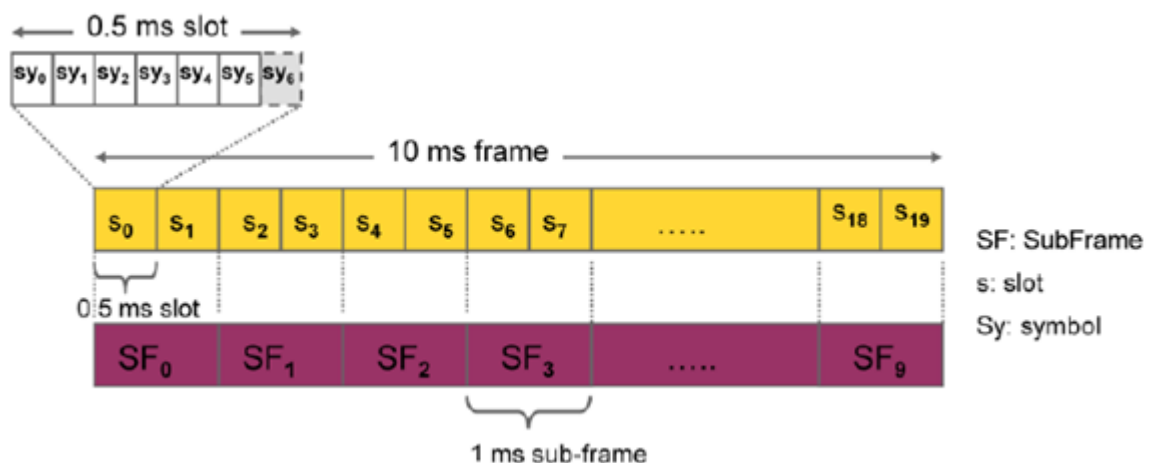


Figura A-1 Estrutura de trama FDD (extraído de [24]).

- Tipo 2: utilizada em sistemas TDD - A estrutura da trama tipo 2 usada no TDD é um pouco diferente. A trama continua a ter os 10 ms como no FDD, só que é

dividida duas sub-tramas de 5 ms cada uma. Por sua vez, cada sub-trama de 5 ms é subdividida em 5 partes, cada uma de 1 ms.

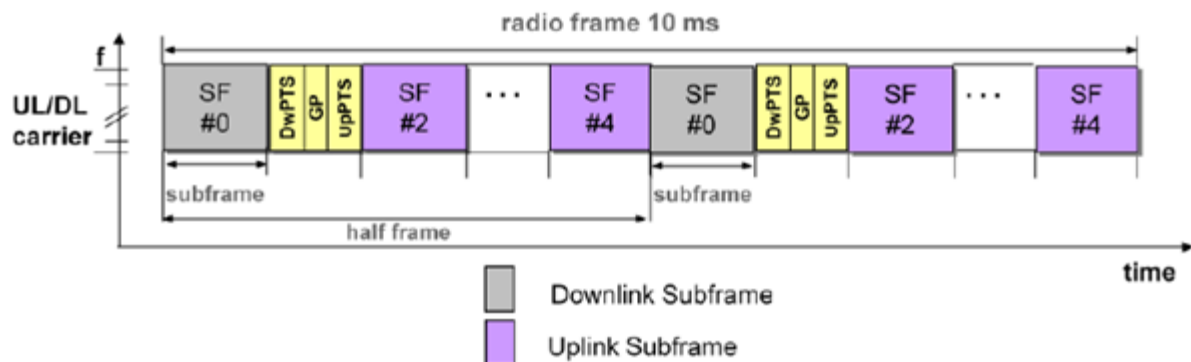


Figura A-2 Estrutura de trama TDD (extraído de [24]).

As sub-tramas podem ser divididas em dois modos: estrutura padrão e estrutura especial. A estrutura especial é constituída por 3 campos:

- DwPTS - DL Pilot Time Slot
- GP – Período de Guarda para separar o UL/DL
- UpPTS - UL Pilot Time Slot.

Estes três campos também são usados no TD-SCDMA e foram transpostos para o TDD em LTE. Estes campos são configuráveis individualmente em termos de comprimentos, no entanto o comprimento total dos três tem de ser obrigatoriamente da duração de 1 ms.

Uma das vantagens ao usar o TDD é que é possível alterar de forma dinâmica o balanceamento do DL e do UL de modo a satisfazer a carga existente na rede. Para que este balanceamento fosse conseguido de uma forma ordenada, foram criadas várias configurações padrão dentro do *standard* do LTE.

No total foram definidas 7 configurações, as quais utilizam uma periodicidade de 5 e 10 ms. No caso de ser utilizado uma configuração com 5 ms, é definida uma estrutura especial em cada uma das metades da trama. Se por outro lado, for utilizado uma configuração de 10 ms apenas é definido uma estrutura especial na primeira metade da trama.

Como se pode observar na Tabela A-1, as sub-tramas 0 e 5 encontram-se sempre reservadas para o DL e a seguir a uma sub-trama especial vem sempre uma sub-trama que vai ser utilizada no UL.

Tabela A-1 Formatação das sub-tramas no TDD

Configuração UL-DL	Alteração da periodicidade DL para UL [ms]	Número da Sub-trama									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	E	U	U	U	D	E	U	U	U
1	5	D	E	U	U	D	D	E	U	U	D
2	5	D	E	U	D	D	D	E	U	D	D
3	10	D	E	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	E	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	E	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	E	U	U	U	D	E	U	U	D

onde:

- D é a sub-trama destinada à transmissão no DL
- E é sub-trama especial a qual é utilizada pelo tempo de guarda
- U é a sub-trama destinada à transmissão no UL

## A.2 Canais físicos, de transporte e lógicos

Para que os dados possam ser transportados pela interface rádio no LTE, existe a necessidade de utilizar vários canais de forma a separar os diferentes tipos de dados e permitir que eles sejam transportados através da rede de acesso rádio de uma forma ordenada. Os diferentes canais fornecem interfaces para as camadas mais altas dentro da estrutura do protocolo LTE e permitem uma segregação ordenada e definida dos dados.

Existem três categorias nas quais são agrupados os vários canais:

Os canais físicos transportam a informação das camadas superiores os quais são mapeados em canais de transporte. Os canais de transporte atuam como uma interface entre a camada de acesso ao meio e a camada física.

Os canais de transporte fazem 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.

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 a informação no plano do utilizador é transportada pelo canal lógico de controlo de tráfego.

### A.2.1 Canais Físicos no LTE

Os canais físicos variam entre o DL e o UL sendo que ambos têm requisitos diferentes e operam de maneira diferente.

#### A.2.1.1 Ligação Descendente

*Physical DL Shared Channel (PDSCH)*: é o principal canal para transporte de informação o qual é assignado aos utilizadores de uma forma dinâmica e oportunista. O PDSCH transporta os dados em *Transport Blocks* (TB) o que corresponde a um MAC PDU. Os TB passam da camada MAC para a camada física uma vez por *Transmission Time Interval* (TTI) ou seja em 1 ms. Para prevenir que haja erros no canal de propagação é utilizado um codificador com *forward error correction*. Os dados são primeiro mapeados nas camadas espaciais de acordo o vários modos de MIMO e depois são mapeados em símbolos de modulação os quais incluem QPSK, 16-QAM e 64-QAM. Os recursos físicos são atribuídos com base em dois blocos de recursos para um TTI (1 ms). Corresponde a 12 sub-portadoras (180kHz) para 14 símbolos de OFDM com um prefixo cíclico normal. O PDCH também é usado para transmitir informações de *broadcast* que não são enviadas no PBCH, as quais incluem os *System Information Blocks* (SIB) e mensagens de *paging*.

*Physical Broadcast Channel (PBCH)*: Este canal transporta a informação de sistema necessária para os UEs que necessitam de aceder à rede. A única informação que transporta são as mensagens *Master Information Block* (MIB). O esquema de modulação usado é sempre o QPSK. Os bits são depois codificados através de

sequência de codificação específica para a célula de forma a evitar confusão com a informação de outras células. As mensagens MIB no PBCHs são mapeadas nas 72 sub-portadoras ou em 6 RBs centrais, independentemente da largura de banda. A informação contida no PBCH é repetida todos os 40 ms, ou seja, um TTI do PBCH inclui 4 tramas rádio. As transmissões PBCH têm 14 bits, 10 bits livres e 16 bits CRC.

*Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)*: Este canal informa o UE sobre o formato do sinal recebido, indica o número de símbolos OFDM (1,2 ou 3) utilizados no PDCCH. A informação contida no PCFICH é essencial porque o UE não dispõe de informação prévia sobre o tamanho da região de controlo. O PCFICH é transmitido no primeiro símbolo de cada sub-trama e transporta um campo com o *Control Format Indicator (CFI)*. O CFI contém uma palavra de código com 32 bits a qual representa 1, 2 ou 3. O CFI4 encontra-se reservado para um uso futuro. O PCFICH utiliza sempre uma modulação QPSK para garantir uma receção robusta.

*Physical Downlink Control Channel (PDCCH)*: O principal objetivo deste canal físico é transportar informação relacionada com o escalonamento.

- Escalonamento dos recursos no DL;
- Controlo de potência no UL;
- Recurso reservados no UL;
- Indicação de paging ou mensagens com informação de sistema.

O PDCCH também transporta uma mensagem na qual vai a informação de controlo para um terminal em particular ou para um grupo de terminais, *Downlink Control Information (DCI)*. Existem vários tipos de formatos de DCI as quais são definidos tamanhos diferentes. Os diferentes tipos de formato incluem: Tipo de 0, 1, 1<sup>a</sup>, 1B, 1C, 1D, 2, 2<sup>a</sup>, 2B, 2C, 3, 3<sup>a</sup> e 4.

*Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)*: Este canal é usado para relatar o estado do *Hybrid ARQ*. O sinal HARQ ACK / NACK é enviado de forma a indicar se um bloco de transporte foi recebido corretamente ou não. O indicador HARQ necessita apenas de 1 bit - "0" indica ACK, e "1" indica NACK.

O PHICH tipicamente é apenas transmitido dentro do primeiro símbolo. Se as condições rádio forem fracas, então o PHICH é estendido a mais símbolos para que exista robustez.

*Physical Multicast Channel (PMCH)*: este canal físico transporta informação de sistema referente a transmissões multicast.

#### A.2.1.2 Ligação Ascendente

*Physical Uplink Control Channel (PUCCH)*: o canal PUCCH fornece os requisitos para os vários controlos de sinalização. Existe um número de formatos diferentes de PUCCH definidos para que a informação necessária seja transmitida pelo canal da forma mais eficiente consoante o cenário encontrado. Este canal também tem a funcionalidade de enviar SR's, *Scheduling Requests* (pedidos de escalonamento). Na Tabela A-2 podemos encontrar os vários formatos.

Tabela A-2 Diferentes formatos do canal PUCCH.

FORMATO PUCCH	INFORMAÇÃO de CONTROLO no UL	ESQUEMA de MODULAÇÃO	BITS por SUB-TRAMA
Formato 1	SR	N/A	N/A
Formato 1a	1 bit HARQ ACK/NACK com ou sem SR	BPSK	1
Formato 1b	2 bit HARQ ACK/NACK com ou sem SR	QPSK	2
Formato 2	CQI/PMI ou RI	QPSK	20
Formato 2a	CQI/PMI ou RI e 1 bit HARQ ACK/NACK	QPSK + BPSK	21
Formato 2b	CQI/PMI ou RI e 2 bit HARQ ACK/NACK	QPSK + BPSK	22

*Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)*: Este canal físico é o inverso do PDSCH no UL.

*Physical Random Access Channel (PRACH)*: Este canal físico é usado para funções de acesso aleatório. Trata-se da única transmissão não sincronizada que o UE pode fazer dentro do LTE. Esta falta de sincronização ocorre porque os atrasos de

propagação no DL como no UL são desconhecidos. A instância PRACH é composta de duas sequências: um prefixo cíclico e um período de guarda. A sequência do preâmbulo pode ter de ser repetida de forma a permitir que o eNB o descodifique, visto as condições de rádio nem sempre serem boas.

Na Figura A-3 podemos observar a disposição dos canais físicos.

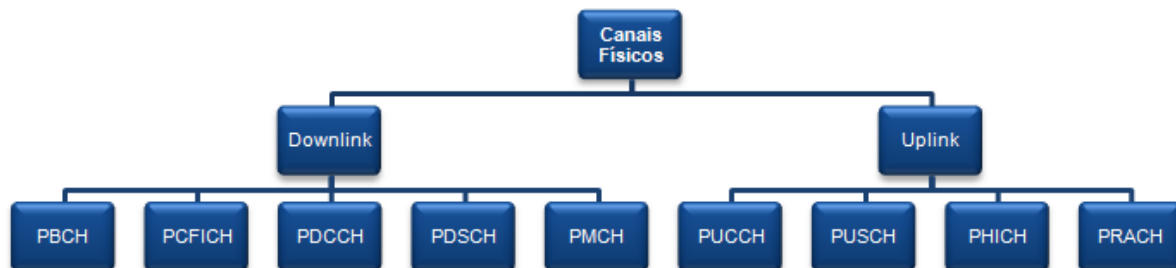


Figura A-3 Disposição dos canais físicos.

## A.2.2 Canais de Transporte no LTE

Os canais de transporte variam entre o UL e o DL pois cada um deles tem requisitos e funcionam de maneira diferente. É nos canais de transporte da camada física que a informação é transferida para a MAC e para as instâncias superiores.

### A.2.2.1 Ligação Descendente

*Broadcast Channel (BCH)*: O canal de transporte BCH tem um formato de transporte fixo e é transmitido em toda a área de cobertura da célula. No LTE, o canal de *broadcast* é usado para transmitir as mensagens de informação do sistema, as quais são necessárias para que os terminais possam aceder ao sistema. Devido à dimensão do campo do SI, o BCH é dividido em duas partes – primário (P-BCH) e dinâmico (D-BCH) [24]. A parte associada ao P-BCH contém os parâmetros básicos de rede L1/L2, os quais são necessários para desmodular o D-BCH o qual contém o resto da informação associadas ao SI. O P-BCH é caracterizado por 4 pontos:

- Esquema de modulação é QPSK;
- Existe apenas um bloco de transporte fixo por TTI;
- O CCPCCH é transmitido nas 72 sub-portadoras ativas, centradas em torno da sub-portadora DC;

- Sem HARQ.

*Downlink Shared Channel (DL-SCH):* O DL-SCH é o principal canal de transporte na transmissão de informação no DL. Este canal suporta as principais funcionalidades do LTE como por exemplo, adaptação dinâmica da velocidade, escalonamento de canal dependente tanto no domínio do tempo como da frequência e multiplexagem espacial. O *Discontinuous Reception (DRX)* também é suportado neste canal, com isso, consegue-se reduzir o consumo da bateria do terminal. O DL-SCH também é utilizado para transmitir informação de sistema que não esteja mapeada no BCH. É possível haver vários DL-SCH por célula [26].

*Paging Channel (PCH):* este canal é utilizado para transmitir informação de *paging* na ligação descendente, ou seja, quando a rede pretende iniciar as comunicações com um terminal.

*Multicast Channel (MCH)* este canal de transporte é usado para transmitir informação MCCH quando existe a necessidade de estabelecer transmissões multicast.

#### A.2.2.2 Ligação Ascendente

*Uplink Shared Channel (UL-SCH):* O UL-SCH é o principal canal de transporte na transmissão de informação no UL. É semelhante ao DL-SCH.

*Random Access Channel (RACH):* é o canal utilizado na UL e tem como finalidade responder às mensagens de paging, ou seja, transportar a informação de controlo do terminal, tais como pedidos de estabelecimento de ligação. Na Figura A-4 podemos observar a disposição dos canais de transporte.

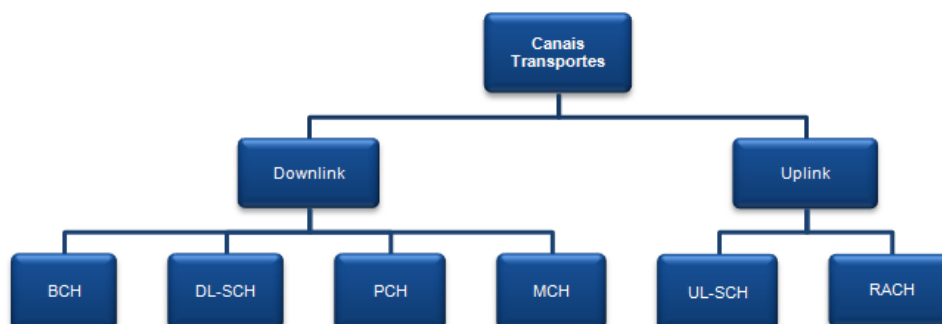


Figura A-4 Disposição dos canais de transporte.

### A.2.3 Canais Lógicos no LTE

Os canais lógicos abrangem os dados transmitidos através da interface rádio. Existem dois tipos de canais lógicos: os de controlo e os de tráfego.

#### A.2.3.1 Canais de Controlo transportam informação no plano de controlo.

*Broadcast Control Channel (BCCH)*: Este canal providência a informação de sistema de modo a que todos os terminais móveis acessem à rede através da célula do eNB. Claro que, para isto acontecer é necessário que cada terminal móvel possua já a informação de controlo do sistema antes de aceder ao sistema.

*Paging Control Channel (PCCH)*: este canal de controlo é usado para paging, ou seja, quando o eNB envia informação para procurar um terminal móvel na rede.

*Common Control Channel (CCCH)*: este canal é usado para obter informações de acesso aleatório, como por exemplo no estabelecimento de uma ligação.

*Multicast Control Channel (MCCH)*: este canal é utilizado na transmissão de informação de controlo de serviços multimédia desde o terminal até um ou mais canais de tráfego multicast. É utilizado principalmente em *Smartphones*.

*Dedicated Control Channel (DCCH)*: este canal de controlo é utilizado para transportar informação de controlo específica para um determinado utilizador, como por exemplo, controlo de potência, *handover*, etc..

#### A.2.3.2 Canais de Tráfego transportam informação no plano do utilizador.

*Dedicated Traffic Channel (DTCH)*: trata-se de um canal ponto-a-ponto, dedicado a um único utilizador, para a transferência de informações. O DTCH pode existir em ambos os sentidos UL e DL.

*Multicast Traffic Channel (MTCH)*: Este canal é usado para a transmissão de dados multicast.

Na Figura A-5 podemos observar a disposição dos canais lógicos.

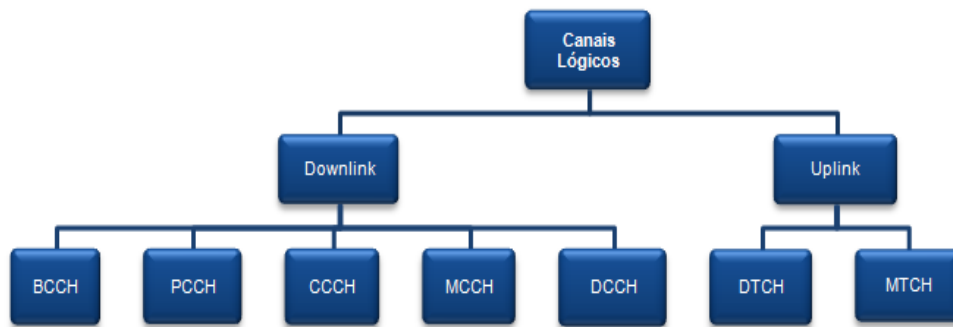


Figura A-5 Disposição dos canais lógicos.

## B. Bandas de Frequência e Espectro no LTE

### B.1 Introdução

Neste Anexo são descritas as bandas de frequência e o espectro que poderá ser utilizado no LTE, tanto para o FDD como para o TDD, com particular nota para o que é utilizado em Portugal.

Atualmente existe um enorme número de bandas de frequência que estão a ser assignadas como prováveis para o uso no LTE. Algumas destas faixas, já se encontram em utilização por outros sistemas, enquanto outras faixas são completamente novas tendo existido a necessidade de realocar algum espectro. Em Portugal com a venda do espectro para LTE na faixa dos 1800 MHz pela Anacom, houve necessidade de realocar parte do espectro que estava alocado ao GSM 1800 MHz (DCS).

### B.2 Banda de Frequência para transmissões FDD e TDD

A utilização do espectro FDD requer bandas emparelhadas, ou seja, uma para o UL e outra para o DL, enquanto no espectro TDD apenas existe a necessidade de uma única banda, uma vez que ambos os sentidos (DL e UL) se encontram na mesma frequência, apenas se encontram separados no tempo. Devido a este facto, foi necessário recorrer a diferentes bandas para o FDD e TDD.

É possível que um terminal tenha de detetar se uma transmissão está em FDD ou TDD e qual deve ser realizada numa determinada banda. Os UEs que estejam em movimento podem encontrar ambos os tipos na mesma banda. Existe portanto a necessidade de detetar qual o tipo de transmissão que é utilizado nessa determinada banda, no local onde se encontrarem.

Foram atribuídos números às diferentes bandas de frequência no LTE. Até ao momento, as bandas entre 1 e 22 são de espectro emparelhado e as bandas entre 33 e 41 são para espectro não emparelhado [26].

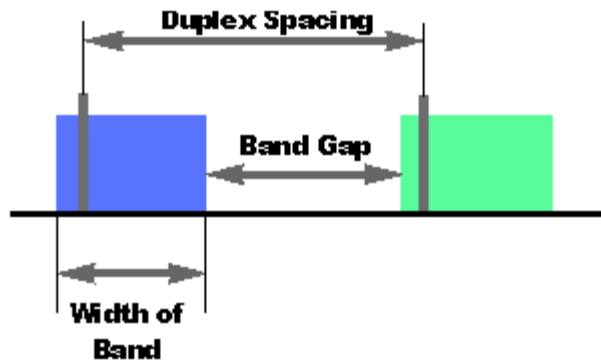


Figura B-1 Definição da Banda de Frequência no LTE (extraído de [5]).

### B.2.1 Atribuição de Bandas de Frequência para FDD no LTE

Existe um grande número de atribuições do espectro rádio que foi reservado para as transmissões FDD no LTE. Atualmente em Portugal os operadores apenas estão a utilizar o FDD. Na Tabela B-1, observa-se os lotes adquiridos pelos operadores nacionais – Optimus (laranja), TMN (azul) e Vodafone (vermelho) aquando do leilão realizado pelo regulador português Anacom. A Vodafone foi o operador que mais espectro adquiriu.

As bandas de frequência FDD no LTE são emparelhadas de forma a permitir uma transmissão simultânea em duas frequências. Entre as bandas, existe uma separação suficientemente grande de forma a permitir que os sinais transmitidos não prejudiquem indevidamente o desempenho do recetor. Se os sinais estiverem muito próximos da frequência do recetor este poderá ficar bloqueado e a sua sensibilidade comprometida. O espaçamento deve ser suficiente de forma a permitir que o filtro da antena atenuasse bastante o sinal transmitido dentro da banda de receção. Na Tabela B-2 são apresentadas as bandas de frequência para transmissões FDD no LTE para o mundo inteiro.

### B.2.2 Atribuição de Bandas de Frequência para TDD no LTE

Existem diversas bandas de frequência não emparelhadas que estão a ser preparadas para serem utilizadas em transmissões TDD no LTE. Na Tabela B-3 são apresentadas as bandas de frequência para transmissões TDD no LTE. Como resultado das negociações nas reuniões da ITU, as atribuições de espectro do LTE

estão constantemente a ser aumentadas. Essas atribuições do espectro para o LTE são resultantes, em parte, do dividendo digital mas também da pressão causada pela necessidade crescente de comunicações móveis. Muitas das novas atribuições do espectro para o LTE são relativamente pequenas, normalmente 10-20 MHz de largura de banda, sendo este um motivo de preocupação [27].

Tabela B-1 Frequência adquiridas pelos operadores nacionais (adaptado de [27]).

Lote	Faixa de frequências	Tamanho dos lotes	Preço do Lote (euro)	Vencedor
B1	800 MHz	2 x 5 MHz	45.000.000	TMN
B2				TMN
B3				VODAFONE
B4				VODAFONE
B5				OPTIMUS
B6				OPTIMUS
C2	900 MHz	2 x 5 MHz	30.000.000	VODAFONE
D1	1800 MHz			TMN
D2				TMN
D3				VODAFONE
D4				VODAFONE
D5				OPTIMUS
D6		OPTIMUS		
E1	1800 MHz	2 x 4 MHz	30.000.000	TMN
E2				VODAFONE
E3				OPTIMUS
G1	2,6 GHz	2 x 5 MHz	3.000.000	TMN
G2				TMN
G3				TMN
G4				TMN
G5				VODAFONE
G6				VODAFONE
G7				VODAFONE
G8				VODAFONE
G9				OPTIMUS
G10				OPTIMUS
G11				OPTIMUS
G12		OPTIMUS		
H1		25 MHz		VODAFONE

Tabela B-2 Bandas de Frequência do LTE e Larguras de Banda suportadas por cada Banda FDD (extraído de [3]).

LTE BAND NUMBER	UL [MHZ]	DL [MHZ]	BANDWIDTH [MHZ]	WIDTH OF BAND [MHZ]	BAND GAP [MHZ]
1	1920 - 1980	2110 - 2170	5, 10, 15, 20	2x60	130
2	1850 - 1910	1930 - 1990	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	2x60	20
3	1710 - 1785	1805 - 1880	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	2x75	20
4	1710 - 1755	2110 - 2155	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	2x45	355
5	824 - 849	869 - 894	1.4, 3, 5, 10	2x25	20
6	830 - 840	875 - 885	5, 10	2x10	25
7	2500 - 2570	2620 - 2690	5, 10, 15, 20	2x70	50
8	880 - 915	925 - 960	1.4, 3, 5, 10	2x35	10
9	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	5, 10, 15, 20	2x35	60
10	1710 - 1770	2110 - 2170	5, 10, 15, 20	2x60	340
11	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9	5, 10	2x20	28
12	698 - 716	728 - 746	1.4, 3, 5, 10	2x18	12
13	777 - 787	746 - 756	5, 10	2x10	41
14	788 - 798	758 - 768	5, 10	2x10	40
15	1900 - 1920	2600 - 2620	-	2x20	680
16	2010 - 2025	2585 - 2600	-	2x15	560
17	704 - 716	734 - 746	5, 10	2x12	18
18	815 - 830	860 - 875	5, 10, 15	2x15	30
19	830 - 845	875 - 890	5, 10, 15	2x15	30
20	832 - 862	791 - 821	5, 10, 15, 20	2x30	71
21	1447.9 - 1462.9	1495.5 - 1510.9	5, 10, 15	2x15	33
22	3410 - 3500	3510 - 3600	-	2x90	10
23	2000 - 2020	2180 - 2200	-	2x20	160
24	1625.5 - 1660.5	1525 - 1559	-	2x34	135,5
25	1850 - 1915	1930 - 1995	-	2x65	15

Tabela B-3 Bandas de Frequência do LTE e Larguras de Banda suportadas por cada Banda TDD (extraído de [3]).

LTE BAND NUMBER	ALLOCATION [MHZ]	BANDWIDTH [MHZ]	WIDTH OF BAND [MHZ]
33	1900 – 1920	5, 10, 15, 20	1x20
34	2010 – 2025	5, 10, 15	1x15
35	1850 – 1910	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1x60
36	1930 – 1990	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1x60
37	1910 – 1930	5, 10, 15, 20	1x20
38	2570 – 2620	5, 10, 15, 20	1x50
39	1880 – 1920	5, 10, 15, 20	1x40
40	2300 – 2400	5, 10, 15, 20	1x100
41	2496 – 2690	5, 10, 15, 20	1x194
42	3400 – 3600	5, 10, 15, 20	1x200
43	3600 – 3800	5, 10, 15, 20	1x200



## C. Definições das classes e categorias de Terminais LTE

Da mesma forma que uma variedade de outros sistemas adotam classes e categorias para os seus equipamentos de acesso, também o LTE tem as suas próprias classes e categorias. Estas categorias são fundamentais pois é baseado nelas que os padrões são definidos para que os equipamentos funcionem em condições.

As categorias e as classes dos terminais são necessárias para garantir que a estação de base, ou eNB no caso do LTE, possa comunicar corretamente com o UE. Este ao transmitir para a rede a informação da sua categoria, faz com que a estação base seja capaz de determinar qual será o desempenho do UE e comunicar com ele de acordo com as suas capacidades, ou seja, o eNB não enviará para o UE pedidos ou recursos que dada a sua categoria não possa responder/utilizar.

Atualmente existem cinco categorias de terminais LTE definidas no 3GPP TS 36.306. Como pode ser observado na Tabela C-1, as diferentes categorias de terminais dispõem de uma larga variedade no que respeita aos parâmetros que suportam e ao seu desempenho. A categoria 1, por exemplo, não suporta MIMO, enquanto a categoria 5 suporta 4x4 MIMO.

É interessante verificar que um terminal de classe 1 de LTE não oferece um desempenho superior ao oferecido pela categoria mais alta de HSPA. Além disso todas as categorias de terminais de LTE são capazes de receber transmissões de até quatro de antenas.

Um resumo dos diferentes parâmetros das categorias é fornecido pelo 3GPP Rel8 padrão e pode ser observado na Tabela C-1. De realçar que um UE, qualquer que seja a sua categoria, pode utilizar a largura de banda máxima disponível no LTE que é os 20 MHz.

Para recolha dos dados em LTE, foi utilizado uma Pen Banda Larga 4G ZTE MF820D, Figura C-1, a qual se encontra na categoria 3. Na Tabela C-2, pode-se observar os parâmetros da pen de banda larga, como as várias tecnologias que

suporta, as suas respetivas bandas de funcionamento, qual a potência máxima transmitida por tecnologia e os sistemas operativos que suporta.

Tabela C-1 Parâmetros das categorias.

Categoria		1	2	3	4	5
Débito Máximo [Mbps]	DL	10	50	100	150	300
	UL	5	25	50	50	75
Capacidade para funcionalidades físicas						
Largura de Banda RF		20MHz				
Débito Máximo Mbps	DL	QPSK, 16-QAM, 64-QAM				
	UL	QPSK, 16-QAM				QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Multi – Antenas						
2 Rx Diversity		Já se encontra definido nos requisitos de desempenho em todas as categorias do LTE				
2X2 MIMO		Não é suportado	Mandatório			
4X4 MIMO		Não é suportado				Mandatório



Figura C-1 Pen utilizada para a recolha de medidas.

Tabela C-2 Especificações da pen de banda larga utilizada (adaptado de [28]).

	Funcionalidade	Descrição	
RF	Chipset	RTR8600	
	Receive Diversity		
	Main Antenna	Internal	
	Receive Diversity Antenna	Internal	
	GSM Band	850/900/1800/1900MHz	
	UMTS Band	2100/900MHz	
	LTE Band	LTE FDD 2600MHz(Band 7),1800MHz(Band 3),DD800MHz(Band 20)	
	RxDiv Band	LTE: 2600/1800/DD800MHz UMTS: 2100/900MHz	
	MIMO	2 x 2 DL SU-MIMO for LTE and HSPA+	
	Max. transmitter power	LTE: +23dBm (Power Class 3) WCDMA: +24dBm (Power Class 3) GSM/GPRS 850MHz/900MHz: +33dBm (Power Class 4) GSM/GPRS 1800MHz/1900MHz: +30dBm (Power Class 1) EDGE 850MHz/900MHz: +27dBm (Power Class E2) EDGE 1800MHz/1900MHz: +26dBm (Power Class E2)	
Technical Standard	GSM/EDGE/WCDMA	GSM CS: UL 14.4kbps/DL 14.4kbps GPRS: Multi-slot Class 10 EDGE: Multi-slot Class 12 WCDMA CS: UL 64kbps/DL 64kbps WCDMA PS: UL 384kbps/DL 384kbps	
	HSDPA/HSUPA/HSPA+/LTE	HSDPA: DL 3.6Mb/s(Category 6) DL 7.2Mb/s(Category 8) DL 14.4Mb/s(Category 10) DL 1.8Mb/s(Category 12) DL 21Mb/s(Category 14) DL 28Mb/s(Category 16) DL 28Mb/s(Category 18) DL 42Mb/s(Category 24) HSUPA: UL 2Mb/s(Category 5) UL 5.76Mb/s(Category 6) LTE FDD(Category 3): DL 100Mb/s UL 50Mb/s	
	3GPP Release	LTE Rel 8 (FDD) WCDMA Rel '99 plus Rel 5 HSDPA, Rel 6 HSUPA, Rel 7 HSPA+, Rel 8 DC-HSPA+	
	OS		Windows XP
			Windows Vista
			Windows 7
			MAC
		Linux	
GPRS Class		Class B	



- [1] Wauters, R., Ericsson Forecasts 5 Billion Mobile Broadband Subscribers, Data Traffic to Grow Tenfold, By 2016.
- [2] Holma, H. and Toskala, A., *LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access* (1st Edition), John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, 2009.
- [3] 3GPP Document TS 36.101, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (rel. 8).” Abril, 2004
- [4] 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.
- [5] Agilent Technologies. 3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development and Test Challenges, Application Note. Junho, 2009.
- [6] 3GPP, TS36.300. Versão 9.1.0 *Technical Specification Evolved UTRA aspects; Overall description (Release 8)*. Set., 2009.
- [7] Holma, H. and Toskala, A., *WCDMA for UMTS - HSPA Evolution and LTE* (4rd Edition), John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, 2007.
- [8] Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker. "LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice". John Wiley and Sons, 2009.
- [9] Salo, J., Nur-Alam, M., Chang, K., *Practical Introduction to LTE Radio Planning*, White Paper, European Communications Engineering (ECE) Ltd, Espoo, Finlândia, Nov. 2010 ([http://www.eceltd.com/lte\\_rf\\_wp\\_02Nov2010.pdf](http://www.eceltd.com/lte_rf_wp_02Nov2010.pdf)).
- [10] *Dahlman, E., Ekstrom, H., Furuskar, A., Jading, Y., Karlsson, J., Lundevall, M., Parkvall, S., “3G Long-Term Evolution – Radio Interface Concepts and Performance Evaluation”, in Proc. of VTC’06 Spring – 63rd IEEE Vehicular Technology Conference, Melbourne, Austrália, Maio, 2006.*

- [11] Kreher, R., Gaenger, K., LTE Signaling – Troubleshooting & Optimization. John Wiley and Sons, 2011.
- [12] Agilent Technologies, <http://www.agilent.com/about/newsroom/tmnews/background/N5106A/Set>, 2012.
- [13] Telesystem Innovations, *The Seven Modes of MIMO in LTE*, White Paper, Telesystem Innovations (TSI), Toronto, Canada, 2009.
- [14] Jacinto, N.M., Performance Gains Evaluation from UMTS/HSPA+ to LTE at the Radio Network Level, M.Sc. Thesis, Technical University of Lisbon, Lisboa, Portugal, 2009.
- [15] Mehlführer, C., Wrulich, M., Ikuno, J., Bosanska, D., and Rupp, M., "Simulating the Long Term Evolution Physical Layer," in Proc. of the 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), Glasgow, Escócia, Agosto, 2009, ([http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_175708.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_175708.pdf)).
- [16] 3GPP, Technical Specification Group - Radio Access Network Working, PDSCH Demodulation Ideal Results, Report R4-080194, Sorrento, Itália, Fev, 2008.
- [17] 3GPP, Technical Specification Group - Radio Access Network Working, *PDSCH 2x2 MCW Ideal Simulation Results*, Report R4-081792, Jeju, Coreia do Sul, Agosto, 2008.
- [18] 3GPP, Technical Specification Group - Radio Access Network Working, *LTE UE PDSCH demodulation results with impairments for MIMO-FDD case*, Report R4-081439, Munique, Alemanha, Jun, 2008.
- [19] 3GPP, Technical Specification Group - Radio Access Network Working, *PDSCH MIMO FDD results*, Report R4-081129, Kansas, EUA, Maio, 2008.
- [20] Duarte, S., *Analysis of Technologies for Long Term Evolution in UMTS*, M.Sc. Thesis, Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal, Sep.,2008.

- [21] Mogensen P., Wei Na., Kovacs I.Z., Frederiksen F., Pokhariyal A., Pedersen K.I., Kolding T., Hugi K., Kuusela M. "LTE Capacity Compared to the Shannon Bound". IEEE 65th Vehicular Technology Conference, Abril, 2007.
- [22] 3GPP TS 36.213: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures". Release 8, 2009.
- [23] Dongzhe Cui. "LTE peak rates analysis". Wireless and Optical Communications Conference, 2009.
- [24] Nokia Siemens Network, LTE Radio Planning."03\_RA41203EN30GLA0 LTE\_Air\_Interface\_GC\_ppt, 2011.
- [25] 3G Americas. The Evolution of Rel-7 to Rel-8 - HSPA and SAE/LTE, Jun, 2008.
- [26] Dahlman E., Parkvall S., Skold Johan., 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Maio, 2011.
- [27] Anacom, <http://www.anacom.pt/render.jsp?contentId=1105917>, Set., 2012.
- [28] ZTE, <http://www.zte.com.cn/endata/mobile/Sweden/>, Set., 2012.
- [29] Qualcomm Europe, "Conveying MCS and TB size via PDCCH", Set., 2012.
- [30] Ascom, V13.2.1, [www.ascom.com](http://www.ascom.com), Junho, 2012
- [31] Actix Software, V4.05.266.502, [www.actix.com](http://www.actix.com), Junho, 2012