

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Eletrónica e
Telecomunicações e de Computadores



Análise de Desempenho em Redes Móveis
Long Term Evolution (Parceria CELFINET)

João Filipe Nunes do Nascimento
(Licenciado em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações e de
Computadores)

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

Orientadores:

Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira
Engenheiro Luis Jorge Lopes Varela

Júri:

Presidente: Doutor Mário Pereira Véstias
Arguente: Doutor António José Castelo Branco Rodrigues

Agradecimentos

Em primeiro lugar queria agradecer ao Professor Pedro Vieira por me ter permitido fazer a dissertação sobre este tema de vanguarda, o qual achei bastante interessante desde o início. Resta-me ainda agradecer a orientação e os conselhos dados ao longo de todo o trabalho desenvolvido.

Gostaria também de agradecer à CELFINET pela oportunidade criada, sem ela esta dissertação não poderia ter sido realizada desta forma. Desse modo queria agradecer ao Luís Varela, ao José Brito e em especial ao Jorge Alcobia com o qual trabalhei na recolha de medidas e na análise dos dados.

Por último, quero agradecer à minha família todo o apoio que me foi dado na realização desta dissertação, do curso e principalmente ao longo de toda a vida, apesar de não o demonstrar, sei o que custa muitas vezes.

Espero que vos tenha dado algum motivo de orgulho.

"Um homem de génio é produzido por um conjunto complexo de circunstâncias, começando pelas hereditárias, passando pelas do ambiente e acabando em episódios mínimos de sorte." – Fernando Pessoa

Resumo

A rede móvel *Long Term Evolution (LTE)* é uma tecnologia que está a ser fortemente implementada, não só em Portugal mas no resto do mundo. A adoção do *LTE* deve-se em grande parte à maior capacidade e à baixa latência oferecidas, para além de ser expansível ao *LTE-Advanced*.

O trabalho apresentado tem por objetivo a análise do desempenho de uma rede *LTE* piloto e comparar os resultados com o teoricamente expectável.

Foi adotada uma metodologia de planeamento em *LTE* e comprovada através das medidas empíricas realizadas. Dessas medições são também sugeridos dois novos modelos de propagação para *LTE* nos 2,6 GHz. Para distâncias inferiores a 1 km sugere-se o modelo *LTE-PL*. Para distâncias superiores a 1 km foi feita uma adaptação ao modelo *Okumura-Hata* para que se aproximasse aos resultados obtidos.

Das medições efetuadas observou-se que em boas condições rádio, os débitos binários são bastante próximos dos máximos teóricos. Além disso foi obtido o desvio padrão em *LTE* de uma área Urbano Denso de 12 dB. Foi ainda possível definir uma margem para as perdas de penetração *in-car* de 2,7 dB.

Efetuuou-se uma análise de vários *Key Performance Indicators* que permitem avaliar o desempenho do *LTE*, tendo também sido definidas categorias de qualidade de serviço. Por último foi avaliado o impacto da velocidade e da distância, pelas medidas realizadas.

Abstract

The mobile network Long Term Evolution (LTE) is a technology that is being strongly implemented, not only in Portugal but in the rest of the world. The adoption of LTE is due largely to the higher capacity and low latency offered, in addition of being upgradeable to LTE-Advanced.

The presented work aims to analyze the performance of a pilot LTE network and evaluate experimentally if the results are as expected theoretically.

A methodology for LTE planning was adopted and proven through the empirical measures undertaken. Of those measurements are also suggested two new propagation models for LTE in the 2.6 GHz. For distances less than 1 km it is proposed the LTE-PL model. For distances exceeding 1 km was made an adjustment to the Okumura-Hata model so that it could approach the results obtained.

Of the measurements made it was noted that in good radio conditions, the bit rates are very close to the theoretical maximum. Besides it was obtained the standard deviation in LTE for a *Dense Urban* area of 12 dB. It was also possible to define a margin for in-car penetration loss of 2.7 dB.

An analysis was made of several Key Performance Indicators for assessing the performance of LTE, also with the definition of categories for *QoS*. Finally we evaluated the impact of speed and distance given the measurements made.

Palavras-Chave

LTE, Planning, Measurement, Performance, KPI

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
<i>Abstract</i>	v
Palavras-Chave.....	vii
Índice.....	ix
Lista de Acrónimos	xiii
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas.....	xxi
1. Introdução.....	1
1.1. Estrutura da Dissertação	1
1.2. Publicações	4
2. Estado da Arte	5
2.1. Motivação	5
2.2. Arquitetura de rede	6
2.2.1. UE.....	7
2.2.2. eNB.....	8
2.2.3. MME	9
2.2.4. S-GW.....	9
2.2.5. P-GW.....	10
2.2.6. PCRF.....	11
2.2.7. HSS.....	11
2.2.8. Serviços	11
2.3. Camada Física do LTE	12
2.3.1. Downlink.....	14
2.3.2. Uplink.....	16
2.4. Multiple Input Multiple Output (MIMO)	17
2.5. Canais de Transporte e Mapeamento nos Canais Físicos.....	18
2.6. Procedimentos da camada física.....	21
2.6.1. Acesso Aleatório	21
2.6.2. Receção e Transmissão de dados na camada física.....	21
2.6.3. Hybrid Automatic ReQuest (HARQ).....	23
2.6.4. Avanço Temporal	23
2.6.5. Controlo de Potência	24
2.6.6. Paging.....	24

2.6.7.	Procura de célula	25
2.6.8.	Informação das Condições de Canal	25
2.7.	Medidas na camada física.....	26
2.8.	Interfaces e Protocolos.....	26
2.8.1.	Interface Rádio	27
2.8.2.	Interface X2.....	29
2.8.3.	Interface S1	30
2.8.4.	Interface S5/S8	30
2.9.	Modelo de Portadoras e Qualidade de Serviço (QoS).....	32
3.	Planeamento Rádio em <i>LTE</i>	35
3.1.	Introdução.....	35
3.2.	Áreas de Estudo	35
3.3.	Planeamento de Cobertura.....	36
3.3.1.	Mapeamento de frequências.....	37
3.3.2.	Mapeamento dos PCI	39
3.3.3.	Link Budget em Uplink.....	40
3.3.4.	Link Budget em Downlink.....	44
3.3.5.	Modelo de propagação Okumura-Hata e COST231-Hata	46
3.3.6.	Modelo de propagação LTE-PL e Okumura-Hata Alterado	47
3.4.	Planeamento de Capacidade	51
3.4.1.	Capacidade em Uplink	51
3.4.2.	Capacidade em Downlink	52
3.4.3.	Dimensionamento de Capacidade	53
3.5.	Planeamento para as áreas em estudo.....	54
3.5.1.	Comparações entre simulações e medidas	54
3.5.2.	Dimensionamento celular.....	55
4.	Medidas em <i>LTE</i>	63
4.1.	Introdução.....	63
4.2.	Tipos de medidas	64
4.3.	Pontos Estáticos.....	66
4.3.1.	Downlink.....	67
4.3.2.	Uplink.....	70
4.4.	Medidas em Idle	71
4.5.	Medidas em Downlink.....	75
4.5.1.	Débito binário.....	75
4.5.2.	RSRP	78

4.5.3.	RSRQ	81
4.5.4.	SINR.....	83
4.5.5.	BLER.....	86
4.5.6.	Resumo dos Principais indicadores apresentados em Downlink	89
4.6.	Medidas em Uplink	90
4.6.1.	Débito Binário	90
4.6.2.	RSRP	93
4.6.3.	RSRQ	94
4.6.4.	Resumo dos Principais indicadores apresentados em Uplink	96
5.	Desempenho	99
5.1.	Introdução	99
5.2.	Key Performance Indicators	99
5.2.1.	Acessibilidade	100
5.2.2.	Integridade.....	102
5.2.3.	Mobilidade	105
5.3.	Perdas de penetração de Veículo	106
5.4.	Eficiência espectral.....	108
5.5.	Throughput	109
5.5.1.	RSRP e RSRQ.....	110
5.5.2.	SINR.....	112
5.5.3.	CQI.....	115
5.5.4.	BLER.....	117
5.6.	Distância	117
5.7.	Velocidade	119
6.	Conclusões	123
	Trabalho Futuro.....	129
	Referências	131
	Anexos.....	135
	Anexo A – Tabela MCS e CQI.....	135
	• Tabela MCS	135
	• Valor do CQI	135
	Anexo B – Self Organizing Networks (SON)	139
	Anexo C – KPI's.....	140
	• Retenção	140
	• Disponibilidade.....	140
	Anexo D – Medidas em Uplink	143

- SINR 143
- Potência Transmitida 145

Lista de Acrónimos

- 3GPP – 3rd Generation Partnership Project*
- AMBR – Aggregate Maximum Bit Rate*
- AMC – Adaptive Modulation and Coding*
- ANR – Automatic Neighbor Relation*
- ARP – Allocation and Retention Priority*
- AuC – Authentication Center*
- BCH – Broadcast Channel*
- BLER – Block Error Rate*
- CDMA – Code Division Multiple Access*
- CP – Control Plane*
- CQI – Channel Quality Indicator*
- DHCP – Dynamic Host Configuration Protocol*
- DL-SCH – Downlink Shared Channel*
- DRX – Discontinuous Reception*
- DwPTS – Downlink Pilot Time Slots*
- EDGE – Enhanced Data rates for GSM Evolution*
- EPC – Evolved Packet Core*
- EPS – Evolved Packet System*
- EVM – Error Vector Magnitude*
- E-UTRAN – Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*
- FDD – Frequency Division Duplex*
- GBR – Guaranteed Bit Rate*
- GCID – Global Cell ID*
- GB – GigaByte*
- GP – Guard Period*
- GPRS – General Packet Radio Service*
- GRE – Generic Routing Encapsulation*
- GSM – Global System for Mobile Communications*
- GTP – GPRS Tunneling Protocol*
- GUTI – Globally Unique Temporary Identifies*
- HSDPA – High Speed Downlink Packet Access*

HSPA – High Speed Packet Access
HSUPA – High Speed Uplink Packet Access
HSS – Home Subscription Server
IMS – IP Multimedia Sub-system
IMSI – International Mobile Subscriber Identity
IP – Internet Protocol
ISD – Inter Site Distance
ISI – Inter Symbol Interference
ITU – International Telecommunications Union
KPI's – Key Performance Indicators
LTE – Long Term Evolution
MAC – Medium Access Control
MBR – Maximum Bit Rate
MCH – Multicast Channel
MIB – Master Information Block
MIMO – Multiple Input and Multiple Output
MME – Mobility Management Entity
O&M – Operation and Maintenance
OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
PCH – Paging Channel
PCI – Physical Cell ID
PCRF – Policy and Charging Rules Function
PDCP – Packet Data Convergence Protocol
PDSCH – Physical Downlink Shared Channel
PDU – Payload Data Units
P-GW – Packet Data Network Gateway
PMIP – Proxy Mobile Internet Protocol
QAM – Quadrature Amplitude Modulation
QCI – QoS Class Identifier
QoS – Quality of Service
QPSK – Quadrature Phase Shift Keying
RB – Resource Block
RE – Resource Element

RS – Reference Signals
RLC – Radio Link Control
RRC – Radio Resource Control
RSCP – Received Signal Code Power
RSRP – Reference Signal Received Power
RSRQ – Reference Signal Received Quality
RSSI – Received Signal Strength Indicator
RTT – Round Trip Time
SIAP – S1 Application Protocol
SC-FDMA – Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
SCTP – Stream Control Transmission Protocol
SDMA – Space Division Multiple Access
S-GW – Serving Gateway
SINR – Signal to Interference to Noise Ratio
SIP – Session Initiation Protocol
SON – Self Organizing Networks
SRS – Sounding Reference Symbol
TDD – Time Division Duplex
TDMA – Time Division Multiple Access
TD-SCDMA – Time Division Synchronous CDMA
UDP – User Datagram Protocol
UE – User Equipment
UMTS – Universal Mobile Telecommunication System
UP – User Plane
UpPTS – Uplink Pilot Time Slots
VoIP – Voice over IP
VoLTE – Voice over LTE
WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access
X2AP – X2 Application Protocol

Lista de Figuras

Figura 1 - Arquitectura de Rede do <i>LTE</i> in [8].	7
Figura 2 - Estrutura de uma de uma <i>frame</i> de Tipo 1 in [4].	12
Figura 3 - Estrutura de uma <i>frame</i> de Tipo 2 in [4].	12
Figura 4 - Grelha de recursos da camada física em <i>downlink</i> in [4].	13
Figura 5 - Escalonamento no domínio da frequência e do tempo in [9].	15
Figura 6 - <i>MIMO</i> numa configuração <i>2x2</i> in [8].	18
Figura 7 - Mapeamento dos sinais de referência em cada antena.	18
Figura 8 - Mapeamento dos canais lógicos, de transporte e físicos de <i>LTE</i> .	19
Figura 9 - <i>LTE HARQ</i> com 8 processos.	23
Figura 10 - Protocolos no plano de controlo in [8].	27
Figura 11 - Protocolos de controlo (à esquerda) e de utilizador (à direita) da interface X2 in [8].	29
Figura 12 - Protocolos no plano do utilizador in [8].	31
Figura 13 - Esquema de portadoras na arquitectura do <i>LTE</i>	32
Figura 14 - Padrões de reutilização de frequências (ic – interior da célula, fc – fronteira da célula, P – potência, f - frequência).	38
Figura 15 - Parâmetros considerados pelo modelo <i>Okumura-Hata</i> in [20].	46
Figura 16 - Potência recebida do sinal RSRP em função da distância para uma altura de antena de 18 m.	49
Figura 17 - Potência recebida do sinal RSRP em função da distância para uma altura de antena de 27 m.	49
Figura 18 - Potência recebida do sinal RSRP em função da distância para uma altura de antena de 38 m.	50
Figura 19 - Comparação das medidas efetuadas com o modelo de <i>Okumura-Hata</i> alterado e com o modelo <i>LTE-PL</i>	51
Figura 20 - Localização dos <i>eNB's</i> trisectorizados na área 1.	56
Figura 21 - Valores do débito binário obtidos em <i>uplink</i> até uma distância de 360 metros. ...	57
Figura 22 - Valores de <i>SINR</i> obtidos em <i>uplink</i> até uma distância de 360 metros.	57
Figura 23 - Valores do débito binário obtidos em <i>downlink</i> até uma distância de 360 metros.	58
Figura 24 - Valores de <i>SINR</i> obtidos em <i>downlink</i> até uma distância de 360 metros.	58

Figura 25 – Montagem utilizada nas medidas efectuadas no terreno.	63
Figura 26 - Percorso efetuado para a Área 1 e locais onde foram obtidas as medidas estáticas.	66
Figura 27 - Percorso efetuado para a Área 2 e locais onde foram obtidas as medidas estáticas.	67
Figura 28 - Débito Binário Médio e Máximo para cada ponto em <i>Downlink</i> da área 1 (à esquerda)	69
Figura 29 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para os pontos estáticos em <i>Downlink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	69
Figura 30 - Débito Binário Médio e Máximo para cada ponto em Uplink da área 1 (à esquerda) e área 2 (à direita).	70
Figura 31 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para os pontos estáticos em <i>Uplink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	71
Figura 32 - Distribuição dos <i>PCI's</i> na área 1.	72
Figura 33 - Distribuição dos <i>PCI's</i> na área 2.	73
Figura 34 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada do sinal RSRP da rota <i>idle</i> para a área 1 (à esquerda) e para área 2 (à direita).	74
Figura 35 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada do sinal RSRQ da rota <i>idle</i> para a área 1 (à esquerda) e para área 2 (à direita).	74
Figura 36 – Mapa com valores de débito binário em <i>Downlink</i> para a área 1.	76
Figura 37 - Mapa com valores de débito binário em <i>Downlink</i> para a área 2.	77
Figura 38 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada dos débitos binários em <i>Downlink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	78
Figura 39 - Mapa com níveis de sinal RSRP medidos em <i>Downlink</i> para a área 1.	79
Figura 40 - Mapa com níveis de sinal RSRP medidos em <i>Downlink</i> para a área 2.	80
Figura 41 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para o sinal RSRP em <i>Downlink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	81
Figura 42 - Mapa com níveis de sinal RSRQ medidos em <i>Downlink</i> para a área 1.	82
Figura 43 - Mapa com níveis de sinal RSRQ medidos em <i>Downlink</i> para a área 2.	82
Figura 44 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para o sinal RSRQ em <i>Downlink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	83
Figura 45 - Mapa com valores de SINR medidos em <i>Downlink</i> para a área 1.	84
Figura 46 - Mapa com valores de SINR medidos em <i>Downlink</i> para a área 2.	85

Figura 47 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para a SINR em <i>Downlink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	86
Figura 48 - Mapa com valores da BLER medidos em <i>Downlink</i> na área 1.	87
Figura 49 - Mapa com valores da BLER medidos em <i>Downlink</i> na área 2.	88
Figura 50 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada da BLER em <i>Downlink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	89
Figura 51 - Mapa com valores de débito binário medidos em <i>Uplink</i> para a área 1.	91
Figura 52 - Mapa com valores de débito binário medidos em <i>Uplink</i> para a área 2.	92
Figura 53 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada do débito binário em <i>Uplink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	92
Figura 54 - Mapa com níveis de sinal RSRP medidos em <i>Uplink</i> para a área 1.	93
Figura 55 - Mapa com níveis de sinal RSRP medidos em <i>Uplink</i> para a área 2.	94
Figura 56 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para o sinal RSRP em <i>Uplink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	94
Figura 57 - Mapa com níveis de sinal RSRQ medidos em <i>Uplink</i> para a área 1.	95
Figura 58 - Mapa com níveis de sinal RSRQ medidos em <i>Uplink</i> para a área 2.	95
Figura 59 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para o sinal RSRQ em <i>Uplink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	96
Figura 60 - Percurso com o UE dentro (à esquerda) e fora do veículo (à direita)	107
Figura 61 - Nível de Sinal RSRP para o percurso interior e exterior ao veículo.	107
Figura 62 - Comparação entre as diferentes eficiências espectrais	109
Figura 63 – Débito binário em <i>downlink</i> em relação ao nível de sinal RSRP e RSRQ para a área 1 (esquerda) e área 2 (direita).	110
Figura 64 – Débito binário em <i>uplink</i> em relação ao nível de sinal RSRP e RSRQ para a área 1 (esquerda) e área 2 (direita).	110
Figura 65 – Débito binário em relação ao nível de sinal RSRP para <i>downlink</i> (esquerda) e <i>uplink</i> (direita).	111
Figura 66 – Débito binário em relação ao nível de sinal RSRP e RSRQ para a área 1 (esquerda) e área 2 (direita).	112
Figura 67 - Débito binário em função da SINR instantânea.	113
Figura 68 - SINR em função do sinal RSRP e RSRQ para a área 1 (esquerda) e área 2 (direita)	114
Figura 69 - MCS em função da SINR.	115

Figura 70 - Mapeamento do <i>CQI</i> em função da <i>SINR</i>	116
Figura 71 - Débito binário em função do <i>CQI</i>	116
Figura 72 - Débito binário em <i>downlink</i> em função da <i>BLER</i> nas duas áreas.	117
Figura 73 - Potência transmitida em função da distância, em <i>uplink</i>	118
Figura 74 – <i>SINR</i> e <i>BLER</i> em função da distância para a área 2.....	119
Figura 75 - Débito binário médio em <i>downlink</i> em função da velocidade do <i>UE</i>	120
Figura 76 - <i>SINR</i> Média em função da velocidade.....	120
Figura 77 - <i>BLER</i> Média em função da velocidade.	121
Figura 78 - Mapa com níveis de sinal <i>SINR</i> medidos em <i>Uplink</i> para a área 1.	143
Figura 79 - Mapa com níveis de sinal <i>SINR</i> medidos em <i>Uplink</i> para a área 2.	144
Figura 80 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para a <i>SINR</i> em <i>Uplink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).	144
Figura 81 - Mapa com a potência transmitida medida em <i>Uplink</i> para a área 1	145
Figura 82 - Mapa com a potência transmitida medida em <i>Uplink</i> para a área 2.....	146
Figura 83 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para a potência transmitida em <i>Uplink</i> da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).....	146

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Configuração de Largura de Banda de Canal [5].....	14
Tabela 2 - Modos de Transmissão em <i>downlink in</i> [10].	17
Tabela 3 - Parâmetros <i>QoS</i> para o <i>QCI in</i> [12].	33
Tabela 4 - Componentes da latência <i>in</i> [8].....	34
Tabela 5 - Características principais das duas áreas de estudo.	36
Tabela 6 - Parâmetros semi-empíricos para <i>uplink in</i> [16].	42
Tabela 7 - Exemplo do parâmetro <i>F</i> para estações trisectorizadas e antenas com 30 m <i>in</i> [16].	43
Tabela 8 - Desvanecimento <i>Log-Normal in</i> [16].	43
Tabela 9 - Perdas de penetração <i>in</i> [17].	43
Tabela 10 - Exemplo do parâmetro <i>F_C</i> para estações trisectorizadas e antenas com 30 m <i>in</i> [16].	45
Tabela 11 - Parâmetros semi-empíricos para <i>downlink in</i> [16].....	45
Tabela 12 - Tipos de ambiente segundo o modelo <i>Okumura-Hata</i>	47
Tabela 13 - Valores de potência medidos e estimados com uma antena de 27 m.	48
Tabela 14 - Pressupostos usados para as simulações.	55
Tabela 15 - Estatísticas das medidas efectuadas por altura de antena.	55
Tabela 16 - Parâmetros do planeamento de capacidade.....	59
Tabela 17 - <i>Link Budget</i> para <i>Uplink</i>	59
Tabela 18 - Raio de célula e distância entre <i>sites</i>	61
Tabela 19 - <i>Link Budget</i> para <i>Downlink</i>	61
Tabela 20 - Comparação teórica e experimental dos débitos binários e <i>SINR</i>	62
Tabela 21 - Distância das medidas estáticas em relação aos <i>eNB's</i>	67
Tabela 22 - Estatísticas de <i>Downlink</i>	68
Tabela 23 - Estatísticas de <i>Uplink</i>	70
Tabela 24 - Estatísticas de <i>Downlink</i>	89
Tabela 25 - Estatísticas de <i>Uplink</i>	96
Tabela 26 - <i>KPI's</i> de Acessibilidade.	100
Tabela 27 - <i>KPI's</i> de Integridade.....	102
Tabela 28 - <i>KPI's</i> de Mobilidade.....	105
Tabela 29 - Valores Médios das medidas Dentro e Fora do Veículo.....	108

Tabela 30 - Correspondência entre índices MCS e o n.º de bits usados [9].....	135
Tabela 31 – Tamanho da sub-banda em função da largura de banda utilizada.....	136
Tabela 32 - Tamanho da sub-banda e número de sub-bandas em função da largura de banda utilizada.	136
Tabela 33 - Tamanho da sub-banda e partes da largura de banda em função da largura de banda utilizada.....	137
Tabela 34 - <i>KPI's</i> de Retenção.	140
Tabela 35 - <i>KPI's</i> de Disponibilidade.	141

1. Introdução

O crescimento do mercado de dados em redes móveis e a exigência dos utilizadores por débitos binários cada vez mais elevados levou à necessidade de uma nova tecnologia que permitisse manter a competitividade das redes móveis no futuro.

O *Long Term Evolution (LTE)* seguindo uma evolução das tecnologias anteriores de comunicações móveis, vem dar resposta à necessidade referida.

A dissertação de mestrado que se apresenta tem como objetivo principal clarificar acerca do que é expectável em termos do desempenho efetivo de uma rede *Long Term Evolution (LTE)*, de 4ª Geração (4G).

Para cumprir esse objetivo, foi efetuado trabalho de campo no decorrer da dissertação através de uma parceria estabelecida com a *CELFINET*, que possibilitou a recolha de medidas numa rede *LTE* piloto.

Além do referido, esse trabalho foi uma mais-valia, pois permitiu um primeiro contacto com a indústria e com problemas existentes na implementação de uma rede/tecnologia.

Relativamente às simulações e à obtenção de gráficos que permitiram relacionar os pontos abordados foram efetuadas sobre a ferramenta *MATLAB* [1].

1.1. Estrutura da Dissertação

Relativamente à estrutura da dissertação esta encontra-se organizada em cinco capítulos.

No **Capítulo 2** (*Estado da Arte*), foi feito um levantamento teórico ao nível das características e funcionamento de uma rede móvel *LTE Release 8*.

Em primeiro lugar, foi identificada qual a motivação do *LTE*, podendo ser definida por dois conceitos chave, débito binário mais elevado e a redução da latência, em relação às tecnologias anteriores.

Sendo o *LTE* uma tecnologia que recorre a um modo de acesso rádio inovador nas redes móveis, foram estudadas as técnicas de acesso em ambos os sentidos da ligação rádio. Nesse mesmo estudo mostra-se como estão organizados os recursos rádio e as suas principais particularidades.

Embora o novo modo de acesso rádio permita aumentar a capacidade de uma célula, esta não seria suficiente para a cumprir os requisitos impostos pelo *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* por si só. Logo é analisado o contributo da técnica *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*, já conhecida e testada em gerações anteriores.

Conhecendo a camada física, para se ter uma noção da necessidade de cada canal definido, foi feito o estudo dos canais de transporte e da sua interligação com o meio físico. Posto isto, são identificados os procedimentos mais importantes que ocorrem ao nível da camada física e como se relacionam com os canais de transporte estudados.

Tendo em conta que existem processos de decisão que dependem das condições rádio, é necessário monitorizar essa ligação, através da recolha de medidas nessa camada. Assim foram analisadas quais as medidas reportadas e qual o seu significado.

Uma vez que a arquitetura do *LTE* sofreu alterações, relativamente à tecnologia de terceira geração, foi analisada a razão das modificações e a responsabilidade de cada elemento da rede, para além das funções de cada interface e dos protocolos existentes.

Sendo a qualidade de serviço tão importante a nível de negócio e de satisfação para os utilizadores, esta foi tida como base fulcral para a implementação do modelo das portadoras usado no *LTE*, segundo essa nova abordagem é importante reconhecer o modo de organização utilizado.

Por último, no *LTE* existe uma tentativa de retirar uma parte do elemento humano no processo de otimização, através do conceito de redes auto-organizáveis, dessa forma foram estudadas as funcionalidades da rede nesse âmbito.

No **Capítulo 3** de *Planeamento Rádio em LTE*, foi possível identificar que o *LTE* segue uma metodologia semelhante à usada nas redes de terceira geração (3G), com algumas diferenças denotadas. No entanto, segue as mesmas linhas orientadoras, em que o planeamento é feito em função das necessidades da área, da cobertura a efetuar e da capacidade absorvida por uma célula.

Relativamente ao planeamento de cobertura, este incidiu sobre os fatores referentes ao *link budget* e ao cálculo do mesmo nos dois sentidos da ligação. Foram ainda analisadas questões associadas à ligação rádio, ou seja, a organização de frequências e dos identificadores de cada célula.

Além disso, tendo sido recolhidos dados que permitem analisar o desvanecimento presente na utilização desta tecnologia, foram propostos dois modelos de propagação para o *LTE* na frequência dos 2,6 GHz.

O planeamento de capacidade estabelece qual a densidade celular que permite cobrir uma área com determinada qualidade de serviço, relacionando a cobertura rádio com a capacidade absorvida e definindo dessa forma o raio máximo de célula.

É de referir que este capítulo teve como objetivo, para além de apresentar uma metodologia de planeamento, ser aproximado àquele usado nas áreas em que foram efetuadas as medidas, de modo a ser possível comparar posteriormente os dois casos e sugerir margens de implementação tendo em conta as áreas estudadas.

No **Capítulo 4** (*Medidas em LTE*) são expostas as medidas efetuadas consideradas mais relevantes numa primeira análise da rede *LTE* piloto, e que foram obtidas no trabalho de campo.

As medidas foram recolhidas em quatro casos distintos, simulando o comportamento espectável de um equipamento móvel presente na rede, de forma a avaliar o desempenho e a identificar problemas iniciais.

O primeiro caso foi testado para condições estacionárias (móvel imobilizado) e em pontos de interesse, onde os resultados se apresentaram bastante bons. As medidas no segundo caso foram recolhidas para a situação em que o móvel se encontra ligado à rede, mas não se encontra a efetuar tráfego de dados do utilizador, tendo como objetivo a análise da distribuição de cobertura celular. As medidas do terceiro e quarto casos foram recolhidas quando se realizava tráfego de dados de utilizador em *downlink* e *uplink*, respetivamente.

Foi ainda efetuado um teste para avaliar a utilização do equipamento no interior de um veículo, ou seja, para estimar as perdas de penetração num veículo e definir uma margem *in-car*.

O **Capítulo 5** (*Desempenho*) foi desenvolvido para avaliar qual o impacto das condições a que um móvel pode estar sujeito e sugerir formas de avaliar essas contribuições, no desempenho da ligação. Numa primeira fase foram definidos os *Key Performance Indicators (KPI's)* que possibilitam avaliar a eficiência de uma rede *LTE*. De forma a conferir o desempenho efetivo do *LTE Release 8*, foi ainda analisada a eficiência espectral e a dependência do débito binário ou *throughput*, em relação às condições rádio. Considerou-se ainda interessante avaliar qual a influência da mobilidade, nomeadamente a distância e a velocidade, em alguns dos indicadores relevantes.

São ainda apresentados os principais resultados obtidos quando comparadas as simulações e as medidas recolhidas.

Por último, são referidas as principais conclusões obtidas no âmbito desta dissertação.

1.2. Publicações

Tendo sempre como preocupação a comunicação e validação dentro da comunidade científica, esta dissertação produziu dois artigos, um em conferência internacional e outro em conferência nacional, ambos com arbitragem.

1. Nascimento J., Vieira P., Vieira M., "A Field Measurement Approach for LTE (4G) Wireless Networks Performance Monitoring", 8th Ibero-American Congress on Sensors (IBERSENSOR 2012), Outubro de 2012 (aceite).
2. Nascimento J., Varela L., Vieira P., "Avaliação Experimental de Desempenho em Redes Móveis 4G (Long Term Evolution) em Ambiente Urbano", 6.º Congresso do Comité Português da URSI - "Aplicações das ondas eletromagnéticas: da eficiência energética à bioengenharia" (ANACOM 2012), Setembro de 2012 (submetido).

2. Estado da Arte

2.1. Motivação

A tecnologia *Long Term Evolution (LTE)* surge da necessidade de garantir a competitividade das redes móveis, sendo uma evolução das tecnologias anteriores de comunicações móveis.

A segunda geração (*2G*) marcou a expansão do mercado das redes móveis e de uma verdadeira mobilidade nos equipamentos móveis, com a implementação do *Global System for Mobile Communications (GSM)*. Esta tecnologia encontra-se amplamente difundida, ou seja, a maior parte dos países que possuem redes móveis de segunda geração são *GSM* e ainda hoje é usado, principalmente em tráfego de voz, pois revela-se bastante robusto e rentável. Ainda na segunda geração, na tentativa de oferecer débitos binários mais elevados para pacotes de dados, tendo em conta o ritmo de transmissão oferecido pelo *GSM (9,6 kbit/s)*, surge o *General Packet Radio Service (GPRS)* orientado à comutação por pacotes. Este último foi seguido pelo *Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE)*.

O *EDGE*, para além de ser compatível com as tecnologias anteriores, facilitou um acesso mais rápido à *Internet* móvel começando a equiparar-se ao das redes de acesso fixas em termos de débitos binários. O *EDGE* não teve uma aderência tão forte a nível de mercado como o seu antecessor pois teve pouco tempo para expansão, devido ao aparecimento das tecnologias de terceira geração (*3G*).

A terceira geração de comunicações móveis representou uma mudança no acesso rádio, ou seja, enquanto os sistemas *2G* realizavam o acesso através de *Time Division Multiple Access (TDMA)*, com a implementação do *3G* o acesso rádio passou a fazer-se através de *Code Division Multiple Access (CDMA)*.

No *IMT-2000* da *International Telecommunications Union (ITU)* existiu uma imposição em termos de débitos mínimos (*144 kbit/s* para utilizadores móveis, *384 kbit/s* para utilizadores pedestres e *2 Mbit/s* em zonas interiores) para que uma tecnologia fosse considerada de terceira geração, o que efetivamente aconteceu com o *Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)*.

A introdução do *High Speed Packet Access (HSPA)* provocou um melhoramento do serviço de dados em *UMTS* com o aumento dos débitos binários máximos, tanto em *downlink* como em *uplink*. Tendo sido inicialmente semelhantes aos do *EDGE*, sofreram um aumento significativo, bem como uma diminuição das latências associadas.

Com o crescimento do mercado de dados em redes móveis e os utilizadores a requererem débitos cada vez mais elevados, surge a necessidade de uma nova tecnologia que permita manter a competitividade do 3G no futuro.

O *LTE* surge como uma tentativa de aproximação aos requisitos mínimos de um sistema de quarta geração (*4G*). Segundo o *IMT-Advanced*, os débitos de pico têm que alcançar os 100 *Mbit/s* em alta mobilidade e 1 *Gbit/s* em baixa mobilidade, apresentando ainda uma eficiência espectral de duas a quatro vezes superior ao *HSPA Release 6* [2]. O *LTE* não é na verdade um sistema de *4G* mas antes de *3.9G*, de acordo com a *Release 8* do *3GPP* vai permitir apresentar débitos de pico bastante elevados, 300 *Mbit/s* em *downlink* e de 75 *Mbit/s* em *uplink*. No entanto, comercialmente a utilização da tecnologia *LTE* é apelidada de *4G*.

O *LTE* é uma tecnologia realizada através de técnicas inovadoras nas redes de comunicações móveis: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA)* e *MIMO* que permitem atingir os débitos considerados e a elevada eficiência espectral requerida pelo *IMT-Advanced*.

Por último ao apresentar uma baixa latência no plano do utilizador e ao aumentar a capacidade em cada célula, vai resultar numa qualidade de serviço bastante elevadas em relação às tecnologias anteriores.

2.2. Arquitetura de rede

Uma rede de *LTE* é constituída pelo *Evolved Packet Core (EPC)* e a *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)* em que o conjunto das duas é denominado por *Evolved Packet System (EPS)* [3]. Para além destas existe também a camada de serviços que interliga o *UE* aos serviços do operador e à *Internet*. O esquema básico da arquitetura de rede do *LTE* pode ser observado na Figura 1.

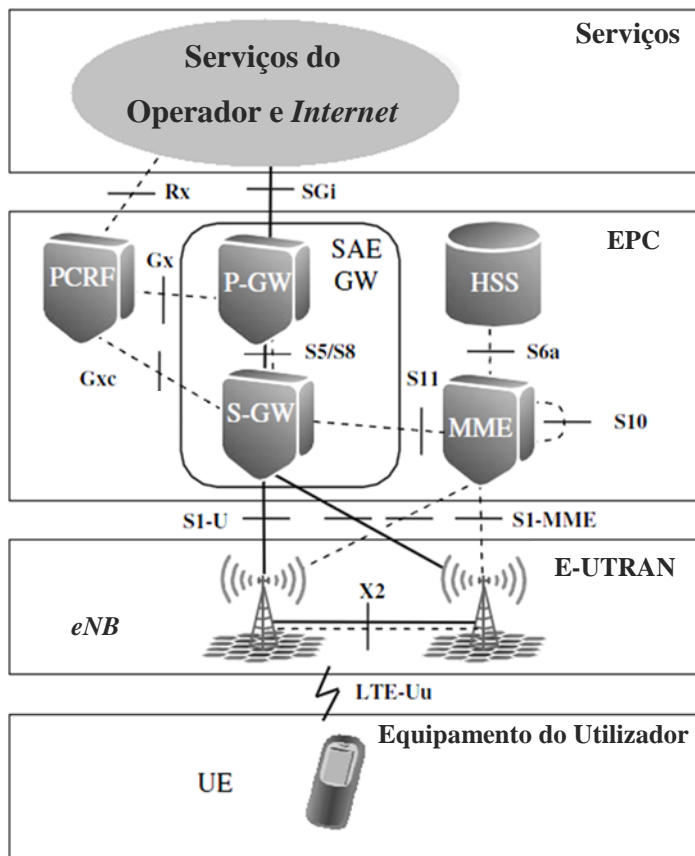


Figura 1 - Arquitectura de Rede do LTE in [8].

O conjunto do UE, E-UTRAN e EPC representam a camada de conectividade *Internet Protocol (IP)* e está apenas otimizada para comunicações assentes sobre o protocolo *IP*, uma vez que em *LTE* não existe comutação de circuitos, reforçando o facto de que o *LTE* é uma tecnologia “all-ip”.

2.2.1. UE

O *User Equipment (UE)* é o aparelho usado pelo utilizador para efetuar comunicações, ou seja, notifica a rede para estabelecer, manter ou remover as ligações requeridas pelo utilizador. Tenha-se como exemplo as funções de gestão de mobilidade, tais como *handovers* ou de informação de localização, que são geridas pela rede mas feitas de acordo com informações transmitidas pelo UE.

O UE é também o responsável por disponibilizar serviços ao utilizador, de modo a que clientes *Voice over IP (VoIP)* possam ser usados no estabelecimento de chamadas sobre *LTE*.

Para a identificação e autenticação do utilizador e para gerar as chaves de encriptação que mantêm a comunicação rádio segura e íntegra, o *UE* contém o *Universal Subscriber Identity Module (USIM)*, que é uma aplicação embutida num cartão amovível denominado *Universal Integrated Circuit Card (UICC)*.

2.2.2. *eNB*

O *evolved Node B (eNB)*, único elemento lógico presente na *E-UTRAN*, é uma estação base que controla todas as funções rádio do sistema. O *eNB* é o ponto de terminação de todos os protocolos rádio com o *UE* e transfere os dados entre a conexão rádio e a conexão *IP* correspondente, na direção do *EPC*. Nesta última função, o *evolved Node B* efetua a encriptação e desencriptação dos dados do plano do utilizador (*User Plane, UP*), efetuando também a compressão e descompressão dos cabeçalhos *IP*, evitando desta forma o envio repetitivo dos mesmos dados nos cabeçalhos.

No plano de controlo (*Control Plane, CP*), o *eNB* é responsável pelo *Radio Resource Management (RRM)* que controla o uso da interface rádio, ou seja, monitoriza e atribui recursos, tendo em conta os pedidos efetuados, atribui prioridades e agenda o tráfico de acordo com a qualidade de serviço (*Quality of Service, QoS*) requerida. Na gestão da mobilidade, o *eNB* tem o papel de controlar e analisar as medições realizadas no *UE* e no próprio *eNB*, como também efetua sinalização entre outros *eNB* e com o *Mobility Management Entity (MME)*.

Outra das características deste elemento lógico é quando um *UE* é ativado e necessita de efetuar uma ligação à rede, o *eNB* é responsável por enviar esse pedido ao *MME* anterior ou seleccionar um novo, caso a informação ou o destino não estejam disponíveis.

O *UE* é servido apenas por um *eNB*, um *MME* e um *Serving Gateway (S-GW)*, no entanto o *eNB* pode servir mais que um *UE*, pode estabelecer conexões com múltiplos *eNB*'s na ocorrência de um *handover* e mais do que um *MME* e múltiplos *S-GW* podem ser interrogados, uma vez que um conjunto destes está designado também para servir um conjunto de *eNB*'s.

2.2.3. MME

O *Mobility Management Entity* é o principal elemento de controlo no *EPC* não desempenhando qualquer tipo de função no plano do utilizador.

Em termos de autenticação, o *MME* ao saber a identificação permanente do *UE* vai pedir ao *Home Subscription Server (HSS)* os parâmetros complementares de autenticação, tal como ao *UE*, comparando ambas as respostas para garantir a identidade do utilizador.

Relativamente à segurança da ligação, o *MME* vai encriptar e garantir a integridade a partir da chave recebida na autenticação, além disso para proteger a privacidade do utilizador é atribuído ao equipamento móvel um *Globally Unique Temporary Identifier (GUTI)*, periodicamente alterado, para que desta maneira a transmissão do *International Mobile Subscriber Identity (IMSI)* no acesso rádio seja minimizada.

Relativamente à gestão de mobilidade, para além de participar na sinalização de *handover* em modo ativo, garante a localização de todos os *UE's* dentro da área de serviço e notifica o *HSS* da localização corrente de cada um. A localização pode ser feita ao nível do *eNB* quando o utilizador está *RRC_CONNECTED* ou num grupo de *eNB's* designada de *Tracking Area (TA)*. Quando o *UE* passa para *RRC_IDLE*, o *UE* vai reportar a sua localização de forma periódica ou quando existe alteração da *TA*. Este elemento é também o responsável pela realização de *handovers* entre tecnologias.

O *MME* tem também a função de gerir o perfil de subscrição, isto é, tem o papel de obter esse perfil, para saber quais os parâmetros de serviço e estabelecer as conexões necessárias.

Por último o *MME* é o responsável por assegurar a conectividade *IP* com o *UE*, intervindo na sinalização entre o *eNB* e o *S-GW*.

2.2.4. S-GW

O *Serving Gateway* é o elemento lógico que tem a função de fazer a gestão e reencaminhamento dos dados no plano do utilizador.

O *S-GW* vai estar ligado *Packet Data Network Gateway (P-GW)*, através de uma interface *S5/S8*, que pode ser implementada de duas formas condicionando o modo de operação do *S-GW*. Caso a interface seja baseada em *GPRS Tunneling Protocol (GTP)*, todas as suas interfaces no plano do utilizador terão comunicação através de túneis *GTP*, em que o controlo é feito no *P-GW* ou no *MME* e não há necessidade duma ligação ao *Policy and*

Charging Rules Function (PCRF). No caso de a interface usar *Proxy Mobile Internet Protocol (PMIP)* o *S-GW* vai ser o responsável por fazer o mapeamento dos serviços *IP* e dos túneis *GTP* nas interfaces *S1-U*. Além disso também vai estar ligado ao *PCRF* para receber a informação desse mapeamento.

Nos *handover* entre *eNB's* e entre sistemas *3GPP*, o *S-GW* vai servir de ponto de ancoragem de mobilidade, ou seja, no primeiro caso o *S-GW* altera o fluxo de dados do *eNB* de origem para o novo *eNB* e no segundo caso vai retransmitir os dados entre os elementos dos sistemas *2G/3G* e o *P-GW*.

Para todos os fluxos de dados do utilizador, quando em modo ativo, o *S-GW* retransmite-os entre o *eNB* e o *P-GW*, no entanto se o *UE* se encontrar em modo *idle*, o *S-GW* vai guardar os dados em *buffer* e pedir que o *MME* realize *paging* ao móvel para que este passe para modo ativo e envie os dados guardados.

O *S-GW* monitoriza e pode coletar os dados transmitidos nos túneis estabelecidos para taxaço e para interceço legal dos dados.

2.2.5. *P-GW*

O *Packet Data Network Gateway* é o elemento lógico que serve de fronteira entre as redes de pacotes externas e o *EPS* e atribui os endereços *IP* aos diferentes *UE* através de *Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP)*.

O *P-GW* é o elemento mais hierarquizado ao nível de mobilidade, pois quando um *UE* realiza um *handover* entre *S-GW's*, o *P-GW* vai ser o responsável por comutar os fluxos de dados entre eles.

Relativamente à interface *S5/S8* entre o *S-GW*, tal como foi referido anteriormente, pode ser baseada em túneis *GTP*, no qual o fluxo de dados *IP* é mapeado nesses túneis pelo *P-GW*, através da informação obtida do *PCRF* ou do *S-GW*. Se a interface for baseada em *PMIP*, os pacotes *IP* são todos mapeados num único túnel *Generic Routing Encapsulation (GRE)* que permite que os pacotes sejam transmitidos de forma transparente entre os *endpoints*, neste caso toda a informação de controlo é trocada apenas com o *PCRF*.

Adjacente ao *P-GW* está o *Policy and Charging Enforcement Function (PCEF)*, para efetuar filtragem, limitação ou controlo de serviços, tendo em conta as políticas definidas para o *UE* nesse aspeto. Do mesmo modo que o *S-GW*, o *P-GW* pode monitorizar e coletar os dados para taxaço e interceço legal dos dados.

2.2.6. *PCRF*

O *Policy and Charging Resource Function* ou *PCRF*, é o elemento responsável pelo controlo das políticas e da taxação aplicadas ao *UE*. Cabe a este elemento, as decisões de como tratar os serviços, baseadas nos parâmetros *QoS* e tem também o encargo de fornecer as regras aplicadas pelo *PCEF* ao *UE*, de modo a serem alocadas as portadoras necessárias.

2.2.7. *HSS*

Relativamente ao *Home Subscription Server*, é uma base de dados usada para guardar toda a informação permanente de subscrições.

O *HSS* contém a cópia principal do perfil de subscrição, isto é, a informação sobre os serviços acessíveis pelo utilizador e se o *roaming* é permitido na rede. Para suportar a mobilidade entre sistemas não definidos pelo *3GPP*, existe um registo das identificações dos *P-GW* usados nessas conexões.

Relativamente à autenticação, a chave permanente, usada para o cálculo dos parâmetros de autenticação enviados e as chaves derivadas para encriptação e integridade estão guardadas no *Authentication Center (AuC)* que tipicamente faz parte do elemento *HSS*.

O *HSS* vai necessitar de ter ligações com todos os *MME's* da rede, pois a sinalização de autenticação é sempre feita entre o *HSS* e o *MME*.

Para cada registo de *UE* no servidor, pode-se saber a localização do utilizador ao nível do *MME*, pois os registos no *HSS* mantêm o *MME* que está a servir o utilizador.

2.2.8. *Serviços*

Os serviços são divididos em três categorias, de acordo com os serviços disponibilizados.

Em primeiro lugar estão os serviços *IP Multimedia Sub-system (IMS)*, estes são serviços implementados pelo operador através de *Session Initiation Protocol (SIP)*.

Em segundo lugar, os serviços não-*IMS*, que não são definidos nas especificações, mas implementados pelo operador, através de um protocolo existente entre uma aplicação no *UE* e um servidor pertencente ao operador.

Por último, estão aqueles serviços não implementados pelo operador, mas acessíveis através da *internet*, tendo em conta que o *UE* pode efetuar uma ligação a um qualquer servidor na *internet*, pode usufruir de outro tipo de serviços aqui categorizados.

2.3. Camada Física do LTE

As transmissões em *downlink* e *uplink* estão organizadas segundo *radio frames*, as quais podem ser de tipo 1 e de tipo 2 mas ambas com a duração de 10 ms [4].

As *frames* de tipo 1, presente na Figura 2, são aplicáveis apenas a *full duplex* e *half duplex Frequency Division Duplex (FDD)*. Esta *frame* é composta por 20 *timeslots* em que cada um tem a duração de 0,5 ms. Uma *subframe* caracteriza-se por ser um conjunto de dois *timeslots* consecutivos com a duração de 1 ms que corresponde ao *Transmission Time Interval (TTI)*.

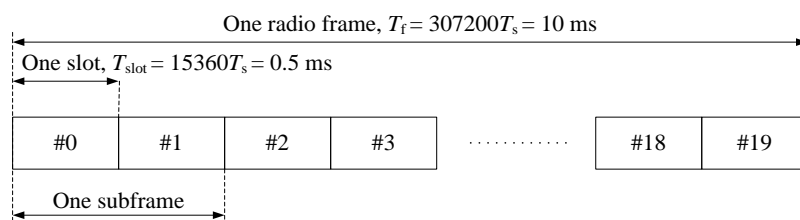


Figura 2 - Estrutura de uma de uma *frame* de Tipo 1 in [4].

As *frames* de tipo 2 (na Figura 3) são aplicáveis a *TDD*. Cada *radio frame* pode-se dividir em duas *half-frames* com a duração de 5 ms cada, as quais se podem dividir em 5 *subframes* de 1 ms. A comutação entre *uplink* e *downlink* pode ser feita com uma periodicidade de 5 ou 10 ms tendo em conta a configuração escolhida. Uma particularidade é que existem *subframes* especiais com os campos *Downlink Pilot Time Slots (DwPTS)*, *Guard Period (GP)* e *Uplink Pilot Time Slots (UpPTS)*, que facilita a implementação do *Time Division Synchronous CDMA (TD-SCDMA)*.

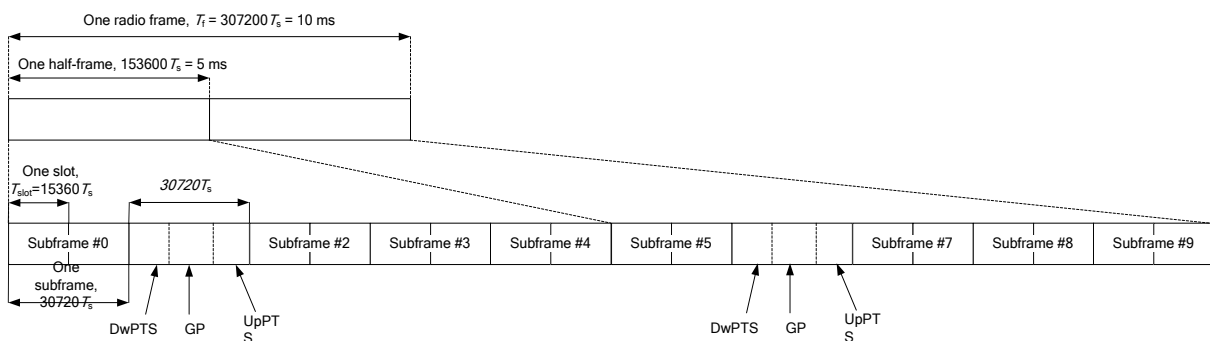


Figura 3 - Estrutura de uma *frame* de Tipo 2 in [4].

A unidade básica de atribuição de recursos denomina-se *Resource Block (RB)*. Este é composto pelo número de símbolos *OFDM* consecutivos ($N_{\text{symp}}^{\text{DL}}$) no domínio do tempo e o número de subportadoras ($N_{\text{sc}}^{\text{RB}}$) presentes no domínio da frequência, o que equivale a um total de 180 kHz (doze subportadoras de 15 kHz). Estes valores dependem das configurações do sistema, enquanto o primeiro depende da extensão cíclica e do espaço entre portadoras; o segundo depende da largura de banda alocada.

No caso de uma transmissão multi-antena existe uma grelha de recursos para cada antena, identificadas pelo seu sinal de referência específico, em que o domínio espacial é separado por camadas [4].

Cada elemento na grelha de recursos denomina-se por *Resource Element (RE)*. Este é composto por uma subportadora e um símbolo *OFDM*, sendo identificado pelos seus índices no domínio da frequência (k) e do tempo (l).

A parametrização descrita pode ser observada na Figura 4. Em *uplink* a grelha é organizada de forma idêntica com as devidas alterações na nomenclatura (leia-se em *DL, UL*).

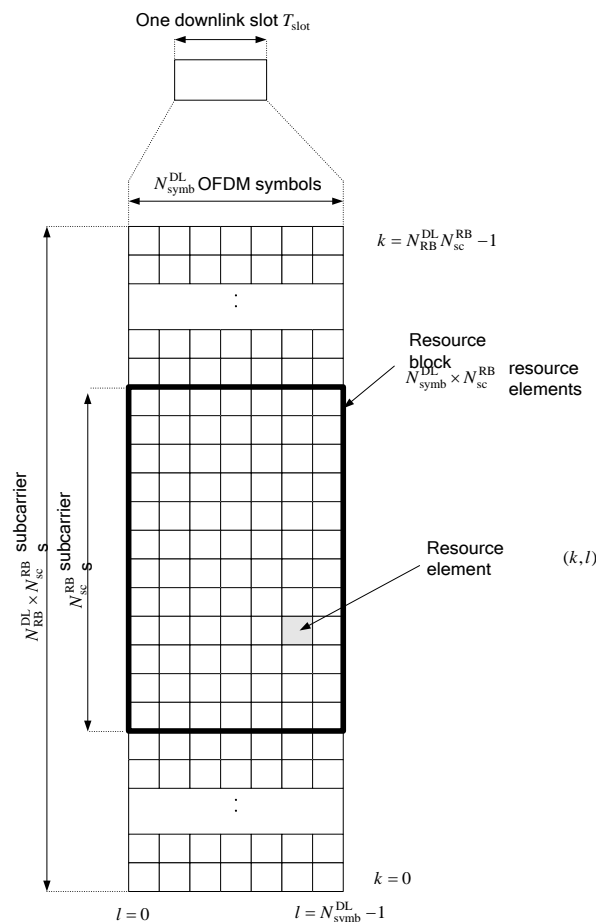


Figura 4 - Grelha de recursos da camada física em *downlink* in [4].

Estão definidas como potências máximas de transmissão para o equipamento móvel de 23 *dBm* [5] e tipicamente 46 *dBm* para a estação base [6].

A largura de banda disponível para mapeamento dos recursos em *LTE*, corresponde a um determinado número de *RB*'s como se observa na Tabela 1.

Tabela 1 - Configuração de Largura de Banda de Canal [5].

Largura de banda do canal [MHz]	1,4	3	5	10	15	20
Número de <i>RB</i> 's	6	15	25	50	75	100

As modulações suportadas na *Release 8*, são a *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)*, 16 *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)* e 64 *QAM*, estas vão influenciar os débitos e a robustez, uma vez que para uma modulação com mais símbolos é necessária uma maior *Signal to Interference to Noise Ratio (SINR)* [4]. A *SINR* é obtida através da potência média do sinal pretendido, dividida pela soma da potência do ruído e da interferência existente.

O *LTE* permite alterar dinamicamente entre estas modulações dependendo da qualidade da ligação. Assim sendo, é possível aumentar o débito binário na proximidade do centro da célula com uma modulação de ordem superior ou o alcance da célula, com a redução para uma constelação com menor número de símbolos, requerendo uma menor *SINR*.

A modulação *Binary Phase Shift Keying (BPSK)*, também está especificada para uso nos canais de controlo de *uplink*, permitindo uma maior robustez nos canais referidos pelas razões acima assinaladas.

2.3.1. Downlink

O *OFDMA* foi a técnica de acesso múltiplo escolhida para *downlink* em *LTE*, uma vez que apresenta melhorias no desempenho em comparação com o *WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access)* usado no *UMTS* [7].

O espectro do *WCDMA* foi dimensionado para o uso de portadoras com largura de banda de 5 *MHz* e o *LTE* foi pensado para suportar larguras de banda que podem ir até 20 *MHz*. Apesar do *WCDMA* apresentar um bom desempenho a 5 *MHz*, o aumento da largura da banda neste sistema provocaria um aumento da complexidade do recetor *RAKE* e das componentes de multipercurso. Deste modo o *OFDMA* apresenta vantagens, porque mantém a ortogonalidade das subportadoras e apenas necessita de fazer compensação em amplitude e de

desvio de fase. Além disso o uso de diferentes larguras de banda em simultâneo no mesmo sistema é mais flexível com a técnica *OFDMA*.

A existência de um tempo de guarda maior que a resposta impulsiva do canal reduz a Interferência Inter-Simbólica (*Inter Symbolic Interference, ISI*), pois as componentes de multipercorso responsáveis por essa interferência vão estar contidas nesse tempo de guarda definido [7].

Com o *OFDMA*, as subportadoras vão estar mais próximas entre si em comparação com *FDD*, passando a ocupar menos largura de banda para transmitir a mesma quantidade de informação, aumentando a eficiência espectral do sistema. Esta técnica vai gerar uma grande quantidade de subportadoras no espectro considerado, desta forma o sistema pode ficar robusto a interferências de banda estreita com a anulação de transmissão nessas portadoras.

O uso desta técnica de acesso múltiplo traz ainda outra vantagem, permite efetuar o escalonamento no domínio da frequência, que não é possível de realizar em *CDMA*, uma vez que os sinais estão distribuídos ao longo de toda a largura de banda. O escalonamento no domínio da frequência está exemplificado na Figura 5 e consiste em alocar recursos para cada utilizador consoante as condições de canal referente a cada um. Este facto possibilita aumentar a capacidade oferecida na célula, pois os pacotes vão ter uma menor probabilidade de apresentarem erros evitando assim a sua retransmissão [8].

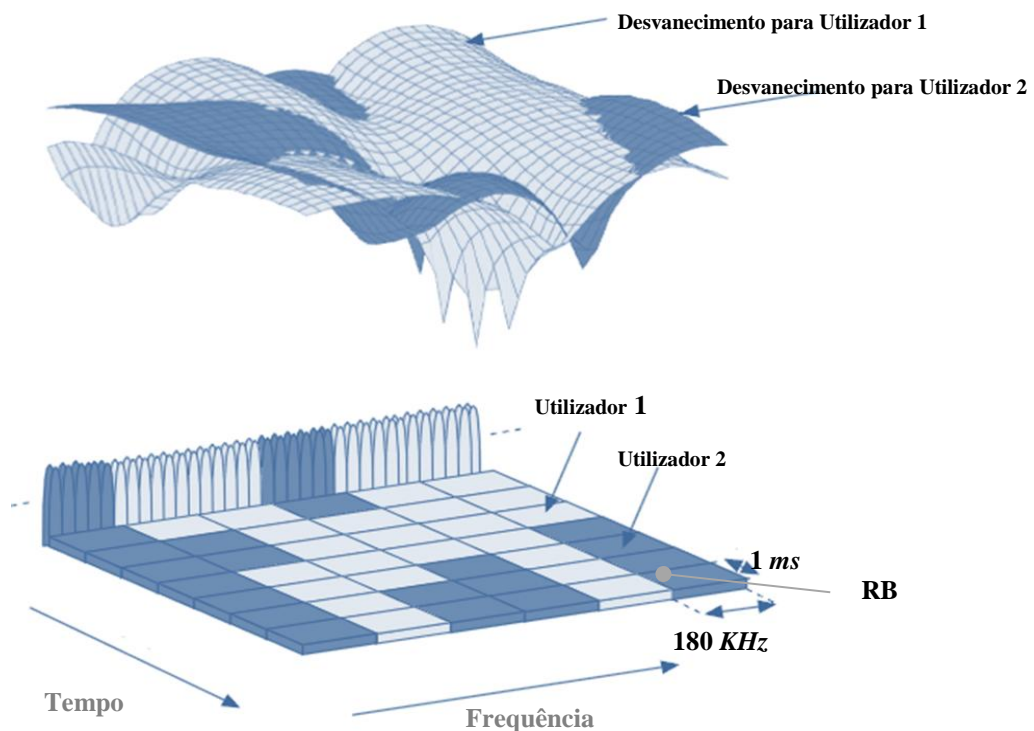


Figura 5 - Escalonamento no domínio da frequência e do tempo in [9].

2.3.2. *Uplink*

O *uplink* recorre ao acesso por *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)* [7], idêntica a *OFDMA*, mas em que a transmissão é feita com base sobre uma única portadora, com extensão cíclica.

A transmissão recorre a um espalhamento por *Discrete Fourier Transform (DFT)* dos símbolos modulados, antes do mapeamento das subportadoras. A aplicação da *DFT* antes do mapeamento permite fazer a distribuição de cada símbolo pelas diversas subportadoras.

A separação entre utilizadores é feita tirando partido do mapeamento de cada subportadora na *Inverse Fourier Transform (IFFT)*, ou seja, o mapeamento ocorre segundo os comandos de alocação de largura de banda recebidos em *downlink* e pode ser classificado em dois tipos, mapeamento localizado e mapeamento distribuído.

No mapeamento localizado as saídas do bloco da *DFT* são mapeadas segundo um subconjunto de subportadoras consecutivas, o que vai contê-las numa fração da largura de banda do sistema. Com mapeamento distribuído, as saídas vão ser mapeadas em subportadoras espalhadas de igual forma ao longo de toda a largura de banda, de tal forma que as subportadoras não consideradas vão ter amplitude zero.

O facto de se transmitir um único símbolo de cada vez, reduz a *Peak to Average Power Ratio (PAPR)*, quando comparado com *OFDMA* [8]. A *PAPR* relaciona-se com a eficiência do amplificador de potência, em que é máxima quando este atua perto da saturação. Com uma *PAPR* alta, a potência máxima do amplificador tem que ser reduzida para evitar a distorção do sinal, com uma *PAPR* mais baixa, o amplificador pode trabalhar mais perto da zona de saturação. Tal facto reflete-se em transmissores mais eficientes e com um consumo menor. Este fator é particularmente relevante, pois o transmissor no equipamento móvel realizado desta forma, permite aumentar a autonomia da bateria do terminal [8].

No lado da receção, é necessário um equalizador no domínio da frequência, mas com a existência de extensão cíclica no sinal, este vai tornar-se mais simples de realizar uma vez que a *ISI* é baixa ou inexistente. Como o equalizador se encontra do lado do *eNB*, não representa uma desvantagem pois não apresenta acréscimo de *hardware* para o equipamento móvel.

2.4. *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*

Uma das tecnologias chave necessárias em *LTE*, permitindo alcançar os débitos propostos, é o *Multiple Input Multiple Output (MIMO)*. A tecnologia *MIMO* permite multiplexar a informação no domínio espacial com o uso de mais que uma antena. Esta técnica permite que numa antena sejam enviados dados distintos (dependendo do modo de transmissão), dos enviados nas outras antenas. Na receção apenas é necessário desmultiplexar a informação recebida nas duas antenas de receção, desse modo a capacidade aumenta consideravelmente. O modo de utilização de *MIMO 2x2* (duas antenas na receção e duas antenas na transmissão) é visível na Figura 6.

Os sete modos de transmissão definidos no *3GPP* são visíveis na Tabela 2.

Tabela 2 - Modos de Transmissão em *downlink in* [10].

Índice	Modo de Transmissão (TM)	Descrição
1	<i>Single-antenna port</i>	A transmissão é feita por uma antena e a receção por uma (<i>SISO</i>) ou mais antenas (<i>SIMO</i>).
2	<i>Transmit Diversity</i>	A mesma informação é transmitida por múltiplas antenas e combinada na receção, melhora a qualidade de ligação e não aumenta a capacidade
3	<i>Open loop spatial multiplexing</i>	Informação distinta é enviada por duas ou mais antenas, sem informação explícita das condições do canal (à exceção do <i>Rank Indicator</i>), permite aumentar a capacidade.
4	<i>Closed loop spatial multiplexing</i>	Semelhante ao anterior, com a distinção do uso de uma matriz de pré-codificação sinalizada pelo <i>UE</i> , permitindo otimizar a transmissão e facilitando a decodificação dos fluxos de informação.
5	<i>Multi-user MIMO</i>	Semelhante ao modo anterior, mas em que os fluxos de informação são orientados para <i>UE's</i> distintos, existindo uma partilha de recursos em que todos têm o mesmo débito mas a capacidade da célula aumenta.
6	<i>Closed loop Rank 1 with pre-coding</i>	<i>Beamforming</i> , a mesma informação é transmitida numa única camada espacial.
7	<i>Single-antenna port; Port 5</i>	Modo de <i>beamforming</i> onde a mesma informação é enviada numa única camada espacial, um sinal de referência forma um porto de antena adicional permitindo que a transmissão seja feita em mais de quatro antenas.

O *MIMO* possibilita o uso da diversidade na transmissão, uma vez que existem várias antenas no sistema, sendo um conceito conhecido das tecnologias anteriores. Este modo de transmissão permite melhorar a qualidade de ligação em condições rádio adversas, devido ao ganho obtido pela receção do mesmo sinal proveniente de duas antenas no transmissor.

A tecnologia *MIMO* pode recorrer a uma pré-codificação (*TM4*), a qual tendo em conta as condições do canal, tenta contrariar o efeito da interferência na transmissão e vai mapear os

sinais de modo a maximizar a *SINR* na recepção. Esta estratégia maximiza a qualidade para um utilizador, no entanto quando estão envolvidos mais utilizadores, o desempenho não pode ser maximizado de igual forma para todos, entrando neste caso numa decisão por prioridades.

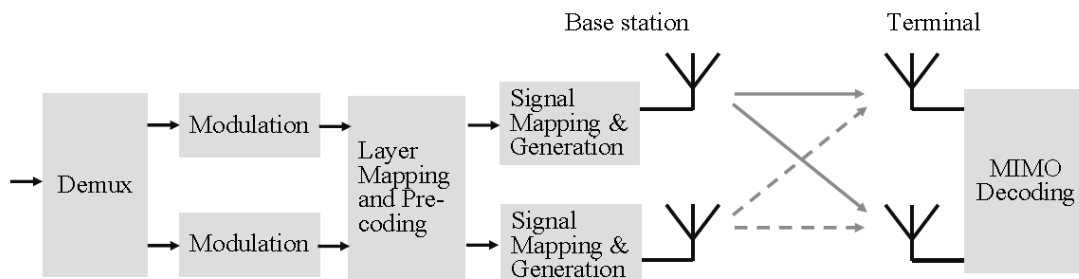


Figura 6 - MIMO numa configuração 2x2 in [8].

Os sinais de referência no *downlink* estão mapeados segundo um padrão para uma, duas ou quatro antenas, ver Figura 7, sendo distribuídos de uma maneira que permitem uma boa estimação de canal e para fazer a separação espacial dos fluxos de dados. Os sinais de referência apresentam uma modulação *QPSK* com uma *PAPR* baixa. Além disso, podem ser configurados com deslocamentos na frequência e com potência mais alta nos *RE's* correspondentes caso seja necessário.

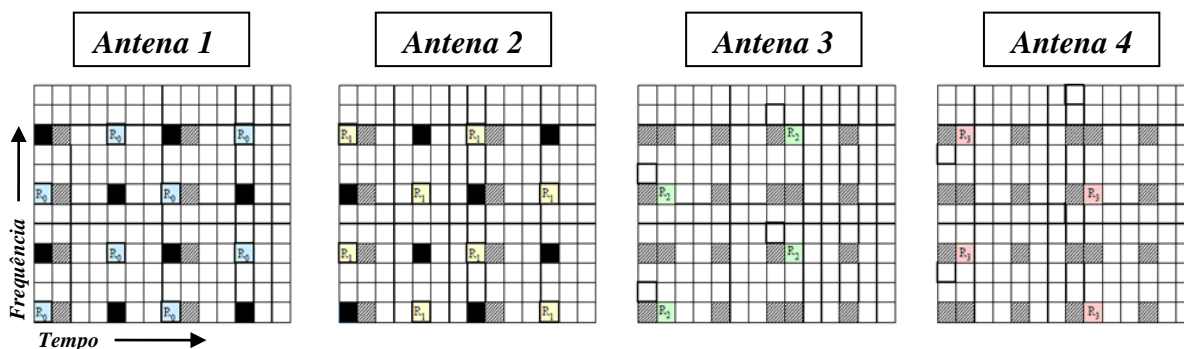


Figura 7 - Mapeamento dos sinais de referência em cada antena.

No *uplink* existem dois tipos de sinais de referência: *desmodulação*, usado para estimação de canal para ser feita a desmodulação dos dados, localizado no quarto símbolo de cada *slot*; *sounding*, para se obter informação da qualidade do canal como base para o escalonamento de pacotes e é transmitido no último símbolo da *subframe*.

2.5. Canais de Transporte e Mapeamento nos Canais Físicos

O *LTE* é composto apenas por canais de transporte partilhados, responsáveis pela interface entre a camada *Medium Access Control (MAC)* e a camada física. A camada física

necessita de alocar recursos tanto pelos diferentes utilizadores como por variações do débito de informação. O mapeamento dos canais lógicos nos canais de transporte e destes nos canais físicos é apresentado na Figura 8.

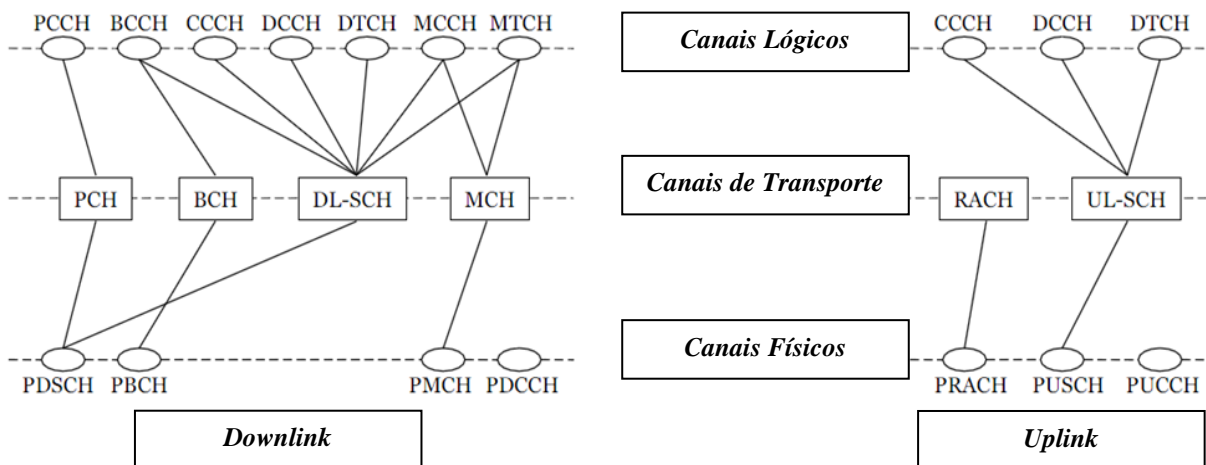


Figura 8 - Mapeamento dos canais lógicos, de transporte e físicos de LTE.

O *downlink* e o *uplink* apresentam quatro e dois canais de transporte, respetivamente. Do *downlink*, é de referir o *Broadcast Channel (BCH)*, usado para difundir todos os parâmetros necessários para que um terminal móvel acesse e identifique o operador, como é o caso dos recursos disponíveis onde pode ser feito o acesso aleatório.

O *Paging Channel (PCH)* notifica o terminal para passar do estado *RRC_IDLE* para *RRC_CONNECTED*.

Ainda não totalmente suportado na *Release 8*, mas já considerado, o *Multicast Channel (MCH)* vai permitir o uso de serviços *multicast* no plano do utilizador.

O *Downlink Shared Channel (DL-SCH)* transporta toda a informação, sejam dados do utilizador de ligações ponto-a-ponto ou de controlo das camadas superiores, assumindo que o *User Equipment (UE)* se encontra no estado *RRC_CONNECTED*. No entanto, apesar do *BCH* ser o meio privilegiado para transporte de informação de sistema, o *DL-SCH* também faz o transporte informação de controlo destinada a múltiplos terminais móveis. Uma particularidade deste canal consiste na adaptação dinâmica da ligação e retransmissões efetuadas na camada física.

Semelhante ao *DL-SCH*, mas para efetuar o *uplink*, existe o *Uplink Shared Channel (UL-SCH)*. A informação de controlo e do utilizador é transportada para o *eNB* tendo em conta que o terminal se encontra no estado *RRC_CONNECTED*. Este canal também pode efetuar retransmissões e adaptar a ligação.

Por último, usado na resposta a mensagens de *paging* ou na alteração de estado, de ou para *RRC_CONNECTED*, está o *Random Access Channel (RACH)*. Neste canal não circula informação relativa ao utilizador ou de camadas superiores, pois é apenas usado para ativar a transmissão no *UL-SCH*.

Os canais de transporte em *downlink* e *uplink* estão mapeados no seu equivalente da camada física. No *downlink*, o *PCH* e o *DL-SCH* são enviados no *Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)*, enquanto o *MCH* é transmitido no *Physical Multicast Channel (PMCH)*. No caso do *BCH*, este é mapeado no *Physical Broadcast Channel (PBCH)*, no entanto apenas parte dos parâmetros de difusão vão ser transmitidos neste canal, pois os *System Information Blocks (SIBs)* vão estar contidos no canal de transporte *DL-SCH*.

O *PBCH* encontra-se na *subframe 0* de cada *radioframe* tendo um baixo débito com um *TTI* de *40 ms*, modulação baixa (*QPSK*) e codificação de canal robusta, para permitir uma melhor cobertura em toda a célula. Para além do referido o *PBCH* transporta também o *Master Information Block (MIB)* que inclui parâmetros essenciais (largura de banda e número de trama) para descodificar o primeiro *SIB*.

Em *uplink*, o *UL-SCH* é mapeado no *Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)* e o *RACH* no *Physical Random Access Channel (PRACH)*.

Para além dos canais físicos, responsáveis por dar suporte aos canais de transporte, existem mais quatro canais que não têm equivalente ao nível de transporte, pois são usados para sinalização na camada física. Para *downlink* estão definidos três tipos de mensagens de controlo que são mapeadas nos canais com as características referidas.

A mensagem de *Downlink Control Information (DCI)* que controla com diferentes formatos a alocação de recursos da camada física, é mapeada no *Physical Downlink Control Channel (PDCCH)*, responsável então pela sinalização da camada física. A mensagem de *Hybrid Automatic ReQuest Indication (HI)* é transportada no *Physical Hybrid Automatic ReQuest Indicator Channel (PHICH)*, o qual é usado apenas para indicar se um pacote foi recebido com sucesso. Por último a mensagem *Control Format Indicator (CFI)* está mapeada no *Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)* e tem como função indicar quantos recursos estão reservados para informação de controlo.

O *Physical Uplink Control Channel (PUCCH)* é o canal semelhante ao *PDCCH*, mas no sentido do *uplink*, ou seja, este canal é usado para transportar informação de controlo da camada física na ausência de dados de *uplink*, mas que ao existirem, a informação de controlo é transmitida multiplexada no *PUSCH*.

Os sinais da camada física são definidos como sendo um conjunto de *RE*'s usados pela camada física mas que não transportam informação derivada de camadas superiores. Podem ser de dois tipos: sincronização, que simplificam a procura de célula e de referência, para estimação da qualidade de canal e para identificar as diferentes camadas espaciais.

2.6. Procedimentos da camada física

Na tecnologia *LTE*, existem procedimentos ao nível da camada física que possibilitam e melhoram o acesso rádio. Os procedimentos mais notórios são identificados de seguida [10].

2.6.1. Acesso Aleatório

O acesso aleatório, à semelhança do *WCDMA*, tem o problema do *UE* não ter informações precisas de qual a potência necessária para que o *eNB* detete a transmissão aleatória. Deste modo o acesso aleatório é feito através da transmissão de um preâmbulo, se não existir resposta este é retransmitido no próximo recurso disponível. A diferença existente no *LTE*, deve-se aos passos que o *eNB* efetua após detetar o *UE*, pois a resposta dada pelo *eNB*, descreve o recurso no qual deve ser feito o acesso no *PUSCH*. Logo, o *RACH* não transmite informação do utilizador e é usado apenas para transmissão do preâmbulo.

2.6.2. Receção e Transmissão de dados na camada física

Sabendo que os recursos têm resolução temporal de 1 *ms* e de 180 *kHz* em frequência, a receção e transmissão de dados é feita tendo em conta a alocação destes recursos dinamicamente.

A receção de dados na camada física, em *downlink*, tem o procedimento seguidamente enumerado:

1. O *eNB* avalia as diferentes condições de cada utilizador, entre as quais os dados que estão presentes no *buffer*, as características temporais e na frequência do canal, quais as necessidades da retransmissão, entre outras. Estas condições são específicas da implementação de cada fornecedor de equipamento.
2. Para que um *UE* tenha uma resposta durante o próximo *TTI* de 1 *ms*, o *eNB* vai avaliar se o *MIMO* pode ser usado, a qualidade do canal, as subportadoras a serem alocadas e que modulação pode ser usada.

3. O *eNB* determina o número de dispositivos a serem alocados durante o *TTI* e a adaptação da ligação para a sinalização, o que quer dizer que vai ajustar a sinalização de um a três símbolos por *radioframe* e alterar o valor do *PCFICH*. Seguidamente o *eNB* vai selecionar o canal *PDCCH* que o equipamento vai decodificar, de modo a que todos os dispositivos tenham espaço reservado. Como o *PCFICH* e o *PDCCH* se encontram no início da *radioframe*, os restantes símbolos vão ser preenchidos com dados do *PDSCH*.
4. O *UE* decodifica o conjunto de possíveis *PDCCH*, de acordo com os parâmetros configurados. Quando decodificado, vai receber o *PDSCH* baseado na informação obtida.
5. Os parâmetros *PDCCH* vão permitir ao equipamento a combinação dos dados do *PDSCH* através do *Hybrid Automatic ReQuest (HARQ)*.
6. Tendo os dados do utilizador sido corretamente decodificados, com a possibilidade de combinação de dados no *buffer*, o *UE* vai enviar um *ACK/NACK* correspondente ao pacote recebido, após os 3 *ms* de tempo necessário para o processamento.

A transmissão de dados em *uplink* na camada física segue a seguinte metodologia:

1. De acordo com as informações da camada *MAC*, o *eNB* determina quais os recursos necessários para a transmissão do *UE*, na direção do *uplink*.
2. Como o *eNB* necessita de saber qual o domínio da frequência em qual colocar a transmissão do *UE*, este vai enviar um *Sounding Reference Symbol (SRS)*. O *SRS* é um sinal de referência distribuído com a mesma potência em múltiplos de quatro *RB*, em que o recetor do *eNB* vai efetuar medições da qualidade deste sinal, em diferentes partes da banda de transmissão em *uplink*.
3. O *eNB* vai otimizar as diferentes transmissões e colocar as informações de *uplink* do *PUSCH* no espaço do *PDCCH* que o *UE* está a decodificar.
4. Quando a decodificação do *PDCCH* termina com o *Cyclic Redundancy Check (CRC)* correto, o *eNB* vai alocar o *PUSCH* nos *RB*'s.
5. No *eNB* vai ser feita a decodificação do *PUSCH*, que tem a informação necessária para assegurar que a combinação dos dados foi feita de forma correta no *buffer*.
6. No lado da receção é necessário escalonar as retransmissões de pacotes.

2.6.3. *Hybrid Automatic Request (HARQ)*

O procedimento *HARQ* em *LTE* é baseado num processo de espera de resposta. Assim que um pacote seja transmitido do *eNB*, o *UE* vai decodificá-lo e providenciar uma resposta no *PUCCH*, que no caso de ser um *Negative ACK (NACK)*, o *eNB* vai retransmitir esse pacote não recebido.

Na receção, a retransmissão vai ser combinada com a transmissão original e no caso de o *CRC* estar correto, o *UE* vai enviar um *ACK* como resposta afirmativa à decodificação. Sendo este um processo descontínuo de espera de resposta, o *LTE* contém oito processos *HARQ* para gerar dessa forma um fluxo contínuo de pacotes, como se verifica na Figura 9. Para múltiplos utilizadores a operação fica dependente do modo como são agendados os pacotes.

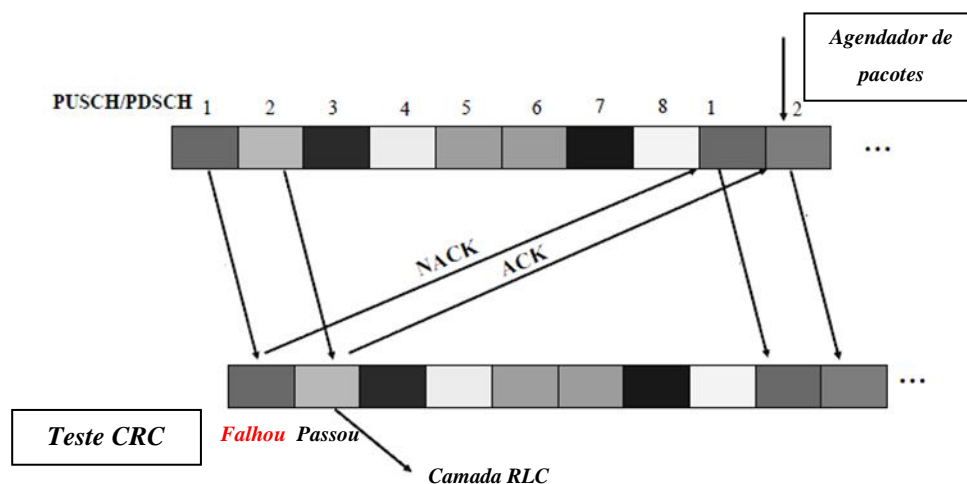


Figura 9 - *LTE HARQ* com 8 processos.

2.6.4. *Avanço Temporal*

O avanço temporal é implementado para que as diferentes transmissões em *uplink*, dos diferentes utilizadores cheguem ao *eNB* dentro do tempo de guarda. Esta sincronização é necessária para evitar a interferência entre os diferentes utilizadores dentro da mesma *subframe*. O avanço temporal é feito quando o *eNB* mede o atraso do sinal de *uplink*, caso seja necessário são enviados comandos, para ajustar o tempo de transmissão com uma resolução de $0,52 \mu\text{s}$.

No caso do *UE* se encontrar em *RRC_IDLE*, estiver num longo período de inatividade, se tiver ocorrido um *handover* não sincronizado ou no caso de falha de ligação, o avanço temporal é medido na transmissão do *RACH*.

Pelo alcance definido apenas pelo avanço temporal o raio das células poderia alcançar os 100 *km* [8].

2.6.5. Controlo de Potência

O controlo de potência no *LTE* é feito de modo a maximizar a autonomia da bateria e para evitar um gama dinâmica demasiado grande no recetor. No *uplink* o controlo é feito de forma mais lenta que no *WCDMA* e a medição é feita ao nível da densidade de potência espectral (potência por *Hz*) e não da potência absoluta como nos sistemas anteriores, uma vez que no *LTE* as larguras de banda são variáveis.

Sendo os recursos no *LTE* ortogonais entre si, o problema do efeito perto-longe, em que um sinal mais forte ofusca outro de mais baixa potência, não existe, o que poderia requerer um controlo de potência mais rápido à semelhança do *WCDMA*.

O controlo de potência é baseado na estimação do *path loss*, tendo em conta os parâmetros da célula e um fator de correção recebido pelo *eNB*, no entanto, tem uma resolução mínima de 1 *dB*.

Os comandos de controlo são enviados no *PDCCH* e podem ser enviados para utilizadores individuais ou para grupos de utilizadores, além disso o controlo de potência é feito de forma separada para o *PUCCH* e para o *PUSCH*.

2.6.6. Paging

O *paging* é feito no *PDSCH*, em que a *subframe* na qual a mensagem é espectável de ser recebida, é alocada pelo *PDCCH*. Os critérios chave de implementação do *paging* têm que assegurar um ciclo de receção descontínua, de modo a que os terminais tenham um menor consumo e uma resposta rápida a uma possível chamada recebida.

2.6.7. *Procura de célula*

A procura de célula é feita através dos sinais de sincronização. Em primeiro lugar, o terminal móvel vai procurar pela sincronização primária que se encontra no centro da banda. Quando o sinal primário for detetado, o *UE* vai procurar por um dos 168 sinais secundários possíveis e uma vez encontrado, o *Physical Cell ID (PCI)* pode ser identificado de um dos 504 identificadores existentes.

A partir da determinação do *PCI*, o *UE* tem informação dos parâmetros usados em *downlink* e pode descodificar o *PBCH*. Todo este processo é independente da banda alocada no sistema pois os sinais de sincronização encontram-se situados no centro da largura de banda do sistema.

2.6.8. *Informação das Condições de Canal*

Por último, a informação das condições do canal é providenciada ao *eNB* para que ajudar no processo de escalonamento dos pacotes. O estado do canal é estimado pelo *UE* baseado nas transmissões de *downlink*. As informações recolhidas, nomeadamente os parâmetros suportados pela receção de dados no *UE*, são enviadas pelo *PUCCH* ou no *PUSCH*. Em *uplink* as informações correspondentes são obtidas a partir do *SRS*.

Em *LTE* podem existir três tipos de informação acerca do estado do canal.

O *Channel Quality Indicator (CQI)*, fornece informações sobre os parâmetros de ligação suportados no *UE*, ou seja, tendo em conta o valor deste, permite uma modulação e codificação mais altas ou não.

O *Rank Indicator (RI)* é a recomendação dada pelo *UE* do número de camadas (espaciais) a serem usadas, este apenas é reportado caso o *UE* se encontre num modo de transmissão que as permita.

Por último, o *Pre-coding Matrix Indicator (PMI)* identifica a matriz definida para mapear os pacotes nas diferentes camadas espaciais, de forma a melhorar a *SINR* na receção.

Estes indicadores podem ser periódicos no *PUCCH*, transportando menos informação devido às características deste canal ou podem ser enviados de forma aperiódica no *PUSCH* quando o *eNB* necessita de informação mais detalhada.

2.7. Medidas na camada física

No *eNB* são efetuadas medidas que são tidas em consideração nas decisões de *handover*, tendo em conta as potências relativas de cada utilizador e também para compensar a interferência entre células [11]. Como todas as funcionalidades rádio, estão localizadas no *eNB*, devido à nova arquitetura de rede implementada no *LTE*, existem poucas medidas que vão ser reportadas nas interfaces subsequentes. O *eNB* vai medir a potência média despendida nos *RE's* usados para transmitir os sinais de referência, a potência da interferência recebida em cada *RB* e o ruído térmico na largura de banda do sistema. Segundo o *3GPP* estão definidos outros indicadores que dão suporte à monitorização do desempenho do sistema, a título de exemplo, a *Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)*.

Das medidas definidas e realizadas no *UE* referem-se em primeiro lugar o *Reference Signal Received Power (RSRP)*, que indica a potência média dos *RE's* que contêm sinais de referência da célula.

O *Reference Signal Received Quality (RSRQ)* é a razão entre o *RSRP* e o *Received Signal Strength Indicator (RSSI)*. Este último apesar de ser medido, não é reportado pelo *UE*, no entanto, mede a potência total recebida no *UE*, originária de qualquer fonte, entre as quais interferência de canal adjacente, ruído térmico, etc.

Tendo em conta o escalonamento, vão ainda existir tempos livres usados para fazer medições noutros sistemas que não o *LTE*.

2.8. Interfaces e Protocolos

Nos sistemas *LTE* os protocolos existentes, relativamente ao *UE*, dividem-se em dois planos: do utilizador e de controlo. Na Figura 10, estão representadas as interfaces de controlo de um único *MME* e onde se pode ver os protocolos na direção do *UE* e dos *gateways*. De referir que os protocolos a cinzento são protocolos *internet* padrão usados no transporte no *EPS*, não tendo sido definidos pelo *3GPP*.

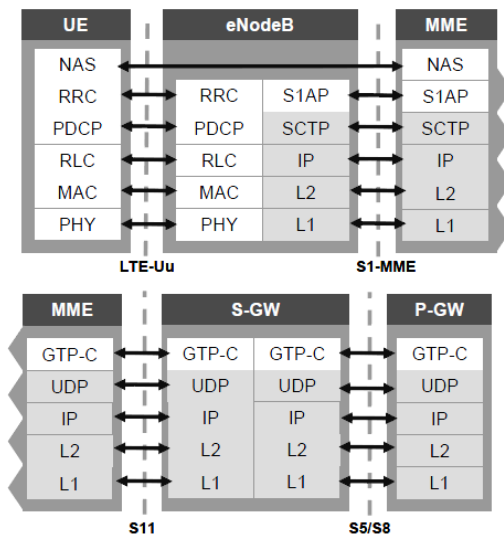


Figura 10 - Protocolos no plano de controle *in* [8].

A camada superior no plano de controlo é a *Non-Access Stratum (NAS)*, sendo transportada em modo “transparente” entre o *UE* e o *MME*. O conteúdo nesta camada não é interpretado pelo *eNB*, sendo este apenas usado para retransmitir estas mensagens. A camada *NAS* divide-se em dois protocolos.

O primeiro é o *EPS Mobility Management (EMM)*, este é o responsável pela mobilidade do *UE* dentro do sistema. Portanto, as funções relativas a este protocolo são de *attach/detach* da rede e de atualização de localização, denominada *Tracking Area Updating (TAU)*. Além disso existem também funções para que o *UE* comute para modo ativo, pedidos de serviços ou de *paging*, caso o pedido seja feito do *UE* ou pela rede, respetivamente. Finalmente, esta camada protocolar tem a seu cargo a alocação do *GUTI* e o controlo da segurança, encriptação e de integridade da camada *NAS*.

O segundo protocolo da camada *NAS* é o *EPS Session Management (ESM)* e dispõe de procedimentos para manipular as portadoras *EPS*. Este protocolo é utilizado para o controlo das portadoras na camada de acesso e no plano do utilizador, ou seja, vai permitir criar, ativar, modificar ou libertar as portadoras necessárias pelo serviço requerido.

2.8.1. Interface Rádio

Os protocolos da interface rádio do *LTE (LTE-Uu)* têm como função configurar, modificar ou libertar o uso das portadoras rádio que permitem fazer a transferência das portadoras *EPS*. Sendo esta dividida em três camadas: a primeira é a camada física; a segunda é composta pela camada *Medium Access Control (MAC)*, o *Radio Link Control (RLC)* e o

Packet Data Convergence Protocol (PDCP); a terceira camada contempla o *Radio Resource Control (RRC)*.

A camada protocolar *MAC* executa o mapeamento dos canais lógicos nos canais de transporte. As tarefas deste protocolo passam pela multiplexagem ou demultiplexagem dos *RLC Payload Data Units (PDU)* das portadoras rádio nos *Transport Blocks (TB)*, medições do volume de tráfego para notificar a camada *RRC*, correção de erros através do protocolo *HARQ* e gestão de prioridades dos canais lógicos dos *UE's*.

O *Radio Link Control* tem a funcionalidade de transferir os *PDU's* recebidos da camada *RRC* ou do *PDCP*. Existem três modos de operação nesta camada, modo transparente em que os *PDU's* são entregues sem interpretação, modo *unacknowledged* que organiza os pacotes para que sejam entregues em sequência e modo *acknowledged* que vem acrescentar funções ao modo anterior, tais como, retransmissão no caso de perda de *PDU's* e segmentação para adaptar os dados aos recursos físicos. Finalmente o *RLC* dispõe ainda de rotinas para detetar e recuperar de estados protocolares com erros.

Em cima do *RLC* está o *Packet Data Convergence Protocol (PDCP)*, com as funções de compressão e descompressão dos cabeçalhos dos pacotes *IP*, encriptação e desencriptação dos dados de utilizador e de controlo. Por último cabe-lhe também a proteção e verificação de integridade, garantido que os dados de controlo vêm da origem correta e não são corrompidos.

O *Radio Resource Control* é o protocolo responsável por controlar o uso dos recursos rádio. O *RRC* tem como funções a difusão de informações de sistema, a gestão das conexões *RRC* e das portadoras rádio ponto-a-ponto. Além disso esta camada protocolar trata das funções de segurança, nomeadamente a gestão de chaves de segurança.

Em termos de gestão de mobilidade realiza *paging*, *handover*, a seleção e a resseleção de células no *UE*. Este protocolo faz ainda o suporte às configurações e otimizações automáticas.

De notar que é nesta camada protocolar que estão definidos os estados de conectividade, passando a existir no *LTE* apenas dois estados: modo ativo (*RRC_CONNECTED*) e modo *idle* (*RRC_IDLE*).

No modo *idle*, o *UE* monitoriza os pedidos de *paging*, obtém informações de sistema, realiza medidas às células vizinhas e efectua a seleção de células. A *Discontinuous Reception (DRX)* ou receção descontínua pode ser configurada neste estado, de modo a fazer poupança de bateria. O controlo de mobilidade neste estado é feito pelo *UE*.

No modo ativo, ocorre transferência de dados entre a rede e o *UE*, no plano do utilizador. Para este efeito o *UE* faz a monitorização dos canais de controlo associados ao canal de dados partilhado, para identificar se existem dados agendados e notifica o *eNB* da qualidade do canal. À semelhança do modo *idle*, o *UE* também realiza medidas às células vizinhas e notifica o *eNB* tendo em conta a configuração feita por este. Neste modo o controlo de mobilidade é feito pela rede.

2.8.2. Interface X2

No *LTE* os *eNB* estão ligados entre si através da interface *X2* e os protocolos existentes nesta interface podem ser observados na Figura 11. A interface *X2* é uma interface lógica que liga diretamente os *eNB*'s e que normalmente é usada para transportar informação de controlo entre *eNB*'s, mas podendo ser usada temporariamente para encaminhamento de dados de utilizador. A diferença entre o plano de utilizador e de controlo na interface *X2* está no modo de transporte, ou seja, para o controlo é usado o protocolo *Stream Control Transmission Protocol (SCTP)* que garante a entrega dos dados e o *X2 Application Protocol (X2AP)* responsável pela sinalização rádio. No plano do utilizador, o *User Datagram Protocol (UDP)*, apesar de não assegurar a entrega, foi considerado suficiente. Em cima deste protocolo à semelhança da interface *S1*, está o *GTP*.

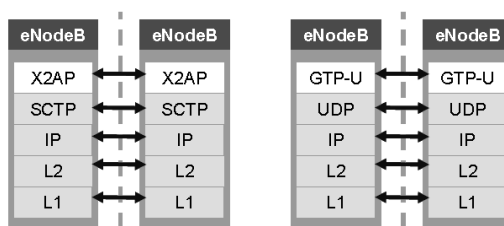


Figura 11 - Protocolos de controlo (à esquerda) e de utilizador (à direita) da interface X2 in [8].

O protocolo *X2AP* tem diversas funções, entre elas está a gestão de mobilidade entre *eNB*'s, sendo as mensagens de *handover* entre *eNB*'s transmitidas nesta interface. Outra das funções é a gestão de carga para permitir a coordenação de níveis de interferência entre células, obtendo informação dos recursos, sobrecarga e tráfego entre *eNB*'s diferentes.

O *X2AP* também configura a interface *X2* e realiza tratamento de erros.

2.8.3. *Interface S1*

A interface *S1* interliga a *E-UTRAN* ao *EPC* através de dois protocolos.

Primeiramente o *S1 Application Protocol (SIAP)* gere as ligações referidas e quando o *core* está envolvido, intervém no *handover*.

Em segundo o *SCTP* é usado para ser feita a transferência sequenciada e garantida dos dados, esta camada assenta sobre o protocolo *IP*.

O facto desta interface ser transportada sobre *IP* permite que a transmissão seja feita sobre vários suportes físicos representados no esquema por *L1* e *L2*.

2.8.4. *Interface S5/S8*

Tal como já foi referido podem ser usadas duas configurações para a interface *S5/S8*, usando *GTP* ou *PMIP*.

No primeiro caso, estão presentes os protocolos *GTP Control Plane (GTP-C)*, responsável por gerir as conexões de utilizador no *EPC* e dos túneis *GTP User Plane (GTP-U)*. Este protocolo é também o responsável pela gestão de mobilidade, quando os túneis *GTP-U* são realocados. Para dar suporte a este protocolo existe o *UDP*, que foi preferido ao invés do *Transmission Control Protocol (TCP)*, pois a camada superior já assegura a entrega fiável da informação.

No segundo caso, o *PMIP* vai assentar diretamente sobre o protocolo *IP* e é responsável pela gestão de mobilidade, mas não pela alocação de portadoras, o que quer dizer que todo o tráfego pertencente a um *UE* é enviado conjuntamente para a rede de pacotes.

É nesta interface que vai residir a diferença de protocolos entre os planos de utilizador e de controlo. Na Figura 12 estão presentes os protocolos relativos ao plano do utilizador, note-se que o *MME* não intervém diretamente na transmissão.

Caso o controlo seja feito sobre *GTP-C* no plano de utilizador, vai estar presente o *GTP-U* para realizar o transporte e formar os túneis usados para envio dos pacotes pertencentes a uma portadora *EPS*.

Ao invés do referido, em conjugação com o *PMIP*, vai ser usado o *Generic Routing Encapsulation* assente diretamente sobre o protocolo *IP*, para transportar toda a informação referente a um utilizador para uma rede de pacotes específica.

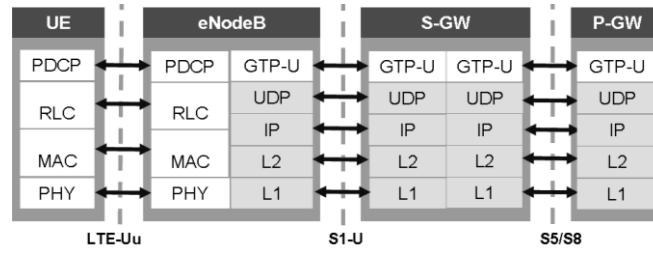


Figura 12 - Protocolos no plano do utilizador *in* [8].

2.9. Modelo de Portadoras e Qualidade de Serviço (QoS)

Na tentativa de melhorar o conceito de qualidade de serviço (*QoS*) existente nas gerações anteriores, que dispunham de um conjunto extenso de parâmetros *QoS*, mas que não se relacionavam diretamente com as aplicações envolvidas em que o modelo de portadoras tinha muitas camadas, no *LTE* o modelo de portadoras virou-se para as aplicações [3].

Foi estabelecido que apenas seria usado um conjunto reduzido de parâmetros *QoS* e seriam definidas características padronizadas. Além disso, a alocação de portadoras foi feita de modo a que esta gestão possa ser feita apenas pela rede e esta decida a forma como são estabelecidos os parâmetros.

O estabelecimento da portadora principal consiste na sinalização direta entre o *UE* e a rede, passando por todos os elementos lógicos desta. Cada *UE* vai ter alocada pelo menos uma portadora para manter a conectividade *IP*, com características de *QoS* pouco exigentes. Para cumprir os requisitos de *QoS* de serviços mais exigentes podem ser alocadas mais portadoras dedicadas a um utilizador.

As portadoras existentes no *LTE* e a sua relação com os elementos lógicos da rede e interfaces podem ser vistas na Figura 13.

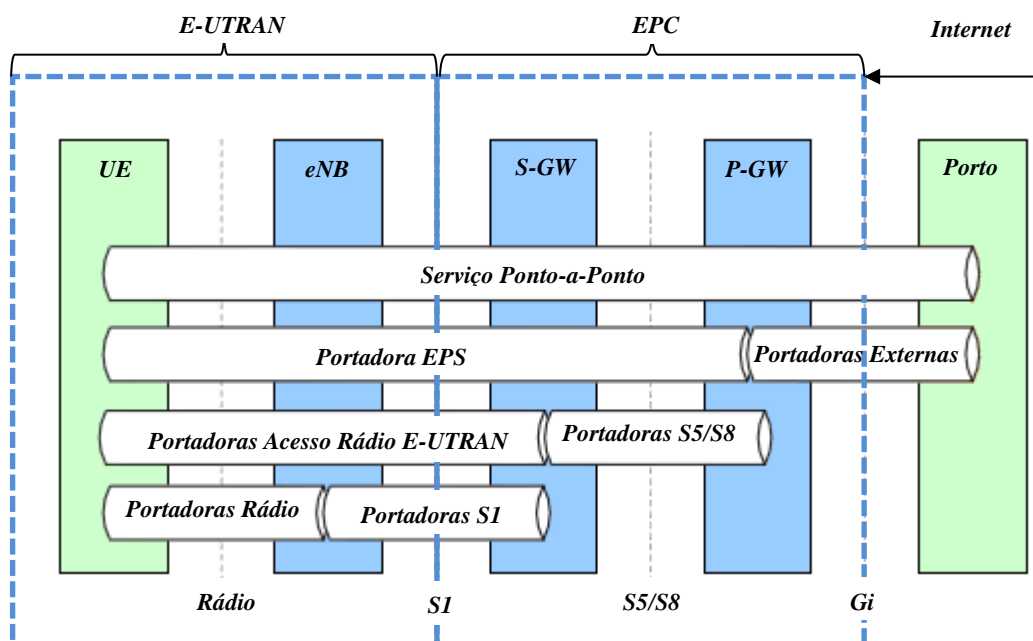


Figura 13 - Esquema de portadoras na arquitectura do *LTE*

O estabelecimento de portadoras faz-se quando o *UE* sinaliza o *IMS*, através da portadora alocada inicialmente, para criar um serviço ponto-a-ponto com as características *QoS* necessárias ou então apenas indicando o serviço requerido. O servidor do lado do *IMS* pede à rede o estabelecimento de uma portadora *EPS* que suporte as características pedidas. Uma vez que não existe sinalização específica da portadora *EPS*, esta é construída através das três portadoras de mais baixo nível (*S5/S8*, *S1* e *Rádio*).

Existem cinco parâmetros de qualidade definidos nas especificações [12].

Em primeiro está o *QoS Class Identifier (QCI)*, este é um índice transmitido que identifica um conjunto de valores definidos para os atributos *QoS* segundo a Tabela 3. As classes estão especificadas segundo duas categorias de portadoras, *Guaranteed Bit Rate (GBR)* e *Non-Guaranteed Bit Rate (Non-GBR)*, sendo o débito binário garantido ou não, respetivamente. A prioridade define a ordenação dos pacotes na interface rádio, o *delay budget* é usado para manter um escalonamento de pacotes de acordo com o requerido e o *packet loss rate* é usado para configurar o número de retransmissões.

Além das classes definidas, os operadores estão livres para criar classes proprietárias com combinações diferentes desses três atributos.

Tabela 3 - Parâmetros *QoS* para o *QCI* in [12].

<i>QCI</i>	Tipo de Recurso	Prioridade	L2 Delay Budget	L2 Packet Loss Rate	Exemplo de Aplicações
1	<i>GBR</i>	2	100 ms	10^{-2}	<i>VoIP</i>
2	<i>GBR</i>	4	150 ms	10^{-3}	Chamadas de Vídeo
3	<i>GBR</i>	5	300 ms	10^{-6}	<i>Streaming</i>
4	<i>GBR</i>	3	50 ms	10^{-3}	Jogos em tempo real
5	<i>Non-GBR</i>	1	100 ms	10^{-6}	Sinalização <i>IMS</i>
6	<i>Non-GBR</i>	7	100 ms	10^{-3}	Jogos interativos
7	<i>Non-GBR</i>	6	300 ms	10^{-6}	<i>Browsing</i> , correio eletrónico, <i>download</i> de ficheiros, etc.
8	<i>Non-GBR</i>	8	300 ms	10^{-6}	
9	<i>Non-GBR</i>	9	300 ms	10^{-6}	

O *Allocation and Retention Priority (ARP)* indica a prioridade de uma portadora em relação a outras. É necessário para aceitar, modificar ou libertar portadoras, esta última situação no caso de congestão na rede.

Seguidamente, existe o *Maximum Bit Rate (MBR)* que identifica o débito máximo oferecido numa portadora e o *Guaranteed Bit Rate (GBR)* para o débito binário que é efetivamente garantido à portadora.

Finalmente está definido o *Aggregate Maximum Bit Rate (AMBR)*, enquanto os parâmetros anteriores eram apenas para portadoras *GBR*, este é apenas para portadoras *Non-GBR* e identifica o débito binário máximo por grupo de portadoras *EPS*, para um único utilizador.

A latência é um parâmetro importante, tendo em conta que existem aplicações que não necessitam de um débito elevado, mas que exigem uma latência baixa. A latência pode ser medida através do *Round Trip Time (RTT)*, este é o tempo que um pacote *IP* demora (ida e volta) entre *UE* e o servidor.

O *delay budget* de ponto-a-ponto no plano do utilizador apresenta-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Componentes da latência *in* [8].

Componente de Atraso	Valores Típicos
Tempo de transmissão <i>uplink</i> e <i>downlink</i>	2 ms
Tempo de Buffer (0,5×Tempo de transmissão)	$2 \times 0,5 \times 1 \text{ ms} = 1 \text{ ms}$
Retransmissões 10%	$2 \times 0,1 \times 8 \text{ ms} = 1,6 \text{ ms}$
Pedido de escalonamento de <i>Uplink</i>	$0,5 \times 5 \text{ ms} = 2,5 \text{ ms}$
Escalonamento concedido de <i>Uplink</i>	4 ms
Atraso estimado no <i>UE</i>	4 ms
Atraso estimado no <i>eNB</i>	4 ms
<i>Core</i>	1 ms
Atraso total com recursos pré-alocados	13,6 ms
Atraso total com escalonamento	20,1 ms

3. Planeamento Rádio em *LTE*

3.1. Introdução

O planeamento feito em *LTE* tem por objetivo obter valores estimados para os débitos binários e de *SINR*, tendo em consideração o tipo de área em estudo. Para esse efeito, os parâmetros usados no planeamento, foram os mesmos que se assumiram nas medidas efetuadas. Desse modo é possível efetuar uma comparação entre ambos os valores (medidas e estimativas) para se efetuar uma validação da metodologia aplicada.

Existem dois tipos de planeamento a realizar: planeamento de cobertura e planeamento de capacidade.

O planeamento de cobertura tem como principal objetivo a determinação da distância máxima de ligação. Esta é obtida através do cálculo da atenuação máxima permitida, tendo em conta as condicionantes: área de planeamento, tipo de equipamentos e modo de transmissão e receção. Neste tipo de planeamento também é definida a distribuição das frequências e dos *PCI's*.

O planeamento de capacidade permite calcular a capacidade oferecida na célula, tendo em conta o raio máximo de célula determinado no planeamento de cobertura e os débitos médios por utilizador.

3.2. Áreas de Estudo

A implementação dos *eNB's* seguiu uma estratégia de co-localização maioritariamente em estações rádio *3G* à exceção da área 2, que apresentava um *eNB* co-localizado numa estação base *2G* situada no cimo de uma elevação e em linha de vista com grande parte da área. Este tipo de implementação permite baixar os custos no que se refere à aquisição de novos *sites* mediante uma troca ou simples implementação das antenas usadas. No entanto, existe a problemática da degradação da qualidade de serviço de uma tecnologia em função de outra, o que leva à determinação de uma solução de compromisso entre as duas tecnologias que se encontram a partilhar a mesma antena.

Os testes têm como referência capacidades de célula de 150 *Mbit/s* para dois utilizadores em simultâneo, débitos binários por um utilizador de 100 *Mbit/s* em *downlink* e 50 *Mbit/s* em *uplink* e uma latência média de 20 *ms*.

As características principais das áreas de estudo estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Características principais das duas áreas de estudo.

Características	Área 1	Área 2
Morfologia	Urbano Denso	Urbano Denso
Área [km^2]	≈4,5	≈13,96
Densidade Populacional [hab/km^2]	210,05	38,83
Número de <i>eNB</i> 's	4	4
Faixa de Frequências [GHz]	2,6	2,6
Tráfego de dados 3G [$kByte/s/célula$]	345578	773119
Largura de Banda [MHz]	20	20
Fator de Reutilização	<i>Full frequency</i>	<i>Full frequency</i>
Espaçamento entre <i>PCI</i> 's	4	4
Sectores	Trisectorizados	Trisectorizados
Antenas	18,5 <i>dBi</i> de ganho e 65° de abertura, duplamente polarizadas a 45°	18,5 <i>dBi</i> de ganho e 65° de abertura, duplamente polarizadas a 45°

3.3. Planeamento de Cobertura

De modo a garantir uma boa mobilidade e desempenho, é necessário que a cobertura rádio seja cuidadosamente planeada, de modo a cumprir os requisitos de qualidade de serviço. Tendo em conta que o *LTE* é uma tecnologia flexível, isto é, pode ser implementado em várias frequências e em diferentes larguras de banda, o planeamento tem que ter em consideração alguns fatores, tais como: o padrão de reutilização de frequências; as características do *eNB* e do *UE*; os serviços a oferecer e a largura de banda necessária.

É nesta fase do dimensionamento de uma célula que é efetuado o *link budget* para se determinar a máxima atenuação permitida, tendo em conta as especificações dos equipamentos e das margens de engenharia definidas.

O raio de célula, ou seja, o alcance máximo de uma ligação rádio e o parâmetro a determinar é então estimado por um modelo de propagação adequado através da atenuação de propagação máxima obtida no *link budget*.

3.3.1. Mapeamento de frequências

Existem diversos métodos para se implementar o conceito de reutilização de frequências [13]. Como se pode observar na Figura 14, estas técnicas podem ser usadas para reduzir a interferência entre células.

Em primeiro lugar refere-se o padrão de reutilização *Full Frequency*, nesta configuração a largura de banda disponível para a rede *LTE* não é dividida por sectores ou *eNB*'s da mesma rede. Desta forma, todas as células vão transmitir com uma potência uniforme ao longo de toda a banda. A grande desvantagem deste padrão é que os utilizadores que se encontrem na fronteira da célula vão estar sujeitos a interferência elevada no *downlink*, resultando numa degradação da qualidade de serviço.

O padrão de reutilização *Full Frequency* é usado nas redes *3G* e é do mesmo modo a abordagem convencional de operação do *LTE*. Neste último, podem ser aplicadas outras técnicas de forma a reduzir a interferência entre células vizinhas, melhorando o desempenho na fronteira das mesmas.

O padrão de reutilização *Hard Frequency* é um método conhecido e usado nas redes *2G* (*GSM*), em que diferentes frequências são atribuídas a células distintas, reduzindo a interferência nas células vizinhas pois existe um maior afastamento entre células interferentes nesta configuração. Quando aplicado ao *LTE* traduz-se numa divisão das subportadoras em três conjuntos distintos (ou de acordo com o fator de reutilização), em que cada um é atribuído a um *eNB* e que as células vizinhas não usem as mesmas subportadoras ou frequências. Apesar desta técnica de reutilização ser aquela que mais reduz a interferência na fronteira da célula, apresenta a desvantagem de reduzir a capacidade segundo o mesmo fator do padrão de reutilização, de acordo com a fórmula de *Shannon* [14] adaptada, visível em (3.1).

$$\text{Capacidade [Mbit/s]} = \frac{\text{Largura de Banda [MHz]}}{\text{Factor de reutilização}} \cdot \log_2 \left(1 + 10^{\frac{\text{SINR [dB]}}{10}} \right) \quad (3.1)$$

O terceiro método é uma solução híbrida entre as duas configurações anteriores tentando aproveitar as vantagens de cada uma, sendo chamado padrão de reutilização *Fractional Frequency*. Nesta configuração é feita uma divisão do espectro em duas secções, uma em *Full Frequency* e a outra em *Hard Frequency*.

Assim, a parte do espectro em *Full Frequency* é mapeada para os utilizadores que se encontrem próximos do centro da célula dispondo de uma maior capacidade.

No caso da secção com o padrão *Hard Frequency*, esta é atribuída aos utilizadores situados na fronteira da célula, deste modo apesar de haver uma redução na capacidade total da célula, existe uma melhoria do desempenho na fronteira da célula tendo em conta a redução da interferência nesse local.

Por último, o padrão de reutilização *Soft Frequency* consiste no uso de toda a largura de banda para transmissão mas com diferentes níveis de potência em cada célula. De acordo com este padrão, e seguindo uma estratégia semelhante ao método anterior, a região do espectro com maior potência, em princípio, vai servir os utilizadores da fronteira da célula e a região com menor potência, aqueles que estão no centro da célula. Este padrão reflete uma melhoria da *SINR* na fronteira da célula enquanto mantém níveis aceitáveis no centro da célula, mantendo também a largura de banda total para toda a célula.

No entanto, a utilização desta configuração pode resultar num acréscimo de sinalização *RRC* caso existam transições indesejadas entre essas regiões.

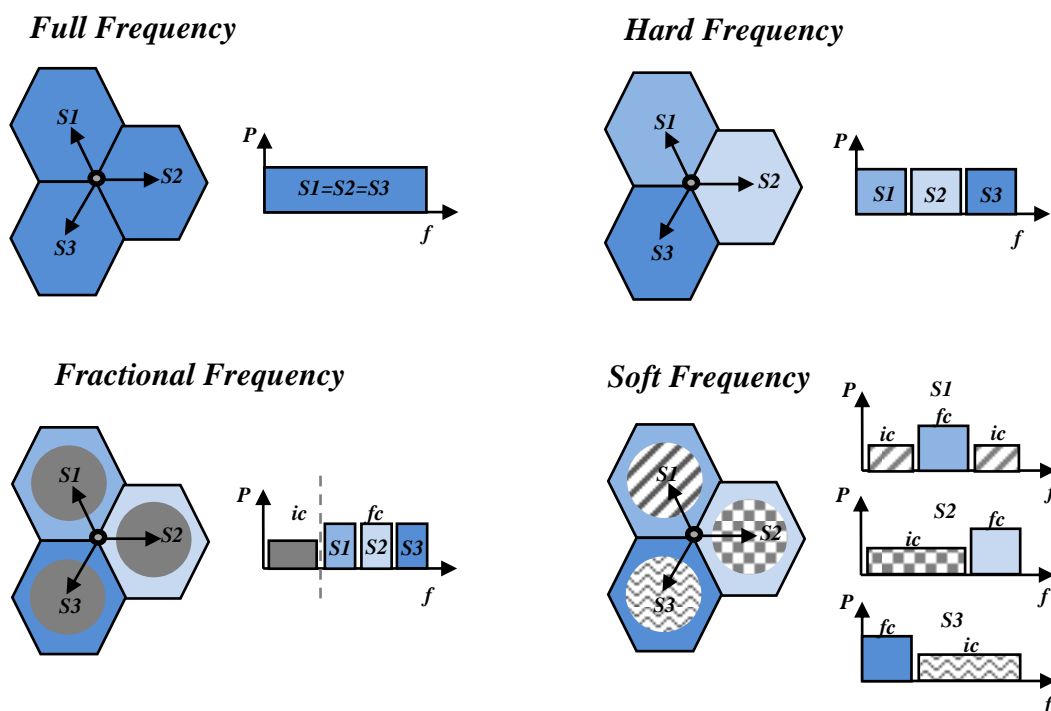


Figura 14 - Padrões de reutilização de frequências (ic – interior da célula, fc – fronteira da célula, P – potência, f - frequência).

3.3.2. Mapeamento dos PCI

Em LTE, o planeamento dos *PCI* é uma tarefa semelhante ao planeamento dos *scrambling codes* em *WCDMA*.

O *PCI* é utilizado pelo *UE* para efetuar medidas nas células vizinhas, assim sendo, os *PCI* mapeados têm que ser distintos de forma a serem inequivocamente diferenciadas a célula vizinha e a servidora, ou seja, o *UE* não pode medir duas células que apresentem o mesmo identificador. No entanto, tal situação não deve acontecer pois existem 504 *PCI* definidos, permitindo um afastamento entre identificadores iguais, se o planeamento for bem efetuado.

O *PCI* é também usado para mapear os recursos dos sinais de referência (*RS*) [15] de *downlink* e *uplink*.

O sinal de referência em *downlink* apesar de ser transmitido no mesmo símbolo *OFDM*, no domínio da frequência, é deslocado segundo o resto da divisão (mod) do *PCI* por três, como se observa na equação (3.2).

$$\text{deslocamento} = (\text{PCI}) \bmod 3 \quad (3.2)$$

Ao existir esse desvio, os sinais de referência das diferentes células do *eNB* não se sobrepõem na frequência o que resulta em menor interferência na estimação do canal. No entanto vai existir sobreposição com os *RE*'s de dados e de controlo das células adjacentes, o que leva à decisão de planear o *PCI* tendo em conta que a interferência seja provocada entre os sinais de referência (*Reference Signals, RS*) ou então entre os *RS* e *PDSCH/PDCCH*. O último caso é aconselhado, ou seja, o uso de deslocamento, pois evita que haja interferência entre os sinais de sincronização primários, o que provocaria problemas na procura de célula e nas medidas de canal.

O sinal de referência em *uplink* é criado a partir de sequências *Zadoff-Chu*, existindo 30 sequências diferentes para serem usadas como sinal de referência [4]. Cada célula deve ter mapeada uma sequência distinta, uma forma de o fazer é ser atribuída diretamente segundo (3.3). No entanto, esta atribuição pode ser insuficiente pois a cada 30 células a sequência é reutilizada, assim sendo existem outros esquemas de planeamento definidos pelo *3GPP* para redução da interferência em *uplink*.

$$\text{índice sequência} = (\text{PCI}) \bmod 30 \quad (3.3)$$

Em primeiro lugar a definição explícita da sequência a utilizar, em (3.4), através de um parâmetro de deslocamento Δ_{SS} , transmitido no *BCCH*, o que desagrega o planeamento de *PCI's* do planeamento de sequências para o sinal de referência.

$$\text{índice sequência} = (PCI + \Delta_{SS}) \bmod 30, \quad \text{com } \Delta_{SS} = 0, 1, \dots, 29 \quad (3.4)$$

Outro esquema de atribuição de sequências, é o uso de um inteiro u_n pseudo-aleatório, em (3.5), alterado a cada *TTI* por um dos padrões definidos.

$$\text{índice sequência} = (u_n + PCI + \Delta_{SS}) \bmod 30, \quad \text{com } \Delta_{SS}, u_n = 0, 1, \dots, 29 \quad (3.5)$$

3.3.3. *Link Budget em Uplink*

O *link budget* é uma das fases mais importantes de planeamento rádio em *LTE*, pois permite calcular a atenuação de propagação máxima permitida entre a antena da estação rádio e o terminal móvel, sendo essa atenuação também conhecida por *path loss*. Com a utilização de um modelo de propagação apropriado, é possível estimar o raio de célula, que possibilite cobertura pelo serviço em causa.

O cálculo de raio de célula vai então permitir estimar o número de estações base necessárias para dar cobertura a uma determinada área geográfica. Além disso o *link budget* permite equiparar a cobertura em relação ao *GSM* e ao *WCDMA*, fator que pode ser de interesse na análise do desempenho *LTE* nas situações em que esta tecnologia é co-localizada nas estações base implementadas.

O *link budget* é feito para o *downlink* e para *uplink*, no entanto, tendo em conta que a potência de transmissão do terminal móvel é mais baixa que a da estação base, a atenuação máxima possível é normalmente definida pelo *uplink* [8]. A metodologia segue os princípios propostos pela *Ericsson* [16].

- **Débito mínimo**

Em primeiro lugar é necessário estabelecer um requisito de qualidade, que se traduz normalmente num débito mínimo que pode ser fornecido a um utilizador na periferia da célula com uma determinada probabilidade.

O débito mínimo por RB é dado em (3.6), onde R_{req} é o débito fornecido a um utilizador e N_{RB} o número de RB 's reservados para garantir esse débito. No entanto na prática, os RB 's vão ser reservados pelo algoritmo de escalonamento dentro do TTI de 1 ms , mas para questões de dimensionamento é importante reter esta definição.

$$R_{reqRB} = \frac{R_{req}}{n_{RB}} \quad (3.6)$$

Se o débito mínimo for obtido com um número baixo de RB 's, a capacidade é maximizada uma vez que existem mais recursos disponíveis para serem atribuídos a outros utilizadores.

Com um número elevado de RB 's, pode ser usada uma modulação menor para alcançar o mesmo débito, assim sendo a descodificação da transmissão pode ser efetuada com uma $SINR$ baixa, o que pode levar a um aumento do raio de célula.

É portanto necessário ter em consideração no algoritmo de escalonamento uma solução de compromisso entre alcance e capacidade.

- **$SINR$ necessária**

Tendo em conta que existem diferentes formatos de transporte com modulações e esquemas de codificação, a cada formato vai corresponder um débito binário. É portanto necessária uma $SINR$ mínima que permita descodificar o formato de transporte usado.

A relação entre a $SINR$ (γ) e o débito binário (R_{RB}) é obtida através de diversas simulações e medidas efetuadas. A expressão semi-empírica dada pela equação (3.7) e a inversa por (3.8) é um exemplo de obtenção dessa relação [16].

$$\begin{cases} R_{RB} = \max \left[0, a_2 + (a_0 - a_3) e^{\ln(2) \left[\frac{\gamma - a_1}{a_2} \right]^2} \right]; \gamma < a_1 \\ R_{RB} = a_0 & ; \gamma \geq a_1 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\gamma = a_1 - a_2 \sqrt{\left(\frac{\ln \left(\frac{a_0 - a_3}{R_{RB} - a_3} \right)}{\ln 2} \right)}; 0 \leq R_{RB} \leq a_0 \text{ [dB]} \quad (3.8)$$

Das equações anteriores, a_0 representa o débito binário máximo que pode ser obtido por RB . No *downlink* os parâmetros a_0 e a_3 têm que ser ajustados de acordo com a configuração usada e são obtidos através de (3.9).

$$\begin{aligned} a_0 &= a_0max \cdot \left(1 - \frac{nPDCCH}{14} - \frac{n_{ant}}{28} - \frac{48 - n_{ant}}{140 \cdot n_{RB}}\right) \\ a_3 &= a_3max \cdot \left(1 - \frac{nPDCCH}{14} - \frac{n_{ant}}{28} - \frac{48 - n_{ant}}{140 \cdot n_{RB}}\right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Em (3.9), a_0max e a_3max , são os valores máximos (sem os canais de controlo) para os parâmetros a_0 e a_3 . O parâmetro $nPDCCH$ representa o número de símbolos reservados para o *PDCCH*; n_{ant} é o número de antenas existentes na configuração usada e n_{RB} é o total de RB 's tendo em conta a largura de banda utilizada.

Os valores para os parâmetros semi-empíricos em *uplink* estão definidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros semi-empíricos para *uplink* in [16].

Modelo de canal/ Frequência Doppler	EPA 5	EVA 70	ETU 300
$a_0[kbit/s]$	459,9	456,9	322,5
$a_1[dB]$	20,76	23,91	20,15
$a_2[dB]$	13,28	13,74	12,41
$a_3[kbit/s]$	0	0	0

- **Margem de interferência em *uplink* (*Uplink Noise Rise*)**

No *LTE* não existe interferência entre utilizadores que se encontram na mesma célula, pois estão separados no domínio do tempo e da frequência. Assim sendo, o aumento da interferência (*noise rise*) resulta exclusivamente da interferência proveniente das células adjacentes. Para tal é necessário definir no *link budget* uma margem, dada por (3.10), que compense o efeito dessa interferência inter-célula.

$$IM_{UL} = \frac{1}{1 - \gamma \cdot Q_{UL} \cdot F} \quad (3.10)$$

A equação (3.10) considera a margem de interferência em modo *TM3* e depende de: γ , que representa a *SINR* mínima do serviço para o qual está a ser dimensionada a cobertura; Q_{UL} , que representa a carga média do sistema no sentido ascendente da ligação; e por último, F que é um ganho resultante da variação dos *tilts* elétricos da antena (ver Tabela 7).

Tabela 7 - Exemplo do parâmetro F para estações trisectorizadas e antenas com 30 m in [16].

Raio de Célula [m]	Tilts [°]									
1000	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	
500	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	9,9	11,9	13,8	15,7	
Parâmetro F	1,1	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	

- **Atenuação máxima permitida**

A atenuação máxima permitida (L_{pmax}) é então obtida através da atenuação máxima calculada no *link budget* com a adição de margens.

A primeira margem considerada (ver Tabela 8) é a margem de *shadowing* ou de desvanecimento *log-normal* (L_{LNF}). Esta margem é definida tendo em conta a mobilidade da ligação, ou seja, tendo em conta a movimentação do *UE* e as próprias alterações na área de propagação do sinal, a potência recebida no *UE* sofre variações. Com a adição dessa margem leva a que a probabilidade de queda de ligação seja menor e que exista uma maior probabilidade de cobertura na fronteira da célula.

A outra margem (ver Tabela 9) entra em consideração com as perdas por penetração ($L_{PenetrationLoss}$), isto é, dependendo do tipo de cobertura que se queira fornecer (*outdoor*, *in-car* ou *outdoor*), essa margem contabiliza as perdas associadas à penetração do sinal num carro ou num edifício, dependente da morfologia da área em questão.

Tabela 8 - Desvanecimento *Log-Normal* in [16].

L_{LNF} [dB]	Cobertura [%]				
σ [dB]	75	85	90	95	98
6	-3,7	-1,2	0,5	3	5,5
8	-3,4	-0,2	1,8	4,9	8,1
10	-3,1	0,7	3,2	6,8	10,7
12	-3,1	1,3	4,2	8,4	13,1
14	-3,2	1,8	5,1	9,9	15,3

Tabela 9 - Perdas de penetração in [17].

Tipo	Perdas de penetração [dB]		
Frequência	2600 MHz	2100 MHz	900 MHz
Urbano Denso	20	19	18
Urbano	17	16	16
Suburbano	13	12	12
Rural	8	8	8

A atenuação máxima permitida é então o resultado da equação (3.11), sendo esta a atenuação máxima que uma célula de um determinado raio pode apresentar de modo a respeitar os critérios de qualidade e de serviço.

$$L_{pmax}[dB] = L_{LinkBudget}[dB] + L_{LNF}[dB] + L_{PenetrationLoss}[dB] \quad (3.11)$$

3.3.4. *Link Budget em Downlink*

O *link budget* em *downlink* permite calcular o débito oferecido na fronteira da célula para a ligação descendente e desse modo efetuar uma comparação com o débito exigido. Além disso, é através deste cálculo que é possível determinar qual o sentido limitante da ligação, caso esse débito não corresponda às condições de planeamento exigidas.

Em primeiro lugar é necessário ter em consideração a atenuação de propagação máxima permitida, calculada em *uplink*, servindo como parâmetro inicial de entrada no cálculo do *link budget* em *downlink*. Este é bastante semelhante ao anterior, no entanto, existem algumas diferenças que são enunciadas seguidamente.

- **Margem de interferência em *downlink* (*Downlink Noise Rise*)**

Tal como no cálculo do *link budget* em *uplink*, é necessário estabelecer uma margem de interferência para a periferia da célula no sentido descendente da ligação. Esta margem vai depender da potência de transmissão por cada *RB* (P_{txRB}) e de um factor da carga presente nas restantes células (Q_{DL}). O factor F_C , é a razão entre a potência recebida das outras células em relação à da célula servidora na periferia da célula e é tido como um fator indicativo da qualidade do planeamento celular. Apresentando-se os valores na

Tabela 10, para uma antena com uma altura efectiva de 30 metros.

A margem de interferência vai também depender do ruído térmico no recetor ($N_{RB DL}$) e da atenuação na periferia da célula (L_{range}). Esta última é obtida através da equação (3.12), resultando da atenuação máxima dada em *uplink* mais a margem de *body loss* ($L_{BodyLoss}$) e das perdas de penetração subtraídas ao ganho da antena da transmissão (G_{ant}).

$$L_{range}[dB] = L_{pmax}[dB] + L_{BodyLoss}[dB] + L_{PenetrationLoss}[dB] - G_{ant}[dBi] \quad (3.12)$$

Tendo em conta os fatores referidos anteriormente, a expressão linear da margem de interferência é dada por (3.13). Note-se que os parâmetros da equação se encontram em unidades lineares.

$$IM_{DL} = 1 + \frac{P_{tx}RB \cdot Q_{DL} \cdot F_C}{N_{RB}DL \cdot L_{range}} \quad (3.13)$$

Tabela 10 - Exemplo do parâmetro F_C para estações trisectorizadas e antenas com 30 m in [16].

Raio de Célula (m)	Tilts (°)									
1000	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	
500	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	9,9	11,9	13,8	15,7	
Parâmetro F_C	2,8	2,7	2,5	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5	1,4	

- **Débito oferecido na periferia da célula**

O débito oferecido na periferia da célula pode ser estimado através do cálculo da *SINR* em *downlink* pela expressão (3.14). A expressão é obtida pela subtração da potência isotrópica efetivamente radiada (*Equivalent Isotropic Radiated Power, EIRP*) pelas margens definidas e convertido num ritmo binário por *RB* através de (3.7), a mesma usada para *uplink*, mas usando os parâmetros semi-empíricos da Tabela 11.

$$\gamma [dB] = P_{Tx}RB_{[dBm]} - L_{pmax}[dB] - N_{RB}DL_{[dBm]} - IM_{DL}[dB] - L_{LNF}[dB] - L_{BodyLoss}[dB] - L_{PenetrationLoss}[dB] + G_{ant}[dBi] \quad (3.14)$$

Tabela 11 - Parâmetros semi-empíricos para *downlink* in [16].

Configuração das Antenas	SIMO 1x2			MIMO 2x2 (Diversidade)			MIMO 2x2 (<i>Open loop</i>)		
	EPA 5	EVA70	ETU 300	EPA 5	EVA 70	ETU 300	EPA 5	EVA 70	ETU 300
Modelo de canal/ Frequência Doppler									
$a_0max[kbit/s]$	912,1	912,4	799,9	914,2	913,8	887,7	1583,8	1409,5	1162,8
$a_1[dB]$	27,00	29,34	27,75	25,92	27,17	27,70	34,03	34,99	31,93
$a_2[dB]$	16,03	15,90	15,34	16,01	15,38	15,49	18,37	18,16	16,84
$a_3max[kbit/s]$	-10,5	-4,4	-5,3	-16,2	-6,4	-7,3	-18,6	-10,2	-8,4

O débito oferecido por *RB*, ao ser multiplicado pelo número de *RB*'s disponíveis define o máximo ritmo binário oferecido na periferia da célula.

Deste último valor é possível observar qual o sentido limitante da ligação, isto é, se o máximo ritmo binário obtido for maior que o ritmo binário necessário na periferia da célula, o sentido limitante é o ascendente.

Caso contrário, o *link budget* é limitado pelo *downlink* e é necessário recalcular um novo raio de célula, começando pelo débito exigido na periferia da célula e seguindo uma metodologia análoga ao *link budget* em *uplink* mas com as diferenças referidas.

Com a atenuação máxima permitida é possível calcular o raio de célula usando um modelo de propagação apropriado.

3.3.5. Modelo de propagação Okumura-Hata e COST231-Hata

O modelo de propagação *Okumura-Hata* foi criado através de medidas de nível de sinal feitas na cidade de Tóquio, Japão por *Okumura* e pelos seus colegas. Estas medidas foram realizadas através de variações de altura das antenas, frequências e do tipo de terreno [18].

Mais tarde, *Hata* desenvolveu um modelo matemático simplificado, representativo das curvas obtidas por *Okumura* [19]. Esse modelo representa a atenuação máxima tendo em conta a frequência de trabalho usada, a altura das antenas, o tipo de terreno e a distância entre o móvel e a estação base, como é visível na Figura 15.

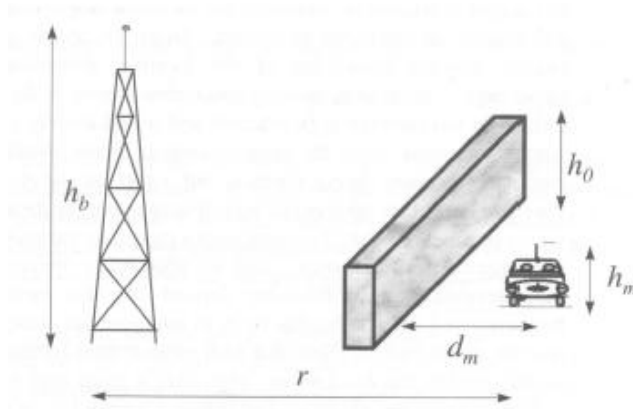


Figura 15 - Parâmetros considerados pelo modelo *Okumura-Hata* in [20].

A fórmula geral é dada por (3.15) a (3.17), onde f corresponde à frequência usada, em *MHz*, d à distância em *km*, h_M à altura do móvel e h_B à altura efectiva da estação base, ambas em metros.

$$PL [dB] = A + B \log(d_{[km]}) + C \quad (3.15)$$

Em que A e B são dados por (3.16) e (3.17), respetivamente.

$$A = 69,55 + 26,16 \log(f_{[MHz]}) - 13,82 \log(h_{B[m]}) - a(h_{M[m]}) \quad (3.16)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log(h_{B[m]}) \quad (3.17)$$

Por último a variável C e o parâmetro $a(h_M)$ dependem do tipo de terreno considerado, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 - Tipos de ambiente segundo o modelo Okumura-Hata.

	$a(h_M)$	C
Áreas Metropolitanas	$\begin{cases} 8,29(\log(1,54h_M))^2 - 1,1 \text{ para } f \leq 200 \text{ MHz} \\ 3,2(\log(11,75h_M))^2 - 4,97 \text{ para } f \geq 400 \text{ MHz} \end{cases}$	0
Cidades pequenas e médias	$0,8 + (1,1 \log(f) - 0,7)h_M - 1,56 \log(f)$	0
Áreas Suburbanas	$0,8 + (1,1 \log(f) - 0,7)h_M - 1,56 \log(f)$	$-2 \left[\log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 5,4$
Áreas Rurais	$0,8 + (1,1 \log(f) - 0,7)h_M - 1,56 \log(f)$	$-4,78[\log(f)]^2 + 18,33 \log(f) - 40,98$

No entanto, a validade do modelo só se verifica para frequências compreendidas entre 150 e 1500 MHz e para distâncias de 1 a 20 km. Além disso, a altura efetiva das antenas da estação rádio compreende uma gama de 30 a 200 m e a do terminal móvel de 1 a 10 m em relação ao solo.

O modelo *COST231-Hata* [21] propõe alterações ao *Okumura-Hata* para dar validade à gama de frequências de 1500 a 2000 MHz em cidades pequenas e médias. Na equação (3.18) estão presentes as alterações efetuadas.

$$PL[dB] = 46,3 + 33,9 \log(f_{[MHz]}) - 13,82 \log(h_{B[m]}) + B \log(d_{[km]}) - a(H_M) + D \quad (3.18)$$

Com D a ser 0 dB para cidades médias e áreas suburbanas ou 3 dB para áreas metropolitanas.

Tendo em conta que a frequência usada para o LTE é de 2,6 GHz e as distâncias consideradas de ligação tendem a ser menores que 1 km, não existem garantias da validade dos modelos nestas condições.

3.3.6. Modelo de propagação LTE-PL e Okumura-Hata Alterado

O modelo de propagação *LTE-PL* foi calculado tendo em conta as medidas feitas na área 1, para uma antena a 27 metros de altitude em relação à cota e a uma distância de referência (d_0) de 30 metros. Os valores obtidos estão expostos na Tabela 13.

O modelo de propagação é pensado para valores de raio de célula entre os 30 e os 1000 *metros*, tendo em conta que o cálculo do coeficiente de decaimento n foi calculado para esse intervalo.

Tabela 13 - Valores de potência medidos e estimados com uma antena de 27 m.

Distância ao <i>eNB</i> [m]	500	750	1000
Potência medida [dBm]	-92,38	-94,51	-96,98
Potência estimada [dBm]	-84,36-12,5 <i>n</i>	-84,36-13,9 <i>n</i>	-84,36-15,2 <i>n</i>

Deste modo o cálculo de n é feito tentando minimizar o erro quadrático médio (3.19) a (3.21), onde é obtido um valor para o coeficiente de decaimento de 7,46 dB por década.

$$MSE(n) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (p_i - \hat{p}_i)^2 \quad (3.19)$$

$$MSE(n) = \frac{1}{4} \left[[-84,36 + 84,36]^2 + [-92,38 - (-84,36 - 12,5n)]^2 + [-94,51 - (-84,36 - 13,9n)]^2 + [-96,98 - (-84,36 - 15,2n)]^2 \right] \quad (3.20)$$

$$= 81,66 - 216,58n + 145,08n^2$$

$$\frac{dMSE(n)}{dn} = -216,58 + 290,44n \rightarrow \frac{dMSE(n)}{dn} = 0 \rightarrow n = 7,46 \text{ dB/década} \quad (3.21)$$

A equação (3.22) representa a atenuação para *LTE* na área em estudo, para distâncias contidas no intervalo de 30 a 1000 *metros*, com uma antena situada a 27 *metros* acima do nível do solo e um ganho de 18,5 *dBi*.

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \rightarrow PL(d)[dB] = 96,36 + 7,46 \log\left(\frac{d[m]}{30}\right) \quad (3.22)$$

Na Figura 16, Figura 17 e Figura 18, tendo em conta alturas das antenas do *eNB* de 18, 27 e 38 *metros*, respetivamente, apresenta-se uma comparação entre os modelos *Okumura-Hata*, *COST231-Hata* e o modelo proposto *LTE-PL*, com a regressão linear obtida através das medidas realizadas.

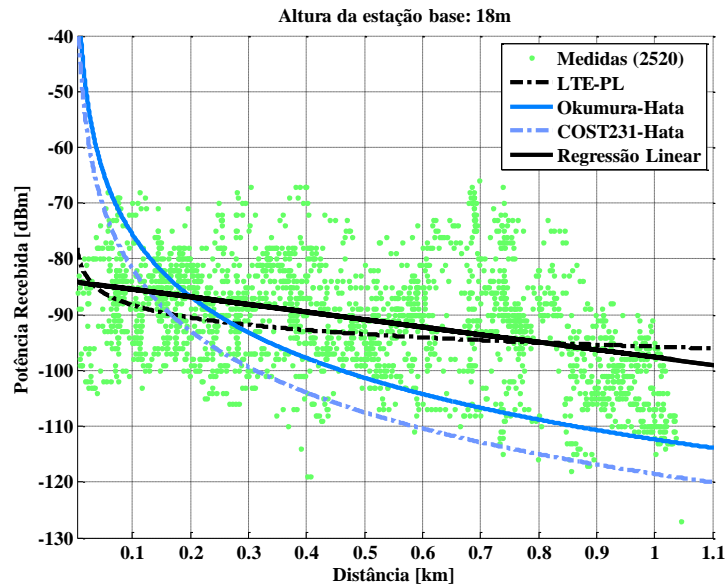


Figura 16 - Potência recebida do sinal RSRP em função da distância para uma altura de antena de 18 m.

Esta comparação tem por objetivo mostrar a disparidade dos dois modelos existentes para as distâncias consideradas e da aplicabilidade do modelo proposto, tendo em conta as medidas. Note-se que para uma altura de 18 metros o modelo *LTE-PL* apresenta uma disparidade mais elevada, cerca de 5 dB, podendo dever-se ao facto dos pontos obtidos serem em menor número o que pode levar a um erro maior na regressão linear. No entanto é mais aproximado que os modelos *Okumura-Hata* e *COST231-Hata* como se pode observar.

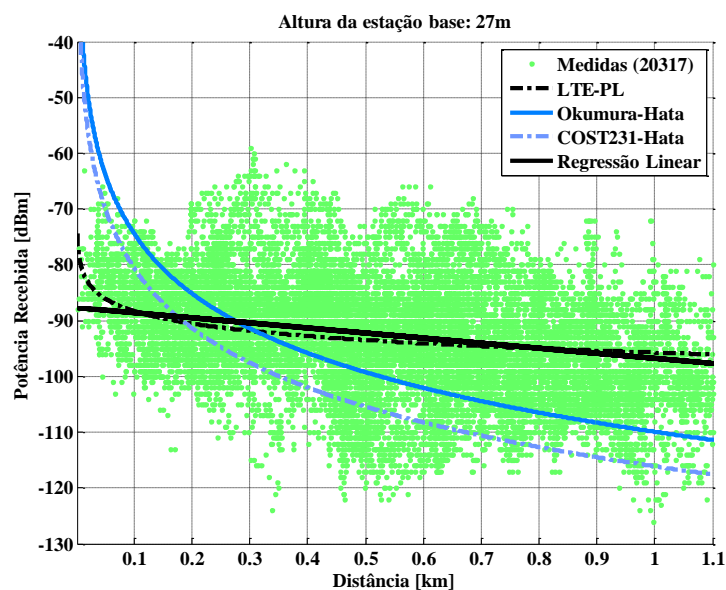


Figura 17 - Potência recebida do sinal RSRP em função da distância para uma altura de antena de 27 m.

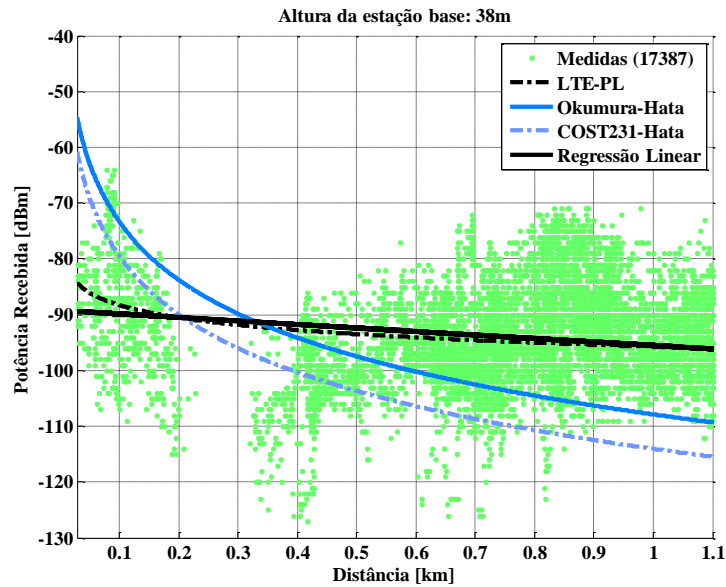


Figura 18 - Potência recebida do sinal RSRP em função da distância para uma altura de antena de 38 m.

Como se observa nas figuras anteriores, o modelo de propagação proposto pode também ser usado para as alturas das antenas referidas.

Para valores de raio de célula superiores a 1000 *metros* é apresentada uma alteração ao modelo de propagação *Okumura-Hata*, onde é substituída a variável independente na equação (3.16), ou seja, o valor de 69,55 passou a ser de 55 como se demonstra na equação (3.23) tendo em conta a regressão linear obtida pelas medidas feitas.

$$A = 55 + 26,16 \log(f_{[MHz]}) - 13,82 \log(h_{B[m]}) - a(h_{M[m]}) \quad (3.23)$$

O resultado da alteração proposta pode ser observado na Figura 19, tal como a disparidade do modelo *LTE-PL* para distâncias superiores a 1000 *metros*.

Tendo em conta os modelos propostos é possível estimar um raio de célula mais fidedigno do que aquele calculado pelos modelos de propagação *Okumura-Hata* ou do *COST231-Hata*, dependendo das distâncias envolvidas.

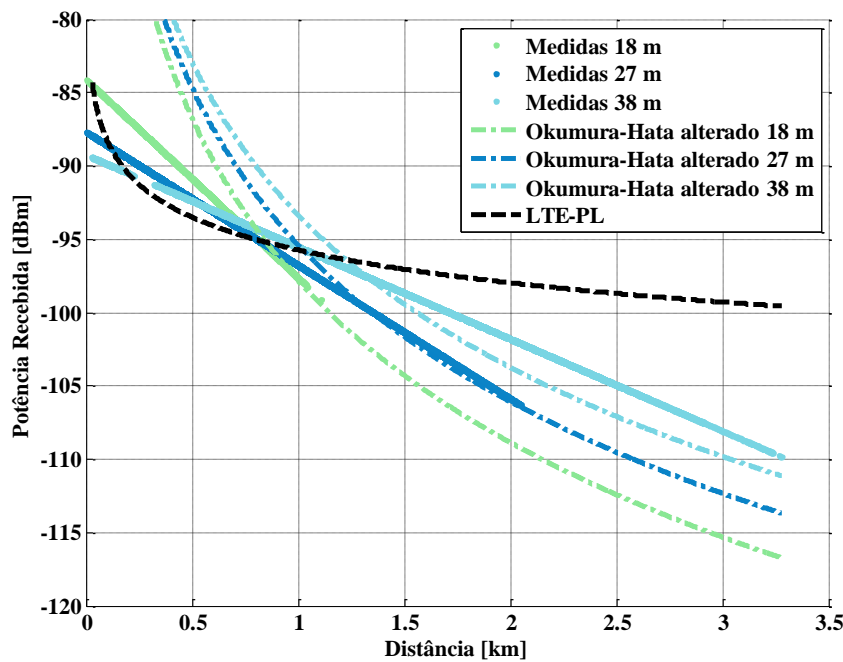


Figura 19 - Comparação das medidas efetuadas com o modelo de *Okumura-Hata* alterado e com o modelo *LTE-PL*

3.4. Planeamento de Capacidade

O planeamento de capacidade permite obter informação acerca do dimensionamento dos *eNB's* e da transmissão, ou seja, o dimensionamento de *hardware* é condicionado por este planeamento.

Os fatores de carga da célula, necessários para definir as margens de interferência são estimados por este planeamento, revelando a existência de uma interligação entre os dois planeamentos considerados, à semelhança do *WCDMA*.

3.4.1. Capacidade em Uplink

Os dois pontos-chave neste planeamento são o cálculo da relação sinal ruído mais interferência (*SINR*) e o máximo débito de uma célula. Para a obtenção da *SINR* é usada a mesma abordagem que no do planeamento de cobertura, ou seja, a *SINR* é estimada para a periferia da célula e o débito por cada *RB* é obtido através da transformação de (3.7).

O débito médio por utilizador (R_{avgUL}) é obtido por (3.24) e depende em primeiro lugar do débito obtido por *RB* (R_{RBUL}) multiplicado pelo número total de *RB's* disponíveis para transmissão (n_{RB}). Este último valor não é igual ao número de *RB's* total, pois é

necessário retirar o número de *RB*'s reservados para o *PUCCH* (n_{PUCCH}) e ao *PRACH* (n_{PRACH}).

$$R_{avgUL} = R_{RBUL}(n_{RB} - n_{PUCCH} - n_{PRACH}) \quad (3.24)$$

O débito máximo da célula, em (3.25), é um valor que depende da carga da célula em *uplink*. É possível observar que o débito médio por utilizador não é afetado pela carga da célula, no entanto, existe uma variação do *throughput* e do raio de célula consoante a carga.

$$T_{CellUL} = Q_{UL} \cdot R_{avgUL} \quad (3.25)$$

3.4.2. Capacidade em Downlink

A capacidade calculada para o *downlink* baseia-se no conceito de uma *SINR* média da célula, isto é, a *SINR* é obtida neste caso não para a periferia da célula, mas sim para uma localização que se encontre a meia distância do *eNB* e do raio de célula.

Em primeiro lugar é necessário definir a margem de interferência usando a equação (3.13), mas para a localização pretendida. A *SINR* média resultante, depende dessa margem considerada, como se observa pela equação (3.26). O factor H da expressão depende de diversos fatores, entre eles a altura da antena do *eNB*, do seu diagrama de radiação e da propagação do sinal na área. É recomendado o uso de um valor de 0,36 para o dimensionamento [16].

$$\gamma_{avg} = 1 + \frac{P_{TXRB}}{B_{DL}NoiseRise \cdot N_{RB}DL \cdot H \cdot L_{range}} \quad (3.26)$$

Usando mais uma vez a equação (3.7) que obtém um débito binário por *RB* ($R_{RB}DL$) através de um valor de *SINR*, é possível determinar o débito médio oferecido a cada utilizador por célula ($R_{avg}DL$) pela equação (3.27).

O *throughput* da célula em *downlink* (T_{CellDL}) é obtido pela equação (3.28). Note-se que este último, é um valor diretamente proporcional ao fator de carga da célula (Q_{DL}).

$$R_{avg}DL = n_{RB} \cdot R_{RB}DL \quad (3.27)$$

$$T_{CellDL} = Q_{DL} \cdot R_{avg}DL \quad (3.28)$$

3.4.3. Dimensionamento de Capacidade

Sabendo a capacidade de uma célula, é possível estimar o número de utilizadores por *eNB*, dependentes do plano de negócio desejado, por dois métodos [8]: volume de tráfego mensal ou débito binário oferecido.

- **Volume de tráfego mensal**

Em (3.29), é estimado o tráfego total, denominado T_{Total} , em *GigaByte (GB)* de um *eNB* na duração de um mês. Essa estimativa é feita tendo em conta a razão entre a carga média na *busy hour* ($B_{hourLoad}$) e a percentagem do tráfego diário nessa mesma hora ($B_{hourDaily}$). O valor final é obtido após multiplicação pelo número de dias do mês (M_{Days}), pelo número de sectores da célula ($N_{sectors}$) e pela capacidade da célula (C) convertida para *GB* por hora.

$$T_{Total}[GB/site/month] = \left(C_{[Mbit/s]} \cdot \frac{3600}{8192} \right) \cdot \frac{B_{hourLoad}[\%]}{B_{hourDaily}[\%]} \cdot M_{Days} \cdot N_{sectors} \quad (3.29)$$

Por fim, entre a razão do tráfego total de um *eNB* e a cota de tráfego que se pretende oferecer mensalmente a um utilizador (T_{User}) é possível definir o número de utilizadores por *eNB* ($N_{Users/site}$), como se observa em (3.30).

$$N_{Users/site} = \frac{T_{Total} [GB/site/month]}{T_{User} [GB]} \quad (3.30)$$

- **Débito binário**

Através deste método o número de utilizadores por *eNB* é estimado através de (3.31), onde a capacidade de uma célula vezes a carga média na *busy hour* são divididas pelo ritmo binário médio de um utilizador na *busy hour*, R_{avg} , obtido em (3.32). Esse valor depende do ritmo binário que se pretende oferecer por utilizador (R_{User}) e de um fator de *overbooking* (O_{Factor}).

O factor de *overbooking*, representa o número de utilizadores médio que partilham um canal mas que não estão a descarregar informação simultaneamente [8] [22]. É um factor que deverá ser corretamente dimensionado de forma a melhorar a eficiência da rede.

$$N_{Users/site} = \frac{C_{[Mbit/s]} \cdot B_{hourLoad[\%]}}{R_{avg[Mbit/s]}} \cdot N_{Sectors} \quad (3.31)$$

$$R_{avg[Mbit/s]} = \frac{R_{User[Mbit/s]}}{O_{Factor}} \quad (3.32)$$

3.5. Planeamento para as áreas em estudo

O planeamento foi realizado de acordo com as características das áreas onde foram efetuadas medidas, ou seja, no planeamento calculado assumiram-se, dentro dos possíveis, os mesmos parâmetros utilizados nas duas áreas.

Em primeiro lugar é observável na Tabela 5, a escolha de um espaçamento entre *PCI's* de 4, tal facto leva a que seja reduzida a interferência entre sinais de referência, pois como foi observado na equação (3.2), os sinais de referência das diferentes células do mesmo *eNB* não são transmitidos nos mesmos *RE's*.

Além disso, esta opção permite densificar a rede de acordo com uma hierarquia de *PCI's* intuitiva, ou seja, os *PCI's* que se encontram entre o espaçamento podem ser atribuídos a células contidas dentro da célula considerada. São exemplos os projetos de cobertura *indoor* ou os *home eNB's*.

3.5.1. Comparações entre simulações e medidas

As simulações foram obtidas assumindo os parâmetros presentes na Tabela 14 e tendo as medições sido feitas nas condições da Tabela 5.

Do valor das medidas foi efetuada uma regressão linear pela técnica dos mínimos quadrados. Esta técnica permite aproximar as medidas empíricas a uma reta que representa o valor esperado da potência recebida com o erro minimizado. Essa regressão linear foi calculada pelo programa *MATLAB*.

Tabela 14 - Pressupostos usados para as simulações.

Parâmetros	Valores
Frequência	2,6 GHz
Altura do móvel	1 m
Altura das antenas	Aproximadas (± 3 metros) às definidas
Distância	$\arccos[\sin(\text{lat1}) \cdot \sin(\text{lat2}) + \cos(\text{lat1}) \cdot \cos(\text{lat2}) \cdot \cos(\text{long2} - \text{long1})] \cdot R$
Raio médio da Terra	6371 km
Potência de transmissão	43 dBm – 12 dBm para os sinais de referência
Tipo de área	Metropolitana – Urbano Denso
Regressão Linear	Aproximação pelos mínimos quadrados a um polinómio de primeira ordem

O valor da potência recebida do sinal *RSRP* foi obtido através das medidas obtidas no terreno pelo *UE*.

A Tabela 15 pretende sumarizar as estatísticas das medidas realizadas, é possível então obter as margens a implementar, tendo em conta a altura das antenas. Isto é, para o desvio padrão a ser considerado numa área com morfologia Urbano Denso em *LTE* pode ser considerado um valor entre 10 a 12 dB. Portanto, através da Tabela 15 e da percentagem de cobertura na área, é possível definir a margem de desvanecimento *log-normal* a ser implementada no *link budget*.

Tabela 15 - Estatísticas das medidas efectuadas por altura de antena.

Altura das antenas dos eNB [m]	Média [dBm]	Desvio Padrão [dB]	Módulo da diferença a 1 km entre simulação do modelo <i>Okumura-Hata</i> e medidas [dB]	Número de amostras
18	-90,49	9,684	15	2520
21	-88	12,8	7,6	4996
27	-93	10,46	13,3	20317
30	-89	10,76	12	3327
35	-98	10,39	8,1	3814
38	-98	10,14	12,6	17387

3.5.2. Dimensionamento celular

Uma vez que as medidas foram realizadas num percurso veicular e de modo a aproximar o planeamento com as medidas efetuadas, os parâmetros seguintes foram escolhidos sabendo as características usadas e obtidas nas medições.

A atenuação máxima permitida foi calculada para um utilizador veicular (*EVA 70*) no modo *TM3 (MIMO 2x2 Open loop)*, sendo este o modo de transmissão preferencial durante a obtenção de medidas.

É assumida uma largura de banda de *20 MHz*, que corresponde a um total de *100 RB's* considerados, sendo a mesma disponível para ambas as áreas em estudo.

Os fatores *F* e *F_c* considerados têm o valor de *0,8* e *2,5*, para antenas com um *tilt* elétrico de *4°*, tendo em conta o valor médio dos *tilts* das antenas presentes na recolha de medidas.

Sabendo a localização dos *eNB's* (Figura 20), é possível extrair o raio de célula sabendo a distância entre *sites*. A distância entre *sites (Inter Site Distance, ISD)* é calculada assumindo um grelha hexagonal composta por *sites* trisectorizados de onde resulta (3.33). Em que o raio é obtido em (3.34).

$$ISD = Raio + \frac{Raio}{2} \quad (3.33)$$

$$Raio = \frac{ISD}{1,5} \quad (3.34)$$

De acordo com as localizações dos *eNB's* da área 1 é feita uma média das distâncias entre eles com um valor de aproximadamente *540 metros*, resultando num raio de célula de *360 metros*.

A partir do raio de célula definido foram obtidos os valores de débito binário e de *SINR* da célula para o *uplink* e *downlink*.

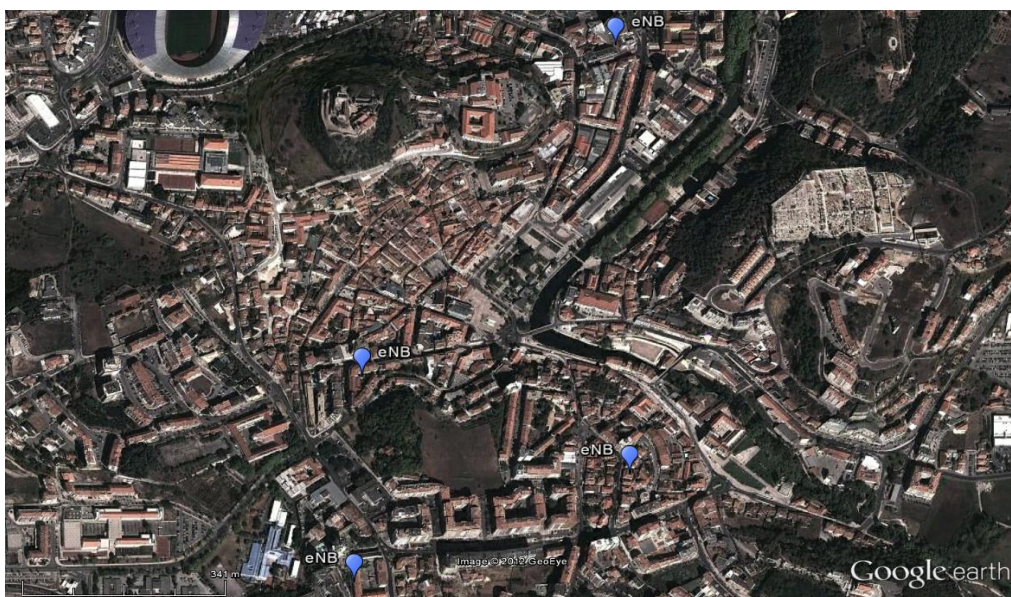


Figura 20 - Localização dos *eNB's* trisectorizados na área 1.

Em *uplink*, o débito binário médio por utilizador é de aproximadamente 31 *Mbit/s* retirado da Figura 21. Relativamente à *SINR*, apresentada na Figura 22, o valor da mesma na fronteira da célula é de aproximadamente 12,5 *dB*.

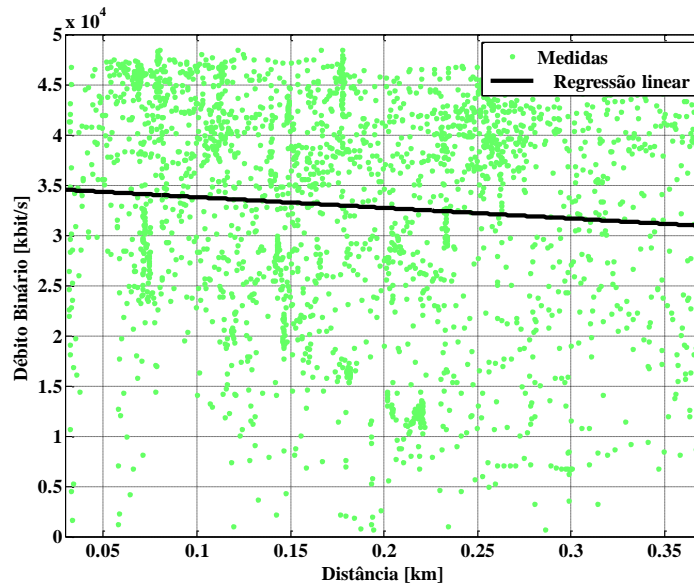


Figura 21 - Valores do débito binário obtidos em *uplink* até uma distância de 360 metros.

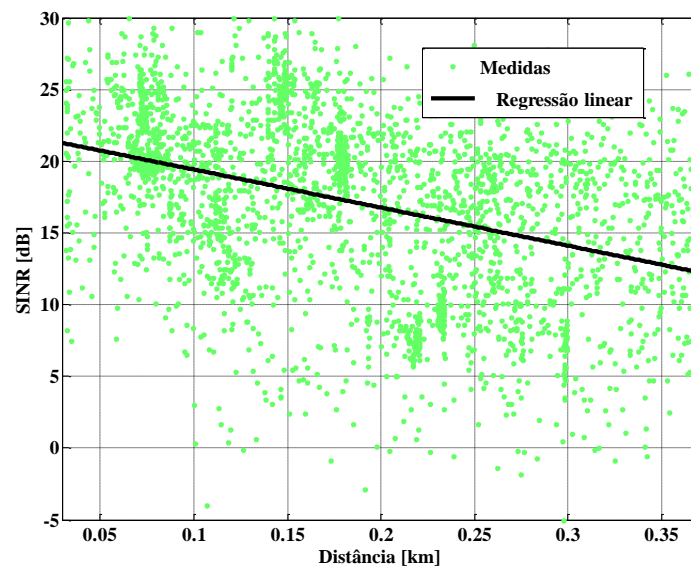


Figura 22 - Valores de *SINR* obtidos em *uplink* até uma distância de 360 metros.

Relativamente ao *downlink*, o débito binário médio por utilizador na célula é de aproximadamente 65 *Mbit/s* como se observa na Figura 23. Quanto ao valor de *SINR*, Figura 24, esse situa-se a aproximadamente 18 *dB*.

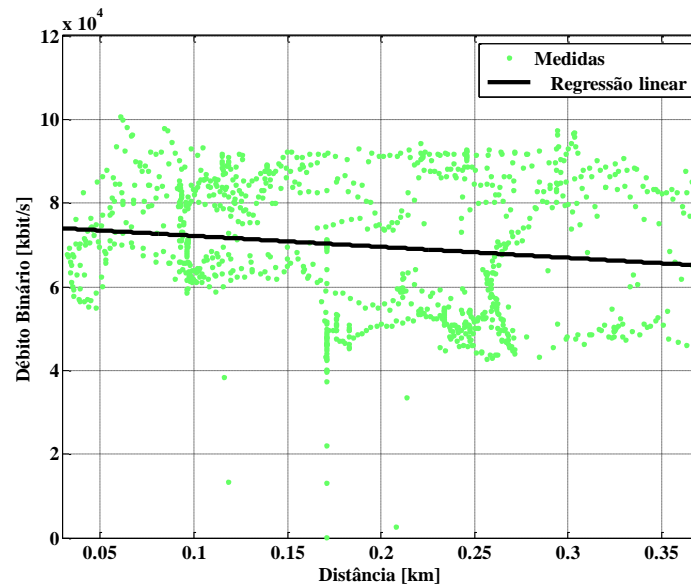


Figura 23 - Valores do débito binário obtidos em *downlink* até uma distância de 360 metros.

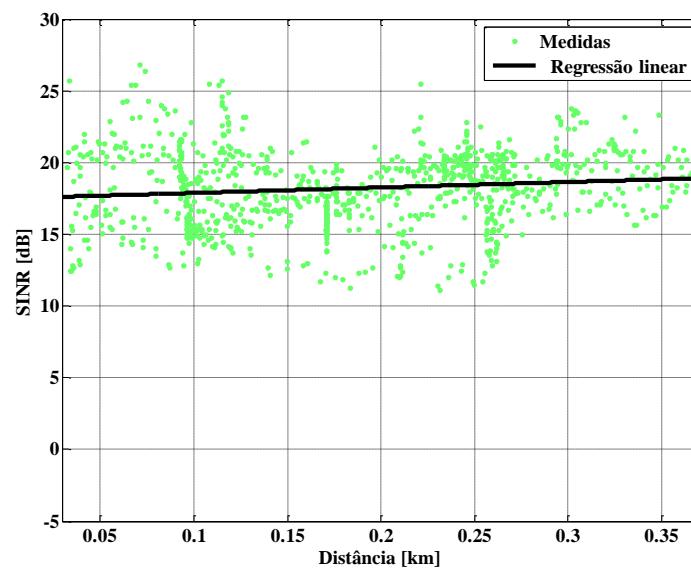


Figura 24 - Valores de SINR obtidos em *downlink* até uma distância de 360 metros.

De acordo com os resultados obtidos anteriormente, foram feitas iterações para que o valor do débito médio por utilizador e da *SINR* na célula, correspondessem àqueles obtidos na área em estudo e para o qual o raio da célula, estimado pelo modelo de propagação *LTE-PL*, correspondesse a aproximadamente o mesmo raio de célula da área calculado em (3.14).

Desse modo, os valores utilizados no planeamento de capacidade são visíveis na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros do planeamento de capacidade.

Parâmetros de Capacidade	<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i> (limite)	<i>Downlink</i> (médio)
<i>RB's</i> para <i>PRACH</i>	0,6	-	-
<i>RB's</i> para <i>PUCCH</i>	4	-	-
<i>RB's</i> disponíveis	100	100	-
<i>Throughput</i> da célula [<i>kbit/s</i>]	1152	-	3349,5
<i>RB's</i> usados	3	100	-
Débito na fronteira da célula [<i>kbit/s</i>]	1000	11812	-
<i>SINR</i> [dB]	14,64	2,22	18,38
Débito médio por utilizador por célula [<i>kbit/s</i>]	31800	-	66991
Factor de carga [%]	3,62	5	-
Margem de interferência [dB]	8,07	25,27	20,35

Os fatores de carga considerados são de 3,62 % em *uplink* e de 5% em *downlink*. Num dimensionamento celular estes valores não podem ser tão baixos pois isso traduzir-se-ia numa perda de eficiência da rede, no entanto os testes foram executados com uma carga bastante reduzida na rede, com apenas um utilizador, que levou aos valores obtidos.

A cobertura foi calculada assumindo uma probabilidade de 95% e um desvio padrão de 10 *dB*, de acordo com as medidas realizadas.

Tendo em conta os pressupostos anteriores, a atenuação máxima de propagação permitida foi calculada como se observa na Tabela 17.

Resta ainda referir que na tabela é feita uma comparação com o *High Speed Packet Access (HSPA)*, que permite visualizar as diferenças entre os dois sistemas [7] [23]. Essa comparação é feita pois o *LTE*, tal como foi referido, foi implementado segundo uma estratégia de co-localização de estações rádio com o *3G*. Essa comparação permite observar a diferença na atenuação máxima permitida e posteriormente no raio de célula máximo.

Tabela 17 - *Link Budget* para *Uplink*.

Variável	Nome	Notas de <i>LTE</i>	<i>LTE</i>	<i>HSPA</i>
Transmissor no Terminal Móvel				
<i>a</i>	Potência de Transmissão [<i>dBm</i>]	Potência na saída do amplificador, depende dos <i>RB's</i> usados	18,23	23
<i>b</i>	Ganho da antena de transmissão [<i>dBi</i>]	Depende do tipo de <i>UE</i> utilizado.	0	0
<i>c</i>	<i>Body loss</i> [dB]	Depende da posição em que o <i>UE</i> se encontra relativamente ao utilizador.	0	0
<i>d</i>	Potência Isotrópica Efetivamente Radiada (<i>EIRP</i>) [<i>dBm</i>]	$a + b - c$	18,3	23

Recetor no <i>eNB</i>				
<i>e</i>	Figura de ruído [dB]	Depende da implementação do fabricante de equipamento.	2	2
<i>f</i>	Ruído Térmico [dB]	$-174 + 10\log(180 \text{ kHz})$	-121,45	-108,2
<i>g</i>	Ruído no recetor [dBm]	$e + f$	-119,45	-106,2
<i>h</i>	SINR [dB]	Relação sinal interferência mais ruído desejada, depende da modulação e codificação, que por sua vez dependem do débito e do número de blocos reservados.	14,64	2,5
<i>i</i>	Sensibilidade do recetor [dB]	$g+h$	-104,8	-103,7
<i>j</i>	Margem de interferência [dB]	Deve-se ao aumento da interferência provocada por outros utilizadores de outras células, depende fortemente do planeamento de capacidade.	8,07	-0,16
<i>k</i>	Perdas no cabo [dB]	Contabiliza as perdas de transmissão entre a antena e o LNA.	2	2
<i>l</i>	Ganho na antena de receção [dBi]	Depende do tipo de antena e frequência utilizada.	18,5	18,5
<i>m</i>	Margem de desvanecimento rápido [dB]	Usada em WCDMA para controlo de potência, não é tida em conta no LTE.	0	1,8
<i>n</i>	Ganho de <i>soft handover</i> [dB]	Não é usado em LTE.	0	2
<i>o</i>	Atenuação máxima [dB]	$d - i - j - k + l - m + n$	131,46	143,6
<i>p</i>	Margem de desvanecimento <i>log-normal</i> [dB]	Depende do desvio padrão e da percentagem de cobertura da área.	6,8	6,8
<i>q</i>	Perdas de penetração [dB]	Contabiliza as perdas por penetração dependente do tipo de cobertura pretendida.	20	20
<i>r</i>	Atenuação máxima permitida [dB]	$o - p - q$	104,66	116,76

Sabendo a atenuação máxima permitida, dada pelo *link budget* em *uplink* é possível determinar a partir deste ponto o raio de célula máximo usando um modelo de propagação adequado. Na Tabela 18 apresentam-se os raios de célula obtidos para LTE e para HSPA, para um serviço de 1 Mbit/s na periferia da célula, usando os modelos LTE-PL e Okumura-Hata.

Como se observa, usando o modelo Okumura-Hata, o raio de célula em LTE é menor que em HSPA. No entanto, como se chegou à conclusão que este modelo de propagação não é aconselhável em LTE, o modelo LTE-PL determina um raio de célula maior em relação ao HSPA.

Caso o modelo Okumura-Hata se considere válido na determinação do raio de célula para o HSPA, pode-se considerar que o LTE apresenta um raio de célula maior que em HSPA para o mesmo serviço.

Tabela 18 - Raio de célula e distância entre sites.

	<i>LTE (LTE-PL)</i>	<i>LTE (Okumura-Hata)</i>	<i>HSPA (Okumura-Hata)</i>
Altura da antena do <i>eNB</i> [m]	30	30	30
Altura da antena do <i>UE</i> [m]	1	1	1
Frequência [MHz]	2600	2600	2100
Tipo de área	Metropolitana	Metropolitana	Metropolitana
Raio de célula [km]	0,384	0,101	0,260
Distância entre sites [km]	0,576	0,1515	0,390

No entanto, para o débito oferecido na fronteira da célula é também feito o cálculo da atenuação máxima permitida para *downlink* na Tabela 19.

Tabela 19 - *Link Budget* para *Downlink*.

Variável	Descrição	Nota	LTE
<i>a</i>	Atenuação máxima permitida [dB]	Atenuação máxima permitida obtida no <i>link budget</i> em <i>uplink</i> .	104,66
<i>b</i>	<i>Body loss</i> [dB]	Depende da posição em que o <i>UE</i> se encontra relativamente ao utilizador.	0
<i>c</i>	Perdas de penetração [dB]	Contabiliza as perdas por penetração dependente do tipo de cobertura pretendida.	20
<i>d</i>	Ganho da antena de transmissão [dBi]	Depende do tipo de antena e frequência utilizada.	18,5
<i>e</i>	Atenuação do sinal na fronteira da célula [dB]	$a + b + c - d$	106,2
<i>f</i>	Potência de Transmissão [dBm]	Potência à saída do <i>eNB</i> por <i>RB</i> (100 <i>RB</i> 's).	26
<i>g</i>	Margem de desvanecimento <i>log-normal</i> [dB]	Depende do desvio padrão e da percentagem de cobertura da área.	6,8
<i>h</i>	Margem de Interferência [dB]	Contabiliza o aumento do ruído no <i>UE</i> causado pelas células vizinhas.	25,27
<i>i</i>	Ruído Térmico [dB]	$-174 + 10\log_{10}(180 \text{ kHz})$	-121,5
<i>j</i>	Figura de ruído [dB]	Depende da implementação do fabricante do <i>UE</i> .	7
<i>l</i>	SINR [dB]	$f - a - i - j - h - g - b - c + d$	2,22

Neste ponto o *link budget* encontra-se finalizado com o raio de célula determinado e os débitos oferecidos tanto em *downlink* como em *uplink*, sendo bastante aproximados dos valores obtidos, como se observa na Tabela 20.

Tabela 20 - Comparação teórica e experimental dos débitos binários e SINR.

Sentido	Indicadores	Obtido	Simulado
<i>Uplink</i>	Débito binário médio	31 <i>Mbit/s</i>	31,8 <i>Mbit/s</i>
	<i>SINR</i>	12,5 <i>dB</i>	14,64 <i>dB</i>
<i>Downlink</i>	Débito binário médio	65 <i>Mbit/s</i>	66,9 <i>Mbit/s</i>
	<i>SINR</i>	18 <i>dB</i>	18,38 <i>dB</i>

Isto leva a uma validação da metodologia apresentada, ou seja, com este método é possível inferir as condições usadas no planeamento de cobertura e capacidade em *LTE* para a área em estudo.

Para além da análise, é ainda de referir que é possível efetuar um planeamento de uma rede *LTE*, dependendo dos requisitos especificados, com a adoção do método proposto.

Tendo em conta os requisitos definidos, pode ser necessário recalcular o raio de célula, caso a capacidade seja insuficiente em *uplink* ou em *downlink*. Nesta última situação, o *link budget* em *downlink* é tido como ponto de partida, ou seja, limitante da ligação.

No entanto, antes de ser feita essa operação, é possível dimensionar os fatores de carga de modo a balancear os valores de capacidade e do débito oferecido na fronteira da célula. Podendo esta última opção ser uma solução para cumprir os requisitos propostos, caso o valor de carga não seja uma condição inalterável.

4. Medidas em LTE

4.1. Introdução

A realização dos testes no terreno foi executada com a montagem visível na Figura 25. Para a comunicação com a rede LTE foi usada uma placa de dados USB de categoria 3 que permite realizar tráfego de pacotes numa rede LTE com débitos até 100 *Mbit/s* em *downlink* e 50 *Mbit/s* em *uplink*, com capacidade para uma largura de banda de 20 *MHz* correspondente à máxima largura de banda suportada pelo *LTE Release 8* [4] [24]. Além disso, o *USIM* utilizado apresentava um índice 7 de *QCI*.

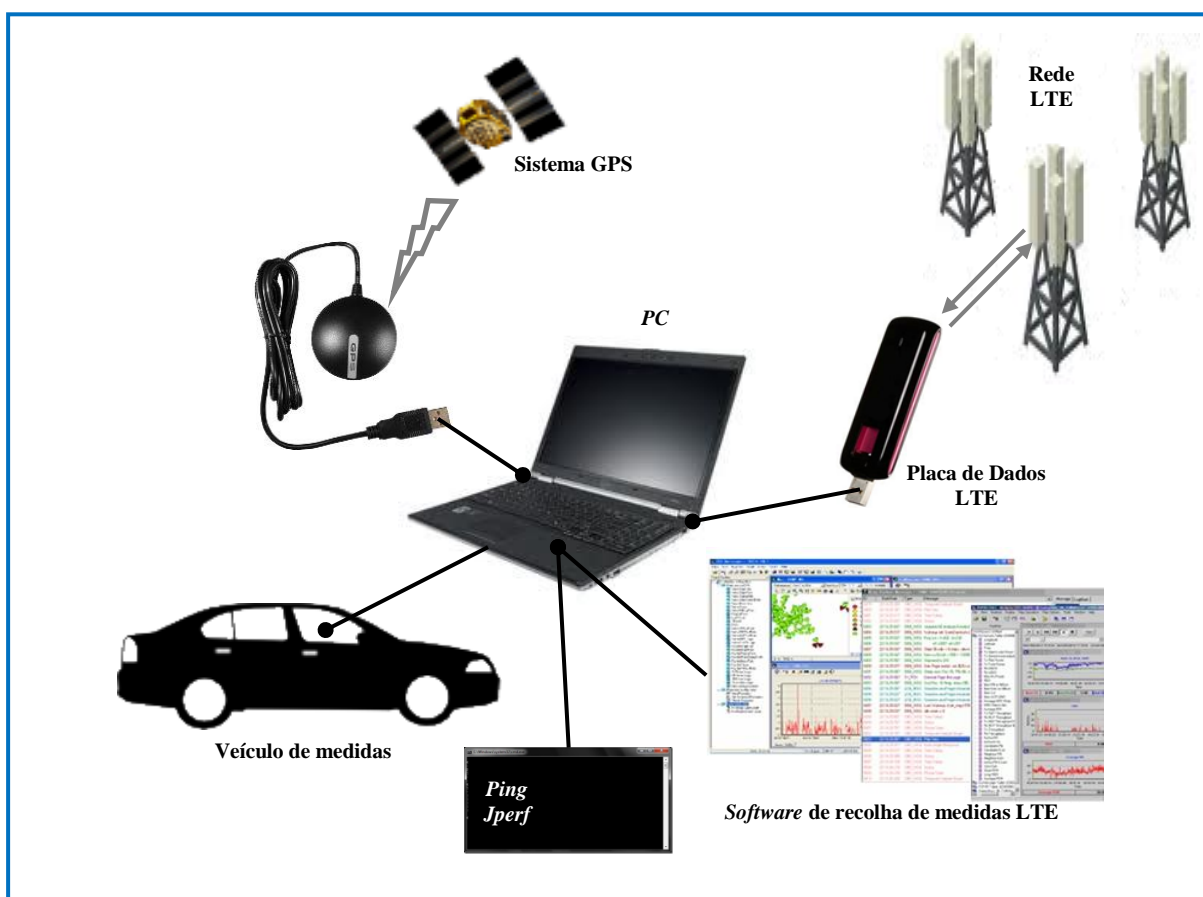


Figura 25 – Montagem utilizada nas medidas efectuadas no terreno.

Em conjugação com a placa de dados era necessário um *software* específico para recolha dos dados em tempo real. Este *software* permitiu obter a grande maioria dos parâmetros necessários para a análise de uma rede LTE, tais como, coordenadas, modos de transmissão, níveis e qualidade de sinal. Além disso, permitiu transcrevê-los num mapa digital, de modo a facilitar visualmente a realização dos testes e verificar *in loco* o desempenho da rede.

No entanto, para dar suporte às duas ferramentas mencionadas foi também necessário um computador portátil onde estava instalado o *software*, o *modem USB* e o módulo *GPS*.

Em adição ao já mencionado é de referir que, para posterior tratamento de dados foi também usada uma ferramenta em *software* que permitiu a obtenção de tabelas e gráficos sobre as medidas gravadas, para posterior análise de desempenho e otimização dos parâmetros da rede que se consideraram necessários.

As medidas recolhidas quando o sistema se encontrava a transmitir dados de utilizador, ou seja, em modo *RRC_CONNECTED*, só podiam ser feitas mediante ferramentas que permitissem a geração de tráfego de pacotes. O fluxo de tráfego nestas condições foi realizado entre o equipamento móvel e o *P-GW*.

O tráfego de dados escolhido para os testes retratados foi realizado sobre o protocolo *UDP*. A razão dessa escolha deve-se ao facto do tráfego *UDP* estar apenas limitado pela largura de banda disponível e pelo poder de processamento do equipamento gerador de tráfego. Isto quer dizer que em detrimento da garantia de entrega de pacotes do *TCP*, o *UDP* apresenta cabeçalhos mais reduzidos o que leva também a que apresente uma baixa latência. Logo, para testar as capacidades máximas da rede *LTE* em estudo, foi esse o protocolo escolhido.

Desse modo, para gerar pacotes *UDP* em *uplink* e *downlink*, foi usado o comando *Iperf*, que permite definir as características do tráfego *UDP* a ser enviado, como por exemplo, o tamanho dos pacotes e o débito máximo. Em adição, o *Iperf* possibilita a visualização da largura de banda, do atraso, *jitter* e dos pacotes perdidos que ocorreram na transmissão.

A latência média foi medida através do comando *Ping* presente no sistema operativo *Windows*, este comando permite ainda verificar se um pacote pode ser entregue a um endereço *IP*, o que pode identificar possíveis problemas de conectividade da rede.

Por último, refira-se que todos os mapas estão orientados a *Norte*, não que seja efetivamente relevante para análise, mas meramente informativo.

4.2. Tipos de medidas

As medidas efetuadas encontram-se divididas em quatro categorias, estas foram realizadas para se conseguirem contemplar quatro casos distintos de utilização do terminal móvel.

No primeiro caso, os testes foram efetuados de modo a que se observasse o desempenho da transmissão em localizações fixas. Estes locais foram escolhidos uma vez que eram locais

com uma densidade populacional elevada, ou seja, poderem vir a revelar uma boa taxa de penetração de *LTE*. No entanto, note-se que os pontos escolhidos encontravam-se em linha de vista com as antenas dos *eNB's* e apresentavam uma boa cobertura *LTE*, isto é, níveis e qualidade de sinal favoráveis.

Relativamente ao segundo caso, foi realizado um percurso com o equipamento móvel em *idle* (modo inativo). Assim sendo, através desta medidas, em que o equipamento não se encontra a transmitir dados, é possível observar o nível de sinal, nomeadamente o *RSRP* e a *RSRQ* sem a interferência de outros terminais móveis *LTE*, em que a única interferência presente é a das células vizinhas, caso existam. Além disso, esta situação permitiu observar qual a célula servidora selecionada pelo *UE*.

O terceiro e quarto casos, foram realizados para que o percurso efetuado fosse o mais semelhante possível ao percurso em *idle*, permitindo posterior comparação. No entanto, estes testes tiveram como intuito principal avaliar as características do *LTE* na existência de transmissão de dados. Desse modo, foi gerado tráfego *UDP* durante todo o percurso, em *uplink* e *downlink*, onde os principais dados, além daqueles obtidos em *idle* (*PCI*, *RSRP*, *RSRQ* e *SINR*) no caso do *downlink* foram:

- Débito binário oferecido ao utilizador;
- *Block Error Rate (BLER)* que indica os erros por bloco;
- *MCS* utilizados em cada canal quando aplicável;
- *CQI*, indicativo da qualidade do canal;
- Velocidade Média do percurso

Específico ao *uplink* foi analisado:

- Débito binário oferecido ao utilizador;
- Potência de transmissão;
- Velocidade Média do percurso.

De notar que todos estes testes foram realizados no interior do veículo de testes. Assim sendo as quatro categorias encontram-se definidas como: pontos estáticos; medidas em *idle*; medidas em *downlink* e medidas em *uplink*.

Por último foi também traçada uma rota de modo a avaliar o impacto das medidas serem feitas dentro de um veículo ou fora deste, de modo a ser possível quantificar as perdas de penetração num veículo.

4.3. Pontos Estáticos

As medidas estáticas foram feitas em três localizações para cada área. Estes pontos foram escolhidos devido ao local ser considerado um ponto de interesse, ou seja, um local público de utilização elevada, que podem assim apresentar uma boa taxa de penetração para *LTE* (dados). Além disso, estes locais apresentavam características propícias a uma boa qualidade de serviço, isto é, existia um bom nível de sinal *RSRP* e uma *SINR* elevada, encontrando-se também em linha de vista com as antenas dos *eNB*'s.

Na Figura 26 pode ser observado o local onde foram recolhidas as medidas estáticas, tal como o percurso realizado em *idle*, para a primeira área. Relativamente à segunda área, o percurso e localização dos pontos podem ser observados na Figura 27.

Foram realizadas dez sessões (transmissão de pacotes) *UDP* para *downlink* e dez sessões para *uplink*, cada uma com a duração de 60 segundos, aproximadamente. As distâncias relativas de cada ponto ao *eNB* estão presentes na Tabela 21, é de referir que a distância não foi um elemento presente na escolha mas sim um fator de análise dos resultados.

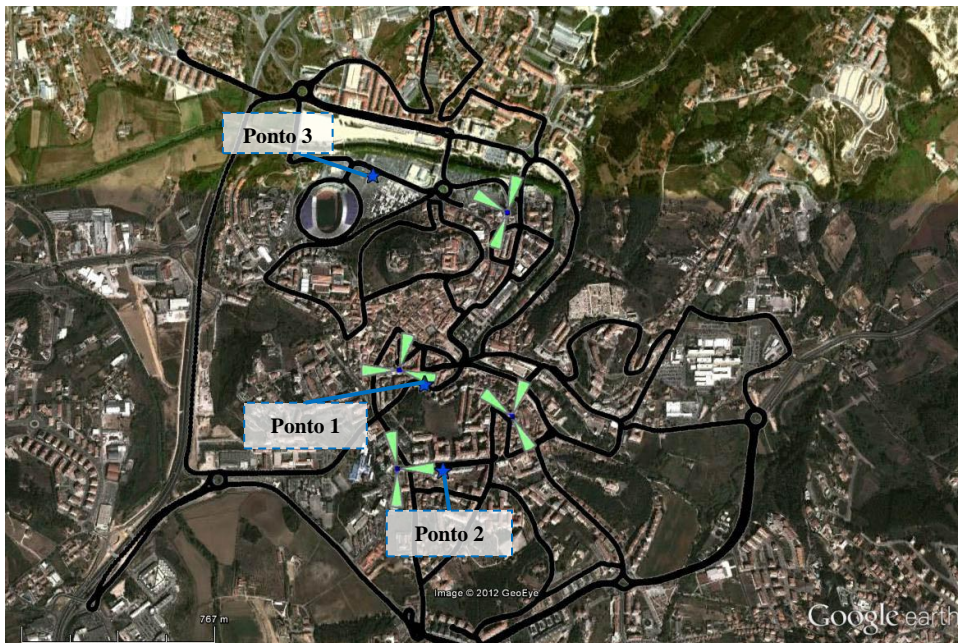


Figura 26 - Percorso efetuado para a Área 1 e locais onde foram obtidas as medidas estáticas.

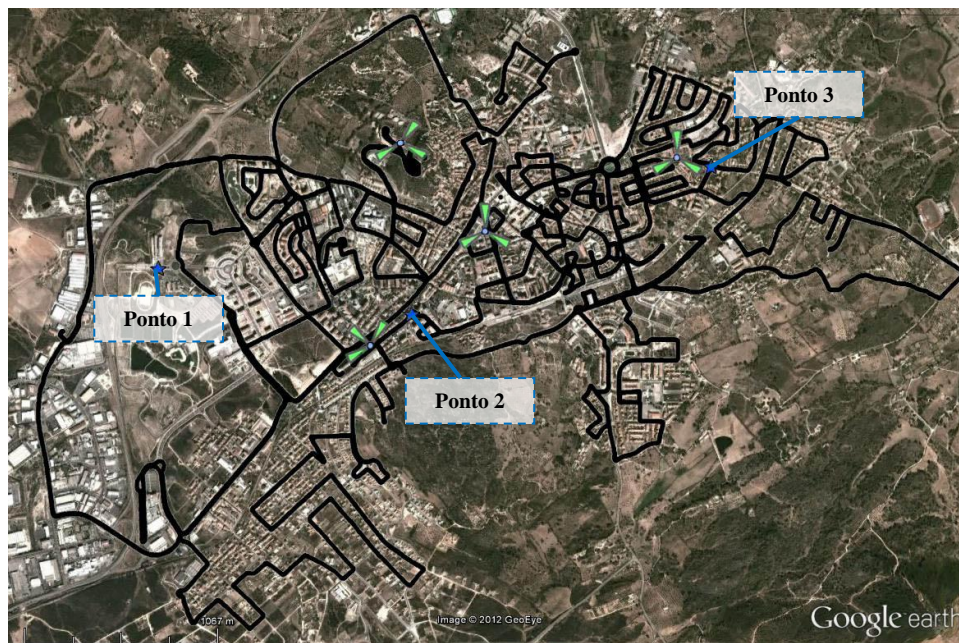


Figura 27 - Percurso efetuado para a Área 2 e locais onde foram obtidas as medidas estáticas.

Tabela 21 - Distância das medidas estáticas em relação aos eNB's.

	Distância ao eNB [km]		
Pontos Estáticos	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Área 1	0,118	0,181	0,557
Área 2	1,29	0,286	0,201

Como se pode observar pelas figuras acima, os pontos apesar de terem sido escolhidos mediante o local ser um ponto de interesse, também apresentam uma relativa dispersão pela área de estudo.

4.3.1. Downlink

Das sessões realizadas para cada área foram obtidas as estatísticas presentes na Tabela 22. Estas estatísticas permitem analisar a qualidade da ligação, tal como a qualidade de serviço oferecida.

Em primeiro lugar, note-se a disponibilidade e continuidade de serviço. Nas sessões efetuadas não se verificou nenhuma quebra de serviço, sendo o tráfego efetuado de forma contínua. Além disso os acessos necessários foram realizados sem qualquer tipo de bloqueio ou de falha.

As características de transmissão rádio podem ser analisadas através dos níveis do *RSRP*, *RSRQ* e *SINR*. O *Wideband CQI* é também um indicador da qualidade do canal em toda a largura de banda usada [10].

Tendo em conta, as características do *LTE* é necessário e extremamente relevante analisar os débitos oferecidos. Para tal está presente na Tabela 22 o débito binário médio e o máximo valor alcançado, além disso, foram contabilizadas o número de amostras em cada tipo de modulação, bem com o *MCS* mediano para cada canal.

Tabela 22 - Estatísticas de *Downlink*.

Estatísticas <i>Downlink</i>	Área 1			Área 2		
	1	2	3	1	2	3
Ponto	10	10	10	10	7*	10
Sessões realizadas	10	10	10	10	7*	10
Número de Quebras de serviço	0	0	0	0	0	0
Acessibilidade de serviço [%]	100	100	100	100	100	100
Número de <i>setups</i> não realizados	0	0	0	0	0	0
<i>RSRP</i> Médio [dBm]	-58,22	-82,5	-73,78	-83,09	-69,11	-83,33
<i>RSRQ</i> Média [dB]	-9,05	-10,16	-9,49	-9,45	-7,89	-9,61
<i>SINR</i> Média [dB]	23,13	21,59	23,10	20,16	25,37	23,17
Débito Binário Médio [Mbit/s]	86,27	81,49	77,03	78,77	86,29	81,30
Débito Binário Máximo [Mbit/s]	97,33	94,54	89,76	93,48	99,32	95,93
<i>Ping</i> [ms]	20	19	19	35	36	53
Amostras em <i>QPSK</i>	7	5	25	10	4	23
Amostras em <i>16QAM</i>	4	41	17	28	4	10
Amostras em <i>64QAM</i>	620	592	583	614	461	623
<i>PDSCH MCS0</i> Mediano	27	24	26	22	28	26
<i>PDSCH MCS1</i> Mediano	27	24	26	22	28	26
<i>Wideband CQI</i> Médio	11,89	13,42	11,50	11,52	14,22	12,38

* Apenas foram obtidas sete sessões pois o ficheiro de medidas encontrava-se corrompido.

Veja-se na tabela que os valores de *ping* da segunda área são mais elevados que na área 1, essa diferença deve-se apenas ao *core* da rede que apresentava mais “nós” na comunicação com o *P-GW*.

A Figura 28 compara os valores médios de débito binário com o máximo valor alcançado. Como se observa o débito médio não apresenta uma grande disparidade, tendo uma diferença, no pior caso, de aproximadamente 15 *Mbit/s*. Este facto demonstra que a ligação em *LTE*, sem movimento do terminal, apresenta uma boa adaptação do canal.

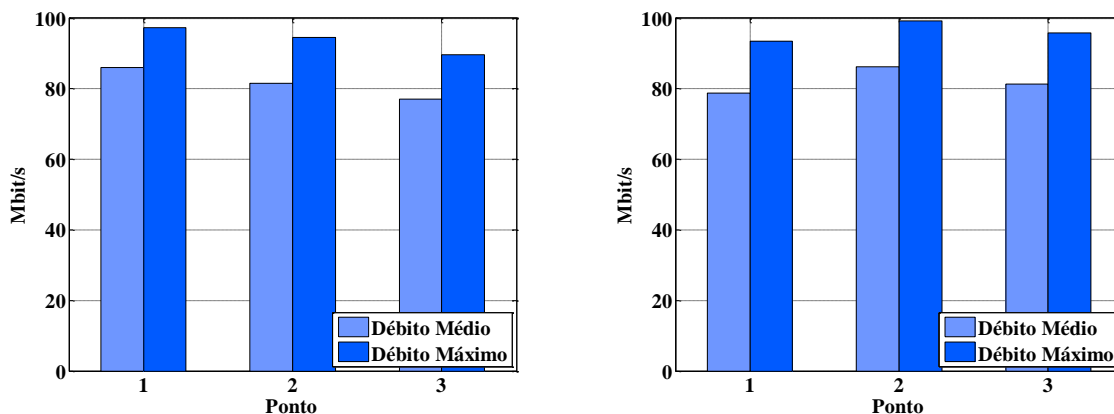


Figura 28 - Débito Binário Médio e Máximo para cada ponto em *Downlink* da área 1 (à esquerda) e para a área 2 (à direita)

Na Figura 29, são apresentadas a Função Densidade de Probabilidade (FDP) e a Função de Distribuição Acumulada (FDA) para os débitos binários obtidos para cada área. A análise da figura permite observar que a maioria das amostras recolhidas apresentam valores compreendidos entre os 80 *Mbit/s* e o valor máximo, 100 *Mbit/s*. Isto dita que a transmissão foi feita com valores de débito muito elevados e próximos do máximo reforçando o referido anteriormente.

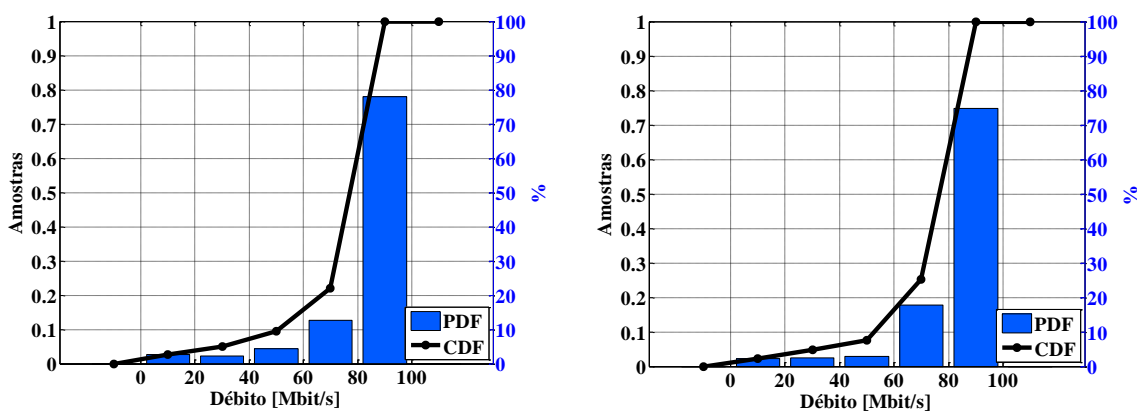


Figura 29 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para os pontos estáticos em *Downlink* da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

4.3.2. Uplink

As estatísticas referentes ao tráfego realizado em *uplink* estão presentes na Tabela 23. Do mesmo modo que no *downlink*, foi reportada a acessibilidade e a disponibilidade de serviço, não apresentando nenhuma falha. No entanto realce-se que o *UE* estava imóvel e problemas de acessibilidade serão mais notórios quando o *UE* se encontrar em movimento pela área de estudo. Ainda assim, é possível observar a boa acessibilidade e retenção da ligação.

Foram também recolhidos o nível de sinal *RSRP* e a *RSRQ* que permitem analisar a qualidade da ligação. Em termos de débito binário, foi obtido o débito binário médio e o máximo valor alcançado para comparação.

Tabela 23 - Estatísticas de *Uplink*.

Estatísticas <i>Uplink</i>	Área 1			Área 2		
	1	2	3	1	2	3
Ponto	10	10	10	10	10	10
Sessões realizadas	0	0	0	0	0	0
Acessibilidade de serviço [%]	100	100	100	100	100	100
<i>RSRP</i> Médio [dBm]	-58,56	-85,36	-75,09	-83,26	-72,91	-83,1
<i>RSRQ</i> Média [dB]	-5,85	-5,87	-5,86	-5,37	-3,81	-5,31
Débito Binário Médio [Mbit/s]	43,64	35,46	44,17	38,94	44,34	38,62
Débito Binário Máximo [Mbit/s]	48,16	45,87	48,55	43,91	50,45	43,47

É de referir que apenas foi usado um *UE*, estando eliminada a interferência provocada por outros equipamentos em *uplink*. A Figura 30 apresenta um gráfico comparativo entre os valores médios de débito binário obtidos, com o valor máximo alcançado em *uplink*. A diferença máxima obtida foi de 10 *Mbit/s*, não deixando de apresentar valores próximos do máximo possível.

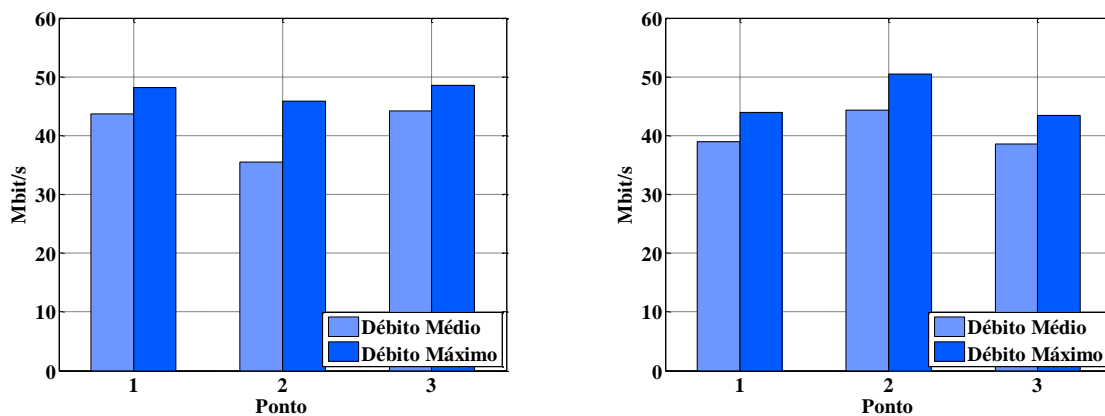


Figura 30 - Débito Binário Médio e Máximo para cada ponto em Uplink da área 1 (à esquerda) e área 2 (à direita).

A Figura 31 reforça o facto de grande parte das amostras recolhidas se encontrarem situadas próximas do valor máximo teórico, como é observável. No entanto é também visível para a área 1, a razão do valor médio de débito binário ser mais baixo, isto porque existe uma boa parte da amostragem feita entre os 30 e os 40 *Mbit/s*. Esta situação poderá ser explicada pelo nível de sinal *RSRP* que se obteve no ponto 2, que é mais baixo do que os restantes pontos dessa área.

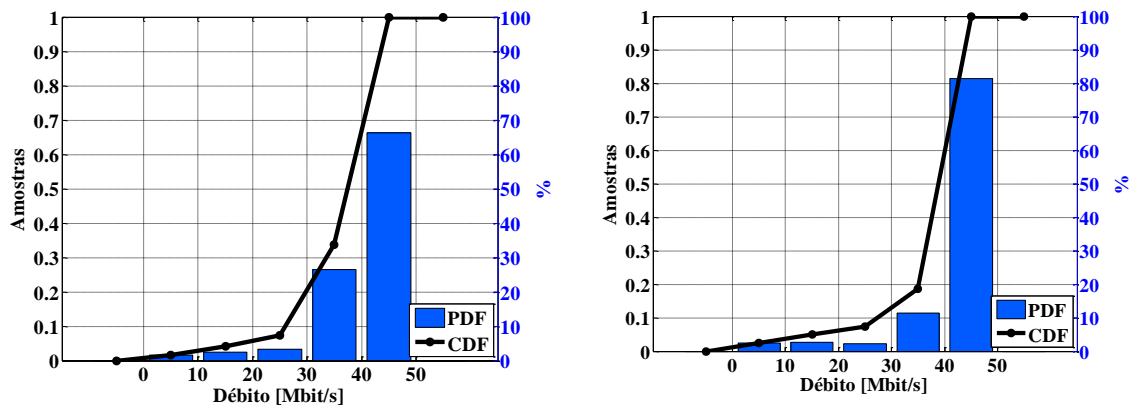


Figura 31 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para os pontos estáticos em *Uplink* da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

4.4. Medidas em Idle

No contexto das medidas foi importante realizar testes em *idle*, pois permitem ter conhecimento do comportamento do equipamento móvel e da rede quando não ocorre transmissão de dados do utilizador. Deste modo, a área em estudo pode ser apenas analisada em termos de níveis de sinal e da interferência das células adjacentes.

Além disso, e através do percurso referido, é possível estudar a distribuição dos *PCI's* na área, o que se traduz na cobertura providenciada por cada célula e qual a melhor célula em cada ponto quando o equipamento se encontra em *idle*. Por último pode ainda ser feita uma análise do modo de seleção de novas células servidoras e da existência ou não de células vizinhas como planeado.

Através dos mapas presentes na Figura 32 (área 1) e da Figura 33 (área 2) pode ser observada a distribuição dos *PCI's* na área definida e qual a célula a que o *UE* se encontrava ligado no momento da amostragem. Com o auxílio dos mapas referidos podem ser identificados problemas ao nível do planeamento de cobertura e da correta utilização dos recursos disponíveis.

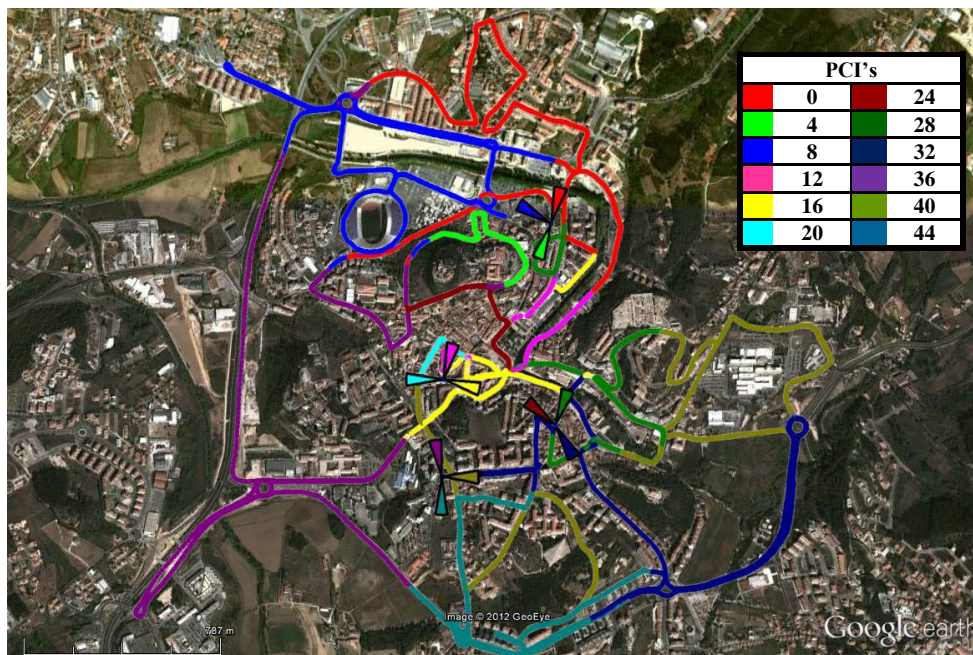


Figura 32 - Distribuição dos PCI's na área 1.

A análise seguinte é feita observando a cobertura apenas em termos de espalhamento dos *PCI's*.

Na área 1 é visível que na zona coberta pelas células com os *PCI's iguais a 4, 16 e 24*, a proximidade dessas antenas encontra-se a ser servida pelas células vizinhas referidas o que se pode revelar um problema se o nível de sinal *RSRP* for baixo. Se o nível de sinal *RSRP* for suficiente, é necessário ter em atenção a interferência gerada nessa zona de forma a proporcionar uma boa qualidade de serviço.

A célula com *PCI igual a 8* apresenta uma zona que é servida por uma célula adjacente (*PCI 0*) que se encontra a radiar para outro quadrante, esta situação pode gerar interferência que pode ser evitada com uma diminuição no *tilt* da antena referida.

A célula com *PCI igual a 36* apresenta uma grande zona de cobertura abrangendo parte do espaço que poderia estar a ser servido pela célula com *PCI igual a 20*, dessa forma é possível efetuar uma melhor distribuição da carga nas células através de uma definição de *offsets* ou com um *downtilt*.

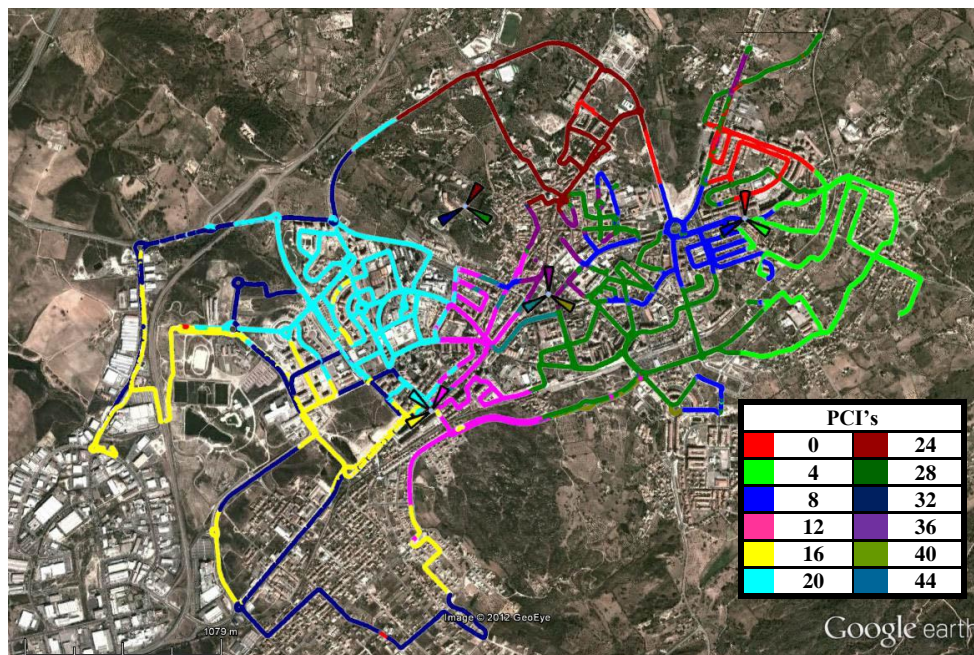


Figura 33 - Distribuição dos PCI's na área 2.

Na área 2, o *eNB* da célula com *PCI igual a 32*, está situado numa grande elevação e as antenas encontram-se em linha de vista com grande parte da área em estudo. Dessa forma é explicável o elevado alcance desta célula, no entanto esta situação é indesejável pois para além de provocar interferência nas células abaixo desta, encontra-se a servir uma zona longínqua em que os níveis de sinal *RSRP* serão baixos. Uma otimização do *tilt* da antena pode levar a um balanceamento da cobertura, tal como a redução da interferência que possa resultar desta situação. No entanto, caso a otimização do *tilt* não seja possível é aconselhável a definição de *offsets* para *handover* de forma a equilibrar a carga entre as células.

Relativamente à célula com *PCI igual a 28* note-se a área de cobertura que se sobrepõe àquela da célula com *PCI igual a 40*. De forma a melhorar a eficiência das células é aconselhável que nesta última seja estabelecida uma maior prioridade no acesso, como por exemplo, um *offset* na escolha da célula.

Por último, a zona coberta pela célula com *PCI igual a 12* é maior quando em comparação com a célula com *PCI igual a 44* e deverá ser reduzida. Um exemplo para esse efeito poderá passar por um *downtilt* na antena da célula com *PCI igual a 12*.

Note-se que a análise feita apenas retracta o espalhamento de cada célula na área em questão e pode não apresentar problemas de qualidade de serviço caso a rede se encontre com poucos utilizadores, isto é, com pouca carga. No entanto para examinar esses problemas é necessário realizar medidas com transferência de dados de utilizador.

A Figura 34 pretende mostrar a forma como o nível de sinal *RSRP* se encontra distribuído na área analisada. Este estudo permite identificar quais os níveis de cobertura da área e se se ajustam ao planeamento efetuado.

A definição de estratégias para melhorar a cobertura, de forma a garantir uma melhoria da qualidade de serviço, deverá observar um aumento dos níveis de sinal.

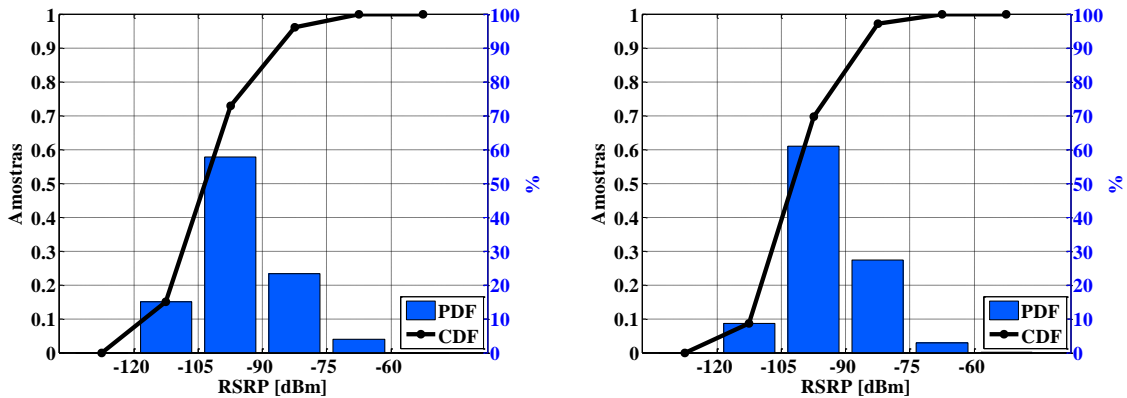


Figura 34 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada do sinal *RSRP* da rota *idle* para a área 1 (à esquerda) e para área 2 (à direita).

Sabendo que a *RSRQ* permite identificar a relação entre a interferência total presente na banda com o sinal *RSRP*, a Figura 35 possibilita observar, em traços gerais, a distribuição de qualidade de sinal na área.

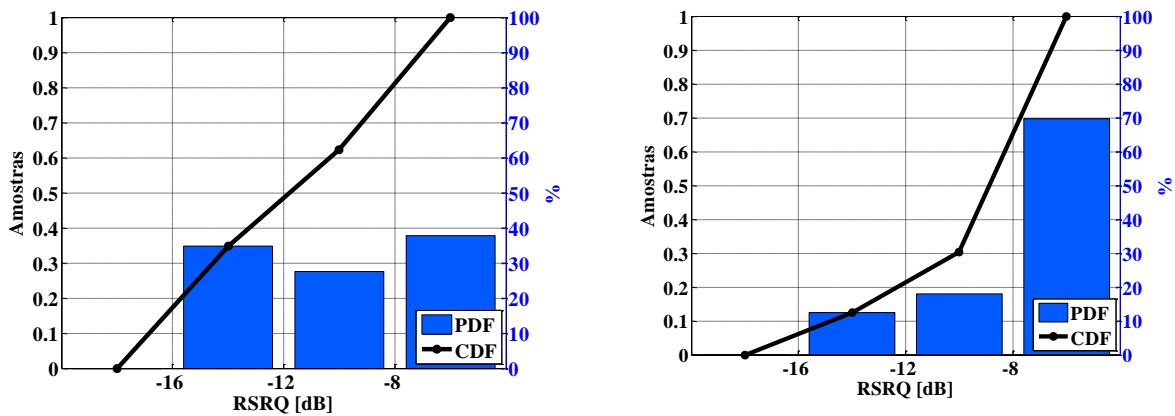


Figura 35 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada do sinal *RSRQ* da rota *idle* para a área 1 (à esquerda) e para área 2 (à direita).

4.5. Medidas em Downlink

As medidas realizadas em *downlink* tiveram como foco principal o estudo do débito binário obtido quando o equipamento móvel se encontra em modo activo. Portanto, foi gerado tráfego *UDP* no sentido descendente, em que o equipamento móvel se encontrava a receber dados no plano do utilizador.

Para além do mapa com os débitos binários obtidos em cada ponto, foram também adquiridos os mapas com os níveis de sinal *RSRP* e *RSRQ*, sendo ainda mapeadas a *SINR* e a *BLER*. Os diversos mapas referidos permitem realizar uma análise comparativa entre os parâmetros mencionados, para que seja possível distinguir as razões do débito binário em determinado ponto ser mais baixo. Portanto, numa primeira análise, pode-se dizer que o débito binário tende a ser baixo com um nível de sinal baixo e/ou quando a interferência se revela elevada.

4.5.1. Débito binário

A Figura 36 representa os débitos binários obtidos no percurso efetuado para a área 1, enquanto a Figura 37 representa os valores obtidos na área 2.

Note-se que os pontos coloridos a preto representam os pontos para os quais deixou de existir transmissão ou que era demasiado baixa para se considerar relevante (0 a 1 *Mbit/s*). Esta ocorrência pode advir do nível de sinal *RSRP* ser extremamente baixo que não possibilite um acesso *LTE* ou falha momentânea do equipamento. A análise do mapa da distribuição do sinal *RSRP* permite discernir entre estas duas situações.

Pode-se identificar no mapa que as zonas passíveis de serem melhoradas são aquelas com os pontos a azul (para além dos já referidos a preto), pois apresentam débitos relativamente baixos (1 a 20 *Mbit/s*). No entanto, é necessário ter em atenção se a zona em causa é de interesse e se a procura de melhoria de condições nesta zona não levará a um decréscimo noutra zona que apresente débitos elevados. Este é um ponto a ter em consideração numa possível otimização.

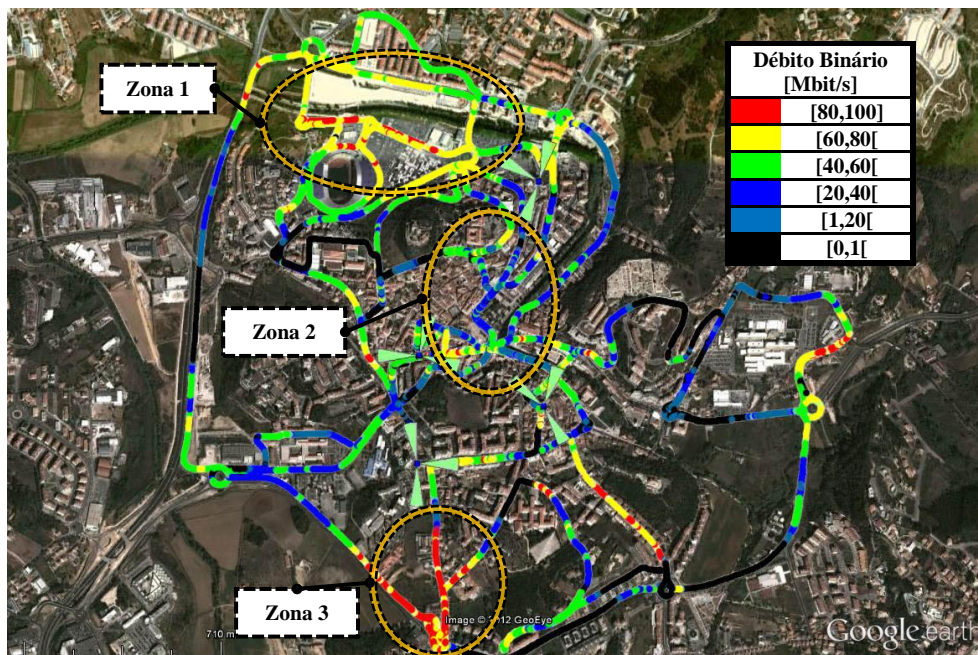


Figura 36 – Mapa com valores de débito binário em *Downlink* para a área 1.

Na área 1, note-se que as zonas que apresentam melhores resultados ao nível do débito encontram-se relativamente afastadas dos *eNB* e são pouco povoadas. Os casos mais evidentes encontram-se assinalados na Figura 36, sem referir os pontos assinalados a preto e a azul.

A zona 1 deve ser digna de atenção, pois apresenta resultados extremamente bons em débito binário entre os 60 e os 100 *Mbit/s*, no entanto é um espaço bastante vazio em termos populacionais onde o único ponto de interesse é o estádio aí localizado, dessa forma a capacidade dessa célula pode estar a ser desperdiçada nesse local.

A zona 2 apresenta débitos binários medianos da ordem dos 40 *Mbit/s*. Desse modo é necessário analisar e retificar a situação pois é uma área densamente povoada com variados pontos de interesse. É possível observar que o problema em princípio não se trata de falta de cobertura, uma vez que se encontra situada entre três células, mas apenas a análise dos mapas de cobertura e qualidade de sinal permitem discernir entre esses casos.

A zona 3 exhibe um problema semelhante à situação da zona 1 e deverá ser também alvo de atenção.

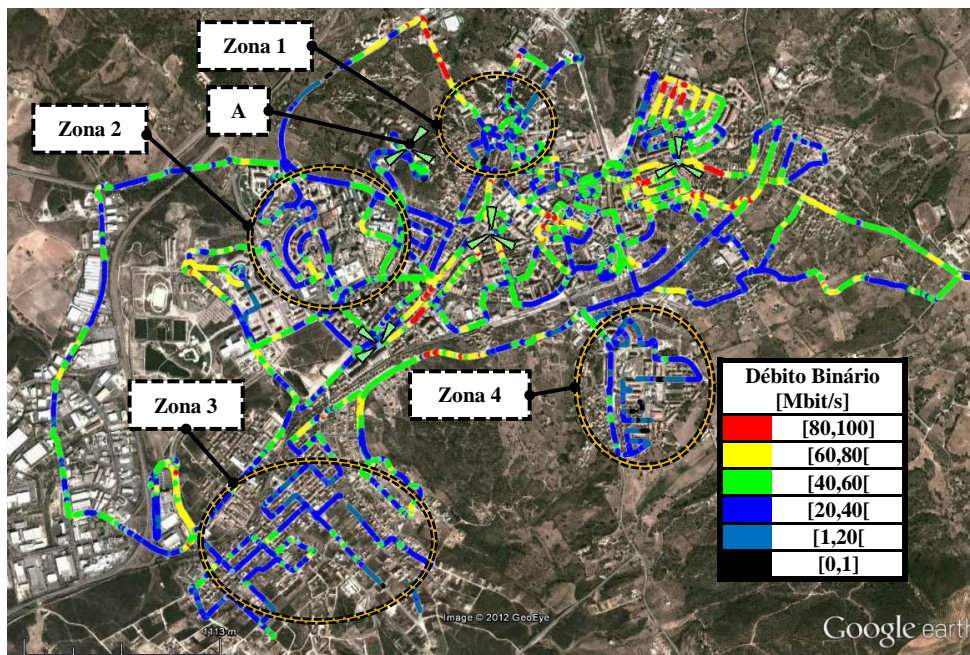


Figura 37 - Mapa com valores de débito binário em *Downlink* para a área 2.

A área 2, tendo em conta as suas dimensões, apresenta uma boa distribuição do débito binário.

Em primeiro lugar é de referir que existe um *eNB* (A), que se encontra numa posição elevada, co-localizada com uma *BTS* “chapéu” de 2G, estando a radiar muito alto. Esta situação leva a que se alcancem débitos elevados (acima de 40 *Mbit/s*) a grandes distâncias e não na área circundante.

Tendo em conta a proximidade da zona 1 e zona 2 aos *eNB*'s respetivos, a causa dos débitos medíocres (abaixo dos 60 *Mbit/s*) pode dever-se aos baixos níveis de sinal ou à interferência provocada por A. Uma solução possível é a alteração dos *tilts* das antenas desses sectores ou baixar a altura a que as antenas se encontram colocadas.

Quanto à zona 3 e zona 4, o débito binário é baixo pois estas sofrem de falta de cobertura, onde uma análise ao mapa da *RSRP* pode confirmar esse facto. A resolução dessa situação passa pela adição de um novo *eNB* (no meio das duas zonas por exemplo) para aumentar os níveis de sinal, tendo em conta que estas zonas já se encontram distantes dos *eNB*'s existentes.

Na Figura 38, está representada a distribuição dos valores do débito binário da área 1 e área 2.

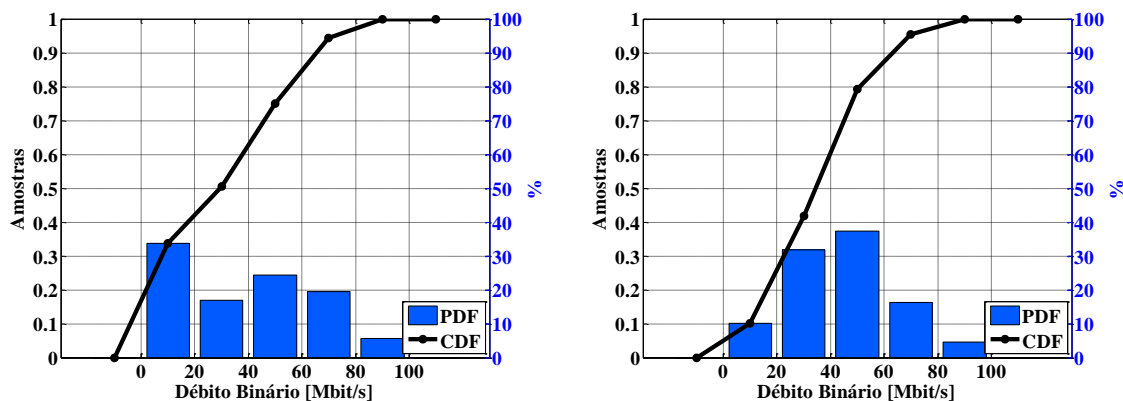


Figura 38 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada dos débitos binários em Downlink da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

Idealmente, quanto mais deslocados para a direita estiverem estes valores mais a área terá tendência a apresentar valores próximos do débito máximo. Uma vez que existem diversos fatores que condicionam o débito, entre os quais a distância, esse cenário não é espectável, mas uma otimização ao nível do débito deverá forçosamente levar a uma maior acumulação de pontos à direita.

Note-se ainda que relativamente à área 1 as amostras situadas entre os 0 e os 20 *Mbit/s* são maiores relativamente às restantes. Tal facto deve-se às amostras recolhidas quando o serviço apresentava valores desprezáveis ou quando existiu uma falha no equipamento. No caso da área 2, esta situação não foi tão notória. No entanto é desejável que para a existência de uma boa oferta de serviço o número de amostras neste intervalo seja o mais reduzido possível dentro da área a ser coberta.

4.5.2. *RSRP*

A Figura 39 e a Figura 40 apresentam o mapa da distribuição de sinal *RSRP* pela área 1 e área 2, respetivamente.

Esta representação numa primeira análise permite constatar se a implementação está de acordo com o planeamento inicial, ou seja, se para a área considerada os níveis de sinal cumprem a percentagem de cobertura pretendida. Além do mais, permite identificar as zonas que não apresentam cobertura *LTE* ou a qual é considerada insuficiente.

Numa fase inicial é possível definir soluções, caso seja necessário, para uniformizar a distribuição do sinal *RSRP* e melhorar a cobertura nas zonas com níveis de sinal considerados baixos.

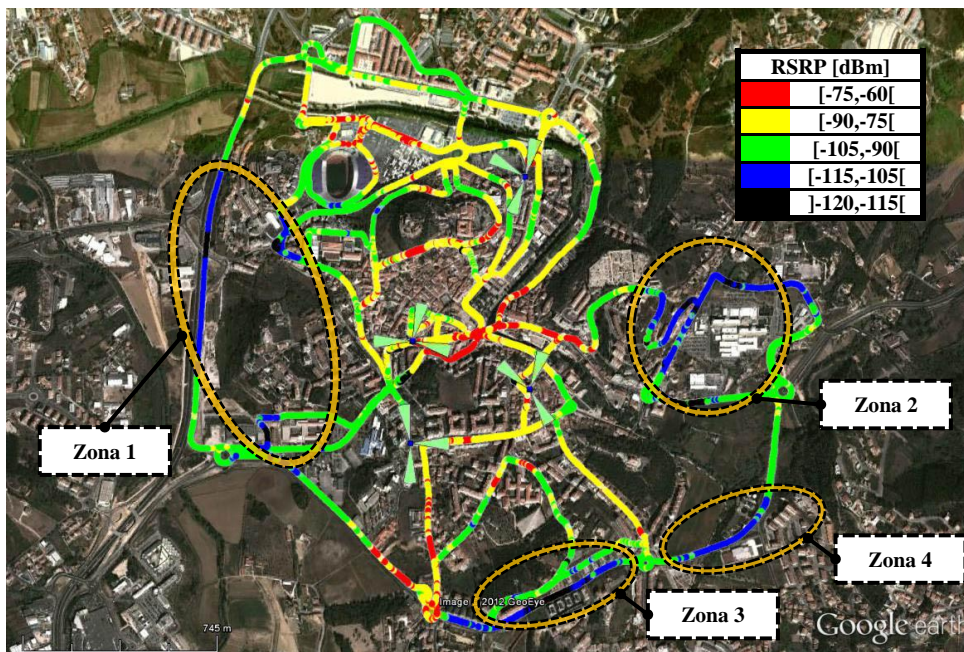


Figura 39 - Mapa com níveis de sinal RSRP medidos em *Downlink* para a área 1.

As zonas assinaladas apresentam os principais problemas de cobertura, onde a área restante se encontra coberta níveis de sinal *RSRP* considerados bons superiores a -105 dBm.

Entre a zona 1 e o sector dirigido a esta, está situada uma grande elevação, desse modo para cobrir esse local é necessário a adição de um retransmissor ou a adição de um novo *eNB* no lado oposto ao já existente.

A zona 2 encontra-se numa posição de cota mais elevada do que a do *eNB* que a deveria servir, para além de não existir nenhum sector a apontar diretamente para esse local, a forma de aumentar os níveis de sinal *RSRP* nesse local é a adição de um *eNB* para cobrir essa elevação.

Na zona 3, existe um túnel no qual foram feitas as medidas, caso seja importante a cobertura *LTE* desse túnel aconselha-se o uso de um retransmissor.

Por fim, a zona 4 apresenta o mesmo problema da zona 1, a adição do *eNB* proposto para a zona 2 podia também ter em vista a cobertura deste local, resolvendo o problema.

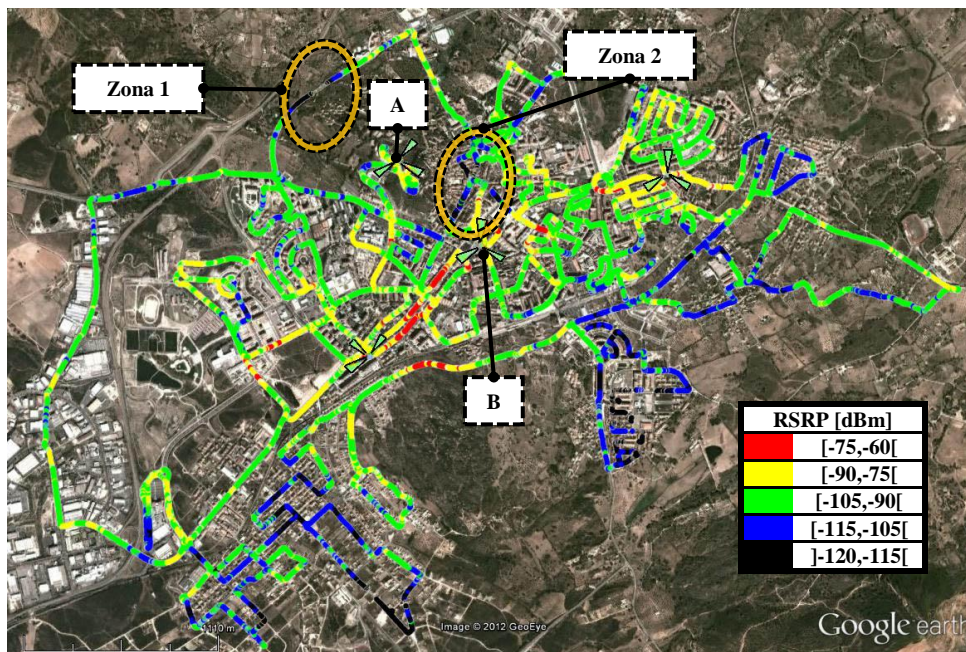


Figura 40 - Mapa com níveis de sinal RSRP medidos em *Downlink* para a área 2.

Tendo em conta análise feita para o débito binário é possível observar que as zonas identificadas em que o débito binário é baixo, deve-se à falta de cobertura como se observa na Figura 40, sendo a resolução dos problemas já referida na análise anterior.

Para esta figura, a zona 1 representa o troço de uma estrada sem habitações, se for de interesse a cobertura *LTE* deste local e arredores, aconselha-se a junção de um quarto sector (virtual) ao *eNB* no topo da colina.

A zona 2 é a zona histórica da cidade, desde logo pode ser desejável a cobertura *LTE* tendo em conta a movimentação turística. De modo a melhorar os níveis de sinal do local podem-se usar as seguintes abordagens: *downtilt* da antena de A; ligeiro *uptilt* da antena de B ou uma cobertura pico-celular na zona referida.

A Figura 41 permite identificar a distribuição de níveis de potência do sinal rádio *LTE* nas áreas em questão. Como se observa os valores medianos de nível de sinal *RSRP* encontram-se entres os -105 e -90 *dBm* para as duas áreas.

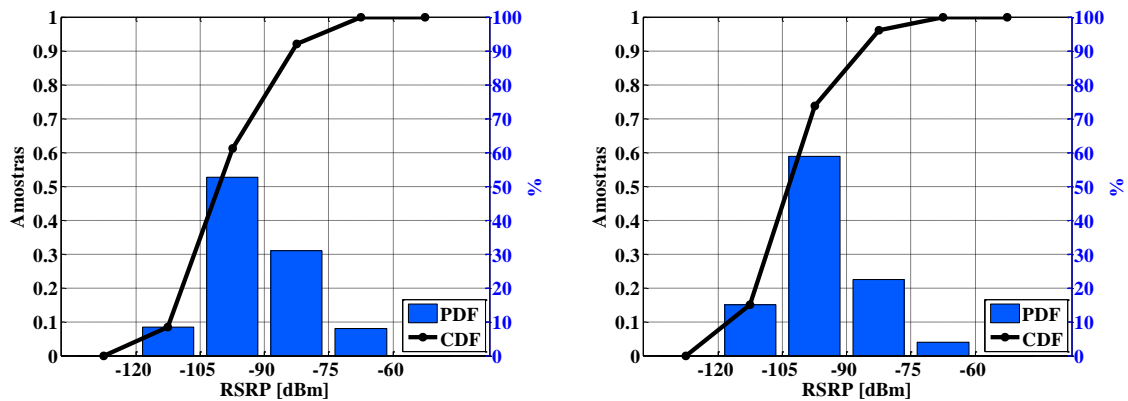


Figura 41 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para o sinal RSRP em Downlink da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

Numa otimização ou seguindo as propostas feitas, os valores de cobertura têm que obrigatoriamente ser mais altos, o que não provocando interferência vai resultar numa melhor qualidade de serviço geral, descartando outros factores.

4.5.3. *RSRQ*

O sinal *RSRQ* quando comparado com o *RSRP*, permite identificar inequivocamente situações em que a qualidade de serviço é baixa derivada do nível de sinal fraco ou então da interferência existente na zona.

De forma resumida, podem-se identificar problemas ao nível da qualidade de sinal quando os valores de *RSRQ* são baixos. Se o *RSRP* também for baixo na mesma zona, a qualidade de sinal deteriorou-se devido a uma insuficiência na cobertura, se por outro lado for elevado, o problema reside na interferência entre células.

Desse modo é possível identificar problemas que afetem a qualidade de serviço através do mapa *RSRQ* quando este apresenta pontos a azul ou a preto (*RSRQ* baixa).

A Figura 42 e Figura 43 apresentam os mapas obtidos do sinal *RSRQ* para a área 1 e área 2, respetivamente.

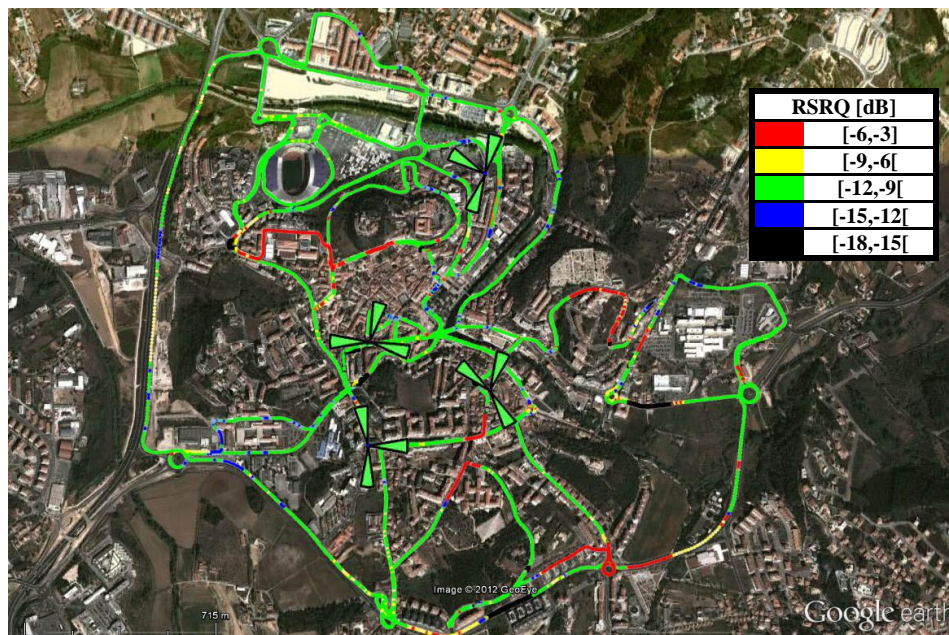


Figura 42 - Mapa com níveis de sinal RSRQ medidos em *Downlink* para a área 1.

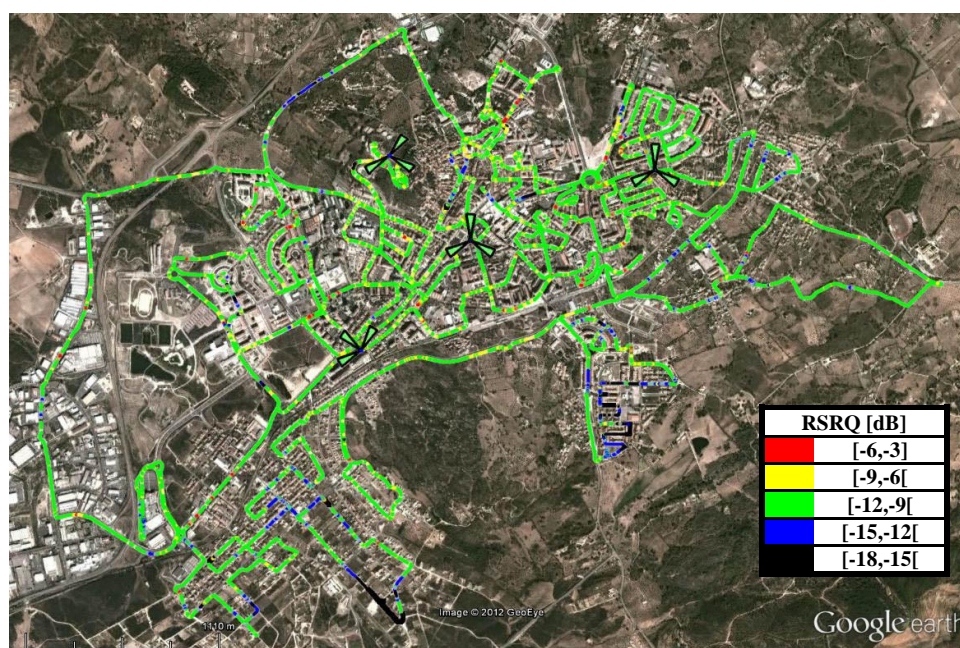


Figura 43 - Mapa com níveis de sinal RSRQ medidos em *Downlink* para a área 2.

A Figura 44 reflete a qualidade do sinal na área de estudo. São distinguidos cinco intervalos que representam uma excelente, boa, razoável, má e péssima qualidade de serviço à medida que os valores de *RSRQ* se distanciam de 0 dB para valores negativos.

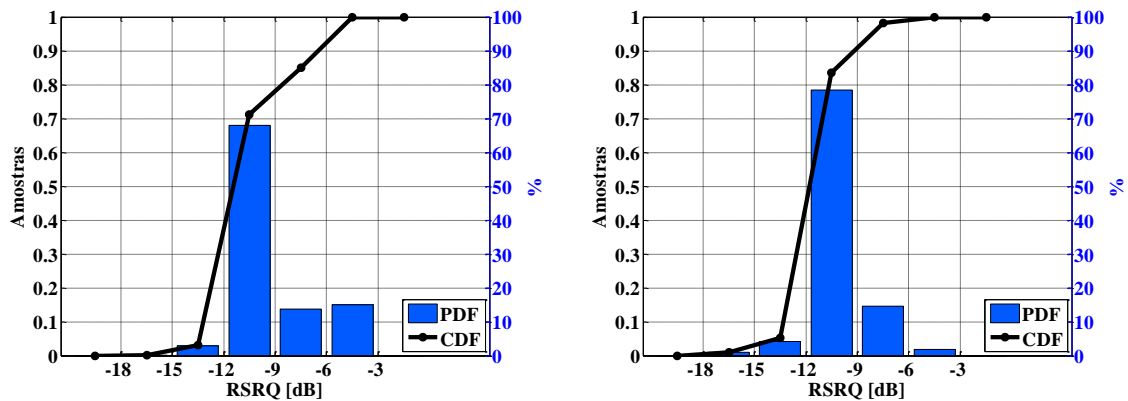


Figura 44 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para o sinal RSRQ em Downlink da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

O desejável de modo a garantir uma boa qualidade de serviço é a minimização dos valores abaixo de -12 dB, pois representam problemas de interferência/cobertura.

4.5.4. SINR

Sabendo que o débito binário oferecido ao utilizador depende fortemente da *SINR*, ou seja, as modulações de ordem mais elevada necessitam de valores elevados de *SINR*, é necessário que exista um bom nível de sinal em relação à interferência existente.

A Figura 45 apresenta os valores da *SINR* obtidos na área 1 e a Figura 46 os valores obtidos para a área 2.

A análise destes mapas permite identificar zonas onde a interferência é mais elevada ou moderada que vão condicionar o máximo débito binário oferecido. A melhoria da *SINR* pode ser efetuada de duas formas: um aumento da cobertura ou (caso a cobertura seja boa) por técnicas de redução de interferência.

Os pontos identificados a azul e a preto vão apresentar débitos binários reduzidos devido à forte interferência e/ou nível de sinal existente ser baixo.

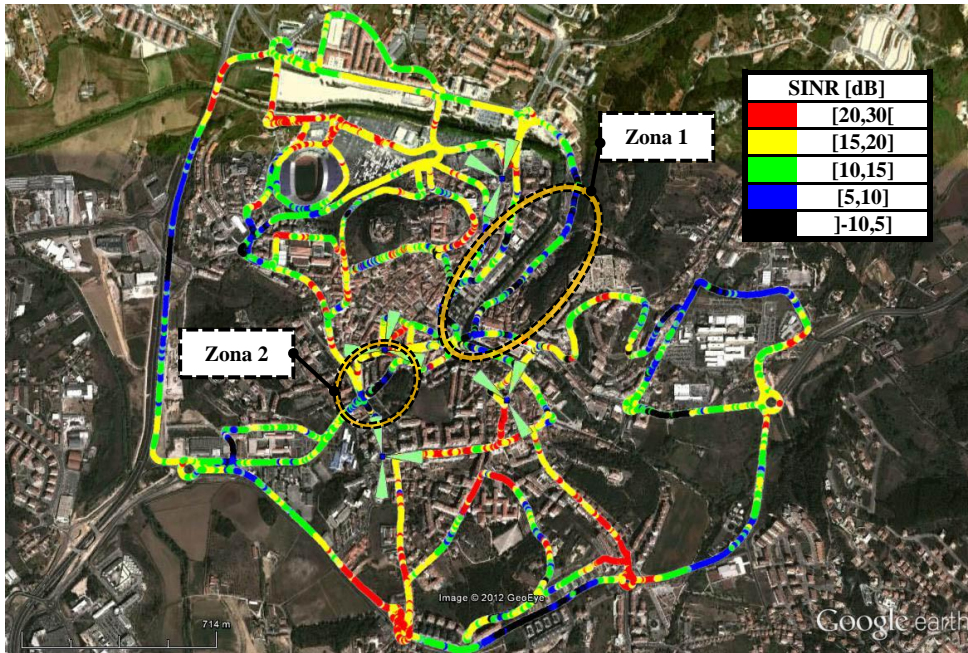


Figura 45 - Mapa com valores de SINR medidos em *Downlink* para a área 1.

Relativamente à área 1, as zonas a preto não identificadas apresentam uma *SINR* baixa inferior a 5 *dB*, devendo-se à falta de cobertura *LTE* como se observou na análise *RSRP*.

A zona 1 assinalada apresenta valores de *SINR* baixos, não devido à falta de cobertura mas sim à interferência que aí se verifica, veja-se o mapa *RSRQ* com os pontos a azul nesta zona. Por forma a mitigar alguma dessa interferência, uma solução pode passar por um *downtilt* das antenas que estão a incidir sobre essa área à exceção da desejada.

A zona 2 não foi assinalada anteriormente mas como se observa no mapa *RSRP*, a *SINR* é baixa devido à fraca cobertura e interferência existente.

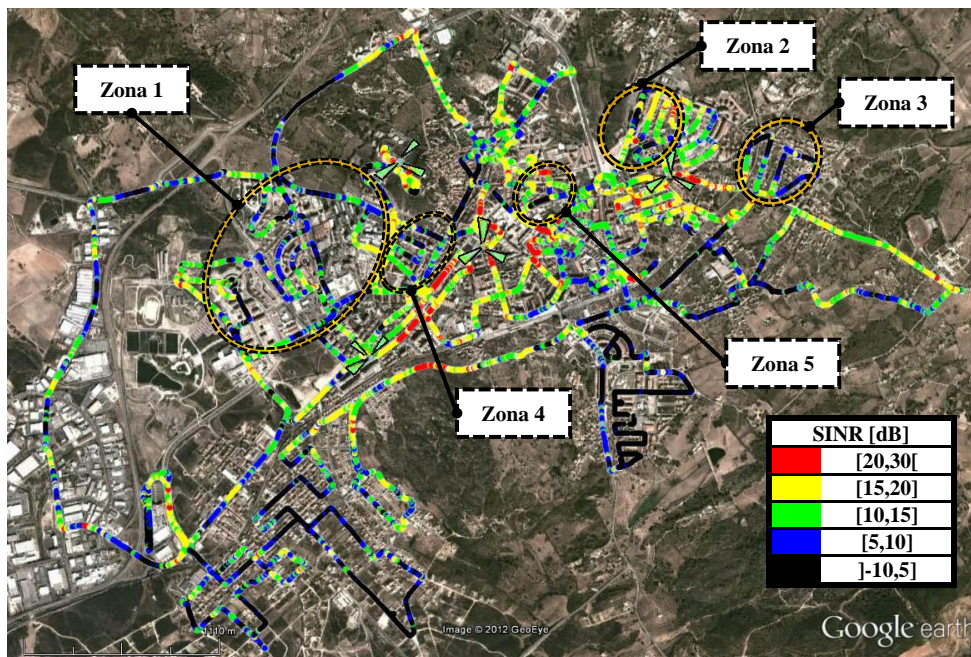


Figura 46 - Mapa com valores de SINR medidos em *Downlink* para a área 2.

A área 2 apresenta várias zonas com valores baixos de *SINR*, nomeadamente abaixo de 10 *dB*. Para as zonas que não se encontram assinaladas, em princípio, os valores de *SINR* serão melhorados com as alterações propostas, nomeadamente o aumento da cobertura *LTE*.

É de referir que o problema da zona 1, já tinha sido identificado por níveis de cobertura insuficientes e neste mapa é visível o impacto que essa insuficiência tem na *SINR*.

A zona 2, zona 3 e zona 4 apresentam problemas semelhantes, ou seja, ainda que se considerem cobertas, o nível de sinal *RSRP* é baixo, entre -105 e -115 *dBm*, refletindo-se nos valores baixos de *SINR* identificados.

A zona 5 é um caso claro de interferência entre células, como os níveis de sinal *RSRP* são elevados nesta zona (superiores a -90 *dBm*), uma análise ao mapa *RSRQ* permite observar que existe interferência, razão pela qual a *SINR* é baixa. Essa interferência será causada em princípio pela interceção das três células apontadas para esse local. Uma possível resolução do problema, de forma a mitigar a interferência é a redução dessa interceção entre células, com *downtilts* a alguns desses sectores, por exemplo.

A Figura 47 possibilita uma visão geral da distribuição dos valores de *SINR* nas áreas em estudo. A grande maioria das amostras encontra-se concentrada de 10 a 20 *dB* e reflete as condições iniciais de planeamento. No entanto, como foi referido, uma *SINR* mais elevada possibilita um débito mais elevado e a otimização destes valores é desejável, necessitando de uma deslocação do acumulado das amostras para valores de *SINR* mais elevados.

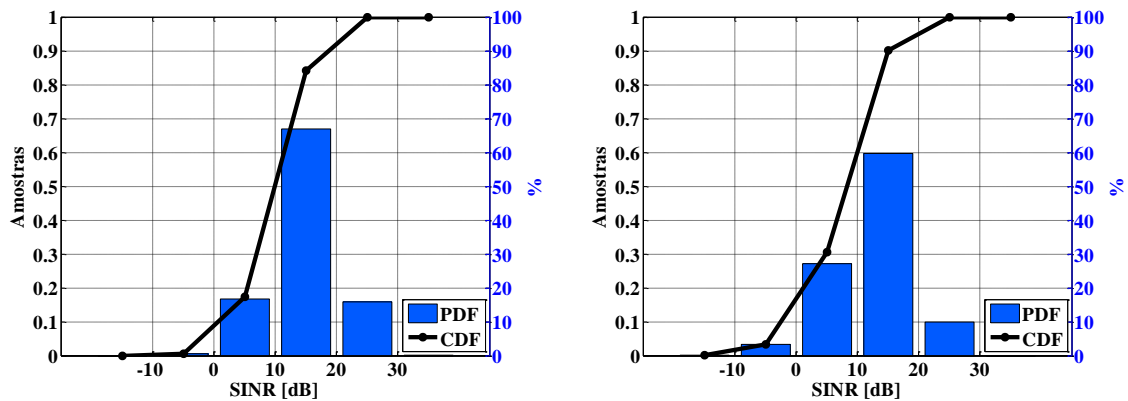


Figura 47 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para a *SINR* em *Downlink* da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

Digno de nota é a ligeira semelhança da distribuição das amostras da *SINR* com o débito binário, tal como seria de esperar. Desse modo é possível fazer uma primeira análise relacional de possíveis problemas para um débito baixo, através da *PDF* e *CDF* da *SINR* e do débito binário.

4.5.5. *BLER*

Sabendo que o *LTE* é uma rede “*all-ip*” a *BLER* em *downlink* é um indicador importante que vai condicionar o máximo débito alcançável, ou seja, a análise dos mapas da *BLER* (Figura 48 e Figura 49) faz sentido no contexto da análise da rede *LTE* em conjunção com os indicadores anteriores.

Esta análise permitir discernir grosso modo, se a causa dos erros de trama se deve à interferência ou a outras possíveis configurações de rede que devam ser alteradas, esta segunda situação requer uma análise mais profunda ao local.

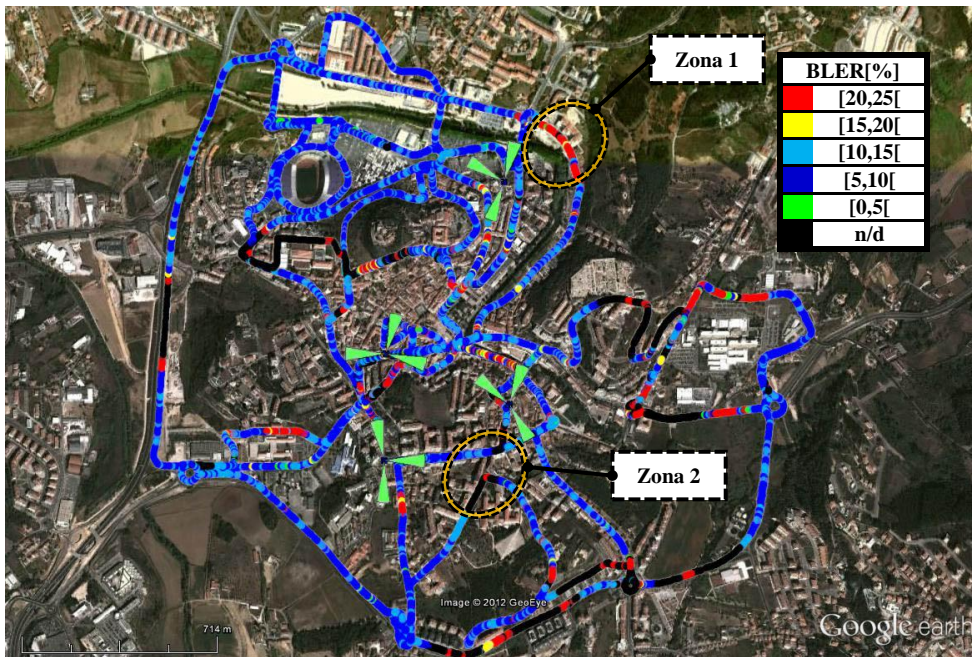


Figura 48 - Mapa com valores da BLER medidos em *Downlink* na área 1.

Na área 1 foram identificadas duas zonas, retirando aquelas em que não existia cobertura *LTE* (a preto).

A zona 1 apresenta uma *BLER* bastante elevada, uma análise ao mapa *RSRP* revela que os níveis de cobertura são aceitáveis, no entanto, o mapa da *RSRQ* deixa transparecer que existe interferência nesse local, facto confirmado pelas amostras obtidas entre os -15 e os -12 *dB*. A resolução desse problema já foi referida no subcapítulo 4.5.4.

A zona 2 assinalada é de mais difícil compreensão pois os mapas de *RSRP*, *RSRQ* e até da *SINR* não justificam uma *BLER* tão elevada. Assim, o problema pode ter passado por uma falha momentânea do equipamento ou da rede, no entanto, seria necessário uma recolha de novos dados para verificar se o problema ocorre novamente e daí investigar a situação em profundidade.

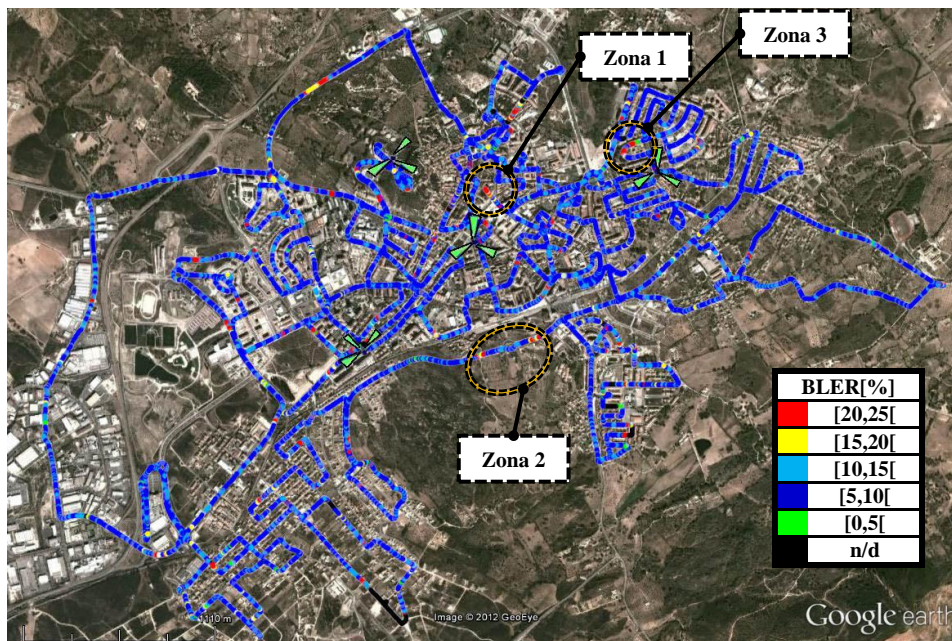


Figura 49 - Mapa com valores da BLER medidos em *Downlink* na área 2.

A área 2 apresenta uma distribuição da *BLER* entre os 0 e os 15 %, no entanto são identificadas três zonas, que devem ser alvo de atenção.

Em primeiro lugar a zona 1, tendo em conta que se situa numa zona densa pode trazer problemas se a *BLER* não baixar para valores inferiores, no entanto a causa e a resolução já foram identificadas como falta de cobertura de serviço *LTE*.

A zona 2 não parece apresentar problemas rádio, isto porque a cobertura de sinal *RSRP* considera-se aceitável e a *RSRQ* não apresenta indícios de interferência. No entanto, a *SINR* dessa zona também é baixa, refletindo-se na *BLER* também baixa. Logo não é possível obter fidedignamente a causa do problema, podendo dever-se a um problema momentâneo da adaptação da ligação ou uma configuração incorreta da rede, sendo necessário um estudo mais aprofundado, caso a situação se verifique novamente.

A *PDF* e *CDF* da *BLER* encontram-se presentes na Figura 50 para as duas áreas de estudo.

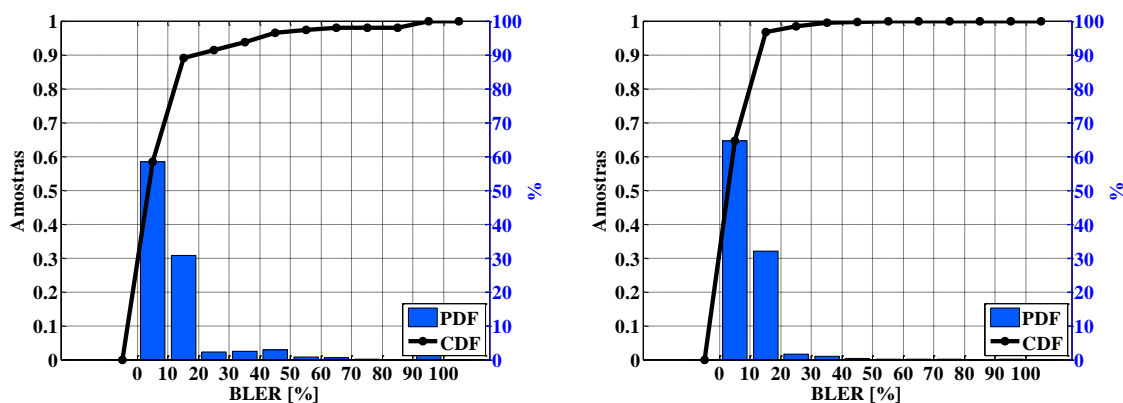


Figura 50 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada da BLER em *Downlink* da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

Das figuras anteriores é possível observar que a grande maioria dos valores de *BLER* se encontram de 0 a 10 % sendo a *target BLER* desejável para uma rede *LTE* [25]. No entanto, existe uma quantidade assinalável desses valores acima de 10 %. Através de otimização da rede e seguindo as alterações propostas nos pontos anteriores, os valores de *BLER* por norma deverão tornar-se inferiores melhorando a eficiência da rede *LTE*.

4.5.6. Resumo dos Principais indicadores apresentados em *Downlink*

Na Tabela 24 estão sintetizados os principais valores de interesse que foram possíveis de obter para os percursos em *downlink* das duas áreas, para análise do desempenho da rede.

Existe uma disparidade de amostras entre as áreas, mas esta advém das dimensões entre as duas serem diferentes, ou seja, tendo a área 2 uma dimensão superior foram recolhidos mais pontos na análise da mesma.

Tabela 24 - Estatísticas de *Downlink*.

Estatísticas <i>Downlink</i>	Área 1	Área 2
Pontos Obtidos	7494	12159
Sucesso Acessos aleatórios [%]	98,72	95,07
Sucesso <i>RRC Connect</i> [%]	100	100
Acessibilidade de serviço [%]	92,98	95,5
Número de <i>setups</i> não realizados	4	5
Tentativas de <i>Handover</i>	173	579
Sucesso dos <i>Handovers</i> [%]	99,42	99,83
<i>RSRP</i> Médio [dBm]	-90,12	-95,53
<i>RSRQ</i> Média [dB]	-9,86	-10,49
<i>SINR</i> Média [dB]	15,10	12,69
Débito Binário Médio [Mbit/s]	48,885	45,664

Débito Binário Máximo [<i>Mbit/s</i>]	100,257	99,970
Quantidade de amostras <i>QPSK</i>	698	1304
Quantidade de amostras <i>16QAM</i>	3726	8685
Quantidade de amostras <i>64QAM</i>	1124	1898
Número de amostras em <i>TM3</i>	6974	11910
Número de amostras em <i>TM2</i>	147	84
<i>PDSCH MCS0</i> Mediano	17	16
<i>PDSCH MCS1</i> Mediano	16	15
Número de amostras <i>MCS0</i>	5887	11887
Número de amostras <i>MCS1</i>	5318	11649
<i>PDSCH BLER</i> Média [%]	13,57	10,34
<i>Wideband CQI</i> Médio	9,99	10,08

Da Tabela 24 é possível que o débito binário médio para as duas áreas é semelhante, podendo-se induzir que o planeamento foi feito de maneira idêntica para as duas áreas.

O *CQI* das duas áreas também apresenta um valor semelhante, o que pode ser tido como um indicativo que as características de propagação rádio das duas áreas são semelhantes, tal como foi assumido.

4.6. Medidas em Uplink

O percurso realizado teve como foco principal o estudo da rede quando o equipamento se encontrava a transmitir dados de utilizador no sentido ascendente da ligação, ou seja, quando é gerado tráfego *UDP* do equipamento móvel para o *P-GW*.

Uma vez que o interesse principal neste percurso era a análise do desempenho da rede em *uplink*, foram obtidos em primeiro lugar os débitos binários alcançados em cada ponto onde foi efetuada cada amostra. Da mesma forma, para se ter uma perceção das condições rádio existentes, foram ainda representados os valores de nível de sinal *RSRP* e *RSRQ*. Deste modo é possível comparar o débito com a potência e a qualidade obtida na zona em questão. Além disso, é ainda representada a *SINR* (em anexo) de modo a correlacionar os ritmos binários de *uplink*.

4.6.1. Débito Binário

A Figura 51 representa num mapa de cores dos ritmos binários obtidos durante o percurso efetuado para a área 1. Ao comparar este mapa com o obtido em *downlink* observa-se que a ligação é mais robusta, ou seja, apesar do débito binário baixo, a ligação manteve-se activa durante mais tempo.

As zonas que não se encontram identificadas mas que apresentam um débito binário baixo, os seus problemas já foram identificados na análise em *downlink*, no entanto, a zona 1 identificada no mapa já apresentava um débito relativamente baixo em *downlink* mas que aqui é bastante expressivo, carecendo de uma análise em termos de condições rádio.

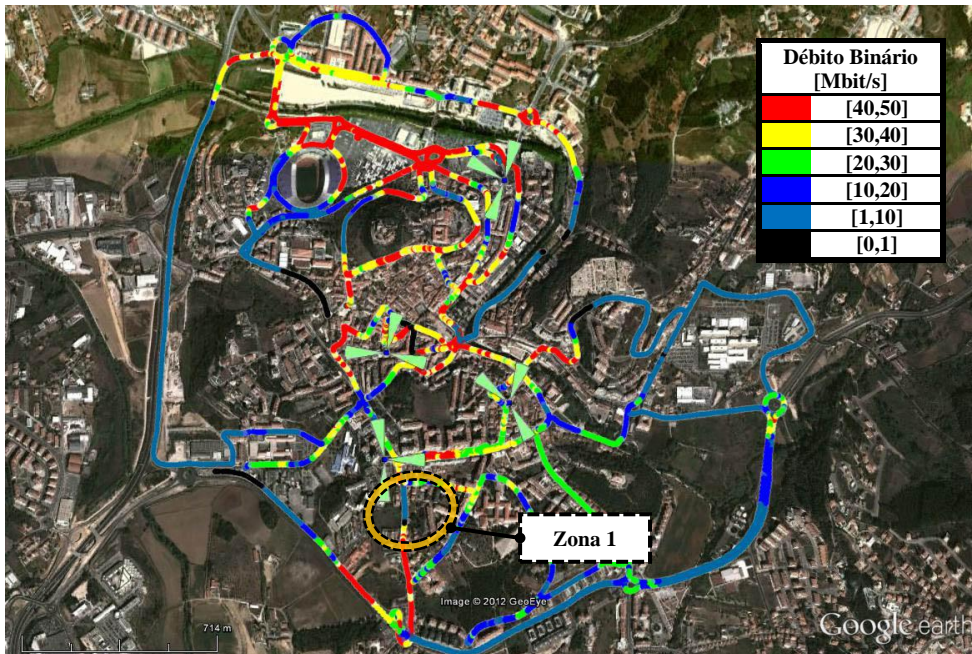


Figura 51 - Mapa com valores de débito binário medidos em *Uplink* para a área 1.

A Figura 52 representa os valores dos débitos binários obtidos na área 2, deste mapa não é possível retirar mais considerações das já retiradas na análise em *downlink*, no entanto, reforça mais uma vez a robustez da ligação em *uplink* em relação ao *downlink*, sendo esta menos afetada, induzindo que este é o sentido limitante da ligação, tal como foi assumido no planeamento para as áreas em estudo.

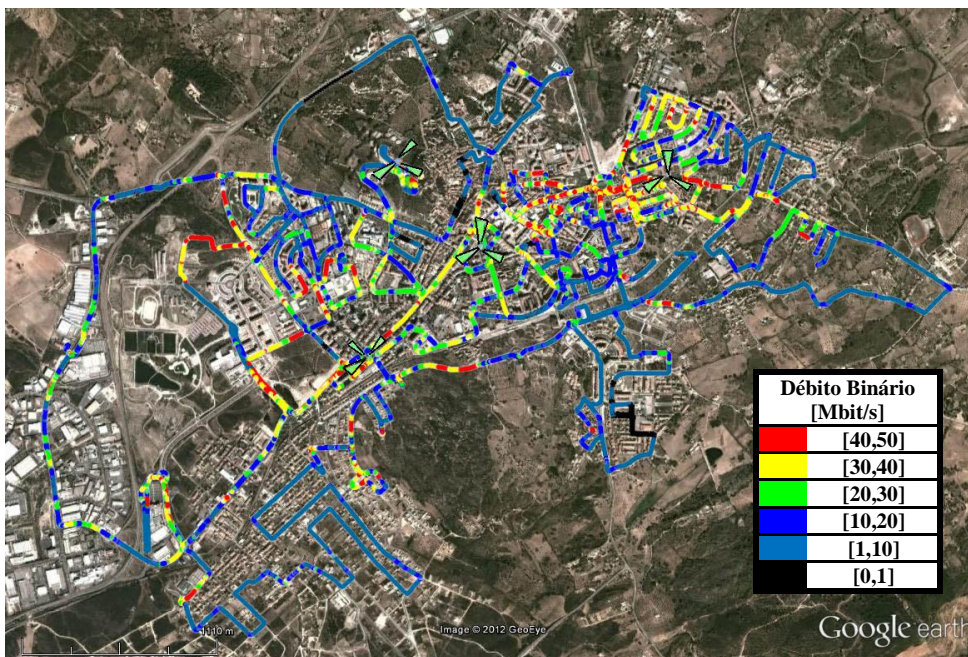


Figura 52 - Mapa com valores de débito binário medidos em *Uplink* para a área 2.

Na Figura 53 é possível observar que para a área 1, existe um grande conjunto de valores presentes no intervalo de 0 a 10 *Mbit/s*, essa concentração é facilmente explicável tendo em conta a grande quantidade de amostras obtidas na periferia da área que apresentavam débitos binários baixos, tendo em conta a distância. Na área 2 existe uma situação idêntica, reforçada pela dimensão da área.

Uma melhoria das condições de *uplink* pressupõe que as amostras obtidas sofram um melhoramento nos débitos binários, isto é, apresentem ritmos mais elevados.

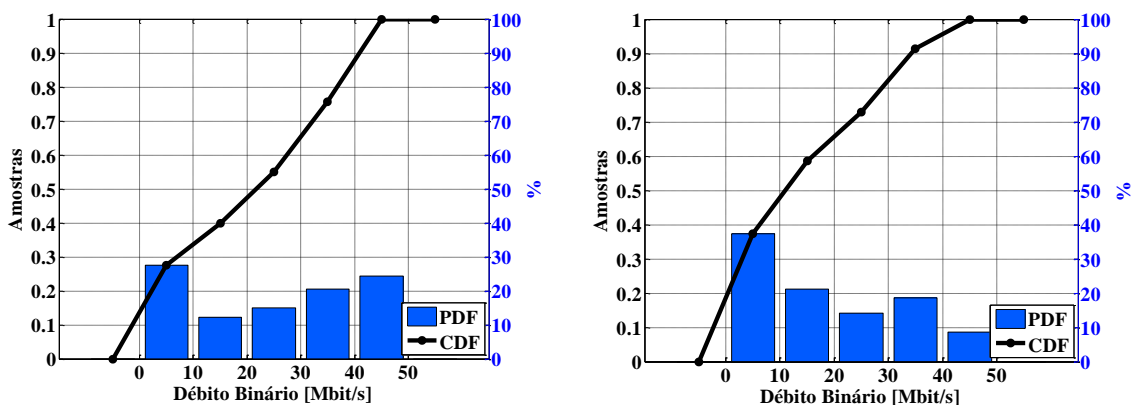


Figura 53 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada do débito binário em *Uplink* da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

4.6.2. *RSRP*

O mapa com os níveis de sinal *RSRP* permite saber qual a potência de sinal recebida pelo equipamento móvel, através destes valores é possível discernir se as causas da existência de débitos binários baixos obtidos em *uplink* se devem a uma cobertura insuficiente.

A Figura 54 e a Figura 55 representam a distribuição de sinal *RSRP* da área 1 e área 2, respectivamente. É espectável que este mapa seja semelhante ao obtido em *downlink*, no entanto, tendo em conta a natureza da propagação rádio e o ambiente em questão podem e vão existir variações nos níveis obtidos quando comparados os mapas, sendo necessário a obtenção deste mapa também para *uplink*.

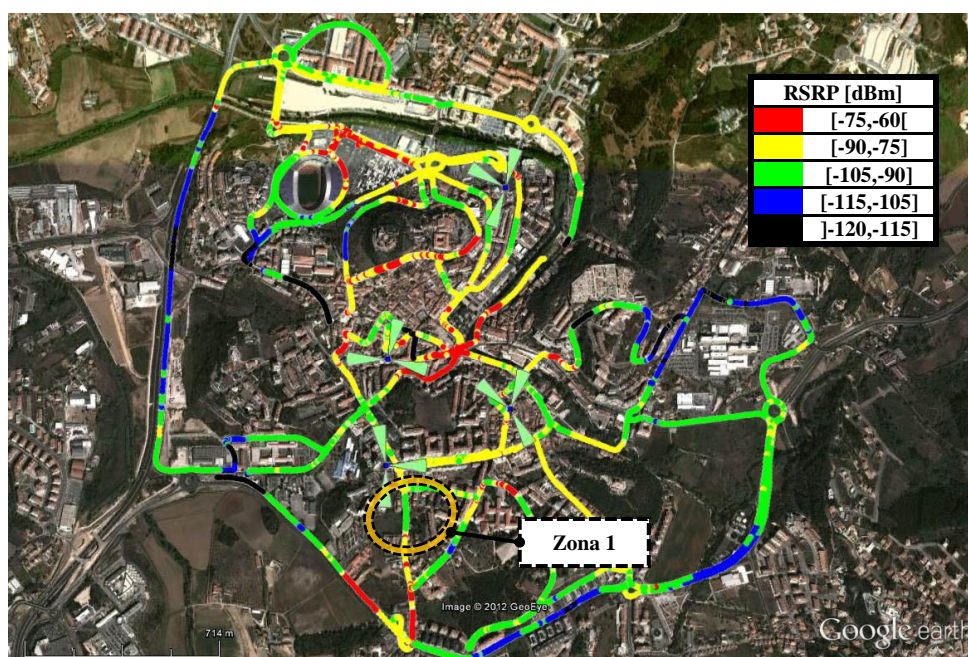


Figura 54 - Mapa com níveis de sinal *RSRP* medidos em *Uplink* para a área 1.

A análise do mapa *RSRP* revela que para a zona 1 assinalada, o nível de sinal *RSRP* é suficiente para que exista serviço *LTE*, remetendo o problema identificado como interferência entre células que condicione a correta descodificação dos dados.

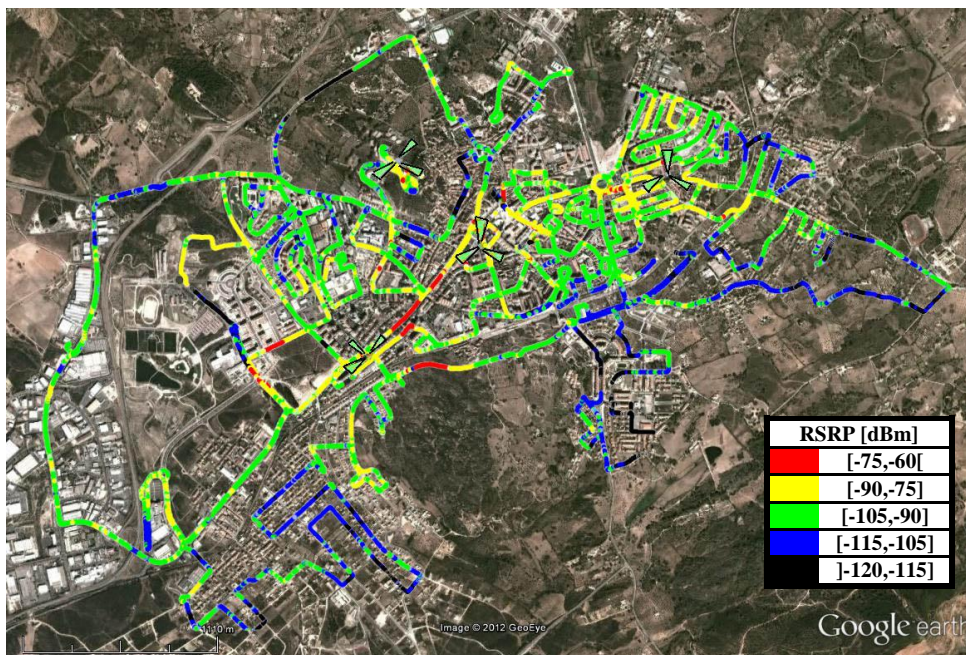


Figura 55 - Mapa com níveis de sinal RSRP medidos em *Uplink* para a área 2.

A Figura 56 apresenta o panorama geral da distribuição do sinal *RSRP* na área. A maioria das amostras encontra-se no intervalo de -90 a -105 dBm o que permite a existência de serviço com uma qualidade média na área em questão. No entanto para melhorar a qualidade de serviço, prende-se que a maioria das amostras, tirando outros fatores, esteja localizada em intervalos com melhor cobertura *RSRP*.

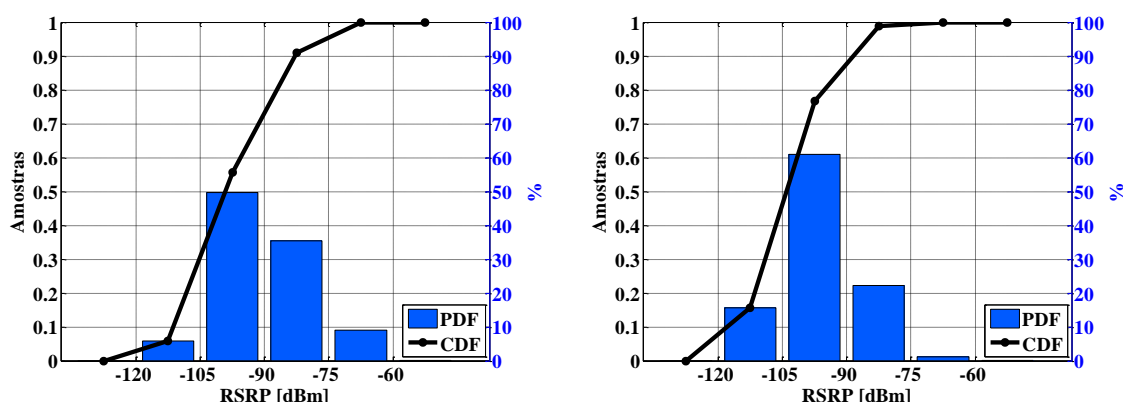


Figura 56 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para o sinal RSRP em *Uplink* da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

4.6.3. *RSRQ*

Como já foi referido a *RSRQ* representa a qualidade de sinal obtida, a Figura 57 e Figura 58 apresentam os valores registados durante o percurso feito para a área 1 e a área 2 da qualidade de sinal. Note-se que quando comparados com os mapas de *downlink* para este

mesmo indicador existe uma grande melhoria na qualidade de sinal obtida, tendo em conta que os níveis de sinal *RSRP* se mantiveram semelhantes, isto indica um decréscimo de interferência na largura de banda usada. Ora isto resulta de que não existem dados de utilizador a gerarem interferência.

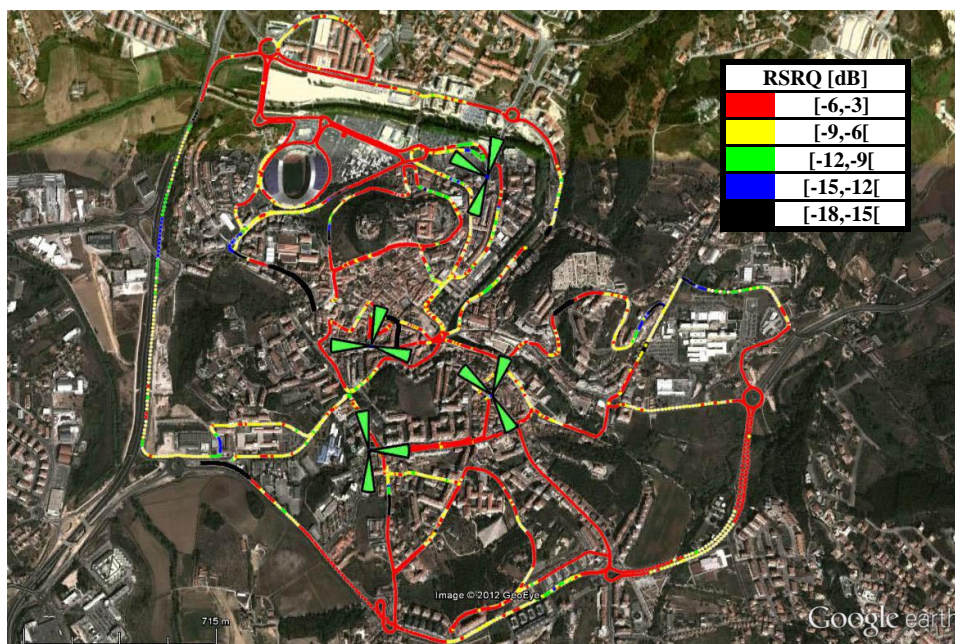


Figura 57 - Mapa com níveis de sinal RSRQ medidos em *Uplink* para a área 1.

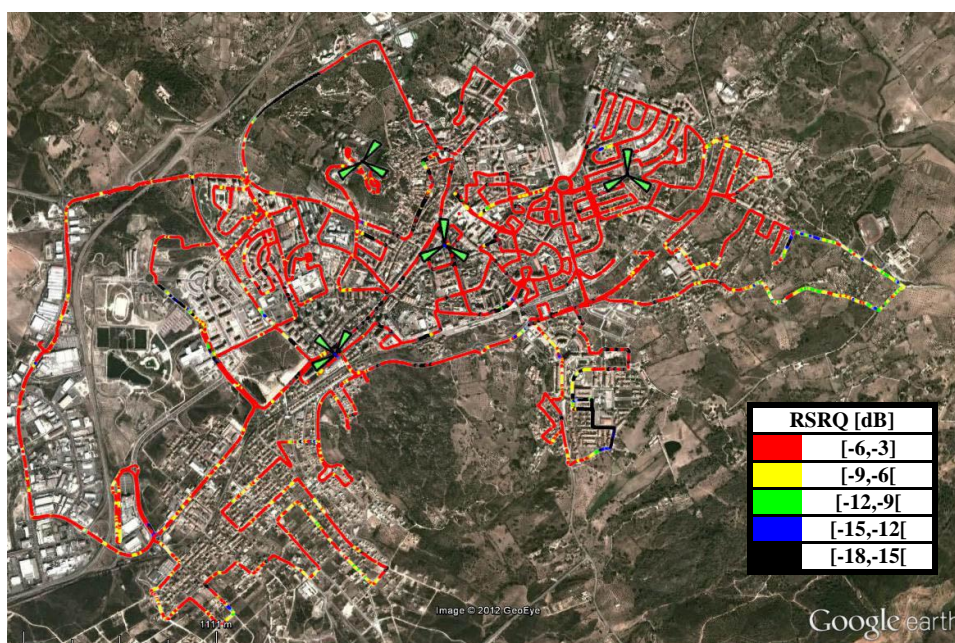


Figura 58 - Mapa com níveis de sinal RSRQ medidos em *Uplink* para a área 2.

A Figura 59 vem reforçar esta melhoria na qualidade de sinal, pois como se visualiza, o intervalo de 0 a -9 dB contém a grande maioria das amostras obtidas nas áreas em causa.

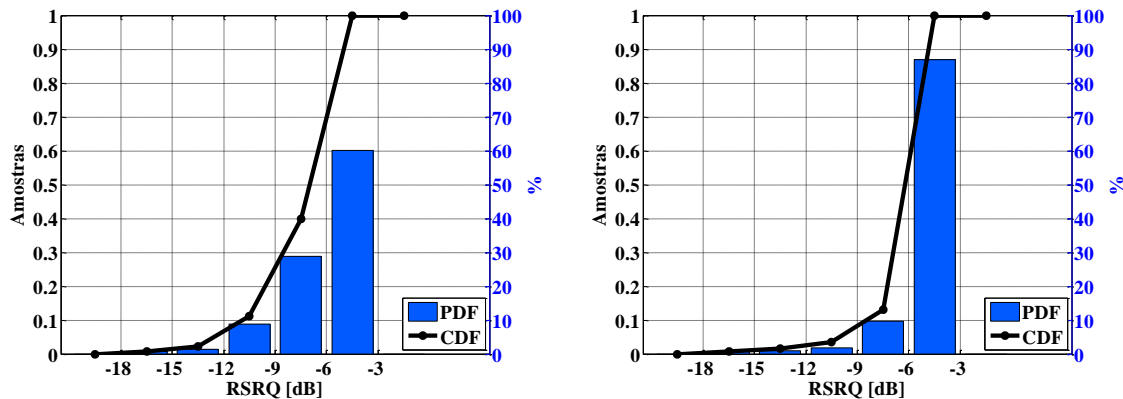


Figura 59 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para o sinal RSRQ em *Uplink* da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

4.6.4. Resumo dos Principais indicadores apresentados em *Uplink*

A Tabela 25 expõe as estatísticas dos parâmetros de interesse, do percurso efetuado para o *uplink*.

Tabela 25 - Estatísticas de *Uplink*.

Estatísticas <i>Uplink</i>	Área 1	Área 2
Sucesso Acessos aleatórios [%]	96,89	100
Sucesso RRC Connect [%]	95,71	100
Acessibilidade de serviço [%]	94,29	100
Número de <i>setups</i> não realizados	4	0
Tentativas de <i>Handover</i>	141	743
Sucesso dos <i>Handovers</i> [%]	100	100
<i>RSRP</i> Médio [dBm]	-88,48	-96,86
<i>RSRQ</i> Média [dB]	-6,97	-4,69
<i>SINR</i> Média [dB]	15,74	13,57
Débito Binário Médio [Mbit/s]	24,320	18,412
Débito Binário Máximo [Mbit/s]	48,841	48,480
Potência Transmissão Média [dBm]	21,01	24,06

Na tabela estão definidos os valores médios das características de sinal rádio obtidos. Tal como se pode observar no subcapítulo 3.5, esses valores vão de encontro àqueles dimensionados para as áreas em questão, nomeadamente a *SINR*.

Relativamente às características de mobilidade, em especial na área 2, observe-se o sucesso da grande quantidade de *handovers* efetuados, mesmo tendo em conta as dimensões consideradas.

A média do débito binário obtido ao longo do percurso, não corresponde exatamente ao dimensionado, no entanto, tal facto pode ser devido aos problemas de implementação encontrados. O máximo valor obtido é bem próximo do máximo suportado pelo *UE*.

Por outro lado, também o valor médio da potência de transmissão se encontra muito próximo do seu valor máximo, o que reflete que o equipamento estaria grande parte do percurso a emitir na potência máxima, indo diminuir a autonomia da bateria do equipamento móvel. Neste caso não foi possível analisar essa influência uma vez que o equipamento de testes se tratava de uma placa de dados sem bateria própria.

5. Desempenho

5.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo a análise de alguns indicadores relevantes e possíveis de obter da rede *LTE* estudada e comparando-os com valores teóricos obtidos no âmbito da dissertação ou estabelecidos pelo *3GPP*.

Deste modo em primeiro lugar são identificados os *KPI's* básicos de uma rede *LTE*, podendo ser adotados outros, no entanto numa rede *trial* estes consideram-se suficientes para avaliar o seu desempenho.

Seguidamente são analisadas as perdas de penetração de veículo e a eficiência espectral da rede estudada, verificando se cumpre as especificações iniciais do *3GPP*.

Tendo em conta a importância do débito binário ou *throughput* na rede *LTE*, é analisado qual o efeito das condições rádio nos valores obtidos.

Por último, tendo em conta que o *LTE* se trata de uma rede móvel, estudou-se o efeito da distância e da velocidade em alguns destes indicadores.

Para definir curvas através dos pontos obtidos foi usado o valor médio das medidas quando se julgava coerente ou a ferramenta *Matlab*, adotando o método *Robust Lowess* com um *span* de 0,7. Essa técnica obtém uma regressão linear localmente ponderada das medidas [26].

5.2. Key Performance Indicators

Numa rede móvel é necessário definir indicadores e métricas para permitir caracterizar o estado da rede e para identificar possíveis problemas, em que uma rede *LTE* não é exceção.

São identificados os indicadores básicos para a análise do desempenho do *LTE*, onde alguns podem ser comparáveis a tecnologias anteriores (*UMTS*) e outros são característicos do *LTE*.

Segundo o *3GPP* existem cinco categorias distintas para classificar os *KPI's*: acessibilidade (*accessibility*); retenção (*retainability*); integridade (*integrity*); disponibilidade (*availability*) e mobilidade (*mobility*) [27].

Relativamente às categorias apresentadas é necessário cumprir certos requisitos para que as mesmas sejam reportadas, nomeadamente na forma de medição de cada um [28].

Os *KPI's* propostos são apresentados através de uma breve descrição acerca do indicador retratado e dos problemas típicos que possam surgir derivados de falhas ou rejeições

de mensagens referentes a esses indicadores. Além disso são referidos os possíveis efeitos dos problemas retratados e a melhor forma de obter esses indicadores. Por último é ainda feita uma analogia dos *KPI's* com os usados em *UMTS* [29].

Além dos *KPI's* expostos podem ser ainda considerados contadores e *KPI's* proprietários de cada fornecedor de equipamentos.

Como nota final note-se que as categorias dos indicadores de desempenho apresentadas neste capítulo são apenas aquelas que contêm algum *KPI* recolhido e utilizado nas medidas, enquanto as restantes se encontram em anexo. É ainda de referir que os *KPI's* não utilizados nas medidas efetuadas poderão ser usados num novo estudo da rede ou de uma nova.

5.2.1. *Acessibilidade*

De modo a fornecer serviços ao utilizador é necessário em primeiro lugar estabelecer uma conexão à rede. Caso o serviço não consiga ser oferecido ao utilizador isso reflete-se numa perda de faturação, podendo levar a uma cada vez maior insatisfação por parte do utilizador e em último caso à perda do cliente.

É portanto necessário a existência de indicadores que permitam avaliar o acesso à rede e aos serviços, para tal são definidos *KPI's* de acessibilidade. Destes apenas devem ser considerados aqueles que resultam do contributo da *E-UTRAN* no acesso à rede, os quais deverão ser medidos como uma percentagem das operações bem-sucedidas [28].

Na Tabela 26 estão definidos os *KPI's* referidos.

Tabela 26 - *KPI's* de Acessibilidade.

<i>Key Performance Indicators</i>	Descrição	Problemas típicos	Efeitos dos problemas	Medição	<i>Em UMTS</i>
<i>Attach Success Ratio</i>	Razão entre <i>attach's</i> bem-sucedidos e todas as tentativas efetuadas.	Rejeição: a subscrição do utilizador não permite o acesso. Falha: problemas nos processos de acesso aleatório ou no estabelecimento de uma conexão <i>RRC</i> .	O <i>UE</i> não se consegue registar na rede e não pode utilizar quaisquer serviços.	É preferível o uso de <i>drive-tests</i> , pois do lado da rede podem não ser registadas todas as tentativas de estabelecimento	Igual.

<i>RRC Connection Establishment Success Ratio</i>	Razão entre conexões <i>RRC</i> bem-sucedidas e todas as tentativas efetuadas.	Rejeição: Caso a <i>QoS</i> das conexões anteriores não seja cumprida com o estabelecimento de novas. Falha: potência de sinal baixa; alta interferência; problemas no acesso aleatório.	O <i>UE</i> mantém-se no estado <i>Idle</i> sem acesso ao serviço pretendido.		Igual.
<i>Random Access Process Success Ratio</i>	Razão entre acessos aleatórios bem-sucedidos e todos os acessos aleatórios.	Falha: Cobertura insuficiente; nível de interferência elevado; problemas de mobilidade; alocação de recursos inadequada; parâmetros dos acessos aleatórios inadequados.	Pode levar a falhas no restabelecimento de conexões <i>RRC</i> ; falhas de <i>handover</i> .		Igual.
<i>Default EPS Bearer Establishment Success Ratio</i>	Razão entre a atribuição bem-sucedida da portadora <i>EPS</i> por defeito e do número total de atribuições da mesma portadora.	Rejeição: recursos insuficientes. Falha: problemas no acesso aleatório; cobertura deficiente; interferência elevada.	Como a portadora <i>EPS</i> não é atribuída o utilizador não tem endereço <i>IP</i> nem conexão com o <i>P-GW</i> .		Conceito idêntico ao <i>PDP context</i> , mas sem <i>KPI</i> correspondente.
<i>Dedicated EPS Bearer Establishment Success Ratio</i>	Razão entre a atribuição bem-sucedida de portadoras <i>EPS</i> dedicadas e do número total dessas portadoras.	Rejeição: recursos insuficientes; erros nos identificadores; serviços não suportados. Falha: problemas nas camadas inferiores.	O serviço correspondente à portadora dedicada não é atribuído ao <i>UE</i> , deixando de existir garantias de <i>QoS</i> na transferência.		<i>PDP context establishment success ratio</i>

5.2.2. Integridade

Esta medida de desempenho permite ao operador avaliar a qualidade das ligações oferecidas, além disso o serviço a analisar deverá ser a entrega de pacotes *IP*.

Sabendo que a qualidade da ligação tem uma influência direta na satisfação do utilizador, ou seja, débitos binários baixos ou a latência demasiado alta são indesejáveis podendo até estar frequentemente abaixo do serviço contractado.

Logo, são necessários *KPI's* que permitam conhecer o estado da qualidade das ligações efetuadas. Caso estes apresentem problemas cabe ao operador apresentar soluções de modo a melhorar a *QoS*.

Na Tabela 27 apresentam-se os indicadores mais importantes para avaliar a integridade das conexões. De referir que na tabela não se indicou o *PMI* como *KPI*, no entanto caso estejam em operação os modos 4, 5 e 6 este é necessário considerar como indicador [10].

Tabela 27 - *KPI's* de Integridade.

<i>Key Performance Indicators</i>	Descrição	Problemas típicos	Efeitos dos problemas	Medição	<i>Em UMTS</i>
<i>RSRP Level of the Best Available Cell</i>	Nível do sinal <i>RSRP</i> da célula com o valor mais elevado.	Baixo nível de sinal <i>RSRP</i> : número de células na rede insuficiente; posição das antenas; ambiente de propagação.	Falhas nas ligações rádio; problemas de <i>handovers</i> ; <i>throughputs</i> baixos e inexistência de serviço.	Através de <i>drive-tests</i> com <i>scanner</i> ou com <i>UE</i> . É possível à rede pedir as medidas feitas no <i>UE</i> mas localização das mesmas é bastante imprecisa.	<i>Received Signal Code Power (RSCP)</i> .
<i>RSRQ Level of the Best Available Cell</i>	Nível do sinal <i>RSRQ</i> da célula com o valor mais elevado.	Baixo nível de sinal <i>RSRQ</i> : nível de sinal <i>RSRP</i> baixo; interferência elevada.	Um nível baixo do sinal <i>RSRQ</i> cria problemas semelhantes a um baixo nível de sinal <i>RSRP</i> .	Feito da mesma forma que o sinal <i>RSRP</i> .	Energia por <i>chip</i> do canal piloto dividida pela densidade de potência do ruído (<i>Ec/No</i>).
<i>SINR Level of the Serving Cell</i>	Relação sinal ruído mais interferência obtida por <i>TTI</i> ou média.	<i>SINR</i> baixa: má cobertura e/ou interferência elevada.	Uma <i>SINR</i> baixa reflete-se diretamente no débito binário oferecido podendo levar a problemas na ligação.	Através de <i>drive-tests</i> para o <i>downlink</i> e das estatísticas de rede em <i>uplink</i> .	Igual.

<i>BLER Level of the Serving Cell</i>	Relação entre o número de blocos errados e o número total de pacotes transmitidos.	<i>BLER</i> elevada: baixa qualidade de sinal; problemas nos equipamentos.	Taxa de erros elevada: aumento das retransmissões; latência elevada; débitos binários baixos.	Através de <i>drive-tests</i> para o <i>downlink</i> e das estatísticas de rede em <i>uplink</i> .	Igual.
<i>CQI Index of the Serving Cell</i>	Indicador da qualidade do canal reportado pelo <i>UE</i> .	Apresenta um comportamento semelhante ao da <i>SINR</i> . Podendo ser usado para despiste de problemas.	Valores de <i>CQI</i> baixos: também débitos baixos.	Através de <i>drive-tests</i> ou das estatísticas de rede. Através de <i>drive-tests</i> ou das estatísticas de rede.	Igual.
<i>RI of the Serving Cell</i>	Indicador com o número de camadas espaciais suportadas na transmissão.	Se <i>RI</i> se mantiver durante demasiado tempo a 1: pode indicar desperdício de capacidade pois apenas se utiliza um domínio espacial.			Igual.
<i>Number of RRC Connection Establishments and Active RRC Connections</i>	Contabiliza as mudanças de estado de <i>idle</i> para <i>connected</i> e as conexões ativas.	Utilizadores que realizam tráfego constantemente e sempre conectados: número elevado de conexões ativas e baixo de novas conexões. Utilizadores esporádicos: número elevado de conexões ativas e baixo de tentativas.	Um número elevado de novas conexões pode causar atraso/falha nos acessos aleatórios ou falhas no estabelecimento de conexões <i>RRC</i> . Caso as conexões ativas excedam limite do <i>eNB</i> o <i>QoS</i> degrada-se para alguns utilizadores.		Semelhante, com a ressalva da existência de mais estados definidos.
<i>Cell-Specific Load</i>	Definida como a razão entre o número de recursos alocados e o número total.	Carga da célula elevada: grande número de utilizadores; tipos de serviço exigentes; más condições rádio por utilizador.	Controlo de admissão rejeita novas ligações, diminui a qualidade das existentes ou pode cancelar alguma das ligações ativas.	A carga da célula é obtida pelas estatísticas da rede.	Semelhante, no entanto define-se como o número de códigos dedicados e não de <i>RB</i> 's.

<i>Throughput</i>	Débito binário por utilizador, de uma célula em particular ou de toda a rede.	Débito binário baixo pode dever-se a: Má qualidade de sinal, carga elevada na rede, características do terminal, restrições impostas, problemas de mobilidade, <i>backbone</i> da rede com baixa capacidade ou apenas por pouca utilização dos recursos.	Um débito binário mais baixo que o pretendido é imediatamente perceptível pelo utilizador refletindo-se na <i>QoS</i> . O débito binário da rede é uma importante métrica para avaliação do desempenho geral.	O débito binário do utilizador pode ser obtido através de <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas da rede. O tráfego das células apenas pode ser obtido pelas estatísticas.	Igual.
<i>Modulation and Coding Scheme</i>	As modulações e codificações (<i>MCS</i>) utilizadas.	<i>MCS</i> de baixa ordem: baixa <i>SINR</i> no recetor; problemas de mobilidade podem afetar negativamente a <i>SINR</i> .	A <i>MCS</i> usada tem um impacto direto no <i>throughput</i> . Modulações de baixa ordem não oferecem débitos binários elevados.	Podem ser obtidas por <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas de rede.	Igual.
<i>User Plane Latency</i>	A latência no plano do utilizador é definida usualmente como o <i>RTT</i> .	Latência elevada pode ter origem em seis pontos: -Processamento (<i>UE</i> e <i>eNB</i>); -Transmissão (<i>downlink</i> e <i>uplink</i>); -Escalonamento (pedido e admissão); -Retransmissão; - <i>Core</i> da rede; -Localização do <i>P-GW</i> .	A latência elevada afeta particularmente os serviços de tempo real com condições exigentes, afetando a qualidade de serviço.	O <i>RTT</i> pode ser medido através de <i>drive-tests</i> .	Igual.

5.2.3. Mobilidade

Tendo em conta que o *LTE* se trata de uma rede móvel, é necessário que existam medições referentes ao desempenho de um *UE* em movimento, nomeadamente nos *handovers* efetuados e no modo de os efetuar.

Os efeitos ao nível de negócio são idênticos aos *KPI's* de retenção, ou seja, se existirem falhas ou quebras na ligação, isso reflete-se na *QoS* e na satisfação do utilizador. No entanto é necessário considerar a sua diferenciação pois originam de problemas distintos.

Na Tabela 28 apresentam-se os *KPI's* de mobilidade mais importantes.

Tabela 28 - *KPI's* de Mobilidade.

Key Performance Indicators	Descrição	Problemas típicos	Efeitos dos problemas	Medição	Em UMTS
<i>Number of Handovers</i>	Contabiliza o número de <i>intra</i> e de <i>inter handovers</i> .	A quantidade de <i>handovers</i> depende de: Área das células, nível de sinal, mobilidade, parâmetros de <i>handover</i> .	Como no <i>LTE</i> apenas existem <i>hard handovers</i> , chegada dos pacotes ao novo destino pode provocar atrasos afetando o <i>QoS</i> dos serviços. Além do mais, os <i>handovers</i> consomem recursos de sinalização.	Pode ser medido por <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas da rede.	Igual.
<i>Ping-Pong Handover Ratio</i>	A razão entre <i>handovers</i> “ <i>ping-pong</i> ” de células adjacentes e o número total de <i>handovers</i> .	O número elevado deve-se usualmente a um processo de <i>handover</i> demasiado rápido, falta de uma célula dominante e listas de vizinhas ineficazes.	De evitar pois não trazem nenhuma vantagem e consomem recursos de sinalização.		Igual.
<i>Time In the Best Cell</i>	Definido como a percentagem de tempo que o <i>UE</i> se encontra na célula com melhor <i>RSRP</i> .	Se o processo de <i>handover</i> for moroso ou a mobilidade for elevada este valor torna-se baixo.	Tempos baixos identificam utilizadores que estão ligados mais tempo a <i>eNB's</i> com um <i>path-loss</i> maior, levando ao aumento da interferência na rede.		Igual.

<i>Intra-LTE Handover Success Ratio</i>	Razão entre o número de <i>intra-handovers</i> e o número de <i>handovers</i> total.	Percentagem baixa: rejeição pelo controlo de admissão e congestão devido a uma carga elevada; medidas e comando para <i>handover</i> podem falhar devido a uma baixa qualidade de sinal; <i>timer</i> de <i>handover</i> chega ao fim antes de existir conexão.	Falha nos <i>handovers</i> pode levar a um decréscimo da qualidade de sinal e à queda de ligação se o nível de sinal continuar a piorar.		Semelhante, tendo em conta que em <i>UMTS</i> existem <i>hard e soft handovers</i> .
<i>Handover Delay (Detach Delay)</i>	Contabiliza o tempo que o <i>UE</i> não está conectado à rede durante o processo de <i>handover</i> .	O atraso depende tipicamente de problemas no acesso aleatório.	Quanto maior a interrupção da ligação maior a degradação do <i>QoS</i> .		Semelhante para os <i>hard handovers</i> , os <i>soft handovers</i> não apresentam atraso.

5.3. Perdas de penetração de Veículo

A obtenção destas medidas teve como único intuito comparar qual o impacto da localização do *UE* dentro do veículo, ou seja, analisar as perdas de penetração em termos de nível de sinal *RSRP* e outras diferenças significativas. Caso as perdas de penetração sejam demasiado elevadas pode levar a que exista uma perda assinalável no desempenho, nomeadamente pela diminuição do valor da *SINR*.

Para esse efeito, foi definido um percurso em que numa primeira abordagem o equipamento se encontrava dentro do veículo (como ocorreu em todos os testes) e numa segunda abordagem foi efetuado o mesmo percurso, mas com o *UE* localizado no exterior do veículo.

Estes testes foram realizados na área 2 e o trajeto realizado está presente na Figura 60. Os percursos foram feitos de modo a que existisse o mínimo de erro entre eles.

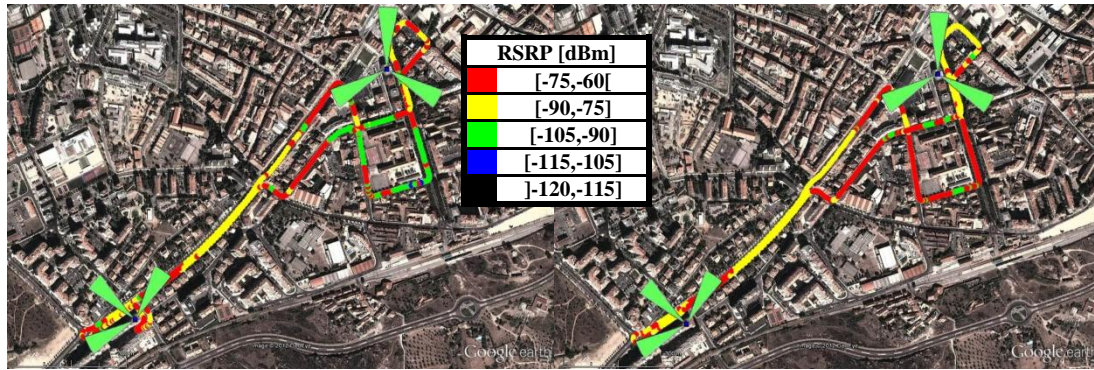


Figura 60 - Percurso com o UE dentro (à esquerda) e fora do veículo (à direita)

Na Figura 61 mostra-se o nível de sinal *RSRP* para as duas situações referidas, estes gráficos foram obtidos tendo em conta as coordenadas de cada ponto, ou seja, apenas estão representados os pontos para os quais as coordenadas coincidem. Desta forma, os erros derivados da diferença existente entre os dois percursos são minimizados, descartando os erros de precisão de *GPS*. Note-se que esse valor é aplicável para uma distância máxima de aproximadamente 450 metros (meia distância entre os dois *eNB*'s).

Portanto, observa-se na Figura 61, que a maior diferença obtida de acordo com as regressões lineares dos níveis de sinal *RSRP* de cada percurso é de aproximadamente 2,14 dB.

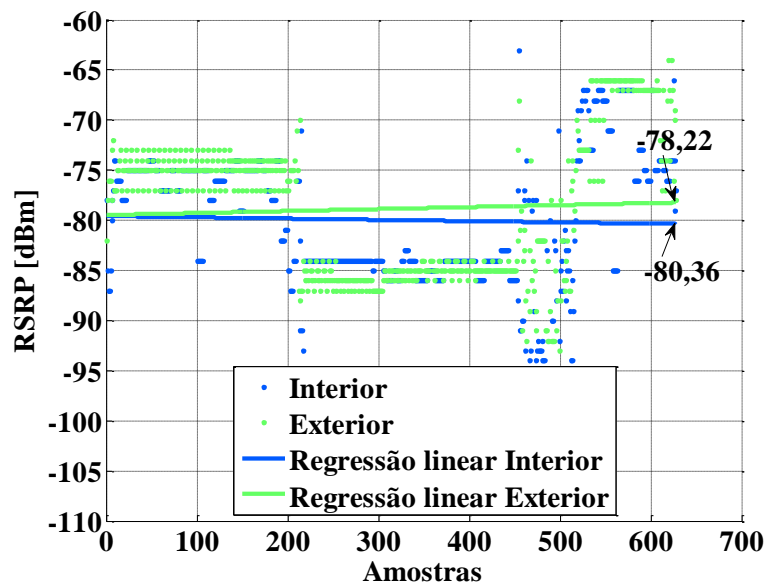


Figura 61 - Nível de Sinal *RSRP* para o percurso interior e exterior ao veículo

A Tabela 29 apresenta as diferenças entre os dois percursos em termos de valores médios. A diferença média entre os parâmetros analisados é de aproximadamente 2,7 dB. Além disso, note-se que apesar de existir diferença na velocidade média dos dois percursos, esta pode ser considerada semelhante.

Tabela 29 - Valores Médios das medidas Dentro e Fora do Veículo.

Parâmetros	Dentro do Veículo	Fora do Veículo
<i>RSRP</i> Médio [dBm]	-82,26	-79,56
<i>RSRQ</i> Média [dB]	-8,28	-10,83
<i>SINR</i> Média [dB]	17,57	14,76
Velocidade Média [km/h]	27,936	35,14

As consequências em termos de desempenho são visíveis em termos da *SINR*, no entanto é uma diferença de 2,81 dB, da mesma ordem que a diferença dos níveis de sinal. Tal facto não leva a crer que exista uma perda significativa no desempenho da ligação.

5.4. Eficiência espectral

Um dos *targets* do *LTE* era o de apresentar uma eficiência espectral, em *downlink*, de três a quatro vezes superior ao *High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)* e de duas a três vezes superior ao *High Speed Uplink Packet Access (HSUPA)*, em *uplink* [2]. Torna-se então importante analisar a eficiência espectral obtida e se cumpre os requisitos propostos.

Sabendo que a eficiência espectral é dada pelo débito binário obtido a dividir pela largura de banda utilizada, a Figura 62 apresenta as eficiências espectrais para *downlink* e *uplink* entre quatro elementos.

Em primeiro lugar, é visível a eficiência espectral para *HSDPA* e *HSUPA*, seguidamente observa-se a eficiência espectral obtida nas medidas e a média obtida entre vários fornecedores de equipamento [30] [31]. Por último a eficiência espectral alcançável tendo em conta um equipamento de categoria 3 e uma largura de banda de 20 MHz.

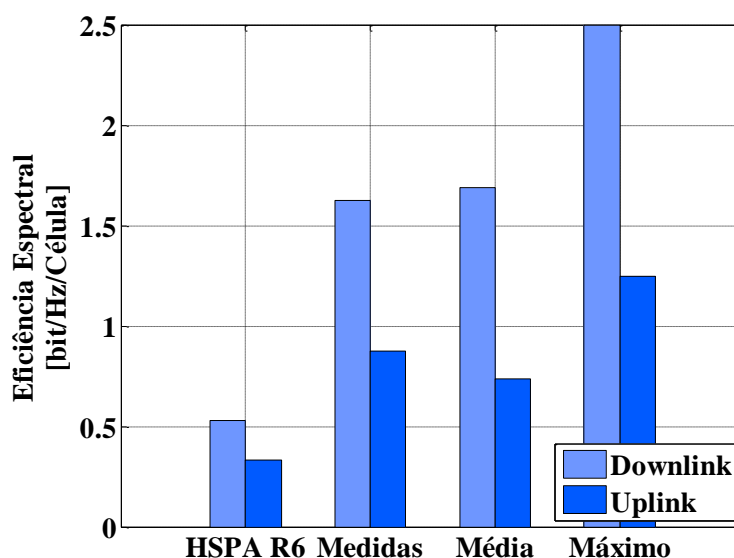


Figura 62 - Comparação entre as diferentes eficiências espectrais

Da figura é possível identificar que a rede estudada cumpre os requisitos do *LTE*, com uma eficiência espectral, relativamente ao *HSPA Release 6*, de 3,06 vezes superior em *downlink* e de 2,65 superior em *uplink*.

Pode ser ainda referido que a rede *LTE* analisada apresenta um desempenho superior em *uplink* relativamente à média dos diversos fornecedores de equipamento.

5.5. *Throughput*

Uma vez que o *throughput* indica a quantidade de informação que um utilizador pode receber/enviar durante um certo período de tempo, este reflete-se imediatamente numa melhor qualidade de serviço o quanto maior for.

Neste subcapítulo são analisadas as restrições impostas ao débito binário, tendo em conta os níveis e qualidade de sinal. Sabendo a importância da *SINR* na determinação da modulação e conseqüentemente do débito binário máximo obtido, é também estabelecida uma relação entre essa e o *throughput* por utilizador.

Uma vez que o *CQI* é mapeado segundo o valor obtido da *SINR*, é também de interesse analisar o débito binário oferecido em relação ao *CQI* reportado.

Por último, é examinado o impacto da *BLER* no débito binário máximo.

5.5.1. *RSRP e RSRQ*

Apesar da *SINR* ser a medida que determina o débito binário máximo, esta depende da potência do sinal que chega efetivamente ao móvel e da interferência existente. Desse modo observa-se na Figura 63, o *throughput* em relação ao nível de sinal *RSRP* e *RSRQ*, em *downlink*.

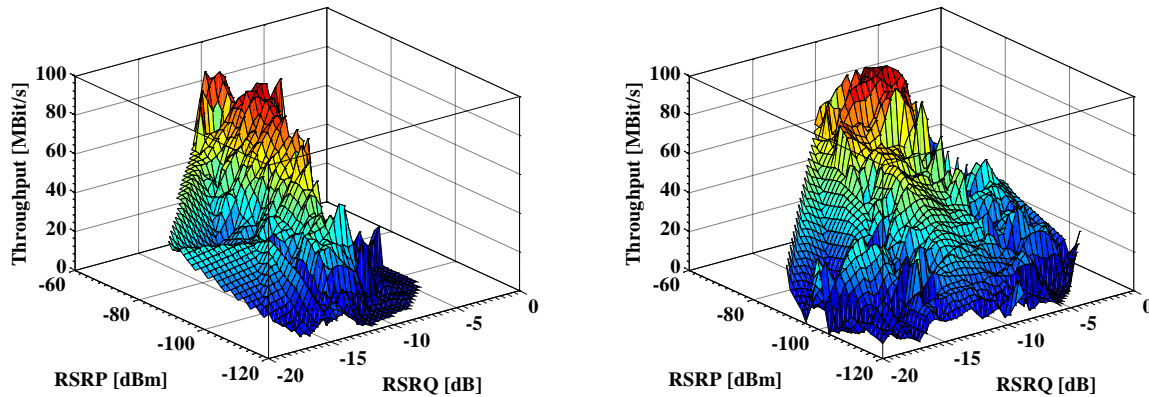


Figura 63 – Débito binário em *downlink* em relação ao nível de sinal *RSRP* e *RSRQ* para a área 1 (esquerda) e área 2 (direita).

Da figura é possível identificar que os valores de débito elevado em *downlink* existem apenas quando o nível de sinal *RSRP* é superior a -100 dBm e a qualidade de sinal (*RSRQ*) é superior a aproximadamente 12 dB .

Na Figura 64 é feita a mesma comparação mas neste caso para *uplink*. O comportamento do débito binário neste caso assemelha-se ao obtido em *downlink*.

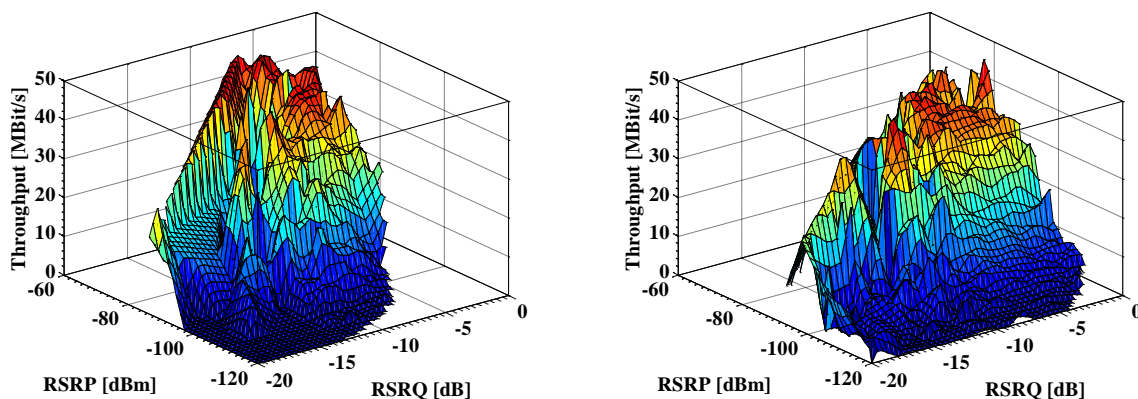


Figura 64 – Débito binário em *uplink* em relação ao nível de sinal *RSRP* e *RSRQ* para a área 1 (esquerda) e área 2 (direita).

Pode-se induzir que as características do *scheduler* são análogas nos dois sentidos, pois os valores máximos são obtidos quando as condições rádio são semelhantes.

Seria de supor que quanto menores os valores de $RSRQ$, maiores ou iguais fossem os débitos binários, mas tal não se observa no gráfico, porque simplesmente houve poucas ocorrências para se fazerem reflectir.

Tendo a noção que existe uma correlação entre o sinal $RSRP$ e o Qos do utilizador, na Figura 65 pretende-se definir três categorias de qualidade de serviço relativamente ao nível de cobertura de sinal $RSRP$, caso não exista uma grande carga na célula.

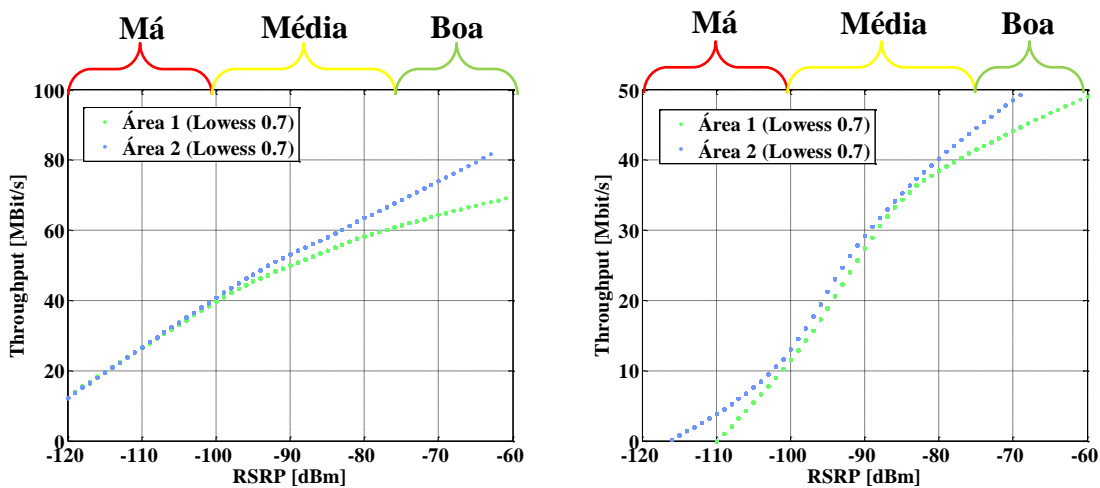


Figura 65 – Débito binário em relação ao nível de sinal $RSRP$ para *downlink* (esquerda) e *uplink* (direita).

Sabendo que a medição do $RSRP$ não considera a interferência existente, as categorias são definidas tendo em conta os resultados obtidos e para os tipos de área em estudo, ou seja, Urbano Denso. Desse modo a sugestão destas categorias para o nível de sinal $RSRP$ é tida como uma primeira tentativa de definição de qualidade de serviço mediante as condições rádio e não deve ser levado como único indicador.

A primeira categoria considerada é a da má qualidade de serviço, para $RSRP$ menor que -100 dBm, onde é expectável que existam quedas de serviço e erros na ligação. Os débitos máximos serão de cerca de 40 e de 10 Mbit/s para *downlink* e *uplink*, respectivamente.

A segunda categoria considera que existe uma qualidade de serviço média. O nível de sinal $RSRP$ neste caso é de -100 dBm a -75 dBm, com um *throughput* máximo de aproximadamente 70 Mbit/s em *downlink* e 40 Mbit/s para *uplink*.

Para um nível de sinal $RSRP$ superior a -75 dBm é esperada a melhor qualidade de serviço, desde que a interferência não seja alta, nem existam muitos utilizadores a usar os recursos da célula, considerando uma categoria de boa qualidade de serviço.

As diferenças entre as duas curvas não são muito significativas, no entanto indicam que a área 1 sofre de mais interferência pois a transmissão deixou de ocorrer com um nível de sinal superior e o desempenho nesta é ligeiramente inferior.

Note-se ainda que no *downlink* com um nível de *RSRP* de -120 *dBm* ainda existe transmissão, mas no *uplink* esta deixa de ocorrer quando o nível de sinal *RSRP* é de aproximadamente -110 *dBm*. Desta constatação observa-se que o *uplink* é o sentido limitativo da ligação, como inicialmente se assumiu no planeamento.

5.5.2. *SINR*

Sendo a *SINR* o indicador que vai condicionar o débito máximo, é importante a sua análise de modo a relacionar estas duas grandezas. Deste modo é possível analisar uma rede e na comparação entre o comportamento destes dois valores identificar ou excluir possíveis problemas, tal como foi feita nas análises presentes no capítulo 4.

Na Figura 66 está presente o *throughput* obtido para *downlink* nas duas áreas em função do *RSRP* e da *SINR*. Tal como foi definido anteriormente, é possível observar que para níveis de sinal superiores a -75 *dBm* os débitos binários são bastante próximos do máximo. No entanto é também necessária uma *SINR* elevada para que tal aconteça.

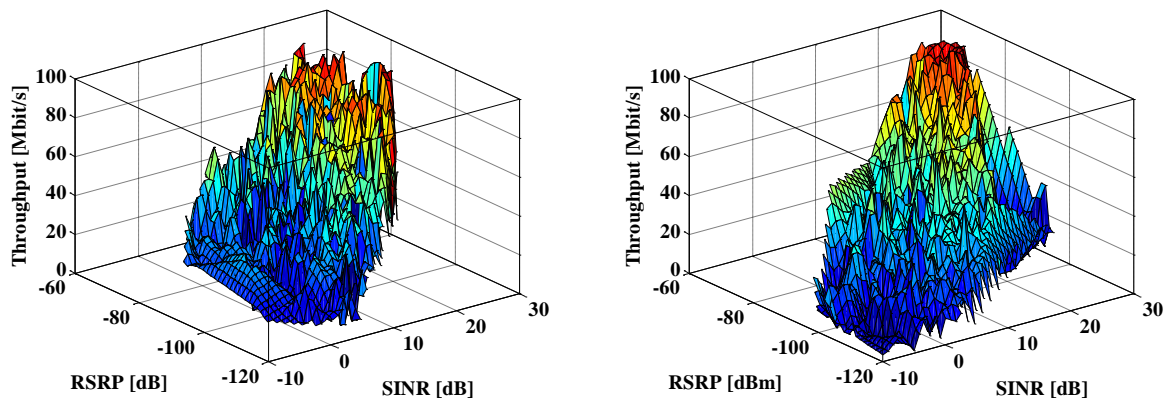


Figura 66 – Débito binário em relação ao nível de sinal *RSRP* e *RSRQ* para a área 1 (esquerda) e área 2 (direita).

A Figura 67 pretende comparar o débito binário obtido em função da *SINR* com o limite de *Shannon* dado pela equação (3.1) e com a equação (3.7) usada no planeamento.

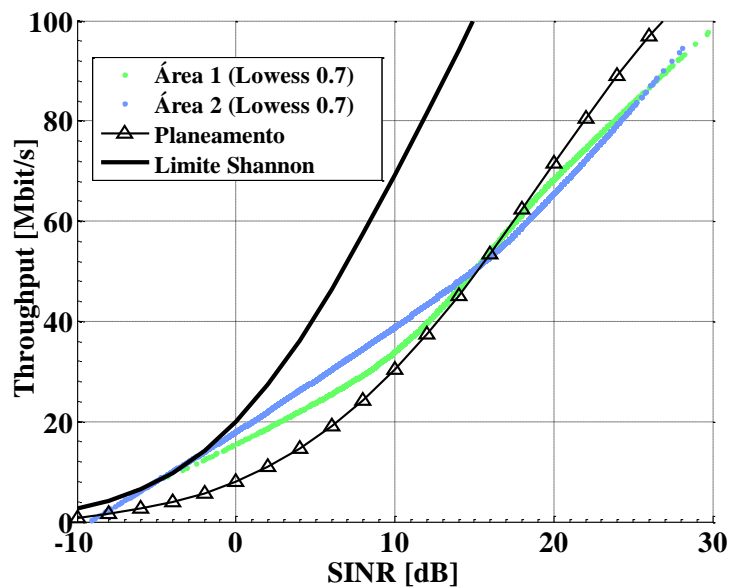


Figura 67 - Débito binário em função da *SINR* instantânea.

Como se observa é possível ver que para a largura de banda de 20 MHz considerada, para o mesmo débito binário existe uma diferença de implementação máxima de 12 dB em relação ao limite de *Shannon*. No entanto, relativamente ao planeamento, a curva identificada é bastante semelhante para valores de *SINR* superiores a 10 dB, abaixo deste valor os resultados obtidos superam o desempenho assumido pela equação (3.7).

Note-se ainda a coincidência do valor de *SINR* a 18 dB, valor esse que foi assumido no dimensionamento de capacidade e que se revela como tendo o mesmo desempenho no *throughput*.

Da Figura 67 é ainda possível definir um intervalo de valores de *SINR* para as três categorias identificadas na cobertura. Assim sendo, para uma boa qualidade de serviço é esperada uma *SINR* superior a 20 dB. Relativamente à qualidade de serviço média os valores de *SINR* situam-se entre 10 a 20 dB. Por último para valores inferiores a 10 dB a qualidade de serviço piorou, à qual se atribui a classificação de má.

Numa tentativa de relacionar também os intervalos das categorias identificadas, para a *RSRQ*, mostra-se a Figura 68 de modo a identificar os intervalos que dão origem aos intervalos de *SINR* definidos.

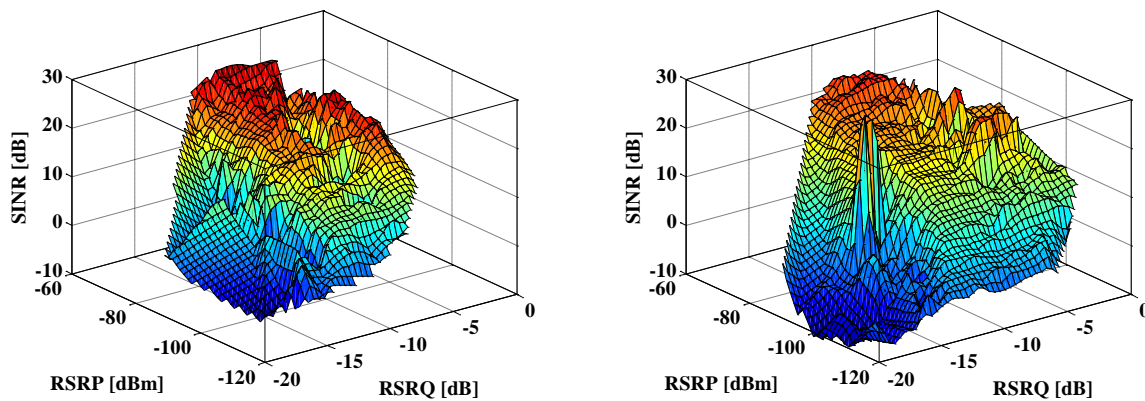


Figura 68 - $SINR$ em função do sinal $RSRP$ e $RSRQ$ para a área 1 (esquerda) e área 2 (direita)

Deste modo, tendo já estipulado os intervalos para os valores de $RSRP$ e da $SINR$ podem-se atribuir valores *a priori* aos intervalos $RSRQ$. Isto porque a rede não se encontrava carregada no *trial*, existindo apenas um utilizador a usufruir da rede, ou seja, o comportamento da interferência ainda é um pouco desconhecido numa rede com mais utilizadores.

No entanto, de acordo com os resultados obtidos para uma qualidade de serviço boa é necessária uma $RSRQ$ superior a -10 dB, para média entre -10 a -15 dB e uma $RSRQ$ inferior a -15 dB representa uma má qualidade de serviço.

Ainda em relação à $SINR$, é possível identificar os MCS mapeados pelo *scheduler* por valor de $SINR$. Essa relação está presente na Figura 69. A modulação $64-QAM$ é usada quando os valores de $SINR$ são superiores a 15 dB. A modulação $16-QAM$ é utilizada quando a $SINR$ se encontra entre este último valor e é superior a aproximadamente 5 dB. Para valores inferiores é usada a modulação menos exigente, ou seja, $QPSK$ que permite que o *Error Vector Magnitude (EVM)* seja maior.

Tal como seria de esperar nas condições em que a potência do sinal é menor, a probabilidade dos erros aumenta, daí a necessidade de reduzir o MCS de forma a aumentar os *bits* de controlo das tramas e/ou diminuir a modulação.

Essa técnica é conhecida como *Adaptive Modulation and Coding (AMC)* e o uso desta técnica tem como objectivo manter a $BLER$ abaixo dos 10%, para que as retransmissões se mantenham num nível aceitável [32].

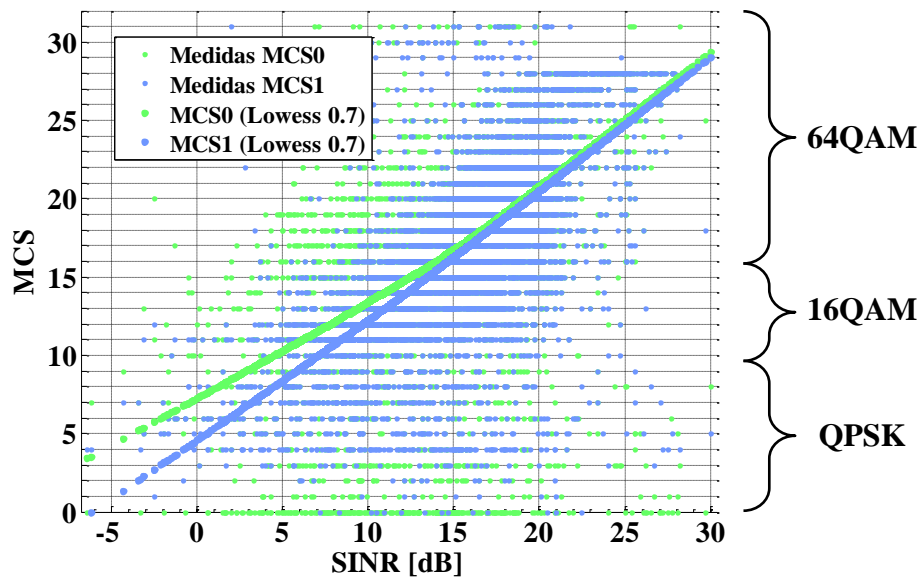


Figura 69 - MCS em função da SINR.

5.5.3. CQI

Este indicador reportado pelo *UE* indica qual a qualidade de sinal no sentido descendente da ligação, ou seja, tendo em conta a *SINR* medida pelo *UE*, este envia para o *eNB* um índice que vai permitir ao *scheduler* ter conhecimento das condições rádio do canal no sentido descendente. Dessa forma, consegue determinar qual a *MCS* que vai ser utilizada e sinalizar o móvel com essa decisão, para que consiga decodificar o sinal corretamente.

Em primeiro lugar é de referir que este valor apenas foi obtido para a área 1 e no percurso efetuado em *downlink*.

A Figura 70 apresenta o mapeamento do *Wideband CQI* em função da *SINR*. O *Wideband CQI* apresenta valores de 0 a 15 e como se observa o índice do *CQI* reportado, é tanto maior quanto maior for o valor da *SINR*.

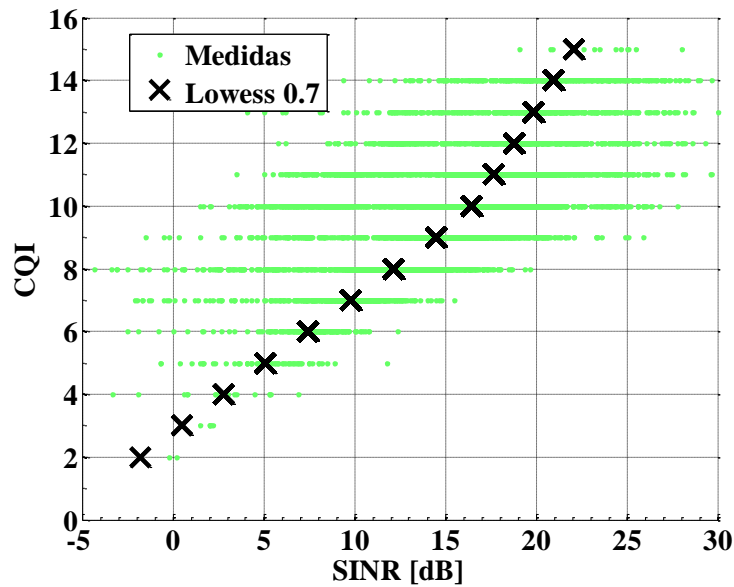


Figura 70 - Mapeamento do *CQI* em função da *SINR*.

A Figura 71 exibe a variação do débito binário em função do índice *CQI*. Esta relação pode ser importante pois permite identificar problemas ao nível da eficiência do *scheduler* ou do reportado pelo *UE*.

Caso o *CQI* reportado seja elevado, será de esperar que sejam alocados recursos para servir o *UE* e que usufrua de uma *MCS* com um índice também mais alto. Desse modo é expectável que o *throughput* em *downlink* siga o mesmo comportamento, apresentando débitos elevados.

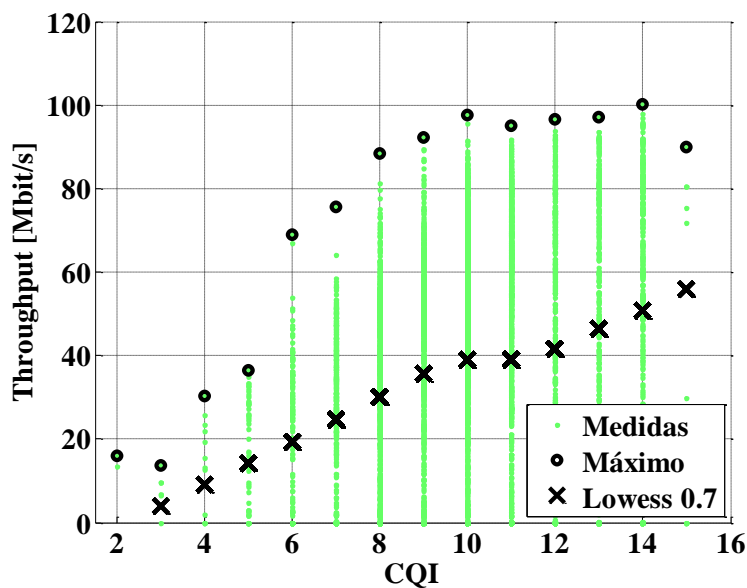


Figura 71 - Débito binário em função do *CQI*.

5.5.4. *BLER*

A Figura 72 representa os valores de *throughput* em função da *BLER*. Tendo em conta que a *BLER* deve apresentar valores abaixo dos 10%, nota-se que a maior parte dos pontos obtidos estão situados em torno desse valor [32].

Para valores de *BLER* superiores a esse valor, embora não seja possível estabelecer uma relação com confiança devido ao menor número de pontos, observa-se o impacto da *BLER* no débito máximo, o qual tende a decrescer. Essa situação é facilmente explicável pois o aumento de pacotes com erro implica a retransmissão da informação, levando a uma diminuição do débito médio oferecido ao utilizador.

Seria interessante a análise do número de retransmissões em relação à *BLER*, de modo a visualizar a relação destas para valores altos de *BLER*, mas tal não foi possível.

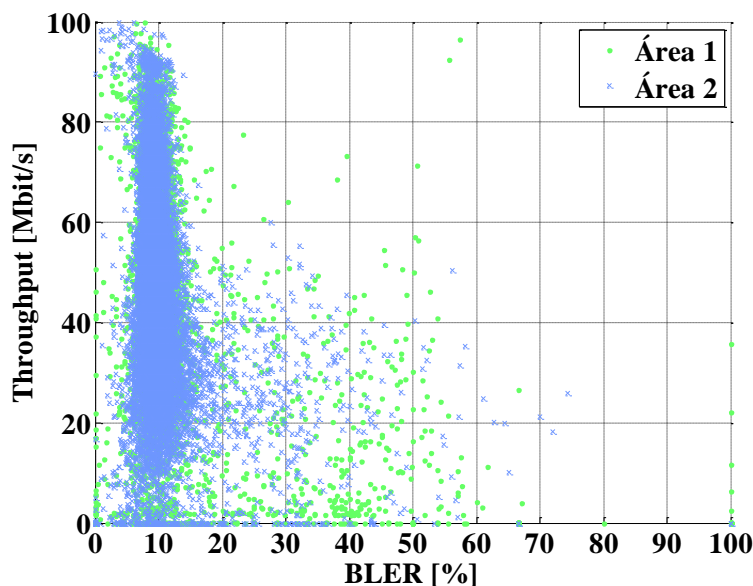


Figura 72 - Débito binário em *downlink* em função da *BLER* nas duas áreas.

5.6. *Distância*

Tendo em conta que a distância desempenha um papel importante na propagação do sinal, são analisados alguns parâmetros, nomeadamente o comportamento da potência de transmissão do *UE*, da *SINR* e da *BLER* quando existe variabilidade na distância.

A Figura 73 apresenta os valores da potência transmitida média em intervalos de 50 metros. Mostra-se que a potência transmitida na área 1 sofre muito mais variação que na área 2, a razão de tal acontecimento deve-se a uma de duas situações.

Em primeiro lugar a área 1 é uma área mais fechada, existindo mais margem para que o nível de sinal varie de forma mais abrupta, sendo essa variação compensada pelo *UE*.

Em segundo lugar, tendo em conta que a área 1 em estudo é menor, os *eNB's* estão mais próximos entre si levando a um maior número de *handovers* realizados a distâncias mais curtas.

A área 2 apresenta um comportamento mais “normal” em relação à potência média transmitida, ou seja, esta aumenta à medida que a distância aumenta. No entanto, a potência média transmitida na área 1 revela-se menor, o que contribuirá para uma melhor autonomia do *UE* situado nesta área.

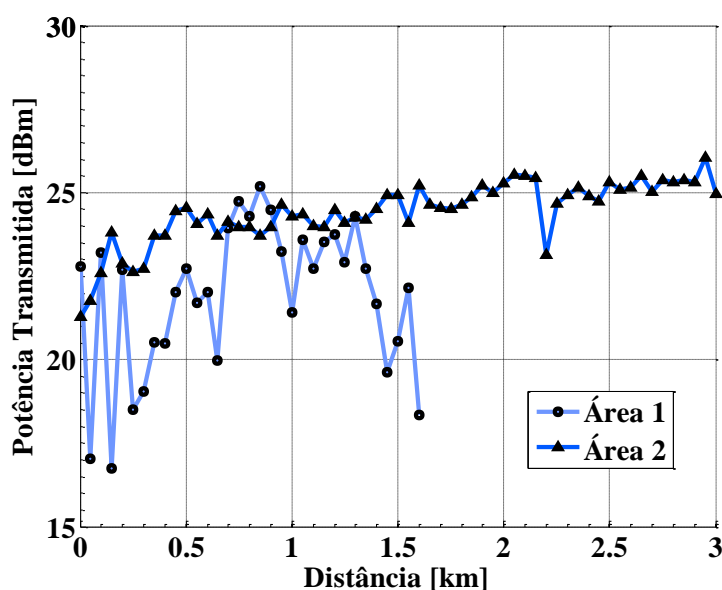


Figura 73 - Potência transmitida em função da distância, em *uplink*.

Uma vez que o comportamento da potência de transmissão na área 2 se pode considerar mais linear e com uma gama maior de valores, é feita ainda uma análise dessa área em termos da *SINR* e da *BLER* em função da distância.

Na Figura 74 observa-se o comportamento da *SINR* e da *BLER* médias. Tal como seria de esperar, à medida que a distância aumenta a qualidade do sinal decresce, no entanto, a adaptação da ligação permite à *BLER* manter-se estável em torno dos 10% como é desejável.

Portanto, o acréscimo da distância por norma não vai implicar um aumento da sinalização na rede.

Acima dos 2 *km* a *SINR* torna de novo a aumentar, isso deve-se apenas ao *eNB* referido no capítulo de medidas, o qual se encontrava a radiar muito alto, sendo este o responsável

pelas amostras recolhidas a essas distâncias. Como ainda existia linha de vista com esse *eNB*, levou ao aumento da *SINR* observado.

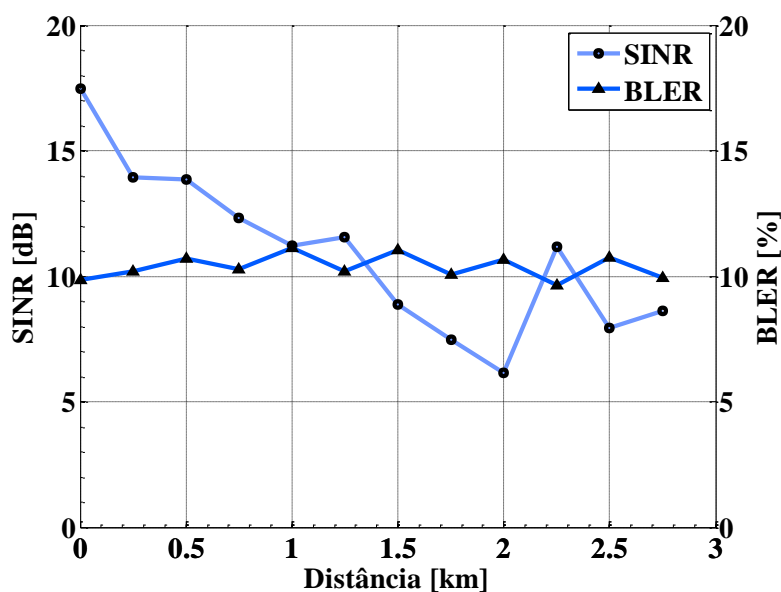


Figura 74 – *SINR* e *BLER* em função da distância para a área 2.

Por último, é de referir que pelo menos até 2,7 *km* em condições de linha de vista e de pouca carga na rede, usando uma frequência de 2,6 *GHz*, é possível oferecer no limite da célula uma *SINR* de 7 *dB*. Apesar de se encontrar em condições de má qualidade de serviço, é ainda assim capaz de oferecer um *throughput* médio de aproximadamente 30 *Mbit/s*.

5.7. Velocidade

Tendo em conta os objetivos da mobilidade propostos pelo *LTE*, que necessita manter um alto desempenho até aos 120 *km/h*, foi também verificado a influência da velocidade na transmissão, nomeadamente no débito binário médio, na *SINR* média e se provocava alterações significativas ao nível da *BLER*.

Uma vez que as áreas de teste da rede *LTE* piloto assentavam em malha urbana, existindo apenas alguns pontos com vias rápidas, não foram obtidas medidas acima de 90 *km/h*, não sendo confirmado o desempenho da rede para velocidades superiores. No entanto, tendo em conta que o planeamento foi efetuado para um modelo de utilizador *EVA 70*, os valores obtidos permitem verificar o comportamento da rede *LTE* nestas condições.

Primeiramente, a Figura 75 retracta o débito binário médio obtido em função da velocidade. Como é observável, para a área 1 existe um decréscimo do débito binário a

velocidades elevadas, no entanto na análise da Figura 76, esse decréscimo deve-se ao facto da *SINR* ser também menor, provocada por uma diminuição dos níveis de sinal e não da velocidade. Aliás, visível para a área 2, nota-se que o impacto da velocidade até pelo menos 90 *km/h* não influencia significativamente o desempenho da ligação.

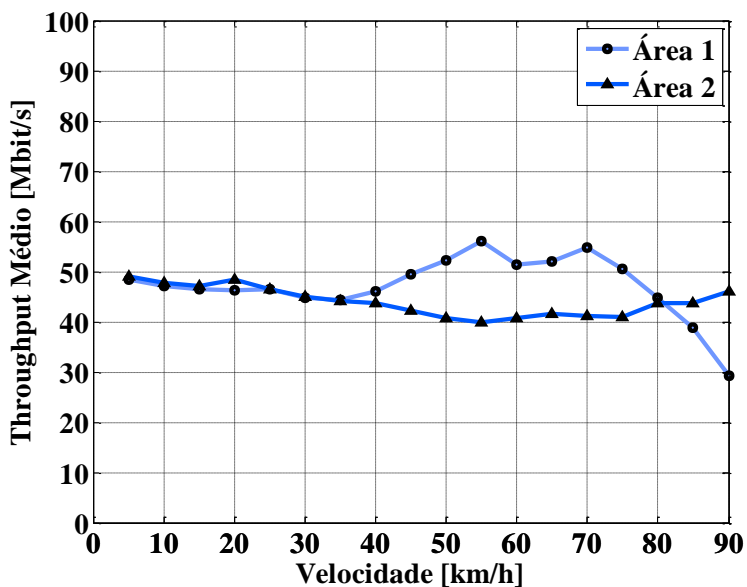


Figura 75 - Débito binário médio em *downlink* em função da velocidade do *UE*.

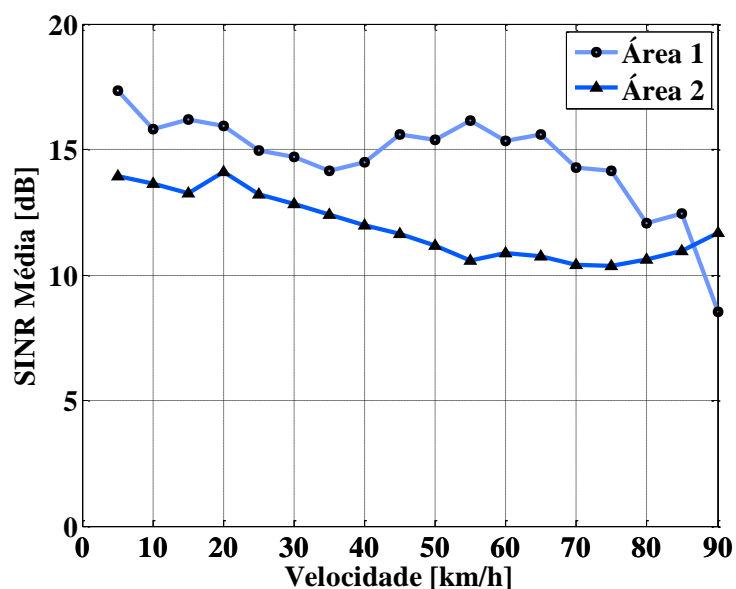


Figura 76 - *SINR* Média em função da velocidade.

A Figura 77 mostra a *BLER* em função da velocidade. Nesta figura também é possível observar que a velocidade (até 90 *km/h*) não reflete diferenças significativas, relativamente aos blocos com erro.

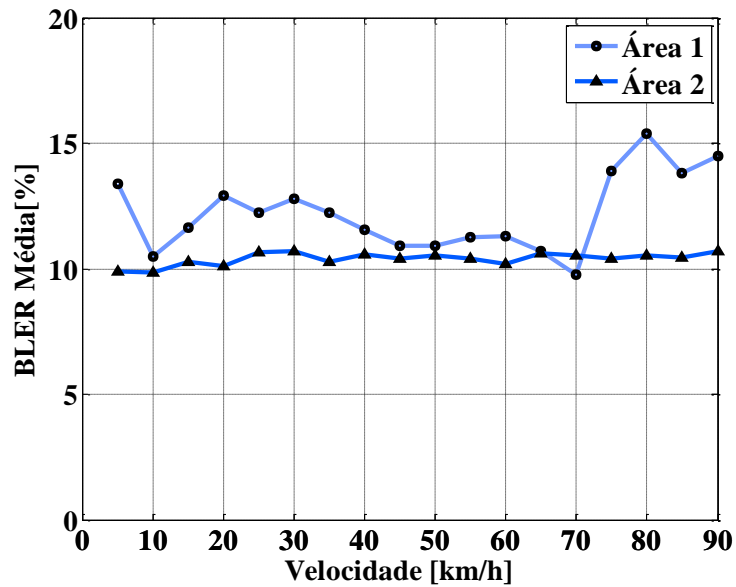


Figura 77 - *BLER Média* em função da velocidade.

Para a área 1 a *BLER* média aumentou para velocidades maiores, no entanto, esta deve-se sem dúvida à diminuição da qualidade do canal rádio como se viu na Figura 76.

Seria de esperar que para velocidades maiores, o número de retransmissões aumentasse, mas como se observa na Figura 77 para a área 2, a *BLER* média manteve-se por volta dos 10% o que contraria essa suposição e vem reforçar a robustez do *LTE* em regime de mobilidade.

Apesar da velocidade média analisada não ter sido considerada até aos 120 *km/h*, esta não apresenta alterações significativas no desempenho até 90 *km/h*, o que deixa adivinhar que para a mobilidade considerada pelo *3GPP*, a rede vai conseguir manter níveis de desempenho bastante semelhantes ao regime estático ou baixas velocidades, devido à rápida adaptação da ligação.

6. Conclusões

O *LTE* segue uma evolução das tecnologias anteriores tanto ao nível do aumento da capacidade, como ao nível da diminuição da latência. Estes são fatores chave na definição das novas redes móveis, pois caso as condições e a qualidade de serviço sejam equiparadas às das redes fixas, o utilizador final vai preferir uma tecnologia que lhe permite o acesso em qualquer lugar.

O aumento da capacidade e diminuição da latência vai possibilitar o desenvolvimento de novas aplicações móveis inovadoras e de sustentar aplicações e serviços já existentes numa rede móvel.

O *LTE Release 8* permite alcançar débitos até 300 *Mbit/s* em *downlink* e 75 *Mbit/s* em *uplink*, no entanto isso significa uma evolução ao nível dos equipamentos que numa fase inicial não se torna viável. Assim sendo, o *LTE Release 8* pode contar, numa fase de implementação já com débitos de pico de 100 *Mbit/s* em *downlink* e 50 *Mbit/s* em *uplink* e que por si só são já superiores a certas redes fixas.

Um outro ponto a favor do *LTE* é de que este é *future-proof*, ou seja, permite aumento do seu desempenho da rede, por *software* ou através do *LTE-Advanced*, sem que isso implique uma mudança de fundo nos elementos da rede, seguindo uma evolução natural através de atualizações.

Do **Capítulo 2** foi possível concluir que a utilização da técnica *OFDMA*, em *downlink*, permite manter a ortogonalidade entre os recursos, para além de reduzir a *ISI*. A aplicação desta técnica torna mais flexível o uso de diferentes larguras de banda no mesmo sistema e vem permitir que exista um escalonamento no domínio da frequência, tendo em conta as condições do canal.

A escolha da técnica *SC-FDMA*, para o *uplink*, permitiu que a *PAPR* seja reduzida, resultando em transmissores mais eficientes e com uma boa autonomia no *UE*.

O uso das técnicas referidas não é suficiente para garantir os débitos exigidos, sendo a razão da implementação da técnica *MIMO* em *LTE*. A redução do *TTI* para 1 *ms* e do facto da arquitetura de rede ter-se tornado mais plana, traduz-se numa redução da latência do sistema.

O *Planeamento Rádio em LTE*, existente no **Capítulo 3** segue as mesmas diretrizes usadas em redes 3G, sendo estas, a determinação da capacidade exigida para a área, a cobertura e a capacidade oferecidas.

Em relação à cobertura chegou-se à conclusão que existem técnicas que podem mitigar a interferência entre células, nomeadamente a *Fractional* e a *Soft Frequency*, ficando em falta a análise do seu desempenho efetivo.

Os *links budgets*, apesar de seguirem um método semelhante ao 3G, tiveram que ser adaptados de acordo com algumas das características do *LTE*. Destas alterações sublinham-se o cálculo da *SINR* e as margens de interferência. A primeira passou a depender do uso da técnica *MIMO* e do modo de transmissão associado, enquanto as margens dependem do fator de carga nas células e da *SINR* pretendida. De realçar que em *uplink* a margem de interferência tende a ser menor que no 3G, pois existe ortogonalidade entre utilizadores na mesma célula, pelo que a interferência resulta dos *UE* nas células vizinhas.

Ainda no plano da cobertura, foi testada a validade dos modelos *Okumura-Hata* e do *COST231-Hata*, onde se chegou à conclusão que estes são pouco precisos no cálculo da atenuação de propagação, chegando a apresentar diferenças máximas de 15 a 20 *dB*.

Na sequência, são propostos dois novos modelos para o cálculo da atenuação de propagação: o *LTE-PL* para distâncias de raio de célula inferiores a 1 *km* e uma alteração ao modelo *Okumura-Hata* para distâncias superiores. Relativamente ao *LTE-PL*, este apresenta resultados muito favoráveis, equiparando-se à regressão linear das medidas obtidas do sinal de referência. A alteração ao modelo *Okumura-Hata*, por seu lado não atingiu resultados tão animadores, no entanto, resulta numa melhor estimativa que o *Okumura-Hata* original.

O planeamento de capacidade permite determinar a *SINR* necessária para oferecer um determinado débito binário e é a partir desse valor determinado que se estima o raio máximo da célula. Com o planeamento realizado, este foi comparado com os valores obtidos na área, nomeadamente o débito binário médio e a *SINR*. Dessa comparação é possível confirmar a empregabilidade do método proposto, pois os valores teóricos e experimentais são bastante semelhantes.

Dessa análise obteve-se ainda o desvio padrão a ser considerado para uma área Urbano Denso em *LTE*, com um valor entre 10 a 12 *dB*.

No **Capítulo 4** (*Medidas em LTE*) foi apresentada uma extensa lista de medições que foram realizadas no âmbito do trabalho de campo. Primeiramente é de referir a importância da

realização dos *drive-tests* para a recolha de dados e monitorizar o desempenho da rede. Estes, em conjunção com as estatísticas de rede são uma ferramenta importante para analisar uma rede móvel, não sendo o *LTE* exceção.

Da análise dos pontos estáticos foi possível confirmar que para situações em que o *UE* se encontra mesmo a distâncias consideráveis e com boas condições de cobertura, o desempenho da ligação é excelente, aproximando-se dos valores máximos suportados.

As medidas recolhidas em *idle*, permitem analisar possíveis problemas iniciais, relativamente ao espalhamento do sinal na área, isto é, através da análise dos *PCI's* é possível observar qual a célula que se encontra a servir o *UE* em determinado local e se corresponde ao comportamento esperado. Além disso, permite verificar se a seleção é bem efetuada, e se existe algum problema com a definição das células vizinhas.

As medidas obtidas dos percursos em *downlink* e *uplink*, tiveram por objetivo a análise do débito binário obtido e a identificação de problemas que possam existir e a causa dos mesmos. Destas conclui-se que um dos principais indicadores de desempenho passa pelo nível de sinal *RSRP*, representativo da oferta de serviço. Por norma, desde que o sinal *RSRP* seja considerado elevado o débito binário mostra-se com valores próximos do máximo, caso contrário, é fundamental avaliar problemas pelos outros indicadores.

A comparação posterior do sinal *RSRQ* com o *RSRP* permite identificar univocamente problemas de falta de cobertura ou de interferência entre células.

A *SINR* é uma boa medida de verificação do desempenho da rede pois relaciona-se diretamente com o débito binário oferecido, no entanto, é necessário ter em atenção que a forma de cálculo desta pode variar entre fornecedores de equipamento. Assim sendo, é essencial ter em atenção o modo de mapeamento do *CQI* em função dessa e as decisões no *scheduler*.

À medida que os mapas foram analisados e os problemas identificados, constatou-se que a grande parte dos problemas iniciais na implementação da rede piloto, passam por problemas de falta de cobertura. Dessa situação foram propostas otimizações fáceis de testar (sem ter em consideração a partilha do meio de transmissão com outras tecnologias), nomeadamente a alteração dos *tilts* das antenas que levarão a uma melhoria da qualidade de serviço.

No **Capítulo 5** de *Desempenho* foram identificadas cinco categorias para classificar os *KPI's*: acessibilidade, retenção, integridade, disponibilidade e mobilidade. Dessas categorias

foram referidos aqueles que se consideram mais importantes para uma primeira análise da rede, existindo margem para a definição de outros mais complexos. Desse levantamento foi ainda identificada a importância dos *drive-tests* em certos indicadores, especialmente nos de acessibilidade.

Foi ainda possível averiguar as perdas de penetração *in-car* para um raio de célula até 450 metros, onde o valor da margem de implementação para essas perdas é de 2,7 dB.

Neste capítulo analisou-se também a eficiência espectral, estando esta de acordo com o definido pelo 3GPP, sendo três vezes superior à de HSDPA e duas vezes e meia à do HSUPA.

No seguimento final, tendo em conta que se concluiu que o *throughput* ou débito binário é o indicador mais imediato para a satisfação do utilizador, foram propostas três categorias para o QoS, nos dois sentidos da ligação.

Para uma boa qualidade de serviço, garantindo débitos binários próximos do máximo permitido, é necessário garantir que o sinal RSRP seja superior a -75 dBm e o sinal RSRQ superior a -10 dB. Além disso a SINR processada deverá estar situada acima dos 20 dB.

Caso a QoS a ser oferecida não seja tão exigente, considera-se média, estando o RSRP contido entre -75 e -100 dBm, o sinal RSRQ entre -10 e -20 dB e a SINR de 10 a 20 dB.

Embora estes valores sejam desaconselháveis pois podem representar quedas e problemas frequentes de ligação, denominou-se má qualidade de serviço quando existem valores de RSRP inferiores a -100 dBm, ou que o sinal RSRQ ou a SINR sejam inferiores a -20 dB e a 10 dB, respetivamente. Por último, valores de RSRP inferiores a -120 dBm tornam-se insustentáveis para manter uma ligação, tendo em conta as áreas analisadas.

Adicionalmente, a BLER não deverá ultrapassar os 10%, para manter o número de retransmissões sustentável e o débito binário elevado. Essa meta é conseguida devido à adaptação da ligação e dos CQI reportados.

Finalmente, tendo em conta as características de mobilidade no LTE, foi avaliada a influência da distância e da velocidade do UE na ligação.

Em termos de distância avaliou-se o desempenho da potência transmitida, esta em áreas mais restritas sofre grandes variações, no entanto a potência média é mais baixa do que numa zona em que o móvel esteja mais distante, tal como seria de esperar, contribuindo para um aumento da autonomia.

Foi ainda possível concluir que, pelo menos até uma distância de 2,7 km, é possível estabelecer uma ligação em má qualidade de serviço usando uma frequência de 2,6 GHz mantendo a BLER estável nos 10%.

No que diz respeito à velocidade, chegou-se à conclusão que até pelo menos 90 *km/h* o impacto nas condições de serviço é baixo, se não nulo, não tendo sido analisadas velocidades até 120 *km/h*, mas dando boas indicações que consiga fornecer um bom desempenho.

Por último, resta sublinhar o contributo do autor na análise da própria rede no decorrer das medidas efetuadas e no auxílio à produção dos relatórios técnicos associados às análises efetuadas no terreno. Adicionalmente, a dissertação, apesar do seu cariz académico, definiu parâmetros e otimizações possíveis de serem implementados pela indústria.

Por tudo o retratado, a rede *LTE Release 8* resulta numa boa aposta de implementação em termos de redes móveis, apresentando um desempenho similar ao proposto teoricamente e cumprindo os requisitos definidos pelo *3GPP*.

Trabalho Futuro

Tendo como base de trabalho esta dissertação, será possível desenvolver este projeto através da realização das seguintes propostas de trabalho futuro.

Seria interessante a análise do desempenho no *LTE* em 800 *MHz*, no entanto, é de ter em atenção que de momento em *Portugal* apenas estão disponíveis 10 *MHz* de largura de banda por operador, em detrimento dos 20 *MHz* usados.

Em relação à propagação rádio, seria importante investigar a influência dos vários modos de transmissão suportados pela *Release 8* na *SINR*.

Apesar dos modelos de propagação propostos terem sido desenvolvidos com base em medidas empíricas, seria interessante pô-los à prova em outras situações, de forma a confirmar a sua validade.

Relativamente à propagação *in-car*, sugere-se que seja analisada até uma distância maior da que foi medida.

Na dissertação não foi possível analisar nenhuma funcionalidade *SON* na rede piloto, para tal propõe-se avaliar o contributo dessas funcionalidades, nomeadamente a *ICIC* que aparenta ser um conceito bastante aliciante.

Em medidas futuras na rede, seria também interessante a análise do comportamento dos protocolos *HTTP* e *FTP* em regime de mobilidade. A análise da latência e do impacto das condições rádio na mesma, seria também importante sabendo que esta terá um papel importantíssimo em aplicações de tempo real a serem usadas futuramente, como é o caso do *VoIP* ou do *VoLTE* [33].

A análise baseou-se numa rede piloto sem carga. No entanto, existe a possibilidade nas configurações do *eNB* de simular carga na rede, pelo que seria aliciante estudar os efeitos da variação de carga nas células. Caso não exista essa possibilidade, poder-se-á testar com vários utilizadores a influência da carga numa rede ativa.

Tendo em conta a carga na rede, seria então possível testar as variações dos *QCI* e a eficiência do *scheduler*.

Referências

- [1] **MathWorks**. Matlab: The Language of Technical Computing. *MathWorks*. [Online] [Citação: 5 de Setembro de 2012.] <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [2] **3GPP**. *UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE)*. s.l. : 3GPP, 2006.
- [3] **3GPP Technical Specification 36.300**. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2*. France : 3GPP, 2008.
- [4] **3GPP Technical Specification 36.211**. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation*. França : 3GPP, 2009.
- [5] **3GPP Technical Specification 36.101**. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 8)*. France : 3GPP, 2008.
- [6] **3GPP Technical Specification 36.104**. *Base Station (BS) radio transmission and reception*. France : 3GPP, 2008.
- [7] **Holma, Harri e Toskala, Antti**. *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*. United Kingdom : John Wiley and Sons, Ltd., 2010. ISBN 978-0-470-68646-1.
- [8] **Holma, Harri e Toskala, Antti**. *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. United Kingdom : John Wiley & Sons Ltd., 2009. ISBN: 978-0-470-99401-6.
- [9] **Dahlman, Erik, et al.** *Key features of the LTE radio interface*. s.l. : Ericsson Review, 2008. No. 2.
- [10] **3GPP Technical Specification 36.213**. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*. France : 3GPP, 2009.
- [11] **3GPP Technical Specification 36.214**. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer – Measurements*. France : 3GPP, 2009.
- [12] **3GPP Technical Specification 23.203**. *Policy and charging control architecture*. France : 3GPP, 2008.
- [13] **Volker Pauli, Juan Diego Naranjo, Eiko Seidel**. *Heterogeneous LTE Networks 2010 and Inter-Cell Interference Coordination*. Munique, Germany : Eiko Seidel, 2010.
- [14] **Shannon, C. E.** Communication in the presence of noise. *Proc. Institute of Radio Engineers*. 1949, Vol. 37, pp. 1192-1201.

- [15] **J. Salo, M. Nur-Alam, K. Chang.** Practical Introduction to LTE Radio Planning. 2010.
- [16] **Ericsson.** *Coverage and Capacity Dimensioning*. Estocolmo : s.n., 2010. 1/100 56-HSC 105 50/1-T Uen J.
- [17] **Huawei.** *LTE Link Budget introduction*. s.l. : Huawei Technologies CO., LTD., 2009.
- [18] **Okumura, Y., et al.,** Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service. *Rev. Elec. Communications. Lab.* September–October, 1968, Vol. 16, pp. 825–873.
- [19] **Hata, M.** Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*. 1980, Vols. 29, Issue 3, pp. 317–325.
- [20] **Ranvier, S.** Path loss models S-72.333 Physical layer methods in wireless. *comlab*. [Online], 23 de Novembro de 2004. [Citação: 3 de Julho de 2012.] http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004_2005_slides/Path_loss_models.pdf.
- [21] **European Comission.** *Digital mobile radio towards future generation systems; COST Action 231*. Belgium : Office for Official Publications of the European Communities, 1999. ISBN 92-828-5416-7.
- [22] **Ball, Robert, et al.** *Aggressive Telecommunications Overbooking Ratios*. Arizona : 23rd IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC), 2004. pp. 31-39.
- [23] **Holma, Harri e Toskala, Antti.** *HSDPA/HSUPA for UMTS*. England : John Wiley & Sons Ltd, 2006. ISBN-13 978-0-470-01884-2.
- [24] **3GPP Technical Specification 36.306.** *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): User Equipment (UE) radio access capabilities (Release 8)*. France : 3GPP, 2011.
- [25] **C. Mehlhrer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, e M. Rupp.** *Simulating the Long Term Evolution Physical Layer*. Glasgow, Scotland : 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), 2009.
- [26] **MathWorks.** Product Documentation. *MathWorks*. [Online] [Citação: 5 de Setembro de 2012.] http://www.mathworks.com/help/toolbox/curvefit/bsz6ber-1.html#bq_6ys3-3.

- [27] **3GPP Technical Specification 32.450**. *Key Performance Indicators Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Definitions (Release 8)*. France : 3GPP, 2011.
- [28] **3GPP Technical Specification 32.451**. *Key Performance Indicators (KPI) for E-UTRAN: Requirements (Release 8)*. France : 3GPP, 2009.
- [29] **Laine, Lasse**. *Performance Management of 3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution*. Espoo : AALTO University, 2011.
- [30] **3GPP TSG RAN R1-072261**. *LTE Performance Evaluation – Uplink Summary*. s.l. : 3GPP, 2007.
- [31] **3GPP TSG RAN R1-072444**. *Summary of Downlink Performance Evaluation*. s.l. : 3GPP, 2007.
- [32] **Kreher, Ralf e Gaenger, Karsten** . *LTE Signaling, Troubleshooting and Optimization*. United Kingdom : John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 978-0-470-68900-4.
- [33] **Nokia Siemens Networks**. The impact of latency on application performance. *Nokia Siemens Networks*. [Online] [Citação: 7 de Agosto de 2012.] <http://www.nokiasiemensnetworks.com/system/files/document/LatencyWhitepaper.pdf>.
- [34] **3GPP Technical Specification 36.902**. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Self configuring and self optimizing network use cases and solutions*. France : 3GPP, 2008.

Anexos

Anexo A – Tabela MCS e CQI

Este anexo mostra a relação entre o índice *MCS* e a modulação utilizada [10]. Além disso é também apresentado o modo de recolha do *CQI*.

- **Tabela MCS**

A Tabela 30 permite estabelecer a relação entre os *MCS* e a modulação utilizada em *downlink*.

Tabela 30 - Correspondência entre índices MCS e o n.º de bits usados [9].

Índice MCS	N.º de bits	Índice MCS	N.º de bits
0	2	16	4
1	2	17	6
2	2	18	6
3	2	19	6
4	2	20	6
5	2	21	6
6	2	22	6
7	2	23	6
8	2	24	6
9	2	25	6
10	4	26	6
11	4	27	6
12	4	28	6
13	4	29	2
14	4	30	4
15	4	31	6

- **Valor do CQI**

O *eNB* é o responsável por determinar o modo de envio do *CQI* e o tipo de determinação do mesmo por parte do *UE*. Existem dois modos de envio do valor do *CQI*: periódico e aperiódico [10].

Relativamente ao envio aperiódico do *CQI*, este é transmitido no *PUSCH* e é pedido pelo *eNB* por um *bit* de controlo além disso pode ser reportado como um de três tipos.

O *Wideband feedback* considera um único valor de *CQI* de banda larga a ser enviado para o *eNB*, que representa as condições para toda a largura de banda utilizada.

O *Higher Layer-configured subband feedback* define o envio de um valor de *CQI* de banda larga para toda a largura de banda, mas envia ainda informação do *CQI* para cada sub-banda definida. O valor de *CQI* de sub-banda é apenas calculado assumindo uma transmissão na banda considerada com o tamanho k , ver Tabela 31. Esse valor é codificado pela subtração do *CQI* de banda larga, podendo assumir um de quatro valores: “ ≤ -1 ”, “0”, “ $+1$ ” ou “ $\geq +2$ ”.

Tabela 31 – Tamanho da sub-banda em função da largura de banda utilizada.

Largura de Banda Utilizada [RB's]	Tamanho da Sub-banda [k]
6-7	Apenas usados <i>CQI</i> 's de banda larga.
8-10	4
11-26	4
27-63	6
64-110	8

Por último, o tipo *UE-selected subband feedback* define um conjunto de M bandas de tamanho k escolhidas na largura de banda utilizada, ver Tabela 32. O *UE* envia então o valor do *CQI* de banda larga e outro que reflete a qualidade média das M bandas escolhidas. O valor médio é então codificado pela subtração com o *CQI* de banda larga, assumindo um de quatro valores: “ $\leq +1$ ”, “2”, “+3” ou “ $\geq +4$ ”.

Tabela 32 - Tamanho da sub-banda e número de sub-bandas em função da largura de banda utilizada.

Largura de Banda Utilizada [RB's]	Tamanho da Sub-banda [k]	Número de Sub-bandas preferenciais (M)
6-7	Apenas usados <i>CQI</i> 's de banda larga .	Apenas usados <i>CQI</i> 's de banda larga.
8-10	2	1
11-26	2	3
27-63	3	5
64-110	4	6

O envio periódico do valor de *CQI* é feito através do *PUCCH*. Neste caso apenas é possível enviar a informação do *CQI* com o tipo *Wideband feedback* e *UE-selected subband feedback*. A periodicidade da informação do *CQI* reportada pode ir de 2 a 160 ms.

O primeiro tipo é em tudo idêntico ao modo aperiódico, no entanto o segundo tipo apresenta algumas diferenças. Ou seja, a largura de banda utilizada é dividida em j partes. Este valor depende da largura de banda utilizada como se observa na Tabela 33 e é calculado para a sub-banda definida de cada uma das partes da largura de banda. Esse valor é enviado juntamente com o índice da sub-banda para o qual foi feito o cálculo.

Tabela 33 - Tamanho da sub-banda e partes da largura de banda em função da largura de banda utilizada.

Largura de Banda Utilizada [RB's]	Tamanho da Sub-banda [k]	Número de partes da largura de banda [j]
6-7	Apenas usados <i>CQI's</i> de banda larga .	1
8-10	4	1
11-26	4	2
27-63	6	3
64-110	8	4

Anexo B – Self Organizing Networks (SON)

Neste anexo apresenta-se uma breve descrição das grandes características do *LTE Release 8*, ou seja, a introdução de redes auto-organizáveis, do inglês *Self Organizing Networks (SON)*. Estas redes vão permitir a configuração de alguns parâmetros sem a intervenção humana e reduzir a complexidade do planeamento. Segundo o *3GPP*, estão a ser desenvolvidas algumas soluções *SON* para certos parâmetros [34].

Na camada física, este conceito está presente ao nível da *PCI*. Quando uma nova célula é inserida na rede, esta pode configurar-se com um identificador aleatório para poder observar o *PCI* das células vizinhas. Posto isto, o *eNB* vai estabelecer conexões *X2*, de acordo com as informações vindas do *UE* e do sistema de Operação e Manutenção (*O&M*), com as células que identificou como vizinhas e assim confirmar se o *PCI* escolhido necessita de ser ajustado ou se mantém o escolhido.

Na *Release 8* está também considerada a configuração dinâmica das interfaces *SI-MME* e *X2*, por parte do *eNB*. Quando o *eNB* é ligado, vai conectar-se ao *O&M* e obter os parâmetros necessários para saber a que outros elementos lógicos da rede se deve conectar. Além do referido, pode fazer o *download* de *software* e receber os parâmetros iniciais de operação, tais como a frequência a que vai operar e quais os parâmetros a difundir. Para este procedimento é necessário existir antes o estabelecimento de uma ligação *SCTP* com pelo menos um *MME*, para pôr a interface *SI-MME* ativa. Seguidamente o *eNB* cria uma associação com o *S-GW* para efetuar a transferência de dados no *UP*.

A função *Automatic Neighbor Relation (ANR)* permite que *UE* detete os vizinhos dentro da mesma frequência sem a necessidade de listas de vizinhança. Esta função é usada quando o *UE* se move para uma nova célula e identifica o novo *PCI*, esse ao descodificar o *Global Cell ID (GCID)*, que identifica unicamente cada célula, vai permitir que o *eNB* descubra o endereço da nova célula e estabeleça uma nova vizinhança (conexão *X2*), permitindo o *handover*. Logo, a geração de listas de vizinhança torna-se mais simples, uma vez que o *UE* pode identificar facilmente todas as células da vizinhança.

Os parâmetros *RACH* podem ser otimizados, pois os *eNB's* vizinhos podem trocar informação acerca dos recursos *PRACH*, evitando colisões no acesso aleatório.

Finalmente, parâmetros relativos à mobilidade dos *eNB's* podem ser adaptados automaticamente para melhorar a robustez ou para balancear a carga das células.

Anexo C – KPI's

Neste anexo apresentam-se os *KPI's* que não foram recolhidos nas medidas, mas que no entanto consideram-se importantes para avaliar o desempenho da rede *LTE*.

- **Retenção**

Quando um utilizador acede a um serviço pretende que este se mantenha ativo durante todo o tempo de utilização, no entanto é espectável que existam interrupções ou até quebras na ligação. Para avaliar o impacto destas e o desempenho da rede é necessário definir *KPI's* referentes à retenção da ligação.

Os *KPI's* de retenção devem ser medidos apenas quando existe uma quebra de ligação não esperada e quando apresentam impacto perante o utilizador.

Na Tabela 34 apresentam-se os tipos de indicadores de retenção que podem ser utilizados para aferir a manutenção das conexões.

Tabela 34 - *KPI's* de Retenção.

<i>Key Performance Indicators</i>	Descrição	Problemas típicos	Efeitos dos problemas	Medição	<i>Em UMTS</i>
<i>Number of Radio Link Failures</i>	Contabiliza o número de vezes que existe uma falha na ligação rádio dependendo dos parâmetros especificados.	Baixo nível de sinal <i>RSRQ</i> ; nível de sinal <i>RSRP</i> baixo; interferência elevada; problemas no acesso aleatório; inexistência de vizinhas.	O estado do <i>UE</i> passa para <i>idle</i> e o fluxo de dados é interrompido.	Através de <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas de rede.	Igual.
<i>EPS Bearer Cut-Off Ratio</i>	Razão entre o número de portadoras <i>EPS</i> desativadas sem pedido explícito e a totalidade de portadoras <i>EPS</i> atribuídas.	Desativação; reativação da portadora; erros na rede.	Quando a portadora dedicada é desativada o <i>UE</i> deixa de ter acesso ao serviço.		<i>PDP context cut-off ratio</i> .

- **Disponibilidade**

Se o acesso à rede não se encontrar ativo é impossível ao operador cobrar por qualquer serviço. Além disso, perante o utilizador, a indisponibilidade do serviço têm um impacto bastante significativo na satisfação geral e na oferta dos serviços.

Deste modo são definidos indicadores de disponibilidade que refletem a percentagem de tempo em que as células se encontram ativas. Como se observa na Tabela 35 existem *KPI's* de disponibilidade.

Tabela 35 - *KPI's* de Disponibilidade.

<i>Key Performance Indicators</i>	Descrição	Problemas típicos	Efeitos dos problemas	Medição	<i>Em UMTS</i>
<i>Cell Availability</i>	Percentagem de tempo que uma célula permite acesso rádio mínimo pelo tempo de medição definido.	Falhas de energia, problemas nos equipamentos.	Impossibilidade de oferecer serviço: quebras na facturação e na satisfação geral.	Pode ser medido por <i>drive-tests</i> ou pelas estatísticas da rede.	Igual.
<i>Network Availability</i>	Percentagem de tempo que um agregado de células permite acesso rádio pelo tempo de medição definido.	Falhas de energia, problemas nos equipamentos.	Impossibilidade de oferecer serviço: quebras na faturação e na satisfação geral.	Pode ser medido por <i>drive-tests</i> no entanto tendo em conta que se considera um agregado de células é mais prático pelas estatísticas de rede.	Igual.

Anexo D – Medidas em Uplink

Este anexo apresenta algumas medidas que foram realizadas nas duas áreas em *uplink*, mas que não apresentavam grande relevância para análise do desempenho e/ou eram repetidos.

- **SINR**

A *SINR* foi obtida no percurso em *uplink* e é representada na Figura 78 para a área 1 e na Figura 79 para a área 2. Os mapas e as amostras obtidas têm como objetivo permitir estabelecer a existência, ou não, de uma correlação entre os ritmos binários em sentido ascendente e a relação sinal e ruído mais interferência. É de pressupor que as condições de propagação nos dois sentidos apresentem semelhanças.

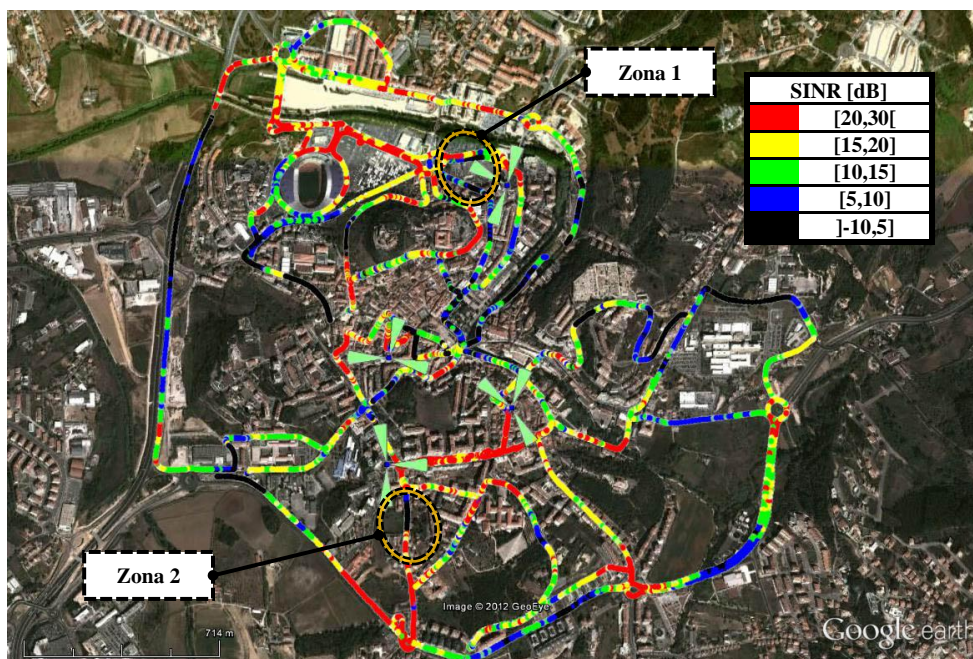


Figura 78 - Mapa com níveis de sinal SINR medidos em *Uplink* para a área 1.

Neste percurso foram identificadas duas zonas onde a interferência se revela alta de tal modo que torna a *SINR* muito baixa. Tendo em conta a proximidade a um *eNB*, aproximadamente 100 metros a zona 1 identificada em 4.5.1 para esta área evidencia-se problemática neste mapa e terá que ser corrigida como sugerido no mesmo subcapítulo.

Relativamente à zona 2, este problema pode ser resolvido pelo sugerido na zona 3 no subcapítulo 4.5.1.

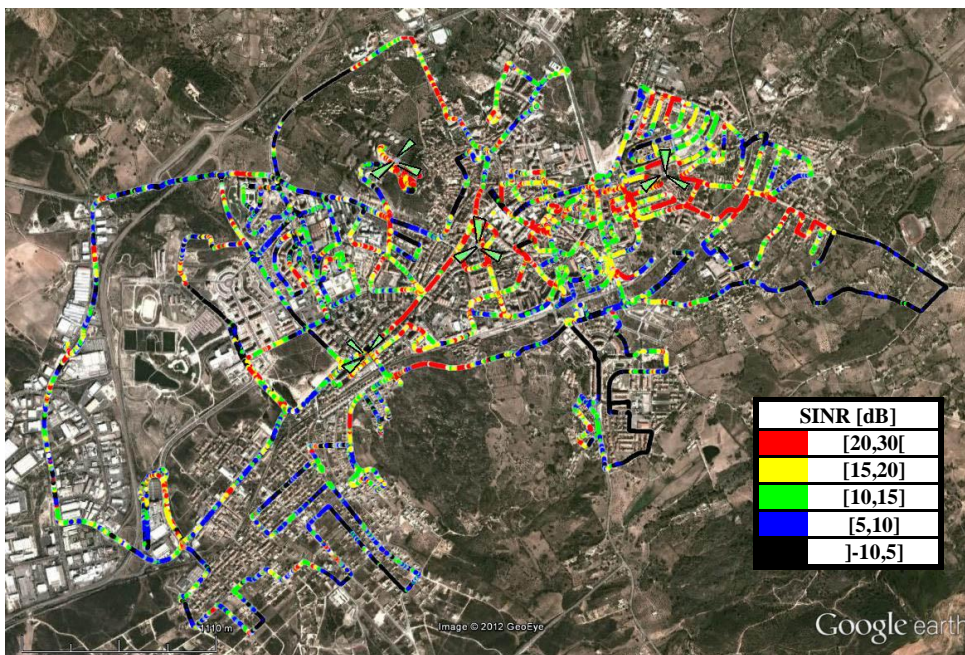


Figura 79 - Mapa com níveis de sinal SINR medidos em *Uplink* para a área 2.

O mapa da distribuição da *SINR* na área 2, vem apenas reforçar que a *SINR* nesta segunda passagem dos mesmos locais, apresenta as mesmas zonas problemáticas já identificadas. Sendo necessária a intervenção nos locais afetados de modo a oferecer uma boa qualidade de serviço.

A Figura 80 demonstra a distribuição de valores das amostras de *SINR* obtidas para cada área neste novo percurso. A distribuição dos valores é semelhante à obtida para o primeiro percurso (em *downlink*), tal como seria de esperar.

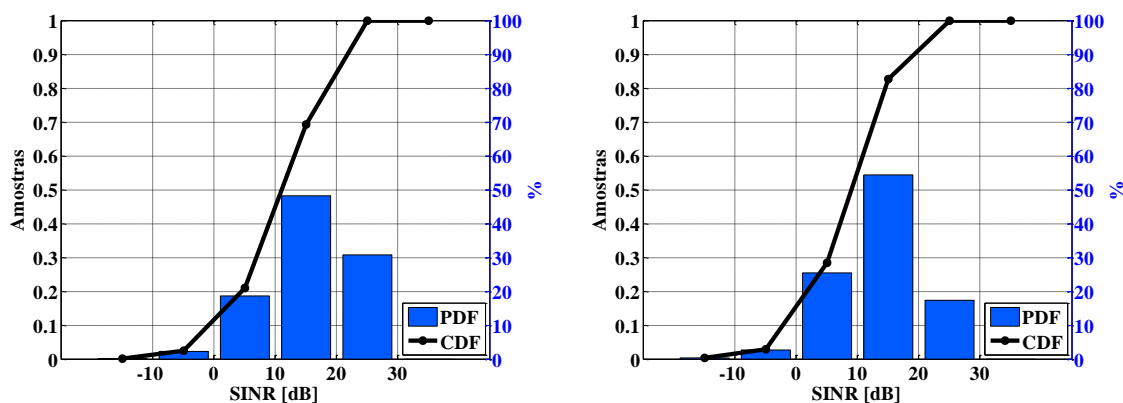


Figura 80 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para a *SINR* em *Uplink* da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita).

- **Potência Transmitida**

A análise da potência transmitida pode considerar-se importante, caso esta seja um parâmetro importante a otimizar. Ou seja, tendo em conta que a potência transmitida influencia a autonomia da bateria, a modulação e adaptação podem ser limitadas para baixar o consumo de energia.

Na Figura 81 e Figura 82, observa-se a potência transmitida em *uplink* para a área 1 e área 2 respetivamente. Como é visível ao longo de grande parte do percurso o *UE* apresenta potências transmitidas próximas da potência máxima, o que desde logo contribui para uma diminuição da autonomia da bateria. No entanto, esta situação deve-se ao facto do *UE* se encontrar sempre a transmitir e com o máximo desempenho disponível.

Com mais utilizadores na rede e com utilizações normais (tráfego esporádico) é expectável que a potência transmitida média seja bastante menor.

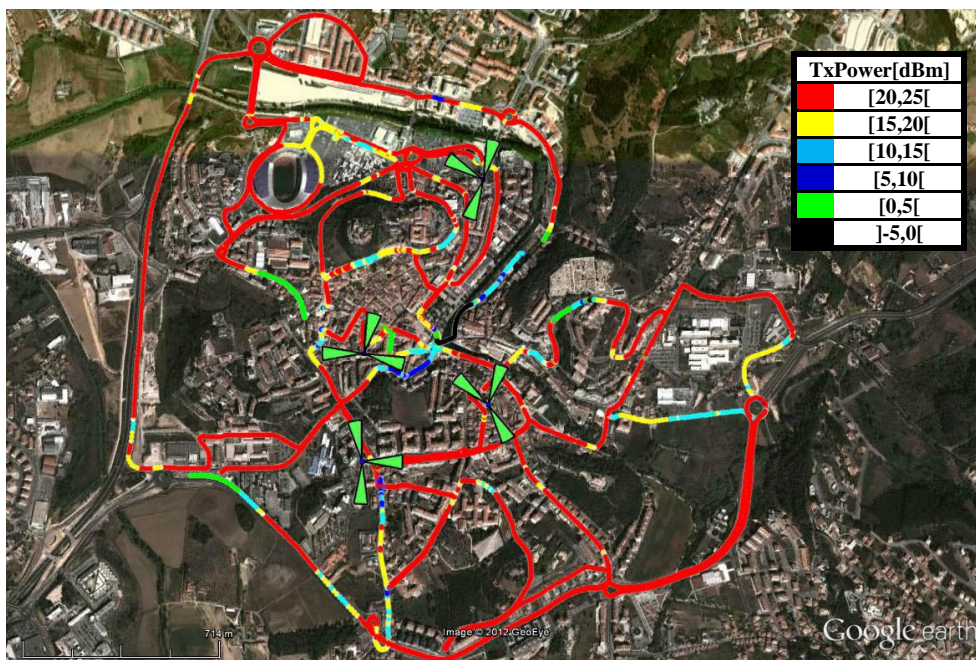


Figura 81 - Mapa com a potência transmitida medida em *Uplink* para a área 1

Outro fator relevante é o facto de, tal como seria de esperar, para zonas próximas das antenas, a potência transmitida seja menor.

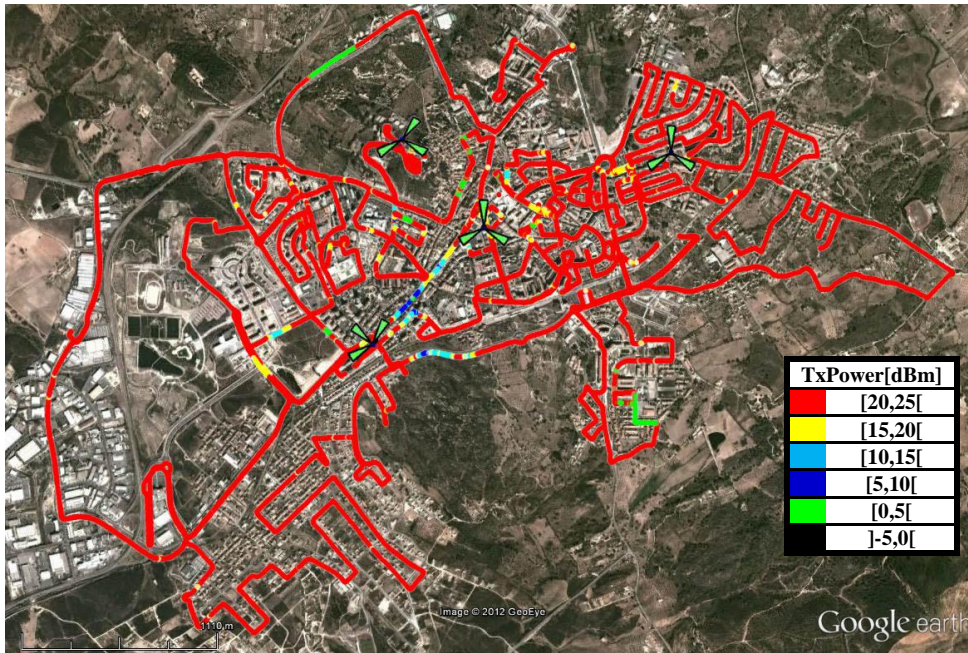


Figura 82 - Mapa com a potência transmitida medida em *Uplink* para a área 2

Na Figura 83 estão presentes os gráficos da CDF e PDF para as duas áreas. Tal como se afirmou as amostras obtidas encontram-se situadas próximas do valor máximo de potência transmitida permitido.

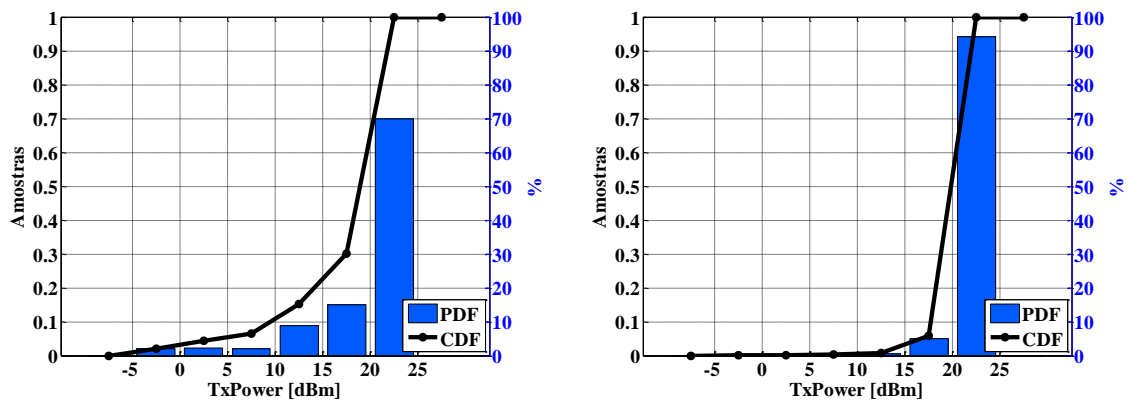


Figura 83 - Função Densidade de Probabilidade e Função de Distribuição Acumulada para a potência transmitida em *Uplink* da área 1 (à esquerda) e da área 2 (à direita)