

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



**Previsão de Desempenho para Redes Móveis LTE e**  
**UMTS baseadas em Redes GSM Co-localizadas**

**Artur Jorge Vasconcelos Barbosa**

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

Orientadores:

Professor Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira  
Engenheiro Augusto Miguel Gaspar Lima da Silva

Júri:

Presidente: Professor Doutor Mário Pereira Véstias

Vogais:

Professor Doutor António João Nunes Serrador  
Professor Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

**Dezembro de 2014**







## **Resumo**

Dadas as condições atuais do mercado de telecomunicações móveis, os operadores tentam rentabilizar as suas redes de comunicações. A melhor forma de o fazer é torná-las mais eficientes a nível tecnológico e diminuir os custos de manutenção e infraestrutura. Uma das técnicas mais recorrentes pelos operadores para minimizar o custo associados às infraestruturas é a co-localização de tecnologias.

O objetivo desta tese é conseguir compreender o comportamento de cada tecnologia (UMTS e LTE) quando co-localizadas com GSM para isso pretende-se desenvolver um algoritmo que permita perceber o desempenho destas. Numa primeira fase é feito um estudo acerca de planeamento e dos principais indicadores a ter em conta no desenvolvimento do algoritmo. Posteriormente é efetuado um *drive-test* com o objetivo de recolher uma série de parâmetros que serão utilizados no modelo de previsão a desenvolver. Depois de desenvolvido o modelo de previsão é efetuado um segundo *drive-test* que visa validar este modelo.

**Palavras-Chave:** Co-localização, GSM, UMTS, LTE, RxLev, RSCP, RSRP, Débito Binário, Eficiência Espetral.



## *Abstract*

Given the current condition of the mobile telecommunications market, operators attempt to profitable their network. The best way to do this is to make them technologically efficient and decrease costs with maintenance and infrastructure. One of the most used techniques by operators to minimize the cost associated with infrastructure is the co-location of different technologies.

The aim of this thesis is to develop an algorithm that allows understanding, when co-located with the GSM, the performance of each technology (UMTS and LTE). In the first phase is done a study about planning and key indicators to be taken into account in the development of the algorithm. Is subsequently performed a drive-test in order to collect a number of parameters that will be used to develop the predictive model. After developing the forecasting model is made a second drive-test which aims to validate this model.

**Keywords:** Co-located, GSM, UMTS, LTE, RxLev, RSCP, RSRP, Throughput, Spectral Efficiency.



## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar, quero agradecer aos orientadores, Doutor Pedro Vieira e Eng.º Augusto Silva por todo o apoio e incentivo dado ao longo do desenvolvimento da tese. Os seus conhecimentos e conselhos foram essenciais para ultrapassar os vários obstáculos que foram surgindo ao longo do tempo de realização desta dissertação.

Quero agradecer à minha família por estarem sempre presentes, e por terem proporcionado as melhores condições possíveis para a realização deste trabalho.

Quero agradecer a todos os meus colegas de curso e de trabalho pelo apoio, disponibilidade e encorajamento sem os quais a realização deste trabalho teria sido uma tarefa muito mais difícil.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer à Vodafone por me ter dado a oportunidade de ter desenvolvido um projeto desta natureza com recurso à sua rede e infraestrutura e pelas informações facultadas.



## Índice

<i>Resumo</i> .....	v
<i>Abstract</i> .....	vii
<i>Agradecimentos</i> .....	ix
1 Introdução .....	1
2 Evolução das Comunicações Móveis .....	3
2.1 GSM .....	3
2.1.1 Arquitetura GSM .....	4
2.1.2 Processos de Sinalização .....	6
2.1.2.1 <i>Location Update</i> .....	7
2.1.2.2 <i>Handover</i> .....	8
2.2 General Packet Radio Service (GPRS) .....	9
2.2.1 Arquitetura GPRS .....	9
2.2.2 Gestão de Mobilidade .....	10
2.2.2.1 <i>GPRS Attach</i> .....	12
2.2.2.2 <i>Routing Area Update (RAU)</i> .....	12
2.3 <i>Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE)</i> .....	13
2.3.1 Modulação .....	14
2.4 UMTS .....	16
2.4.1 WCDMA .....	17
2.4.2 Access Stratum (AS) e Non-Access Stratum (NAS) .....	18
2.4.2.1 AS .....	18
2.4.2.2 NAS .....	18
2.4.3 Arquitetura UMTS .....	19
2.4.4 High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) .....	21
2.4.4.1 Canais lógicos no HSDPA .....	22
2.4.4.2 Agendamento .....	22
2.4.5 High Speed Uplink Packet Access (HSUPA) .....	24
2.4.6 High Speed Packet Access (HSPA+) .....	24
2.4.6.1 MIMO .....	25
2.4.6.2 Modulações de ordem superior .....	27
2.4.6.3 <i>Multi-Carrier HSDPA (MC-HSDPA)</i> .....	27
2.5 Long Term Evolution (LTE) .....	29
2.5.1 <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> .....	30
2.5.2 <i>Single Carrier – Frequency Division Multiple Access</i> .....	32
2.5.3 Arquitetura LTE .....	32

2.6	<i>LTE-Advanced</i> .....	34
2.7	Conceitos de Planeamento Celular.....	34
2.8	<i>Link Budget</i> .....	36
3	Modelo de previsão .....	39
3.1	Potência recebida.....	40
3.2	SINR.....	41
3.3	Tratamento matemático do débito binário em função do SINR.....	42
3.3.1	Teorema de <i>Hartley-Shannon</i> .....	42
3.3.2	Modelo Implementado .....	44
4	Ferramenta de previsão.....	47
4.1	<i>Inputs</i> .....	47
4.2	Importar.....	48
4.3	<i>Outputs</i> .....	48
4.3.1	Média, Mínimo e Máximo .....	49
4.3.2	Análise em função do <i>RxLev</i> .....	49
4.3.3	Variação do Débito com o Fator de Carga.....	50
4.3.4	KML.....	50
4.4	Cenários de teste.....	51
4.4.1	Variação da potência de transmissão .....	51
4.4.2	Variação do débito binário com o fator de carga.....	53
4.4.3	Análise da eficiência espectral .....	57
4.4.4	Análise do débito binário em função do nível de cobertura .....	63
5	Caso de estudo .....	71
5.1	Análise de RSCP/RSRP .....	72
5.2	Análise do débito binário .....	75
5.3	Análise em função do <i>RxLev</i> .....	76
5.4	Visualização no mapa.....	80
6	Conclusões.....	85
7	Referências .....	87
	Anexo A.....	89
	Anexo B.....	94
	Anexo C.....	95
	Anexo D.....	97

## Índice de Figuras

Figura 1 - Arquitetura GSM (adaptado de <i>Release 96</i> do 3GPP [5]).	4
Figura 2 - Arquitetura GPRS (adaptado da <i>Release 97</i> do 3GPP [6]).	9
Figura 3 - Modulação GMSK e 8PSK [8].	15
Figura 4 - Esquemas de codificação [7].	16
Figura 5 - Árvore de códigos OVSF [9].	17
Figura 6 - Arquitetura UMTS (adaptado da <i>Release 99 TS 23.002</i> do 3GPP [10]).	19
Figura 7 - Agendamento PF [11].	23
Figura 8 - Função <i>Sync</i> [14].	30
Figura 9 - Espectro de várias funções <i>Sync</i> [14].	31
Figura 10 - Arquitetura LTE (adaptado da <i>Release 8</i> do 3GPP) [16].	33
Figura 11 - Algoritmo do modelo de previsão.	39
Figura 12 - Comparação entre débito binário medido e teórico (U900).	43
Figura 13 - Comparação entre débito binário medido e teórico (L800).	43
Figura 14 - Comparação entre modelo matemático e débito medido (U900).	45
Figura 15 - Comparação entre modelo matemático e débito medido (L800).	45
Figura 16 - Janela de <i>Inputs</i> .	47
Figura 17 - <i>Inputs</i> .	51
Figura 18 - CDF do débito binário para vários fatores de carga (U900).	54
Figura 19 - CDF do débito binário para vários fatores de carga (U2100).	55
Figura 20 - CDF do débito binário para vários fatores de carga (L800).	56
Figura 21 - CDF do débito binário para vários fatores de carga (L1800).	57
Figura 22 - CDF do débito binário para vários fatores de carga (L2600).	57
Figura 23 - Eficiência espectral em função do <i>RxLev</i> (cenário 1).	58
Figura 24 - Eficiência espectral em função do <i>RxLev</i> (cenário 2).	59
Figura 25 - Eficiência espectral em função do <i>RxLev</i> (cenário 3).	60
Figura 26 - Eficiência espectral para $RxLev > -61$ dBm.	61
Figura 27 - Eficiência espectral para $-70 > RxLev > -80$ dBm.	62
Figura 28 - Débito binário em função do <i>RxLev</i> (cenário 1).	63
Figura 29 - Débito binário/eficiência energética para $RxLev > -60$ dBm (cenário 1).	64
Figura 30 - Débito binário/eficiência energética para $-70 > RxLev > -80$ dBm (cenário 1).	65
Figura 31 - Débito binário em função do <i>RxLev</i> (cenário 2).	66
Figura 32 - Débito binário/eficiência energética para $RxLev > -60$ dBm (cenário 2).	67
Figura 33 - Débito binário/eficiência energética para $-70 > RxLev > -80$ dBm (cenário 2).	67
Figura 34 - Débito binário em função do <i>RxLev</i> (cenário 3).	68
Figura 35 - Débito binário/eficiência energética para $RxLev > -60$ dBm (cenário 3).	69
Figura 36 - Débito binário/eficiência energética para $-70 > RxLev > -80$ dBm (cenário 3).	69
Figura 37 - Função densidade cumulativa para RSCP (UMTS900).	73
Figura 38 - Função densidade cumulativa para RSRP (L800).	74
Figura 39 - Função densidade cumulativa para débito binário (U900).	75
Figura 40 - Função densidade cumulativa para débito binário (L800).	76
Figura 41 - Gráfico de RSCP (U900) em função do <i>RxLev</i> .	77
Figura 42 - Gráfico de RSRP (L800) em função do <i>RxLev</i> .	77
Figura 43 - Vista de <i>RxLev</i> medido em <i>Google Earth</i> .	80
Figura 44 - Vista de RSCP medido (em cima) e previsto (em baixo) em <i>Google Earth</i> .	81

Figura 45 - Vista de RSRP medido (em cima) e previsto (em baixo) em <i>Google Earth</i> . .....	82
Figura 46 - Vista de débito medido (em cima) e previsto (em baixo) em <i>Google Earth</i> (U900). ....	83
Figura 47 - Vista de débito medido (em cima) e previsto (em baixo) em <i>Google Earth</i> (L800). ....	84
Figura 48 - Débito binário instantâneo medido (U900). ....	90
Figura 49 - Débito binário instantâneo medido (L800). ....	90
Figura 50 - Débito binário médio e máximo medido (U900). ....	91
Figura 51 - Débito binário médio e máximo medido (L800). ....	91
Figura 52 - Percurso efetuado para o caso de estudo. ....	92
Figura 53 - Medições no TEMS durante <i>drive-test</i> . ....	93

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características GSM / DCS [4].	4
Tabela 2 - Interfaces GPRS [6].	10
Tabela 3 - GPRS vs. EDGE [7].	14
Tabela 4 - Interfaces UMTS [10].	19
Tabela 5 - Características HSDPA [13].	26
Tabela 6 - Características HSUPA [13].	26
Tabela 7 - N° de RBs por Largura de banda [15].	31
Tabela 8 - Média e máximo do débito binário (U900).	52
Tabela 9 - Média e máximo do débito binário (U2100).	52
Tabela 10 - Média e máximo do débito binário (L800).	53
Tabela 11 - Média e máximo do débito binário (L1800).	53
Tabela 12 - Média e máximo do débito binário (L2600).	53
Tabela 13 - Valores de fator de carga para o cenário 1.	58
Tabela 14 - Valores de fator de carga para o cenário 2.	59
Tabela 15 - Valores de fator de carga para o cenário 3.	60
Tabela 16 - Valores de RSCP e RSRP correspondentes a $RxLev$ de -70 e -80 dBm (cenário 1).	65
Tabela 17 - Análise de resultados por $RxLev$ (U900).	78
Tabela 18 - Análise de resultados por $RxLev$ (L800).	79
Tabela 19 - Análise do débito binário, utilizando RSRP medido, por $RxLev$ (L800).	79



## *Acrónimos*

<b>3GPP</b>	<i>3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project</i>
<b>8PSK</b>	<i>8-Phase Shift Keying</i>
<b>AGCH</b>	<i>Access Grant Channel</i>
<b>AICH</b>	<i>Acquisition Indicator Channel</i>
<b>AS</b>	<i>Access Stratum</i>
<b>ATM</b>	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
<b>AuC</b>	<i>Authentication Centre</i>
<b>BCCH</b>	<i>Broadcast Control Channel</i>
<b>BCH</b>	<i>Broadcast Channel</i>
<b>BMC</b>	<i>Broadcast/Multicast Control</i>
<b>BTS</b>	<i>Base Transceiver Station</i>
<b>BSC</b>	<i>Base Station Controller</i>
<b>CBCH</b>	<i>Cell Broadcast Control Channel</i>
<b>CC</b>	<i>Channelization Codes</i>
<b>CP</b>	<i>Control Plane</i>
<b>CPCH</b>	<i>Uplink Common Packet Channel</i>
<b>CPICH</b>	<i>Common Pilot Channel</i>
<b>CN</b>	<i>Core Network</i>
<b>CQI</b>	<i>Channel Quality Indicator</i>
<b>CS</b>	<i>Circuit Switch</i>
<b>CSCF</b>	<i>Call Session Control Function</i>
<b>DCH</b>	<i>Dedicated Channel</i>
<b>DCS</b>	<i>Digital Communication System</i>
<b>DSCH</b>	<i>Downlink Shared Channels</i>

<b>ECSD</b>	<i>Enhanced Circuit Switched Data</i>
<b>EDGE</b>	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>
<b>EGPRS</b>	<i>Enhanced GPRS</i>
<b>EIR</b>	<i>Equipment Identity Register</i>
<b>EIRP</b>	<i>Equivalent Isotropically Radiated Power</i>
<b>EPC</b>	<i>Evolved Packet Core</i>
<b>EPRE</b>	<i>Energy Per Resource Element</i>
<b>EPS</b>	<i>Evolved Packet System</i>
<b>E-DCH</b>	<i>Enhanced Dedicated Channel</i>
<b>E-UTRAN</b>	<i>Evolved – UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
<b>FACCH</b>	<i>Fast Access Control Channel</i>
<b>FACH</b>	<i>Forward Access Channel</i>
<b>FCH</b>	<i>Frequency Correction Channel</i>
<b>FDD</b>	<i>Frequency Division Duplex</i>
<b>FDMA</b>	<i>Frequency Division for Multiple Access</i>
<b>GERAN</b>	<i>GSM EDGE Radio Access Network</i>
<b>GGSN</b>	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
<b>GMM</b>	<i>GPRS Mobility Management</i>
<b>GMSK</b>	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
<b>GPRS</b>	<i>General Packet Radio Service</i>
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile Communications</i>
<b>GSMA</b>	<i>Groupe Speciale Mobile Association</i>
<b>HARQ</b>	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
<b>HLR</b>	<i>Home Location Register</i>
<b>HSCSD</b>	<i>High Speed Circuit Switch data</i>
<b>HSDPA</b>	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
<b>HSPA+</b>	<i>High Speed Packet Access</i>

<b>HSUPA</b>	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
<b>HSS</b>	<i>Home Subscription Server</i>
<b>HS-DPCCH</b>	<i>Uplink High Speed Dedicated Physical Control Channel</i>
<b>HS-DSCH</b>	<i>High Speed - Downlink Shared Channels</i>
<b>HS-SCCH</b>	<i>High Speed – Shared Control Channel</i>
<b>IMS</b>	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
<b>IMSI</b>	<i>International Mobile Subscriber Identity</i>
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i>
<b>L2TP</b>	<i>Layer 2 Tunnelling Protocol</i>
<b>LA</b>	<i>Location Area</i>
<b>LAC</b>	<i>Location Area Code</i>
<b>LTE</b>	<i>Long Term Evolution</i>
<b>LU</b>	<i>Location Update</i>
<b>MAC</b>	<i>Media Access Control</i>
<b>MCS</b>	<i>Modulation Coding Scheme</i>
<b>MC-HSDPA</b>	<i>Multi-Carrier High Speed Downlink Packet Access</i>
<b>MGCF</b>	<i>Media Gateway Control Function</i>
<b>MGW</b>	<i>Media Gateways</i>
<b>MIMO</b>	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
<b>MISO</b>	<i>Multiple Input Single Output</i>
<b>MM</b>	<i>Mobility Management</i>
<b>MME</b>	<i>Mobility Management Entity</i>
<b>MRF</b>	<i>Media Resource Function</i>
<b>MS</b>	<i>Mobile Station</i>
<b>MSC</b>	<i>Mobile Switching Centre</i>
<b>MSISDN</b>	<i>Mobile Subscriber Integrated Services Digital Number</i>
<b>NAS</b>	<i>Non-Access Stratum</i>

<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i>
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
<b>OVSF</b>	<i>Orthogonal Variable Spreading Factor</i>
<b>PACCH</b>	<i>Packet Associated Control Channel</i>
<b>PAGCH</b>	<i>Packet Access Grant Channel</i>
<b>PAPR</b>	<i>Peak – to – Average Power Ratio</i>
<b>PBCCH</b>	<i>Packet Broadcast Control Channel</i>
<b>PC</b>	<i>Power Control</i>
<b>PCCCH</b>	<i>Packet Control Common Channels</i>
<b>PCCPCH</b>	<i>Primary Common Control Physical Channel</i>
<b>PCH</b>	<i>Paging Channel</i>
<b>PCRF</b>	<i>Policy and Charging Resource Function</i>
<b>PCU</b>	<i>Packet Control Unit</i>
<b>PDCCH</b>	<i>Packet Dedicated Control Channels</i>
<b>PDCP</b>	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
<b>PDP</b>	<i>Packet Data Protocol</i>
<b>PDTCH</b>	<i>Packet Data Traffic Channel</i>
<b>PF</b>	<i>Proportional Fair</i>
<b>PICH</b>	<i>Paging Indicator Channel</i>
<b>PNCH</b>	<i>Packet Notification Channel</i>
<b>PPCH</b>	<i>Packet Paging Channel</i>
<b>PRACH</b>	<i>Packet Random Access Channel</i>
<b>PS</b>	<i>Packet Switch</i>
<b>PSTN</b>	<i>Public Switched Telephone Network</i>
<b>PTCCH</b>	<i>Packet Timing Advance Control Channel</i>
<b>P-GW</b>	<i>Packet Data Network Gateway</i>
<b>P-TMSI</b>	<i>Packet – Temporary Mobile Subscriber Identity</i>

<b>QAM</b>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<b>QoS</b>	<i>Quality of signal</i>
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
<b>RA</b>	<i>Routing Area</i>
<b>RACH</b>	<i>Random Access Channel</i>
<b>RAN</b>	<i>Radio Access Network</i>
<b>RANAP</b>	<i>Radio Access Network Application Part</i>
<b>RAU</b>	<i>Routing Area Update</i>
<b>RB</b>	<i>Resource Block</i>
<b>RE</b>	<i>Resource Element</i>
<b>RLC</b>	<i>Radio Link Control</i>
<b>RNC</b>	<i>Radio Network Controller</i>
<b>RRC</b>	<i>Radio Resource Control</i>
<b>RSCP</b>	<i>Received Signal Code Power</i>
<b>RSRP</b>	<i>Reference Signal Received Power</i>
<b>RSRQ</b>	<i>Reference Signal Received Quality</i>
<b>SACCH</b>	<i>Slow Associated Control Channel</i>
<b>SAE</b>	<i>System Architecture Evolution</i>
<b>SAPI</b>	<i>Service Access Point Identifier</i>
<b>SAToP</b>	<i>Structure Agnostic Transport over Packet</i>
<b>SC</b>	<i>Scrambling Codes</i>
<b>SCCPCH</b>	<i>Secondary Common Control Physical Channel</i>
<b>SCH</b>	<i>Synchronization Channel</i>
<b>SC - FDMA</b>	<i>Single Carrier – Frequency Division Multiple Access</i>
<b>SDCCH</b>	<i>Stand-alone Dedicated Control Channel</i>
<b>SF</b>	<i>Spreading Factor</i>
<b>SGSN</b>	<i>Serving GPRS Support Node</i>

<b>SHO</b>	<i>Soft Handover</i>
<b>SIM</b>	<i>Subscriber Identity Module</i>
<b>SIMO</b>	<i>Single Input Multiple Output</i>
<b>SINR</b>	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
<b>SISO</b>	<i>Single Input Single Output</i>
<b>SMS</b>	<i>Short Messages Service</i>
<b>SNR</b>	<i>Signal to Noise Ratio</i>
<b>S-GW</b>	<i>Serving Gateway</i>
<b>TA</b>	<i>Timing Advance</i>
<b>TC</b>	<i>Transcoder</i>
<b>TCH</b>	<i>Traffic Channel</i>
<b>TCH/F</b>	<i>Traffic Channel em Full Rate</i>
<b>TCH/H</b>	<i>Traffic Channel em Half Rate</i>
<b>TDD</b>	<i>Time Division Duplex</i>
<b>TDM</b>	<i>Time Division Multiplexing</i>
<b>TDMA</b>	<i>Time Division for Multiple Access</i>
<b>TEI</b>	<i>Terminal Endpoint Identifier</i>
<b>TMSI</b>	<i>Temporary Mobile Subscriber Identity</i>
<b>TRX</b>	<i>Transceiver</i>
<b>UE</b>	<i>User Equipment</i>
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
<b>UP</b>	<i>User Plane</i>
<b>UTRAN</b>	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
<b>VLR</b>	<i>Visitor Location register</i>
<b>WCDMA</b>	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

# 1 Introdução

As telecomunicações têm evoluído de forma intensa, nomeadamente as comunicações móveis. Com esta evolução, também a forma como as pessoas comunicam tem vindo a sofrer alterações.

Com o surgimento das comunicações móveis (primeira geração, 1G) era possível efetuar chamadas em movimento, mas não com muita facilidade. Os terminais não eram fáceis de transportar devido ao seu tamanho e a sua autonomia era reduzida. Quanto ao custo, este era bastante elevado. Quando surge a segunda geração de comunicações móveis (2G), já começam a ser disponibilizados pelos operadores terminais mais práticos, fáceis de transportar e mais acessíveis (preços mais reduzidos). Nesta segunda geração também surgem novos serviços. Mais tarde aparece a terceira geração (3G) que já permite aos utilizadores, devido à tecnologia utilizada, aceder à internet a ritmos de transmissão bastante próximos aos obtidos nas redes de comunicação fixa. Por fim, com a quarta geração (4G), já é possível obter, numa rede de comunicações móveis, velocidades tão boas ou melhores do que numa rede fixa. [1]

Uma vez que as redes de comunicações móveis já existem há mais de 30 anos, a maioria dos operadores já tem a sua cota de mercado estabelecida. Com o número de clientes já estabelecidos e o custo das comunicações móveis cada vez mais baixos para os clientes, é necessário para o operador encontrar formas de manter o retorno monetário [2]. Desta forma, para ser possível ir buscar este retorno é necessário rentabilizarem a sua rede e pouparem nos custos das infraestruturas, quer sejam custos de instalação ou de manutenção. Para isto ser possível é utilizada a co-localização de tecnologias, ou seja, no mesmo local, são colocadas todas as tecnologias que o operador desejar utilizar numa determinada zona. Para um operador que já possui uma rede construída há anos, cujo local de instalação de cada antena já foi previamente estudado e posteriormente otimizado para uma determinada tecnologia, pode ser um problema aquando do planeamento e implementação de uma nova tecnologia. Por vezes, a localização de uma nova tecnologia pode não ser a localização ideal para outra, devido a diversos fatores como por exemplo a banda de frequência utilizada. Desta forma é necessário fazer um estudo, do desempenho da tecnologia quando co-localizada com a tecnologia anterior. É com este intuito que surge esta dissertação de mestrado, que tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta/ algoritmo que permita ao operador perceber o desempenho de cada uma das tecnologias/banda de frequência a implementar e baseado em

medidas de sistemas anteriores e já instalados, isto para que este possa ser auxiliado nas decisões de otimização da sua rede. Em suma, esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo que permita ao operador efetuar uma previsão do desempenho das tecnologias LTE e UMTS quando co-localizadas com o GSM.

Este documento é composto por 7 capítulos, incluindo este. No capítulo 2 é feita uma descrição à cerca da evolução das comunicações móveis. São explicados os conceitos básicos de comunicações móveis e posteriormente é feita uma descrição técnica de cada tecnologia em funcionamento. Existem também dois subcapítulos ligados ao planeamento celular de redes móveis e ao dimensionamento da ligação (*link budget*), por serem dois assuntos fundamentais para a compreensão dos algoritmos descritos.

O terceiro capítulo diz respeito a uma parte do trabalho efetuado, e que é a execução do *drive-test*. Aqui é descrito o equipamento utilizado, bem como as condições em que os testes foram efetuados.

No capítulo quatro são explicadas as diferentes etapas dos algoritmos desenvolvidos para que seja possível fazer a previsão do desempenho de cada tecnologia.

O antepenúltimo capítulo, o capítulo 5, contém a descrição da ferramenta desenvolvida para previsão e estimação de desempenho. Neste capítulo são também definidos e descritos cenários de teste para validação da ferramenta.

No penúltimo capítulo é feita uma descrição de um caso de estudo onde é possível validar os algoritmos utilizados e detetar correções que necessitem de vir a ser efetuadas.

Por fim, no capítulo 6 encontram-se as conclusões, e trabalho futuro a desenvolver.

## 2 Evolução das Comunicações Móveis

Durante os últimos 20 anos o uso das comunicações móveis tem vindo a crescer de forma intensa. A primeira geração de comunicações móveis surgiu no início da década de 1980. Nesta geração, os terminais móveis eram muito grandes e pouco práticos e por isto esta solução não era muito viável [2].

No início dos anos 90, surge a segunda geração de comunicações móveis (2G). O aparecimento desta tecnologia possibilita uma grande melhoria na qualidade das comunicações, bem como novos serviços e também uma maior mobilidade, uma vez que já se começam a desenvolver terminais mais pequenos e por isso mais fáceis de transportar.

Em finais dos anos 90, mais concretamente em 1998 surge uma nova tecnologia, mais conhecida como a terceira geração (3G). O 3G surge com o *3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project* (3GPP) e tem como principal objetivo aumentar a largura de banda para os utilizadores de modo a que estes consigam ter acesso, no seu terminal móvel, a serviços que até à data só eram possíveis em casa.

Nos últimos anos surge então a quarta geração de comunicações móveis (4G). Esta geração surge não só com o intuito de melhorar os serviços prestados aos utilizadores, mas também, com o objetivo de tornar a rede do operador mais eficiente [1].

### 2.1 GSM

O *Global System for Mobile Communications* (GSM), mais conhecido como 2G, é neste momento a tecnologia de comunicações móveis mais usada em todo mundo, segundo dados da *Groupe Speciale Mobile Association* (GSMA).

Por volta de 1992, começam a aparecer as primeiras redes GSM, utilizadas inicialmente na banda dos 900 MHz, e mais tarde também nos 1800 MHz, denominadas de *Digital Communication System* (DCS) [3].

Na Tabela 1 é possível comparar as características de cada um.

Tabela 1 - Características GSM / DCS [4].

	<b>GSM 900</b>	<b>DCS 1800</b>
<b>Banda de frequência [MHz]</b>	890-915 (UL) 935-960 (DL)	1710-1785 (UL) 1805-1880 (DL)
<b>Distância Duplex [MHz]</b>	45	95
<b>Nº de portadoras</b>	124	374
<b>Time-slot por portadora</b>	8	8
<b>Largura de banda por portadora [kHz]</b>	200	200

### 2.1.1 Arquitetura GSM

Na Figura 1 é possível ver como é constituída uma arquitetura GSM:

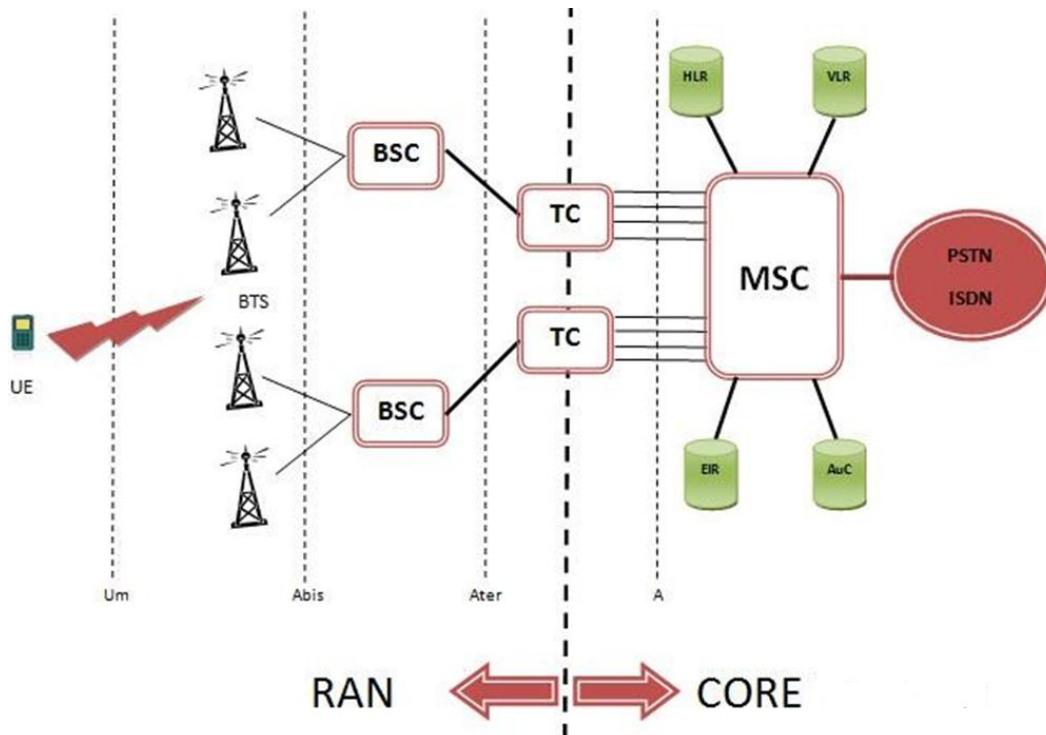


Figura 1 - Arquitetura GSM (adaptado de Release 96 do 3GPP [5]).

Uma rede GSM, tal como a maioria das redes de comunicações rádio, está dividida em duas sub-redes. Uma denominada de *Radio Access Network* (RAN) e a *Core Network* (CN). A primeira, como o próprio nome indica, tem como principal função permitir que os utilizadores tenham acesso à rede via rádio. Com as funções de comutação, gestão de recursos e interligação com outras redes existe a *Core Network*. Sendo que, também aqui se encontram as bases de dados com as informações dos utilizadores necessárias à realização de chamadas/sessões de dados.

As bases de dados existentes na *Core Network* são quatro:

- ***Home Location Register (HLR)*** - contém a informação de cada cliente, *Mobile Subscriber Integrated Services Digital Number (MSISDN)*, o *International Mobile Subscriber Identity (IMSI)*, bem como os seus serviços;
- ***Visitor Location Register (VLR)*** - contém a localização do cliente;
- ***Authentication Centre (AuC)*** – responsável pela autenticação do utilizador;
- ***Equipment Identity Register (EIR)*** – faz a identificação da validade do equipamento.

Os equipamentos existentes dentro da RAN em GSM são as *Base Transceiver Station (BTS)* e as *Base Station Controller (BSC)*. A segunda, como o próprio nome indica, controla as BTSs. É responsável pela gestão de recursos tanto das BTSs como da interface entre estas, e a BSC (interface Abis), é também responsável pelos processos de *handover* entre BTSs. Quanto às BTSs, estas têm a função de difundir informação, pelos vários utilizadores que se encontram na sua área de cobertura, e possuem também algumas funções de controlo do canal rádio, tais como, medições de qualidade e de alinhamento temporal e controlo de potência.

O *User Equipment (UE)* representa o terminal móvel, *Mobile Station (MS)*, do utilizador juntamente com o seu *Subscriber Identity Module (SIM)*. Só é possível para um utilizador aceder à rede se este possuir um SIM com um IMSI válido, com exceção para chamadas de emergência. Cada terminal móvel está dividido em 5 classes que variam consoante as suas características, incluindo a sua potência de transmissão.

Com a função de comutação, existe um nó de maior capacidade denominado *Mobile Switching Centre (MSC)*. Este nó faz também as interfaces com as diversas bases de dados e

com redes externas. Qualquer tráfego existente na rede tem obrigatoriamente que passar pelo MSC.

Entre as BTSs e a BSC, existe a interface Abis, que poderá funcionar sobre TDM ou, mais recentemente, sobre *Internet Protocol* (IP). Com Abis sobre TDM o mapeamento das chamadas é feito em E1s tendo portanto um ritmo de 64 kbps por *time-slot*, sendo que cada *time-slot* transporta quatro canais de tráfego de um TRX com um ritmo de 16 kbps cada. Uma vez que na rede de telefonia fixa, também conhecida como *Public Switched Telephone Network* (PSTN), uma chamada de voz corresponde a um *time-slot* do E1, ou seja tem um ritmo de 64 kbps, é necessário fazer esta conversão. Com esta função, de converter um canal de voz de 16 em 64 kbps e vice-versa, existe o *Transcoder* (TC). Assim, entre a BSC e o TC existe uma interface em que cada chamada tem um ritmo de 16 kbps, denominada de Ater e a seguir ao TC até à MSC existe a interface A, a 64 kbps. Cada interface Ater irá originar quatro interfaces A.

Atualmente, começa-se a utilizar a interface Abis sobre uma transmissão baseada em IP. Este tipo de transmissão é feito num domínio de *Packet Switch* (PS) enquanto o tipo de serviços existentes nesta interface é orientado para *Circuit Switch* (CS). Por esta razão, vai ser necessário encontrar um mecanismo que segmente, adapte e encapsule as tramas TDM em pacotes IP. Comparado com o TDM, este tipo de transmissão fornece mais capacidade por largura de banda, uma vez que é possível partilhar a sinalização, a voz, dados ou até recursos de UMTS nas mesmas conexões.

Neste tipo de transmissão é definido um canal de tráfego numa interface E1, que transporta vários *time-slots* de 64 kbps e é definido por um *Terminal Endpoint Identifier* (TEI). Posteriormente são transportadas em túneis *Layer 2 Tunnelling Protocol* (L2TP). Dentro destes túneis, os vários tipos de serviços são diferenciados pelo *Service Access Point Identifier* (SAPI).

### 2.1.2 Processos de Sinalização

Assim que o MS se liga, é iniciado o processo de *IMSI Attach*. Este processo consiste em fazer o registo do MS no MSC e no VLR. Ao receber esta mensagem o VLR atribui um *Temporary Mobile Subscriber Identity* (TMSI), este TMSI é atribuído temporariamente e tem

de ser alterado cada vez que o MS alterar a sua área geográfica. Durante todo o tempo em que o MS estiver conectado à rede é utilizado este TMSI em vez do IMSI, de modo a impossibilitar que o MS seja detetado por elementos alheios à rede.

Ao contrário deste procedimento existe o IMSI *Detach* que acontece quando o MS é desligado para informar a rede de que se vai desligar. Ao receber esta mensagem o VLR atualiza a informação do MS. Desta forma o VLR não necessita de ocupar recursos quando o utilizador for contactado.

### 2.1.2.1 *Location Update*

Uma rede GSM, é uma rede dividida em áreas denominadas de *Location Areas* (LA). A cada LA está atribuído um código, *Location Area Code* (LAC) que as identifica no VLR, contendo cada uma várias BTSs.

A única informação que a rede possui sobre a localização de um determinado utilizador, quando este não se encontra a efetuar nenhuma comunicação, é a LA. Desta forma, uma vez que em cada LA existem várias BTSs, quando a rede necessita de saber a posição do MS é difundida por todas as BTSs dessa LA uma mensagem de *paging*. Ao receber a mensagem de *paging*, o MS vai responder à BTS e a partir desse momento a rede já sabe em que célula se encontra o utilizador para quem a chamada é destinada.

Para isto ser possível, o MS tem de estar constantemente em comunicação com a rede e assim que mudar de LA, terá de fazer um *Location Update* (LU). Podem existir dois tipos de LU, dentro do mesmo VLR, ou entre VLRs diferentes, sendo que este último requer maior troca de sinalização.

Estas LAs não podem ser muito grandes nem muito pequenas, porque quanto maior forem mais sinalização será necessária trocar quando se fizer um processo de *paging*, contrariamente, se a LA for muito pequena requer maior consumo de bateria ao móvel, uma vez que terá de estar constantemente a fazer LU.

### 2.1.2.2 Handover

Para que seja garantida a mobilidade, existe um processo denominado de *handover*. Tal como no LU, este processo pode acontecer entre células da mesma BSC, entre BSCs diferentes ou até mesmo entre MSCs diferentes.

Na decisão do *handover* é necessário ter em conta os níveis de potência, do MS e das BTSs (tanto da que serve o MS como das vizinhas), medidos pelo MS e pela BTS que serve o MS. Com estas medidas e de acordo com a qualidade da transmissão, tráfego e capacidade das células é tomada a decisão de *handover*.

As diferentes etapas existentes durante o processo de *handover*, quando este ocorre dentro da mesma BSC são:

1. UE envia as medidas periódicas para a rede;
2. A BSC manda a nova BTS ativar um canal de tráfego;
3. A BSC envia a configuração do novo canal de tráfego para o móvel, através da BTS antiga, esta informação é enviada através do canal *Fast Access Control Channel* (FACCH). Ver Secção 2.2.4;
4. O MS sintoniza-se e sincroniza-se com a nova BTS e começa a troca de mensagens de *handover* através do canal FACCH;
5. A nova BTS deteta as mensagens de *handover* e fornece informação ao MS sobre o *Timing Advance* (TA);
6. O MS informa a nova BTS de que o *handover* está terminado;
7. A BSC dá a informação à BTS antiga de que o canal de tráfego pode ser libertado.

A complexidade do processo de *handover* aumenta com o número de equipamentos envolvidos na troca de mensagens, se o *handover* for feito entre células de BSCs diferentes, a troca de mensagens terá de ocorrer não só entre as BSCs e as BTSs, mas também entre as BSCs e o MSC/VLR.

## 2.2 General Packet Radio Service (GPRS)

O GPRS, também conhecido como o 2.5G, é uma extensão ao GSM que permite uma transmissão em comutação por pacotes, em vez de comutação por circuitos. Permite ter maiores ritmos de transmissão, até 20 kbit/s por *time-slot*, e novos serviços, como o acesso à Internet.

### 2.2.1 Arquitetura GPRS

No que toca à rede de acesso, o único *hardware* necessário a acrescentar é uma carta na BSC, que tem como função controlar o tráfego de pacotes na rede. Esta carta chama-se *Packet Control Unit* (PCU).

Já na rede central (Core), é necessário acrescentar um *Serving GPRS Support Node* (SGSN), responsável por fazer a comutação dos pacotes existentes na rede e o *Gateway GPRS Support Node* (GGSN) que tem como função fazer a interligação para outras redes (Ver Figura 2).

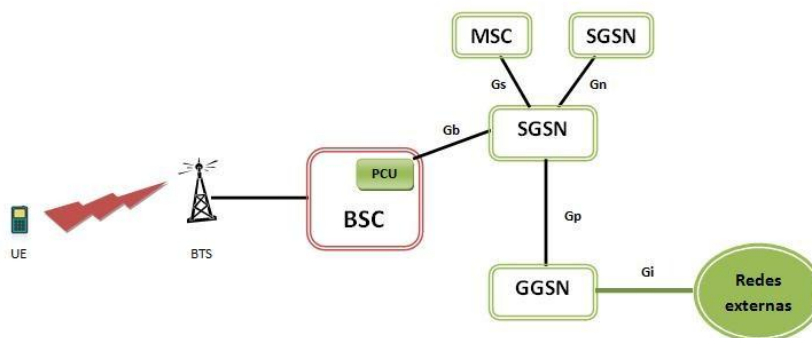


Figura 2 - Arquitetura GPRS (adaptado da *Release 97* do 3GPP [6]).

Com o GPRS aparecem também novas interfaces (ver Tabela 2).

Tabela 2 - Interfaces GPRS [6].

<b>Interface</b>	<b>A-end</b>	<b>B-end</b>
<b>Gb</b>	SGSN	BSC
<b>Gs</b>	SGSN	MSC
<b>Gp</b>	SGSN	GGSN
<b>Gi</b>	GGSN	Outras redes
<b>Gn</b>	SGSN	SGSN

A forma de o GPRS conseguir obter ritmos de transmissão maiores do que os obtidos em GSM é a utilização de vários *time-slots* numa só trama, para o mesmo utilizador e os tipos de codificação utilizados.

### 2.2.2 Gestão de Mobilidade

Tal como no GSM, também no GPRS é necessário que exista gestão da mobilidade. Numa rede GPRS, as LAs (existentes em GSM) são divididas em várias *Routing Areas* (RA). Uma vez que o GPRS é uma tecnologia de domínio PS, é expectável que existam mais mensagens de *paging* direccionadas a um MS do que em GSM, por esta razão é necessário saber com maior precisão a área onde se encontra o MS.

No GPRS, o MS pode estar em três estados diferentes:

- **Idle** – o MS não se encontra registado na rede GPRS, só existe atualização da LA;
- **Ready** – o MS está a efetuar transferência de pacotes, só existe atualização da célula;
- **Standby** – o MS está à espera de uma transmissão ou receção de pacotes, só existe atualização da RA.

No que diz respeito à gestão de mobilidade, uma rede GPRS suporta três modos de operação:

- **Modo I:**
  - Suporta procedimentos de atualização de localização e de *paging* conjuntos para utilizadores em GSM e GPRS;
  - É necessária a interface Gs;
  - O MS escuta um canal de *paging* (CCCH + PDTCH ou PCCCH + PDTCH).
  
- **Modo II:**
  - Não existem procedimentos de atualização de localização e *paging* conjuntos;
  - Não é necessária a interface Gs;
  - O MS escuta um canal de *paging* (CCCH).
  
- **Modo III:**
  - Não existem procedimentos de atualização de localização de *paging* conjuntos;
  - Não é utilizada a interface Gs;
  - O MS tem de escutar dois canais de *paging* (CCCH e PCCCH).

No SGSN existem dois registos importantes para a gestão de mobilidade, um deles denominado de *Mobility Management Context* e o outro de *Packet Data Protocol (PDP) Context*.

O *Mobility Management Context* contém parâmetros como: a identificação do utilizador, o estado em que se encontra (*Idle*, *Ready* ou *Standby*), chaves de autenticação e encriptação, a identificação do VLR que serve a área onde se encontra o MS, parâmetros de SMS, número de telefone, identificação da RA e se o MS se encontrar no estado *Ready* a identificação da célula. Existe um registo destes para cada MS que esteja registado no SGSN.

O *PDP Context* é como uma estrutura de dados que existe no SGSN e no GGSN e que contém a informação acerca da sessão do utilizador quando este se encontra numa sessão ativa. Quando um MS pretende utilizar uma sessão GPRS, após fazer o *GPRS Attach* (ver Secção 2.2.2.1) tem de ativar o *PDP Context*. Neste registo encontram-se parâmetros como o IP do MS e o seu IMSI.

### 2.2.2.1 GPRS Attach

Este procedimento é semelhante ao IMSI Attach em GSM e tem como funções:

- Autenticar o MS;
- Gerar a chave de encriptação;
- Ativar a encriptação;
- Atribuir uma identificação temporária, *Packet* – TMSI (P-TMSI);
- Copiar o perfil do assinante do HLR para o SGSN;
- Verificar os direitos do acesso do assinante.

Depois de o GPRS Attach estar terminado:

- A localização do MS é atualizada;
- A comunicação entre o MS e o SGSN é segura;
- É recolhida a informação de taxação;
- O SGSN sabe quais os serviços permitidos ao MS;
- O HLR sabe em que SGSN é que o MS se encontra registado.

### 2.2.2.2 Routing Area Update (RAU)

Uma vez que, em GPRS, a posição do MS é definida por uma RA, é necessário que a rede se mantenha atualizada em relação à posição do MS, assim como acontece com as LAs em GSM. Da mesma forma que existe o procedimento de LAU também existe o de RAU.

Este processo é efetuado quando o MS deteta que entrou numa nova RA (após ter feito o GPRS Attach). Podem existir duas situações diferentes:

- **RAU intra-SGSN** – Quando ambas as RAs pertencem ao mesmo SGSN;
- **RAU inter-SGSN** – Quando ambas as RAs pertencem a SGSNs diferentes.

O processo de RAU intra-SGSN é bastante mais simples e consiste em três etapas apenas:

1. O MS faz o pedido de RAU ao SGSN;
2. O SGSN aceita o pedido de RAU;
3. O MS informa o SGSN que o RAU está completo.

O mesmo não acontece quando o RAU é entre SGSNs diferentes:

1. O MS faz o pedido de RAU ao novo SGSN;
2. O novo SGSN faz o pedido do *Mobility Management Context* ao SGSN antigo;
3. O SGSN antigo passa a informação de MM ao novo SGSN;
4. O SGSN antigo faz o reencaminhamento dos pacotes para o novo SGSN;
5. O Novo SGSN faz o pedido de *PDP Context* ao antigo;
6. O Novo SGSN faz a atualização da localização do MS no HLR;
7. O HLR informa o SGSN antigo que este pode cancelar a localização do MS;
8. O HLR envia para o novo SGSN os dados do utilizador;
9. O Novo SGSN confirma a atualização da localização ao HLR;
10. O MS envia ao novo SGSN a aceitação da RAU.

### **2.3 Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE)**

O EDGE é uma evolução do GSM que tem como objetivo aumentar o ritmo de transmissão e a eficiência espectral. Esta tecnologia é também conhecida como 2,75G. Surgiu pela primeira vez em 2003 na América do Norte.

Esta tecnologia pode ser dividida em dois ramos. Um deles é o CS, conhecido como *Enhanced Circuit Switched Data* (ECSD) e o outro diz respeito ao PS, *Enhanced GPRS* (EGPRS).

Com a introdução do EDGE, o tráfego PS veio a sofrer melhorias uma vez que surge uma nova camada física e permite usufruir até 59,2 kbit/s por *time-slot* ao usar nove esquemas de modulação, denominados de *Modulation Coding Scheme* (MCS). Permite ritmos até 473,6 kbit/s (teóricos), isto graças a novas técnicas de modulação (ver Tabela 3) combinadas com mecanismos de adaptação da ligação.

Com o GPRS, foram introduzidos vários protocolos e equipamentos na rede. Com o EDGE apenas uma nova técnica de modulação e codificação de canal surgiu. A nível de protocolos, apenas na RAN existem protocolos diferentes entre o GPRS e o EDGE, na CN ambos são tratados da mesma forma.

Para além de aumentar o ritmo de transmissão, o EDGE também aumenta a capacidade. O mesmo *time-slot* permite suportar mais utilizadores.

Na Tabela 3 é possível ver uma comparação técnica entre o GPRS e o EDGE. Apesar de ambos terem o mesmo *symbol rate*, têm ritmos de transmissão diferentes. O EDGE consegue transmitir três vezes mais bits que o GPRS no mesmo período de tempo [7].

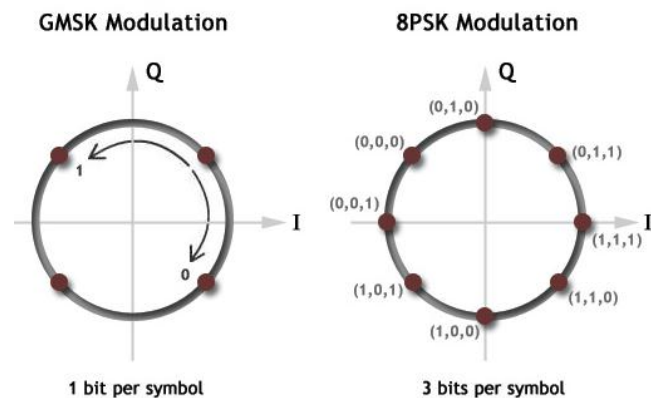
Tabela 3 - GPRS vs. EDGE [7].

	<b>GPRS</b>	<b>EDGE</b>
<i>Modulation</i>	GMSK	8-PSK/GMSK
<i>Symbol rate [ksym/s]</i>	270	270
<i>Modulation bit rate [kb/s]</i>	270	810
<i>Radio data rate per time-slot [kb/s]</i>	22,8	69,2
<i>User data rate per time-slot [kb/s]</i>	20 (CS4)	59,2 (MCS9)
<i>User data rate (8 time-slots) [kb/s]</i>	160	473,6
<i>Gross rate (8 time-slots) [kb/s]</i>	182,4	553,6

### 2.3.1 Modulação

Enquanto que no GPRS e no GSM era usada uma modulação *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK), no EDGE é usada uma modulação *8-Phased Shift Keying* (8-PSK).

No GMSK, cada bit representa uma variação na fase e cada símbolo contém apenas um bit. No 8-PSK cada símbolo representa 3 bits consecutivos, ou seja é enviada a mesma quantidade de símbolos no mesmo período de tempo, mas são enviados três vezes mais bits aumentando assim o ritmo de transmissão para o triplo (ver Figura 3).



**Figura 3 - Modulação GMSK e 8PSK [8].**

Uma vez que existem mais bits por símbolo estes vão estar mais próximos, logo existirá uma maior probabilidade de ocorrerem erros devido à má identificação destes. Se existirem boas condições rádio, não existe qualquer problema, mas com condições menos favoráveis o GMSK torna-se mais eficiente, devido à menor probabilidade de erro. Para contornar este problema são adicionados bits extra para a correção dos erros e recuperar a informação inicial. Devido a isto, o EDGE utiliza ambos os tipos de modulação.

O EDGE utiliza nove esquemas de modulação, denominados de MCS1 até MCS9. Os quatro esquemas mais baixos (MCS1 até MCS4) usam GMSK enquanto os outros cinco usam 8-PSK.

Na Figura 4 é possível observar os diferentes esquemas de modulação e respectivos ritmos de transmissão.

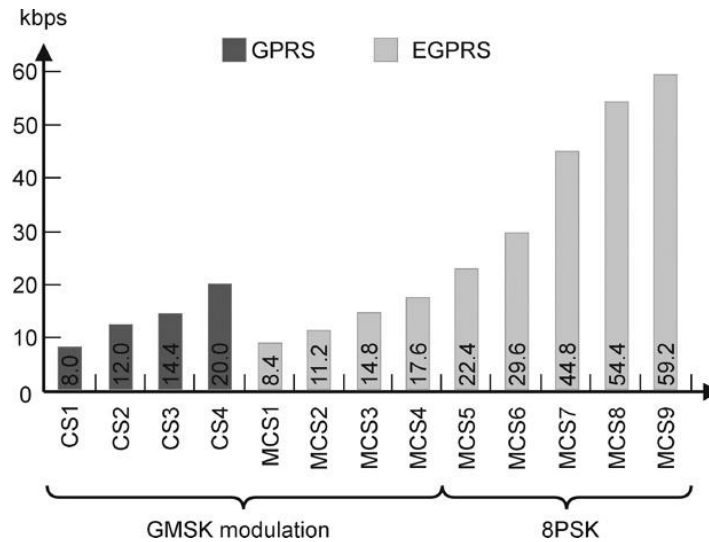


Figura 4 - Esquemas de codificação [7].

Enquanto que no GPRS o ritmo máximo de transmissão é de 20 kbps, com CS4, no EGPRS é possível ir até aos 59,2 kbps, com MCS9. Apesar de os quatro esquemas de códigos do GPRS e os quatro primeiros esquemas do EGPRS usarem o GMSK, o EGPRS consegue melhores resultados devido a ter cabeçalhos e *payloads* diferentes nos pacotes. Um pacote enviado com um esquema de código maior (menos bits de correção de erros) que não é recebido nas melhores condições, pode ser retransmitido com um esquema de código mais baixo (com mais bits de correção de erros). Isto só é possível no EDGE, porque este consegue voltar a segmentar os pacotes, ou seja dividir o pacote inicial em segmentos e enviar os vários segmentos com esquemas de modulação mais baixos e menos propícios a erros.

## 2.4 UMTS

No fim dos anos 90 e início de 2000 apareceu o *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), mais conhecido como a terceira geração (3G).

A grande diferença nesta nova geração é a técnica de acesso ao meio utilizada, o *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA).

### 2.4.1 WCDMA

Ao contrário do GSM, que usava a técnica de TDMA para permitir que vários utilizadores acessem à rede em simultâneo, o UMTS distingue os diversos utilizadores através de uma atribuição de códigos. Esta técnica consiste em multiplicar os dados a enviar por dois conjuntos de códigos, os primeiros denominados de *Channelization Codes* (CC) e os segundos de *Scrambling Codes* (SC).

Os CC permitem espalhar o sinal e fazer a separação dos serviços. Estes códigos são ortogonais entre si e podem ser mapeados na árvore *Orthogonal Variable Spreading Factor* (OVSF), Figura 5.

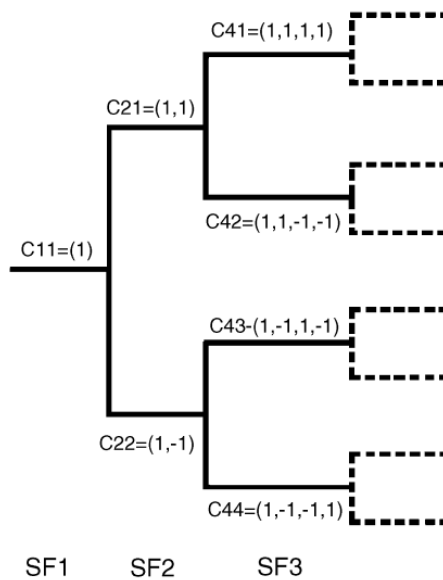


Figura 5 – Árvore de códigos OVSF [9].

Cada conjunto de códigos consiste num *Spreading Factor* (SF). Sendo o SF, a razão entre o *chip rate* e o *bit rate*.

O *chip rate* corresponde ao número de chips por segundo a que o sinal é transmitido, e tem o valor de 3,84 Mchip/s.

Depois de ser feito o espalhamento, o sinal é então multiplicado pelo SC. Esta operação existe para que seja possível distinguir os diferentes MSs (em *uplink*) e as diferentes células (em *downlink*).

## 2.4.2 Access Stratum (AS) e Non-Access Stratum (NAS)

Uma forma de estruturar uma rede UMTS é fazer a sua divisão em duas camadas: a camada AS e a NAS. Os protocolos da camada AS providenciam os meios para transportar o tráfego sobre a interface rádio e fazem a gestão dos seus recursos. Ao contrário desta camada, os protocolos na NAS são aplicados entre o UE e a CN sobre os quais a AS não tem influência.

### 2.4.2.1 AS

Esta camada está dividida em duas subcamadas: a *Uu Stratum* e a *Iu Stratum*. A primeira faz a gestão dos recursos entre o UE e a RAN onde atuam protocolos como *Medium Access Control* (MAC), *Radio Link Control* (RLC), *Broadcast/Multicast Control* (BMC), *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP) e *Radio Resource Control* (RRC). Sendo este último o principal protocolo de sinalização entre o UE e a RNC.

A subcamada *Iu Stratum* é responsável pela comunicação entre a RAN e a CN. O principal protocolo nesta subcamada é o *Radio Access Network Application Part* (RANAP). Este protocolo é usado entre a RNC e o MSC ou o SGSN.

Resumindo, a AS transporta mensagens NAS entre o UE e a CN.

### 2.4.2.2 NAS

Os protocolos desta camada terminam na CN e podem ser divididos em duas camadas: uma correspondente ao *Mobility Management* (MM) e a outra ao *GPRS Mobility Management* (GMM), sendo a primeira de domínio CS e a segunda PS. Estes protocolos permitem que a rede acompanhe os utilizadores enquanto estes se movimentam. É também garantida a confidencialidade ao utilizador e apenas utilizadores autenticados podem ter acesso à rede.

Sobre estas camadas atuam vários protocolos, tais como protocolos de *Call Control*, *Session Management*, *Supplementary Service* e SMS. O *Call Control* atua no domínio CS e o *Session Management* no domínio PS. Os *Supplementary Services* são uma extensão dos serviços normais, como por exemplo o reencaminhamento de chamadas.

### 2.4.3 Arquitetura UMTS

No UMTS, existe a vantagem de não ser obrigatória a inserção de novos elementos ao nível do Core. Contudo, com a *Release 4* do 3GPP vão surgir novos elementos com o objetivo de tornar a rede mais eficiente, como se poderá ver mais à frente. Os únicos novos elementos que aparecem, são os *Node B*, que têm praticamente as mesmas funções das BTS em GSM, e as *Radio Network Controller* (RNC) que estão para os *Node B* assim como as BSC estão para as BTSs (ver Figura 6).

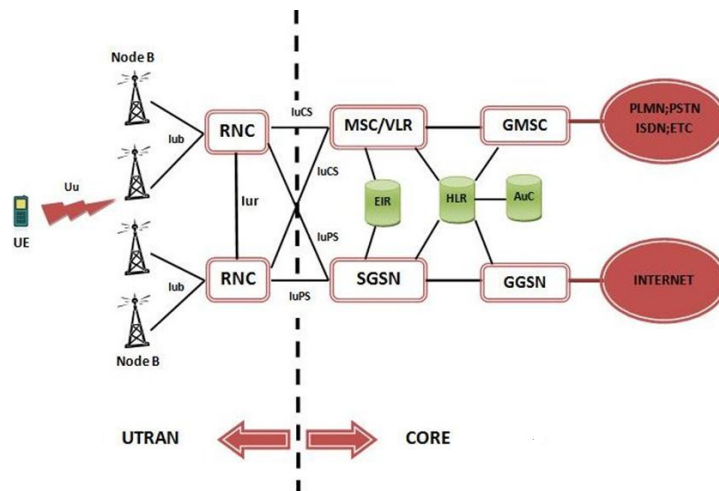


Figura 6 - Arquitetura UMTS (adaptado da *Release 99 TS 23.002* do 3GPP [10]).

Devido à rápida evolução e crescimento da utilização do tráfego de dados, surgiu a necessidade de criar uma tecnologia que permitisse grandes débitos e que funcionasse em comutação de pacotes, mas que em simultâneo funcionasse também por comutação de circuitos devido à existência do GSM. Posto isto, desenvolveu-se o UMTS que funciona em ambos os tipos de comutação. Surgem na CN duas novas interfaces: a Iu CS e a Iu PS (ver Tabela 4).

Tabela 4 - Interfaces UMTS [10].

<b>Interface</b>	<b>A-end</b>	<b>B-end</b>
<b>Uu</b>	UE	Node B
<b>Iub</b>	Node B	RNC
<b>Iur</b>	RNC	RNC
<b>Iu CS</b>	RNC	MSC
<b>Iu PS</b>	RNC	SGSN

Com a interface Iur, é agora possível otimizar o processo de *handover*, uma vez que as RNC estão ligadas entre si, podendo por isso tomar decisões de *handover*, sem que seja necessário a intervenção do MSC ou do SGSN. Com isto é também possível fazer um *Soft Handover* (SHO) entre RNCs, que consiste em estabelecer a ligação ao novo *Node B* antes de terminar a comunicação com o antigo, assim o móvel fica conectado a dois ou mais *Node B* em simultâneo, reduzindo a probabilidade de queda da chamada.

O processo de SHO só é possível entre células que utilizem a mesma banda de frequência para *uplink* e *downlink*. É estabelecida uma ligação entre o UE e cada uma das células envolvidas no SHO. Como o UE se encontra ligado a duas células em simultâneo vai existir diversidade, permitindo assim que o móvel transmita com menos potência devido ao ganho associado a esta diversidade. Uma vez que a potência do móvel será menor, também a interferência causada por este diminuirá.

De acordo com as especificações do 3GPP, dependendo das características do UE e da rede, o UE pode ter até seis ligações com outras células em simultâneo e com uma ligação ativa na camada NAS [9].

Por esta razão existe um outro aspeto, para além de ser necessário contar o número de ligações ativas entre o UE e as células, tem de haver uma maior gestão de mobilidade (MM). Existem dois tipos de MM na rede, um a nível da camada NAS que consiste, basicamente, em fazer LU e *handovers* inter-MSC em CS e o outro consiste em fazer *Routing Area Update* no domínio PS. Na UTRAN surge uma nova função de MM que é controlada pela RNC. O MM é executado usando mensagens de sinalização RRC e permite mudanças de células e adição/remoção de ligações quando existe SHO. Com a *Release 4* do 3GPP apareceram algumas mudanças na CN a nível de CS, como o surgimento das *Media Gateways* (MGW) e dos *MSC Servers*. Com estes dois novos tipos de equipamentos é possível separar o tráfego correspondente à sinalização, *Control Plane* (CP), e o tráfego de dados, *User Plane* (UP). As MGW, sendo equipamentos que suportam vários tipos de protocolos de transmissão, como o *Time Division Multiplexing* (TDM), ATM, IP, etc., suportam o tráfego de UP. As *MSC Servers* suportam o tráfego de CP. Com isto, é possível fazer o reencaminhamento das chamadas, sem que estas necessitem de passar pelas *MSC Servers*. O circuito é estabelecido inicialmente pela *MSC Server*, que informa qual o circuito da MGW que vai ficar reservado para a chamada, a partir daqui a própria MGW trata do resto.

Com o surgimento da *Release 5* aparece um novo subsistema, destinado a lidar com serviços baseados em IP, este subsistema denomina-se de *IP Multimedia Subsystem (IMS)*. O IMS está dividido em três funções:

- ***Media Resource Function (MRF)*** – controla os recursos disponíveis para os serviços;
- ***Call Session Control Function (CSCF)*** – tem as funções de controlar as sessões das chamadas, é o primeiro contacto do UE com o IMS, e atua como *Firewall* para fora da rede;
- ***Media Gateway Control Function (MGCF)*** – tem como função controlar as conversões de protocolo nas MGW.

#### 2.4.4 High Speed Downlink Packet Access (HSDPA)

O HSDPA, especificado na *Release 5* do 3GPP, pode ser visto como uma evolução da *Release 99*, que especifica o conceito de canais em *Downlink* partilhados, DSCH, é usado o canal *High Speed - DSCH (HS-DSCH)*.

Com o HSDPA, o *throughput* é aumentado através de uma transmissão rápida a nível da camada física combinada com uma rápida adaptação da ligação (*Fast Link Adaptation*) por parte do Node B.

Isto só é possível adicionando novas funcionalidades ao Node B, este agora consegue fazer um rápido escalonamento dos dados a enviar para os respetivos UEs. Este escalonamento é baseado no *feedback* dado pelo UE sobre a qualidade, na capacidade do UE, na disponibilidade dos recursos, no estado do *buffer*, *Quality of Service (QoS)*, prioridade e devido às seguintes características do HSDPA:

- Divisões da camada MAC – algumas funcionalidades MAC foram passadas para o Node B, para que o agendamento da transmissão de pacotes seja mais eficiente;
- Tamanho da trama de *downlink* de 2 ms;
- *Fast Link Adaptation* e relatórios sobre a qualidade do canal de 2 em 2 ms, modulações *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)* e *16-Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM)*;

- *Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)* – retransmissões rápidas;
- *Data User Multiplexing/* transmissão em canal partilhado – transmissão de dados é feita em canal partilhado no tempo e em códigos;
- Agendamento de pacotes – agendamento rápido feito pelo Node B de 2 em 2 ms.

A adaptação da modulação é feita consoante a relação sinal ruído. Se o C/I aumentar, o *Node B* escolhe uma modulação de ordem superior para ser possível aumentar o *throughput*.

#### 2.4.4.1 Canais lógicos no HSDPA

Se o SF é sempre 16, o número de códigos disponíveis são 15, mas dependendo do tipo de UE, um só terminal pode usar até 15 códigos. Só existem 15 códigos disponíveis, porque é necessário deixar um “ramo” da árvore para os canais CPICH, PICH, AICH, PCCPCH, SCCPCH e *High-Speed Shared Control Channel (HS-SCCH)*.

Através do canal CPICH é feita uma estimação do canal, durante os 3 *time-slots* seguintes o *Uplink High Speed Dedicated Physical Control Channel (HS-DPCCH)* fornece uma indicação da qualidade do canal, *Channel Quality Indicator (CQI)*. Com esta informação é feito o agendamento pelo *Node B*, e de seguida é enviado pelo HS-SCCH a informação necessária para que o UE faça a desmodulação do canal HS-DSCH.

Desde que é feita a medição do canal pelo CPICH até o UE começar a receber os dados decorrem cerca de 5 ms.

#### 2.4.4.2 Agendamento

O rápido agendamento dos dados a enviar é um ponto forte do HSDPA. Um dos algoritmos utilizados é o *Maximum Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)*, em que a célula serve o utilizador que tem as melhores condições do canal, ou seja, aquele que tem as melhores condições para suportar débitos maiores. Este algoritmo tem como vantagem o elevado *throughput* por célula e tem como desvantagem o facto de não ser justo para todos os utilizadores, isto é, se um utilizador se encontrar longe do *Node B* pode nunca chegar a receber tráfego.

De forma a contornar este problema desenvolveu-se o algoritmo *Proportional Fair* (PF) que faz o agendamento tendo em conta não só a qualidade do sinal recebido, mas também o tamanho do *buffer* de cada utilizador [9].

Na Figura 7 é apresentado o princípio de funcionamento do algoritmo. No primeiro TTI (2 ms) é enviada informação para o utilizador B, porque a qualidade do sinal recebido deste é melhor que o utilizador A. É possível observar no segundo gráfico que o *buffer* de B baixa e o de A sobe, no entanto no instante seguinte, o *Node B* continua a enviar informação para o B, porque este continua com melhor sinal. Só no terceiro TTI é que começa a enviar para o utilizador A, ou seja até aqui o *Node B* apenas envia informação para o utilizador com melhor qualidade de sinal. Apenas quando a diferença dos *buffers* é muito grande, o *Node B* envia para o utilizador com *buffer* maior, por forma a equilibrar a quantidade de informação no *buffer* de cada um.

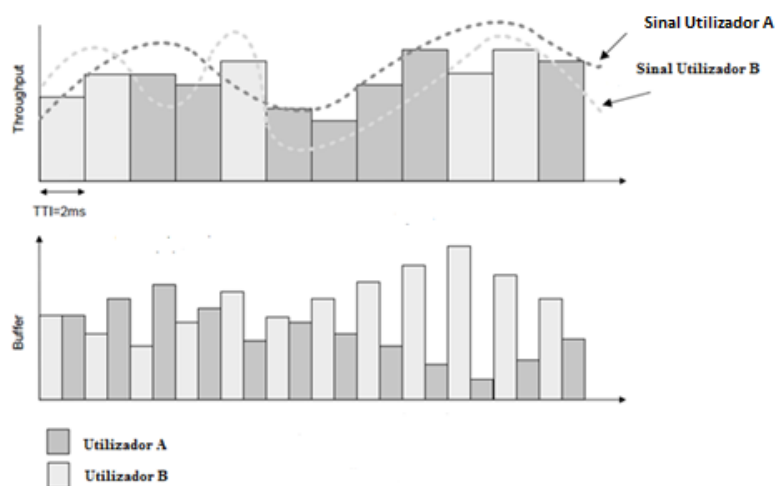


Figura 7 - Agendamento PF [11].

Um dos problemas dos algoritmos previamente referidos é o facto de não terem em conta os serviços em tempo real. Para tentar resolver esta questão foi desenvolvido o algoritmo *Modified Largest Weighted Delay First*. Este algoritmo tem como objetivo manter a probabilidade de atraso dos pacotes de cada utilizador abaixo de um limite estabelecido, limite esse que varia consoante o serviço que está a ser utilizado [12].

Outro algoritmo que visa diminuir o atraso dos pacotes é o *Expo-Linear*, que utiliza um algoritmo PF quando tem um atraso baixo e vai aumentando de forma exponencial a prioridade do utilizador à medida que este se vai aproximando do limite.

### 2.4.5 High Speed Uplink Packet Access (HSUPA)

O HSUPA, especificado na *Release 6* do 3GPP, tem como objetivo aumentar os ritmos de transmissão e a área de cobertura em *Uplink*, e é também conhecido como *Enhanced Dedicated Channel* (E-DCH).

Aqui, os MSs partilham o mesmo canal de *uplink*, como tal este é fortemente limitado pela interferência que cada UE causa nos restantes. Desta forma, é necessário que exista um bom mecanismo que controle a potência de emissão de cada MS.

De seguida, são apresentadas algumas características mais importantes do HSUPA:

- PC Rápido – o E-DCH é transmitido com um *offset* de potência relativa à potência controlada do canal de controlo em *uplink*. Ao ajustar este *offset* é possível controlar a potência de transmissão permitida do E-DCH;
- SHO;
- *Multi-code operation*;
- Agendamento de pacotes – ajusta a máxima potência recebida permitida de um UE;
- Rápidas retransmissões HARQ.

Para ser possível suportar os elevados ritmos de transmissão é necessário ter *multi-code operation* e SF variável. Assim como no HSDPA, é o *Node B* quem toma as decisões de agendamento, mas o *buffer* com os dados a transmitir encontra-se no UE.

Enquanto no HSDPA a potência do *Node B* pode ser enviada apenas para um utilizador, no HSUPA vários utilizadores podem estar a enviar em paralelo.

### 2.4.6 High Speed Packet Access (HSPA+)

Mais uma evolução do 3G, o HSPA+ aparece na *Release 7* do 3GPP. Esta evolução dá-se como um passo intermédio em direção ao LTE (que será abordado na secção 2.4).

A grande evolução tecnológica do HSPA+ deve-se ao uso da tecnologia *Multiple Input Multiple Output* (MIMO).

#### 2.4.6.1 MIMO

Os sistemas de comunicações móveis tradicionais são baseados na utilização de uma única antena, quer do lado do recetor, quer do lado do emissor (sistemas *Single input single output* (SISO)), permitindo a exploração dos domínios do tempo, da frequência e da codificação.

A utilização de antenas inteligentes, sistemas em que um dos terminais está equipado com um agregado de antenas (*Single Input Multiple Output* (SIMO) e *Multiple Input Single Output* (MISO)), permite a exploração parcial do domínio espacial, podendo-se obter ganhos de diversidade espacial e também ganhos fornecidos pela técnica de formatação de feixe, quando utilizadas.

Os sistemas que utilizam múltiplas antenas, quer do lado do transmissor quer do lado do recetor, designam-se de sistemas MIMO e permitem a exploração total do domínio espacial. Os sistemas MIMO permitem a obtenção de diferentes ganhos: diversidade, beamforming e multiplexagem espacial. Um ambiente caracterizado pela existência de um elevado número de componentes multipercurso independentes, apresenta uma capacidade de transmissão de informação muito superior que qualquer outro sistema de comunicações móveis. A introdução do conceito de multiplexagem espacial é fundamental pois permite que as características de propagação das componentes multipercurso sejam exploradas de forma a criar múltiplos canais virtuais de transmissão paralelos.

O desafio de aumentar a taxa de transmissão e a fiabilidade da informação, envolve diversas dificuldades. Para se aumentar a capacidade de um canal (bps) é necessário aumentar a largura de banda de transmissão ou então o *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). A limitação ao uso de uma maior largura de banda está no facto do espectro de frequência ser um recurso raro e caro, por outro lado para se aumentar o SNR é necessário aumentar a potência de transmissão, o que não é desejável num dispositivo móvel. Relativamente à fiabilidade da informação recebida, esta é afetada pelo desvanecimento multipercurso, e pode ser combatida através de diferentes esquemas de diversidade.

Os sistemas MIMO realizam uma forma de diversidade espacial, logo apresentam um ganho de diversidade que permite combater o desvanecimento e melhorar a fiabilidade da informação recebida. A tecnologia MIMO permite também aumentar a taxa de transmissão sem ser necessário aumentar a largura de banda e a potência de transmissão.

Como a tecnologia MIMO permite aumentar a taxa de transmissão e combater o desvanecimento, é possível arranjar estruturas que forneçam simultaneamente as duas alternativas.

Estes sistemas são vistos como ferramentas que permitem atingir grande capacidade, através do aumento do SNR e redução da interferência. Os sistemas MIMO permitem obter SNRs iguais aos atuais, mas com menor potência de transmissão e consequentemente maior poupança. O ganho das antenas MIMO está relacionado com o número de antenas, a sua orientação e distância.

De seguida, é possível ver as características do HSDPA (ver Tabela 5) e do HSUPA (ver Tabela 6) e o que varia em cada tecnologia de acordo com a *Release 7* do 3GPP.

Tabela 5 - Características HSDPA [13].

<b>Categoria</b>	<b>Nº de códigos</b>	<b>Modulação</b>	<b>MIMO</b>	<b>Coding</b>	<b>Peak bit rate [Mbit/s]</b>	<b>3GPP Release</b>
12	5	QPSK	-	3/4	1.8	R5
5/6	5	16-QAM	-	3/4	3.6	R5
7/8	10	16-QAM	-	3/4	7.2	R5
9	15	16-QAM	-	3/4	10.1	R5
10	15	16-QAM	-	≈ 1/1	14	R5
13	15	64-QAM	-	5/6	17.4	R7
14	15	64-QAM	-	≈ 1/1	21.1	R7
15	15	16-QAM	2x2	5/6	23.4	R7
16	15	16-QAM	2x2	≈ 1/1	28	R7

Tabela 6 - Características HSUPA [13].

<b>Categoria</b>	<b>TTI</b>	<b>Modulação</b>	<b>Coding</b>	<b>Peak bit rate [Mbit/s]</b>	<b>3GPP Release</b>
3	10	QPSK	3/4	1.4	R6
5	10	QPSK	3/4	2.0	R6
6	2	QPSK	1/1	5.7	R6
7	2	16-QAM	1/1	11.5	R7

#### 2.4.6.2 Modulações de ordem superior

Para além de serem utilizados sistemas MIMO, também se utilizam modulações de ordem superior com o objetivo de aumentar os ritmos de transmissão de dados. Esta técnica está especificada na *Release 7* para *downlink* e *uplink* e para *downlink* com MIMO [11].

Pode ser utilizada uma modulação 16-QAM e com isto duplicar os ritmos de transferência de bit quando comparado com o QPSK, uma vez que transmite 4 bits em vez de 2 por símbolo. Já o 64-QAM aumenta o ritmo de transmissão em 50%, relativamente ao 16-QAM, já que transmite 6 bits por símbolo. Por outro lado, os pontos da constelação estão mais próximos uns dos outros nas modulações de ordem superior e a relação sinal-ruído necessária para a correta receção terá de ser maior. A diferença da relação sinal-ruído necessária é de aproximadamente 6 dB entre o 16-QAM e o QPSK e entre 16-QAM e 64-QAM. Por estas razões, o *downlink* com 64-QAM e o *uplink* com 16-QAM só podem ser utilizados se existirem condições favoráveis do canal rádio.

O ritmo de transmissão máximo com 64-QAM é de 21.1 Mbps e com MIMO 28.0 Mbps. A combinação do MIMO 2x2 e modulação 64-QAM consegue obter valores de pico acima dos 40 Mbps, mas não está incluída na *Release 7*.

O HSUPA, com 16-QAM consegue obter ritmos de transmissão de 11.5 Mbps.

#### 2.4.6.3 Multi-Carrier HSDPA (MC-HSDPA)

Com a utilização de várias portadoras é possível aumentar o débito binário, aumento a largura de banda.

Incluído nas *Releases 7* e *8* do 3GPP, o HSPA+ introduz:

- Maiores ritmos de transmissão de dados;
- Baixa latência;
- Aumento da capacidade;
- Melhor suporte para VoIP;
- Melhor suporte para serviços *multicast*.

Para além disto foi introduzido o *Multi-Carrier*, mais especificamente *Dual-Carrier HSDPA* no *downlink* com duas portadoras de 5 MHz adjacentes, especificado na *Release 8* do 3GPP. Uma evolução para mais do que duas portadoras em *downlink* e múltiplas em *uplink* será introduzida em *Releases* futuras.

Ao agregar os recursos rádio de múltiplas portadoras, as taxas de transmissão e a capacidade aumentam substancialmente.

Juntamente com MIMO e 64-QAM, o MC-HSDPA pode atingir ritmos de transmissão em *downlink* até 84, 126 ou 168 Mbps, assumindo 2, 3 ou 4 portadoras de 5 MHz, respetivamente.

Um pré-requisito para um operador implementar o MC-HSDPA é a disponibilidade de espectro. Nem todos os operadores móveis têm acesso a mais de 5 ou 10 MHz de espectro numa única banda. Por esta razão, muitos operadores optam por utilizar também a banda dos 900 MHz para além dos 2100.

Por outro lado, uma vez que os dispositivos estão preparados para trabalhar em duas bandas em simultâneo, é possível melhorar os mecanismos de mobilidade e de balanceamento de carga dos utilizadores pelas duas bandas. Esta funcionalidade é especialmente útil em cenários em que a ligação entre o UE e o *Node B* é limitada por ruído.

Se tanto o UE como a rede suportarem HSDPA com duas portadoras, a rede vai configurar o UE não só com uma célula mas sim com duas (uma primária e uma secundária) originadas no mesmo *Node B* mas em portadoras adjacentes.

Do ponto de vista do UE, apenas a célula primária tem um canal de *uplink* e a informação não relacionada com o HSDPA, como o SCH e o PC, são sempre mapeados na célula primária. Contudo, do ponto de vista da rede, uma célula em particular poderá ser primária para alguns utilizadores e secundária para outros.

O processamento dos dados do utilizador – incluindo codificação do canal, *interleaving*, modulação e sinalização a nível da camada física – são efetuados independentemente de qual a célula que está a ser utilizada, o que significa que o utilizador pode ser agendado independentemente nas duas células.

Tendo em conta que muitos dos *Node Bs* já suportam várias portadoras, a complexidade aumenta devido à introdução do MC-HSDPA do lado da rede. O que necessita de ser

melhorado é o mecanismo de agendamento, que agora necessita de fazer o agendamento de um utilizador em mais de uma portadora.

## 2.5 Long Term Evolution (LTE)

O LTE, classificado como a 4ª geração de comunicações móveis (4G), desenvolvido pelo 3GPP e especificado na *Release 8*, permite aos utilizadores obterem débitos elevados e permite aos operadores terem uma rede mais eficiente e mais barata, uma vez que existem mudanças a nível da arquitetura de rede. Deixa de existir controladores dos nós de acesso e a transmissão utilizada em toda a rede é uma transmissão por IP. Desta forma é possível poupar nos equipamentos utilizados e a eficiência da rede aumenta devido às vantagens associadas à tecnologia IP.

Em paralelo ao desenvolvimento da rede de acesso rádio, existe outro projeto em desenvolvimento denominado de *System Architecture Evolution* (SAE). Este projeto tem como objetivo definir uma CN totalmente baseada em pacotes (*packet-only*) e sobre IP (*all-IP*), denominando esta rede de *Evolved Packet Core* (EPC). Estes dois sistemas juntos têm a designação de *Evolved Packet System* (EPS).

Com esta rede pretende-se obter débitos elevados, baixo custo e baixa latência, mas também conseguir interligar a rede de LTE com as tecnologias já existentes.

O LTE tem como principais características:

- **Largura de banda flexível** – Pode variar desde os 1,4 MHz até aos 20 MHz;
- **Ortogonalidade no *uplink* e no *downlink*** – Todos os utilizadores usam frequências que são ortogonais entre si, tanto no *uplink* como no *downlink*. Não existe interferência intracelular;
- **Modulação de ordem superior** – QPSK, 16-QAM e 64-QAM;
- ***Frequency Division Duplex* (FDD) e *Time Division Duplex* (TDD)**;
- **Tecnologia de antenas avançada** – é usado MIMO em *downlink*.

### 2.5.1 *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*

A principal diferença entre as 4 gerações de comunicações móveis é a técnica de acesso ao meio utilizada por cada uma. Na primeira geração era usado o TDMA, na segunda, como já foi referido na secção 2.2.2, era usada uma combinação de TDMA com FDMA. Na terceira geração existiu uma mudança mais radical e passou-se a utilizar o CDMA (já referido na secção 2.5.1). Agora, com a quarta geração, surge uma nova técnica, denominada de OFDMA.

Esta técnica consiste em utilizar *Orthogonal Frequency Division Multiplex Access* (OFDMA). O OFDMA usa um conjunto de sub-portadoras que matematicamente se traduzem em funções *sync* (ver Figura 8), e são espaçadas para que os seus nulos coincidam com os picos da sub-portadora adjacente. Este espaçamento é conseguido alterando a fase de cada onda.

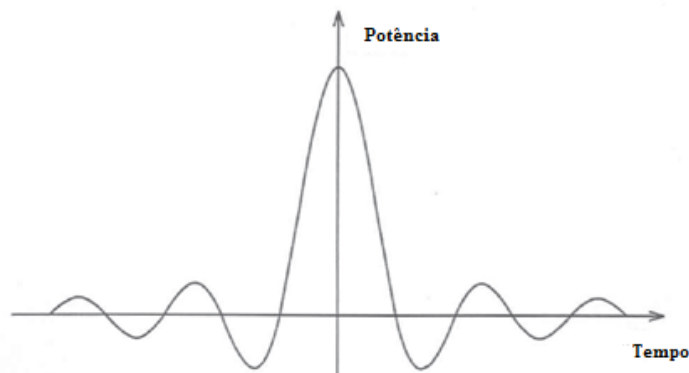


Figura 8 - Função *Sync* [14].

No LTE cada período de símbolo dura 66,7  $\mu$ s, ao definir o espaçamento de cada sub-portadora para ser de 15 kHz estas vão alinhar perfeitamente, ver Figura 9.

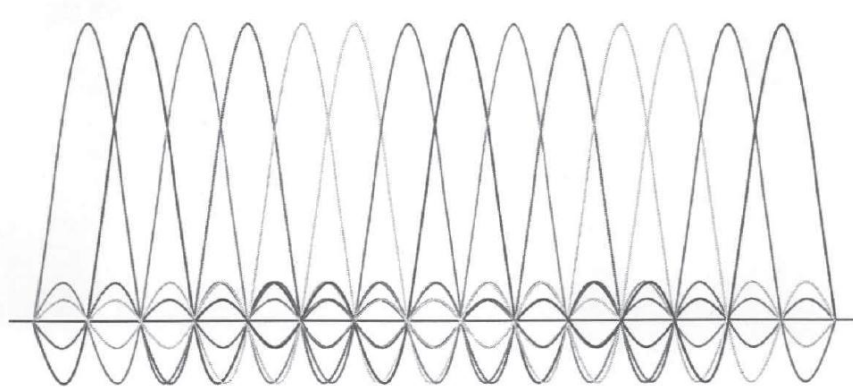


Figura 9 - Espectro de várias funções Sync [14].

A diferença entre o OFDM e o OFDMA é que o OFDMA, para além de utilizar a técnica de OFDM também usa o TDMA, ou seja, os utilizadores para além de estarem divididos por sub-portadoras, vão estar também divididos no tempo, formando assim uma matriz de sub-portadora/tempo que pode ser utilizada para alocar qualquer utilizador.

Cada conjunto de 12 sub-portadoras (com 15 kHz cada) e com a duração de 0,5 ms é denominado de *Resource Block* (RB). O *eNode B* vai alocar o utilizador num ou mais RBs, ou seja vai-lhe atribuir um conjunto de portadoras durante um instante temporal. Esta técnica é utilizada apenas no *downlink*.

Na Tabela 7 é possível ver a quantidade de RBs para as diferentes larguras de banda.

Tabela 7 - N° de RBs por Largura de banda [15].

Largura de banda	N° de RB
1.4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

### 2.5.2 *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*

O *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) é utilizado em *uplink* no LTE. É muito semelhante ao OFDMA, a única diferença é que em vez de ter 12 sub-portadoras num RB, todo o RB é uma portadora apenas.

Esta técnica foi escolhida devido ao facto de ter um *Peak – to - Average Power Ratio* (PAPR) baixo, porque usa apenas uma portadora. Já no OFDMA, acontece o contrário, devido a este funcionar com várias portadoras, possui um PAPR alto. Um elevado PAPR obriga a utilização de amplificadores de potência bastante caros e portanto aumenta o custo dos terminais móveis e o consumo de energia reduzindo a sua autonomia. O SC-FDMA combina o baixo PAPR, assim como o GSM e o UMTS, com a resistência ao multipercurso e flexibilidade na alocação de frequências do OFDMA.

### 2.5.3 *Arquitetura LTE*

Um dos grandes objetivos do LTE é criar uma rede que, para além de interligar com as redes atualmente já existentes, *GSM and EDGE Radio Access Network* (GERAN) e *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN), seja mais simples que as anteriores. Esta nova arquitetura é uma arquitetura toda baseada em IP, *all-IP*, e também permite a mobilidade entre as diferentes tecnologias de acesso rádio.

Na Figura 10 é possível ver como é constituída uma arquitetura LTE, tanto os novos nós como as suas interfaces, bem como as interfaces que interligam com as outras tecnologias de acesso rádio.

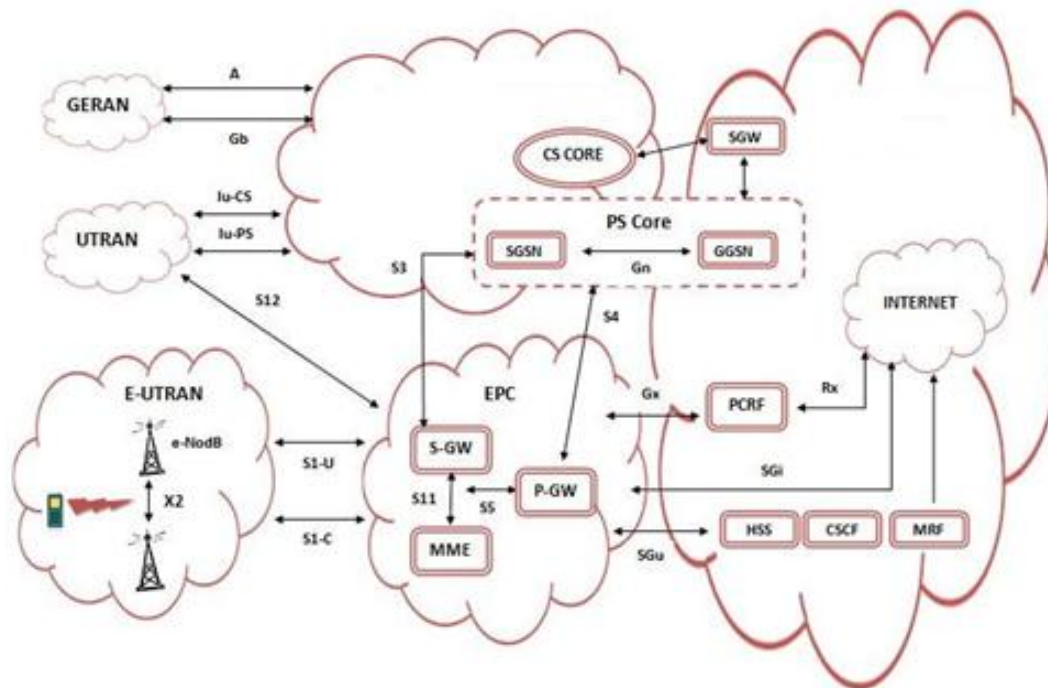


Figura 10 - Arquitetura LTE (adaptado da Release 8 do 3GPP) [16].

Com esta arquitetura surgiram três novos nós:

- **Mobility Management Entity (MME)** – equipamento de controlo que processa a sinalização entre o UE e a CN;
- **Serving Gateway (S-GW)** – todos os pacotes IP passam por aqui. Serve de âncora a qualquer móvel que se desloque entre *eNode B* ou entre outra tecnologia;
- **Packet Data Network Gateway (P-GW)** – é responsável pela alocação de um endereço IP ao UE. É também responsável por filtrar os pacotes em *downlink* de acordo com a sua prioridade (QoS);
- **Policy and Charging Resource Function (PCRF)** – é responsável pela política de controlo de recursos e de tarifação de cada utilizador definindo, também, o QoS necessário;

- **Home Subscription Server** (HSS) – contém todos os dados do utilizador, como o seu perfil e a sua localização;

Importante referir também que, com esta nova arquitetura, surgiram enumeras interfaces. De salientar que a interface  $S_1$  está dividida em CP ( $S_{1-C}$ ) e UP ( $S_{1-U}$ ).

## 2.6 LTE-Advanced

Tal como aconteceu nas tecnologias anteriores, também a quarta geração começa a sofrer uma evolução. Com o objetivo de atingir débitos ainda maiores, surge o *LTE-Advanced*. Para isto são utilizadas várias técnicas, tais como a utilização de MIMO (até 8x8), de *beamforming* ou de agregação de portadoras para atingir este objetivo. [15].

Neste momento a mais utilizada e já em funcionamento em Portugal é a agregação de portadoras que permite atingir débitos até 300 Mbps. [17]

## 2.7 Conceitos de Planeamento Celular

As técnicas de planeamento celular têm vindo a crescer bastante nos últimos tempos, juntamente com o crescimento das comunicações móveis. O objetivo do planeamento celular é aproveitar ao máximo as características de espectro existentes. Com isto pretende-se fornecer o máximo de capacidade possível com o mínimo de espectro, isto só acontece diminuindo a interferência entre os diferentes canais utilizados.

Para além de serem usadas diversas técnicas para permitir a comunicação entre a rede e o terminal móvel, FDMA, CDMA ou OFDMA, também é necessário elaborar todo um planeamento celular que está dependente não só da tecnologia de acesso rádio, mas também do próprio ambiente de propagação. Outro grande objetivo deste planeamento é a redução do consumo energético nas BTS, Node B ou eNode B, uma vez que estes elementos são os maiores responsáveis do consumo energético de toda a rede. Por esta razão opta-se, por vezes, por soluções como a co-localização de antenas, ou seja reaproveitar a infraestrutura já existente para o GSM, e colocar lá também os equipamentos relativos ao UMTS e LTE. [9].

Consoante os requisitos necessários para a implementação da rede, sejam estes requisitos de cobertura, capacidade ou qualidade, vai ser feito um dimensionamento inicial que visa determinar o número de *sites* e respetivas configurações necessárias para cobrir a área pretendida com os requisitos de capacidade/cobertura previamente estabelecidos. São também escolhidas, nesta fase, várias localizações possíveis para cada *site*, uma vez que a sua localização ideal pode não ser possível, por motivos alheios ao operador.

Durante a fase de implementação é definida a localização exacta dos sites, bem como as suas configurações, que por algum motivo poderão ser diferentes relativamente ao previamente definido. De seguida é feita uma análise de cobertura, capacidade e de QoS da rede.

Após a rede estar implementada e a funcionar, passa-se à fase de otimização, que consiste em estar constantemente a medir os indicadores de rede e a reajustar parâmetros desta, com o objetivo de maximização do desempenho.

Para fazer uma boa implementação da rede móvel é essencial passar por 8 fases:

- **Requisitos do sistema** – cobertura nos diferentes tipos de ambiente (urbano denso, urbano, suburbano, rural), comportamento do tráfego dos clientes, QoS, investimentos futuros e a largura de banda limitada;
- **Definição das linhas de orientação** – cobertura e interferência, planeamento de tráfego, estratégia de planeamento de frequências e estratégia de otimização;
- **Planeamento celular inicial** – localização e configuração de BTS, previsão do mapa de cobertura e interferência, configuração de células, ajuste de parâmetros, planeamento de carga e escolha de equipamentos (combinadores, antenas, etc...);
- **Investigação do ambiente rádio e do site** – análise do desvanecimento, da interferência e de necessidades físicas;
- **Desenho dos sites e configuração de parâmetros** – escolha da melhor localização entre várias possíveis, dimensionamento das BTS (NB), BSC (RNC) e da CN;
- **Implementação** – instalação e testes para detetar zonas sem cobertura, qualidade do HO e do LU e correto estabelecimento de chamada;
- **Lançamento do serviço comercial** – depois de a rede estar implementada é lançado o serviço para os clientes;
- **Otimização** – com a rede a funcionar são feitos testes na rede e tiradas estatísticas para que exista uma melhoria continua.

## 2.8 Link Budget

Para ter uma estimativa do número de *sites* a utilizar para cobrir uma determinada área geográfica, é necessário saber qual a área de cobertura de cada site. Para isso determina-se a atenuação máxima permitida (*Maximum Allowable Path Loss*). Com esta atenuação é possível determinar, através de um modelo de propagação, qual o raio de cobertura do *site*.

Para determinar a atenuação máxima de propagação é elaborado um *Link Budget*, que consiste em determinar a atenuação de propagação consoante as diferentes tecnologias e as suas respetivas características.

Para elaborar um *Link Budget* é necessário conhecer algumas das variáveis que influenciam, direta ou indiretamente, o raio de cobertura da célula.

- **Max. Tx power** – diz respeito à máxima potência de transmissão do equipamento, sendo que no caso de ser uma BTS, um *Node B* ou um *eNode B* pode ser limitado pelo combinador e pela quantidade de TRX ou unidades de processamento a usar. É medido em dBm;
- **Tx antenna gain** – é o ganho da antena transmissora, medido em dBi;
- **Cable Loss** – perdas nos cabos e conectores, em dB;
- **Body Loss** – corresponde às perdas existentes devido ao telemóvel estar junto à cabeça durante uma chamada, este valor geralmente é zero quando se trata de uma transmissão de dados (SMS, navegação na internet, etc...), também medido em dB;
- **Equivalent Isotropically Radiated Power (EIRP)** – é a potência que uma antena isotrópica (que emite uniformemente para todos os lados) radiaria para produzir a mesma densidade de potência da antena utilizada. Está dependente da potência de transmissão da antena e do seu ganho, medido em dBm;
- **Noise Figure** – mede a degradação causada no SINR, devido às imperfeições existentes na cadeia de receção e de *hardware*, também medido em dB;
- **Thermal Noise** – ruído elétrico introduzido devido ao movimento dos eletrões dentro dos condutores, em dB;
- **SINR** – relação sinal ruído, medido em dB;
- **Fator de carga** – Fator que representa a carga existente no sistema, em %.

- **Interference Margin** – margem que é dada devido à interferência causada pelos outros utilizadores na rede, em dB. Varia com o fator de carga;
- **Control Channel Overhead** – cabeçalhos utilizados, relativos a sinais de sinalização e de referência, pode variar entre 0 e 25% (0 e 1dB);
- **Fast Fading Margin** – margem dada, devido ao móvel estar em constante movimento e devido à possibilidade de estar a grandes velocidades, medido em dB.

Tanto o UMTS como o LTE são tecnologias limitadas por interferência a nível de cobertura e capacidade. Esta limitação deve-se ao facto de usarem a mesma portadora em células adjacentes. Por este motivo um fator, bastante importante, a ter em conta nos respetivos *link budgets* é o fator de carga que aumenta à medida que o número de utilizadores na rede também aumenta.

Existindo mais utilizadores na rede, a interferência aumenta e portanto a qualidade diminui. Uma forma de aumentar a qualidade é aumentar a potência de transmissão em cada elemento, contudo se isto acontecer a interferência aumentará ainda mais.

O que na realidade acontece é, uma vez que os níveis de interferência estão maiores, o SINR diminui sendo mais difícil manter a comunicação com os UEs mais distantes da célula, desta forma pode-se dizer que o raio da célula diminuiu fenómeno conhecido por *cell breathing*.

Uma forma de representar este fenómeno no *link budget* é utilizando uma margem de interferência (IM) em função do fator de carga [11]:

$$IM = 10 \times \log_{10}\left(\frac{1}{1 - \eta}\right) \quad (2.1)$$



### 3 Modelo de previsão

Com o objetivo de prever o desempenho de cada tecnologia foi desenvolvido um modelo matemático baseado em conceitos teóricos como a fórmula de *Friis*, o modelo de *Okumura-Hata* e o teorema de *Hartley-Shannon*.

Pretende-se, a partir dos valores de *RxLev* medidos e de uma série de parâmetros (fornecidos como *inputs* da ferramenta), conseguir estimar o débito binário para as diferentes tecnologias, supondo que estas se encontram co-localizadas com as BTS que fornecem cobertura na área onde foram efetuados os *drive-tests* (Figura 11).

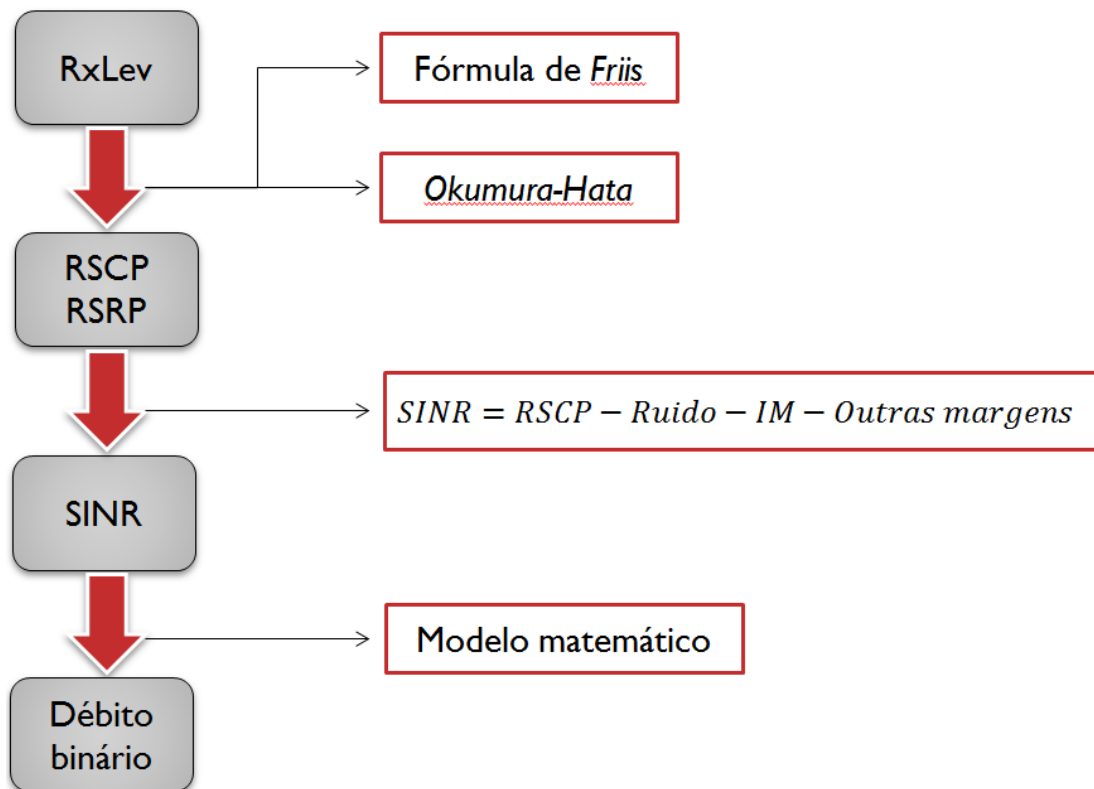


Figura 11 – Algoritmo do modelo de previsão.

### 3.1 Potência recebida

A ferramenta vai calcular, com base fórmula de Friis [18], a diferença de potência recebida entre o UMTS nas bandas de 900 e 2100 MHz (U900 e U2100, respetivamente), o LTE nas bandas de 800, 1800 e 2600 MHz (L800, L1800 e L2600, respetivamente) e o GSM:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - At \quad (4.1)$$

Sendo a  $P_{tx}$  e o  $G_{tx}$  a potência e o ganho de transmissão, respetivamente, e fornecidos como *inputs*.  $G_{rx}$ , representa o ganho de receção do móvel e assume-se 0 dBi.

Quanto à atenuação de propagação,  $At$ , esta é dada pelo modelo de *Okumura-Hata*.

Com base nesta fórmula é possível agora calcular os vários diferenciais ( $\Delta$ ) para cada uma das tecnologias, denominados de  $\Delta_{U900}$ ,  $\Delta_{U2100}$ ,  $\Delta_{L800}$ ,  $\Delta_{L1800}$  e  $\Delta_{L2600}$ , onde:

$$\Delta_{U900} = RxLev - P_{rxU900} \quad (4.2)$$

$$\Delta_{U2100} = RxLev - P_{rxU2100} \quad (4.3)$$

$$\Delta_{L800} = RxLev - P_{rxL800} \quad (4.4)$$

$$\Delta_{L1800} = RxLev - P_{rxL1800} \quad (4.5)$$

$$\Delta_{L2600} = RxLev - P_{rxL2600} \quad (4.6)$$

Uma vez que o modelo de *Okumura-Hata* depende da banda utilizada e as tecnologias se encontram co-localizadas, é possível determinar  $At$  para cada tecnologia. Ficando desta forma com as seguintes expressões:

$$\Delta_{U900} = P_{txGSM} + G_{txGSM} + G_{rxGSM} - P_{txU900} - G_{txU900} - G_{rxU900} \quad (4.7)$$

$$\Delta_{U2100} = P_{txGSM} + G_{txGSM} + G_{rxGSM} - P_{txU2100} - G_{txU2100} - G_{rxU2100} + 9,6263 \quad (4.8)$$

$$\Delta_{L800} = P_{txGSM} + G_{txGSM} + G_{rxGSM} - P_{txL800} - G_{txL800} - G_{rxL800} - 1,3381 \quad (4.9)$$

$$\Delta_{L1800} = P_{txGSM} + G_{txGSM} + G_{rxGSM} - P_{txL1800} - G_{txL1800} - G_{rxL1800} + 7,8749 \quad (4.10)$$

$$\Delta_{L2600} = P_{txGSM} + G_{txGSM} + G_{rxGSM} - P_{txL1800} - G_{txL1800} - G_{rxL1800} + 12,0527 \quad (4.11)$$

Desta forma, com base em medidas recolhidas em *drive-test* para GSM, é possível aferir as potências de receção, para as restantes tecnologias:

$$RSCP_{U900} = RxLev - \Delta_{U900} \quad (4.12)$$

$$RSCP_{U2100} = RxLev - \Delta_{U2100} \quad (4.13)$$

$$RSRP_{L800} = RxLev - \Delta_{L800} \quad (4.14)$$

$$RSRP_{L1800} = RxLev - \Delta_{L1800} \quad (4.15)$$

$$RSRP_{L2600} = RxLev - \Delta_{L2600} \quad (4.16)$$

## 3.2 SINR

Uma vez que o débito binário varia com a relação sinal ruído mais interferência (SINR), é necessário calcular para cada valor de potência recebida o SINR que vai existir:

$$SINR = P_{rx} - Ruído - Interferência \quad (4.17)$$

Considerando o ruído, como o ruído gerado pelo terminal móvel (ruído térmico) e a interferência dada pelo fator de carga (introduzido como *input*), é agora possível estimar o SINR para cada valor de potência recebida.

Para o cálculo do ruído térmico foi utilizada a seguinte equação, [19]:

$$Ruído = k \times T \times B \quad (4.18)$$

Onde,  $k$  representa a constante de *Boltzmann* e tem o valor de  $1,38065 \times 10^{-23}$ ,  $T$  é a temperatura e é dada em  $^{\circ}K$ , assume-se um valor de  $290^{\circ}K$  e  $B$  diz respeito à largura de banda utilizada pela tecnologia, em  $Hz$ , tem o valor de  $3,84$  Mchips no caso do UMTS e a largura de banda de um RB (180 kHz) para o LTE.

### 3.3 Tratamento matemático do débito binário em função do SINR

Uma vez determinado o valor de SINR, é agora necessário encontrar um modelo matemático que permita obter o débito binário em função deste.

Assumindo que a variação do débito depende da qualidade do canal estabelecido (SINR) e da tecnologia utilizada, decidiu-se separar o modelo em dois modelos diferentes, um para UMTS e outro para LTE.

#### 3.3.1 Teorema de *Hartley-Shannon*

Numa primeira abordagem de forma a obter um modelo matemático que traduza o comportamento verificado nas medidas feitas no terreno foi utilizado o teorema de *Hartley-Shannon*.

Este modelo indica o ritmo de transmissão máximo que é possível ter num canal de comunicações sem que existam erros, considera que existe apenas ruído branco e é dado pela fórmula:

$$C = LB \times \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (4.19)$$

Onde  $C$  representa o ritmo binário em *bps*,  $LB$  a largura de banda em *Hz* e  $\frac{S}{N}$ , o ruído branco. [20].

Como se pode verificar na Figura 12 e na Figura 13, o débito binário medido (camada física) está muito abaixo do teórico. Isto deve-se ao facto de o modelo considerar uma transmissão sem erros e apenas ruído branco, o que na realidade não acontece.

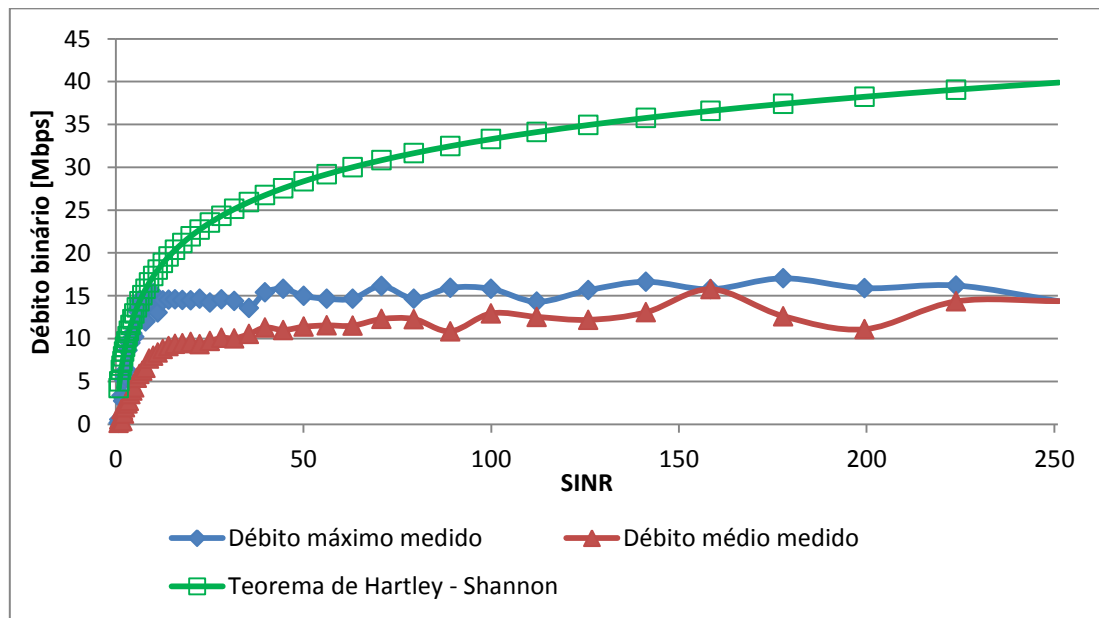


Figura 12 - Comparação entre débito binário medido e teórico (U900).

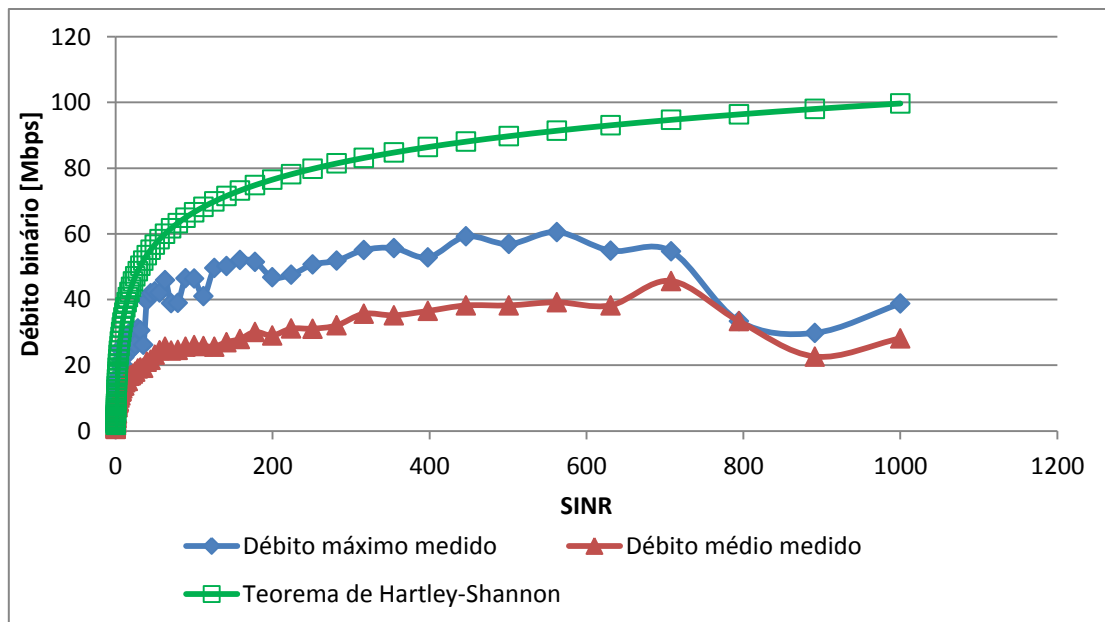


Figura 13 - Comparação entre débito binário medido e teórico (L800).

### 3.3.2 Modelo Implementado

Uma vez que o modelo de *Hartley-Shannon* está longe da realidade, decidiu-se desenvolver um modelo matemático que tivesse o mesmo formato do *Hartley-Shannon*, mas que fosse capaz de traduzir com menor erro a realidade.

Com base nas amostras recolhidas no *drive-test*, representadas na Figura 12 e na Figura 13, e com o auxílio da função *cftool* do *MatLab* foi determinada a expressão matemática que melhor aproxima as medidas. Esta funcionalidade do *MatLab* cria a curva que melhor se aproxima aos valores introduzidos, neste caso foi utilizado o SINR como eixo das abcissas e o valor de débito binário correspondente como eixo das ordenadas. Depois de construído o gráfico, é retirada a função matemática correspondente ao gráfico obtido.

As expressões obtidas foram, para UMTS:

$$C_{UMTS} = 1,825 \times \log_2(1 + SINR) \quad (4.20)$$

e para LTE:

$$C_{LTE} = 3,714 \times \log_2(1 + SINR) \quad (4.21)$$

Ambas representadas em Mbps.

Fazendo agora uma análise gráfica, é possível verificar pela Figura 14 e pela Figura 15 que ambas as expressões se aproximam dos resultados obtidos no *drive-test*.

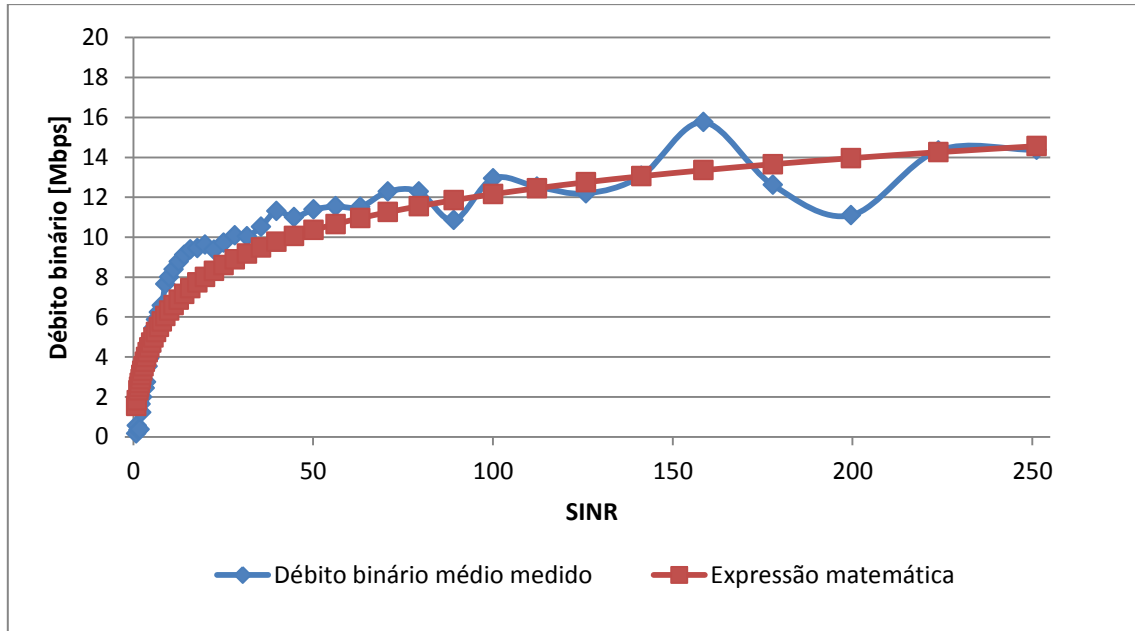


Figura 14 - Comparação entre modelo matemático e débito medido (U900).

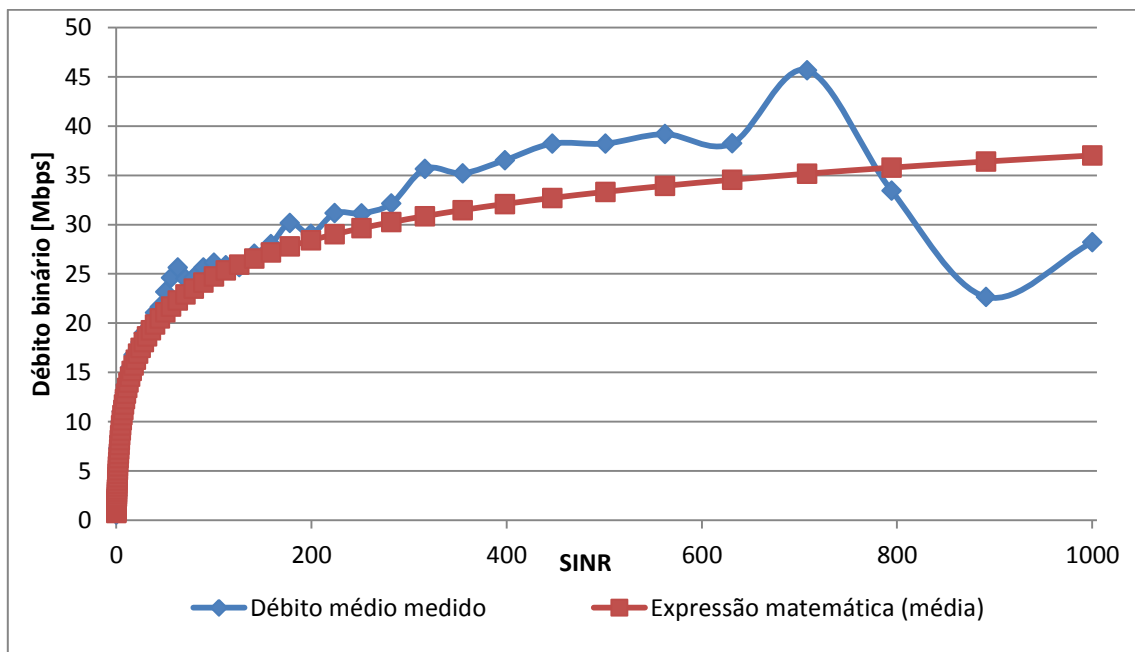


Figura 15 - Comparação entre modelo matemático e débito medido (L800).

De forma a validar estas expressões, foi calculado o seu erro relativo ao débito binário médio instantâneo medido. Depois de eliminados 10% das piores amostras (com maior erro relativo), obteve-se um erro relativo médio de 20,73% para UMTS e de 7,64% para LTE. As tabelas com todos os valores obtidos estão apresentadas para UMTS no Anexo B e para LTE no Anexo C. Quanto ao UMTS, este elevado erro relativo deve-se ao facto de o modelo matemático ser demasiado otimista para valores de SINR abaixo dos 5,5 dB, o que representa cerca de 20% das amostras.

Uma vez que estes resultados foram obtidos com base em medidas recolhidas em UMTS 900 (5 Mhz de largura de banda) e em LTE 800 (10 Mhz de largura de banda), decidiu-se apresentar as expressões em função da sua eficiência espectral, visto que serão utilizadas, no caso do UMTS para *dual-carrier* e no caso do LTE para várias larguras de banda.

Desta forma obtém-se as seguintes expressões, em *bps/Hz*, para UMTS e para LTE, respetivamente:

$$\rho_{UMTS} = 0,365 \times \log_2(1 + SINR) \quad (4.22)$$

$$\rho_{LTE} = 0,371 \times \log_2(1 + SINR) \quad (4.23)$$

Com estas expressões é agora possível estimar, com alguma aproximação, o débito binário a partir do SINR para ambas as tecnologias, considerando qualquer largura de banda.

Uma vez que a carga na rede, na zona de testes e durante o *drive-test*, era bastante reduzida assume-se que a equação 4.23 representa a eficiência espectral quando todos os RBs disponíveis são alocados a um só utilizador. Desta forma, para ser possível incluir o fator de carga na equação esta será multiplicada pela percentagem de RBs alocadas a um utilizador, por sua vez esta percentagem será inversamente proporcional ao fator de carga. Assumiu-se que a distribuição de RBs pelos utilizadores é uniforme, ou seja, todos recebem o mesmo número de RBs.

## 4 Ferramenta de previsão

Com o objetivo de facilitar o manuseamento dos dados obtidos na rede e o auxílio da previsão do desempenho de cada tecnologia foi construída uma ferramenta em *Excel*.

Com base num conjunto de medidas recolhidas em *drive-test*, é possível obter um conjunto de dados que nos traduzem o comportamento das diferentes tecnologias considerando uma serie de *Inputs*, que serão analisados de seguida. De salientar que para o desenvolvimento da ferramenta, foi sempre considerado que as diversas tecnologias se encontram co-localizadas.

### 4.1 Inputs

Para além das medidas recolhidas na rede para o GSM, é necessário introduzir também alguns parâmetros, como se pode ver na Figura 16.

The screenshot shows a software window titled "Inputs" with a light gray background. It is organized into six columns, each representing a different technology: GSM, U900, U2100, L800, L1800, and L2600. Each column contains several input fields, some of which are dropdown menus. At the bottom of the window, there are several buttons for analysis and data handling.

Technology	Parameter	Value
GSM	Potência de Tx [dBm]	43
	Ganho Tx [dB] (Ganho da antena menos perdas)	16
	Dual Carrier	Não
	Factor de carga [%]	20
U900	Potência de Tx [dBm] (CPICH)	33
	Ganho Tx [dB] (Ganho da antena menos perdas)	17.5
	Dual Carrier	Não
	Factor de carga [%]	20
U2100	Potência de Tx [dBm] (CPICH)	33
	Ganho Tx [dB] (Ganho da antena menos perdas)	17.5
	Dual Carrier	Sim
	Factor de carga [%]	50
L800	Máx. potência de Tx [dBm]	47
	Ganho Tx [dB] (Ganho da antena menos perdas)	18
	Numero de RB	50
	Factor de carga [%]	20
L1800	Máx. potência de Tx [dBm]	47
	Ganho Tx [dB] (Ganho da antena menos perdas)	18
	Numero de RB	75
	Factor de carga [%]	20
L2600	Máx. potência de Tx [dBm]	47
	Ganho Tx [dB] (Ganho da antena menos perdas)	18
	Numero de RB	100
	Factor de carga [%]	20

Buttons at the bottom:

- Análise em função do RxLev
- Varição do débito com o fator de carga
- Média Mínimo Máximo
- KML
- Importar

Figura 16 - Janela de *Inputs*.

Para todas as tecnologias é necessário indicar qual a potência e o ganho de transmissão, sendo que este último já deverá incluir o ganho e as perdas associadas à BTS/*Node B/eNode B* (ganho da antena, perdas nos cabos, TMAs, etc...).

Quanto à potência de transmissão, esta tem significados diferentes para cada tecnologia. No GSM representa a potência de transmissão definida para a BTS, no UMTS representa a potência associada ao CPICH, pois este será o canal de interesse sobre o qual serão realizados os cálculos posteriores. Para o LTE, esta potência representa a potência de transmissão total que será depois dividida pelos RBs para o cálculo do RSCP.

Para o UMTS e o LTE é possível indicar o fator de carga. Existe, também como *input*, a indicação da utilização de *Dual Carrier* e no caso do LTE o número de RBs utilizados.

## 4.2 Importar

Para começar, é necessário importar as medidas recolhidas em GSM no *drive-test*. Com esta finalidade foi criada uma função que importa estas medidas para a ferramenta de previsão. Tudo o que é necessário é exportar do TEMS um ficheiro com o formato *xls* que contenha nas três primeiras colunas a latitude, a longitude e o *RxLev* medido para cada coordenada, respetivamente. As coordenadas devem estar em décimas de grau e o *RxLev* em dBm. No Anexo D é possível ver um exemplo.

## 4.3 Outputs

Inicialmente são calculados as respetivas diferenças entre a potência recebida em GSM (*RxLev*) e a potência recebida em UMTS/LTE (RSCP/RSRP). Estas diferenças de potência são calculadas através das equações 4.7 a 4.11, respetivamente para cada tecnologia. Todos estes parâmetros são dados como *inputs*, exceto a potência de transmissão em LTE ( $P_{txL800}$ ,  $P_{txL1800}$  e  $P_{txL2600}$ ) que varia consoante o número de RBs escolhido, e pode ser representado através da equação:

$$EPRE = Máx P_{tx} - \log_{10}(N_{RB} \times 12) \quad (5.1)$$

Em que *Energy Per Resource Element* (EPRE) representa a potência associada a cada *Resource Element* (RE),  $Máx P_{tx}$  é dado como *input* e  $N_{RB}$  é o número de RBs atribuídos. EPRE e  $Máx P_{tx}$  são representados em dBm.

Depois de calculadas as diferenças de potência recebida, são calculadas as respectivas potências recebidas para cada tecnologia através das equações 4.2 a 4.6. De seguida é calculado o SINR respetivo pela equação 4.17. Por fim, com as equações 4.22 e 4.23 são calculadas as eficiências espectrais correspondentes a cada valor de SINR. Multiplicando pela respetiva largura de banda obtém-se os débitos binários médios e máximos para cada coordenada.

É possível observar na janela de *Inputs* outros quatro botões para além do botão Importar. Cada um destes botões representa um *output* ou conjunto de *outputs* diferentes. De seguida serão descritos os *outputs* de cada um destes botões, bem como os algoritmos utilizados para os atingir.

#### 4.3.1 Média, Mínimo e Máximo

Com as equações das secções anteriores e o modelo matemático anteriormente descrito é agora possível obter uma estimativa do débito binário, não só para cada coordenada em que foi feito o *drive-test*, mas também um débito binário médio, mínimo e máximo para cada tecnologia em toda a área de *drive-test*.

Esta função lê todos os valores de débito binário calculados para cada coordenada, calcula a média destes e identifica os valores mínimos e máximos que existem para cada tecnologia.

#### 4.3.2 Análise em função do *RxLev*

Com o objetivo de compreender o comportamento de cada tecnologia com o nível de cobertura, fez-se uma análise dos valores médios e máximos do débito binário para as situações em que existe uma boa cobertura (*RxLev* superior a -60 dBm), cobertura mediana

(*RxLev* compreendido entre - 60 e -80 dBm) e fraca cobertura (*RxLev* menor que - 80 dBm). Também para estes cenários foi calculada a eficiência espectral média.

Desta forma é possível comparar a eficiência das diferentes tecnologias entre si bem como os seus limites, considerando variáveis como a carga na rede, a utilização de *Dual-carrier* no UMTS ou até mesmo a largura de banda do LTE.

### 4.3.3 Variação do Débito com o Fator de Carga

A ferramenta permite também fazer uma análise, para cada tecnologia, da variação do débito binário com o fator de carga.

Aqui não é considerado fator de carga introduzido como *input*, a ferramenta automaticamente atribui valores de fator de carga de 20, 40, 60, 80 e 90% e calcula o SINR e o débito binário resultante de cada. De seguida, calcula a função densidade cumulativa para todos os pontos existentes e representa-os graficamente.

Com estes gráficos é possível analisar o comportamento de uma tecnologia à medida que a carga aumenta.

### 4.3.4 KML

Como *output* existe ainda a opção de exportar os resultados para que possam ser visualizados geograficamente em *Google Earth*. A ferramenta gera 11 ficheiros em formato kml, cinco dos quais dizem respeito à potência recebida de cada tecnologia denominados *gsm\_rxlev*, *u900\_rscp*, *u2100\_rscp*, *l800\_rsrp*, *l1800\_rsrp* e *l2600\_rsrp*. Os restantes seis ficheiros representam os débitos binários calculados em cada coordenada e têm os nomes *u900\_deb*, *u2100\_deb*, *l800\_deb*, *l1800\_deb* e *l2600\_deb*.

Cada um destes ficheiros contém um ponto que representa a coordenada geográfica onde foi efetuada a medida em GSM com uma cor que pode variar entre cinco cores diferentes (verde claro, verde escuro, amarelo, laranja e vermelho) em que o verde-claro representa a melhor potência recebida ou o melhor débito e o vermelho representa o pior (representação em mapa temático).

## 4.4 Cenários de teste

Com o objetivo de testar e validar a ferramenta foram analisados os resultados dos diferentes *outputs*. Foi feita uma análise à variação do débito binário de cada tecnologia variando as respectivas potências de transmissão e o fator de carga. Por fim, foram definidos três cenários de modo a compreender o comportamento da eficiência espectral de cada tecnologia em diferentes zonas de cobertura.

### 4.4.1 Variação da potência de transmissão

Para os valores de *drive-test* foram utilizados os já existentes, mencionados no capítulo **Error! Reference source not found.** Como *Inputs* utilizou-se os da Figura 17.

Tecnologia	Potência de Tx [dBm]	Ganho Tx [dB]	Dual Carrier	Fator de carga [%]
GSM	43	16	Não	20
U900	33	17.5	Não	20
U2100	33	17.5	Sim	60
L800	47	18		30
L1800	47	18		30
L2600	47	18		30

Buttons at the bottom:

- Análise em função do RxLev
- Varição do débito com o fator de carga
- Média Mínimo Máximo
- KML
- Importar

Figura 17 - Inputs.

Foi variada a potência de transmissão do canal CPICH para o UMTS entre valores de 30, 33 e 36 dBm e obteve-se os seguintes valores médios e máximos para toda a área de *drive-test* (Tabela 8 e Tabela 9).

**Tabela 8 - Média e máximo do débito binário (U900).**

<b>Débito [Mbps]</b>			
<b>Ptx [dBm]</b>	<b>Médio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
30	13.18	2.38	33.17
33	14.95	3.60	35.40
36	16.75	5.06	37.63

**Tabela 9 - Média e máximo do débito binário (U2100).**

<b>Débito [Mbps]</b>			
<b>Ptx [dBm]</b>	<b>Médio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
30	12.85	0.40	47.58
33	15.71	0.78	52.04
36	18.84	1.45	56.49

Consegue-se perceber pelas tabelas anteriores que o aumento da potência de transmissão para além do valor típico (33 dBm) traz algumas vantagens a nível de débito binário, uma vez que para um aumento de 3 dB (dobro da potência) o débito binário médio aumenta cerca 1,8 Mbps para o U900 e cerca de 3 Mbps para o U2100 considerando que este último utiliza *dual carrier*. O que representa um aumento de 12 e 19 %, respetivamente. Quanto ao débito máximo, embora em valores absolutos seja ligeiramente mais significativo, 2,23 Mbps para o U900 e 4,46 Mbps para U2100, apenas existe um aumento de 6 % para o U900 e de 8 % para o U2100.

Já no LTE, como se pode observar nas Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12, um aumento do dobro da potência representa um acréscimo de cerca de 3,7, 5 e 5,8 Mbps para L800, L1800 e L2600 respectivamente, considerando larguras de banda de 10 MHz para L800, 15 MHz para L1800 e 20 MHz para L2600.

**Tabela 10 - Média e máximo do débito binário (L800).**

<b>Débito [Mbps]</b>			
<b>Ptx [dBm]</b>	<b>Médio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
40	23.01	2.83	72.78
45	28.94	6.24	81.56
47	31.36	8.05	85.07
50	35.02	11.12	90.34

**Tabela 11 - Média e máximo do débito binário (L1800).**

<b>Débito [Mbps]</b>			
<b>Ptx [dBm]</b>	<b>Médio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
40	17.50	0.44	80.26
45	24.65	1.30	93.43
47	27.82	1.98	98.70
50	32.84	3.56	106.60

**Tabela 12 - Média e máximo do débito binário (L2600).**

<b>Débito [Mbps]</b>			
<b>Ptx [dBm]</b>	<b>Médio</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
40	15.07	0.17	87.98
45	22.60	0.53	105.51
47	26.15	0.82	112.54
50	31.99	1.59	123.07

#### **4.4.2 Variação do débito binário com o fator de carga**

Com o objetivo de tentar compreender a evolução de cada tecnologia com o fator de carga, foi criada uma função na ferramenta que representa a variação do débito binário em função do fator de carga.

Analisando o gráfico da Figura 18 é possível observar que existe uma grande variação do débito com o aumento do fator de carga até aos 80%. Entre os 20 e os 80 % de carga existe uma redução de 50 % no débito binário médio. O mesmo acontece com o U2100 (Figura 19), a variação do débito binário entre os 20 e os 80 % também é cerca de 50 %.. Percebe-se em ambos os gráficos que a tecnologia está praticamente saturada quando atinge 90% de carga, o que seria expectável.

É possível observar também que para o U2100 os débitos binários médios são menores do que para o U900, mas os débitos máximos são razoavelmente superiores. Isto deve-se à fraca cobertura das bandas de frequência mais altas quando comparadas com as mais baixas.

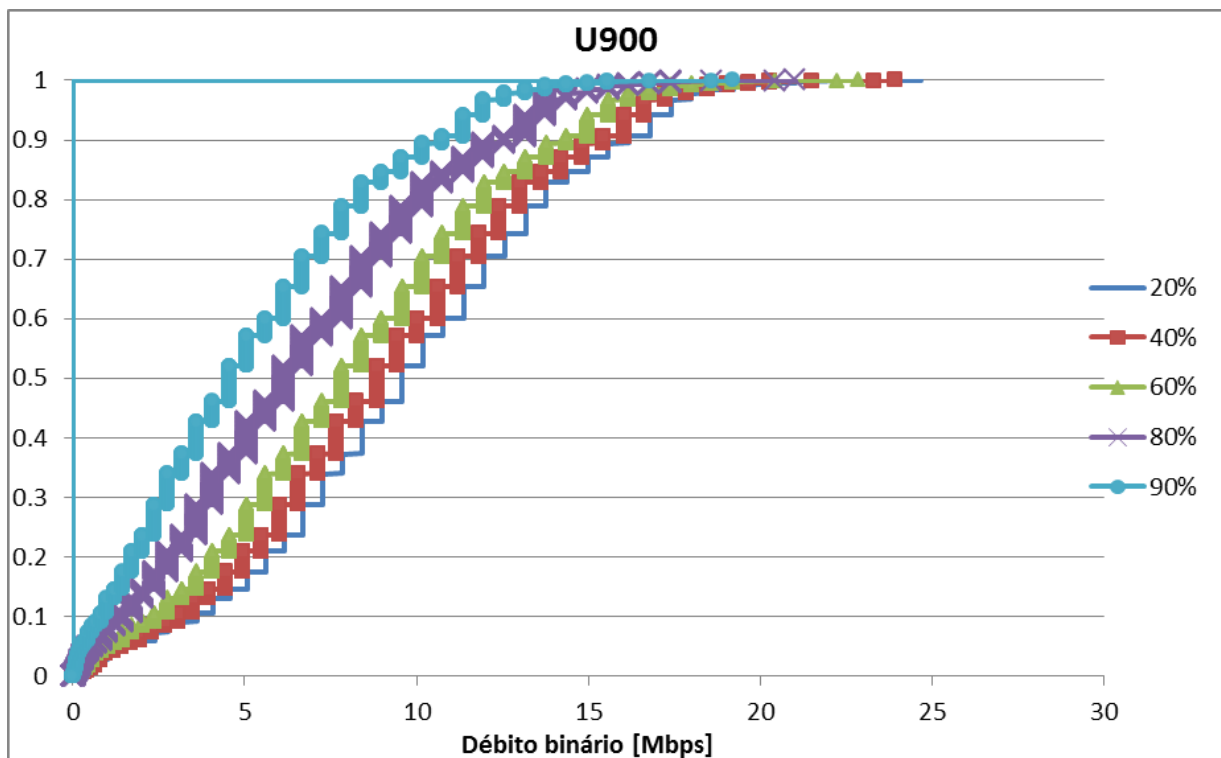


Figura 18 - CDF do débito binário para vários fatores de carga (U900).

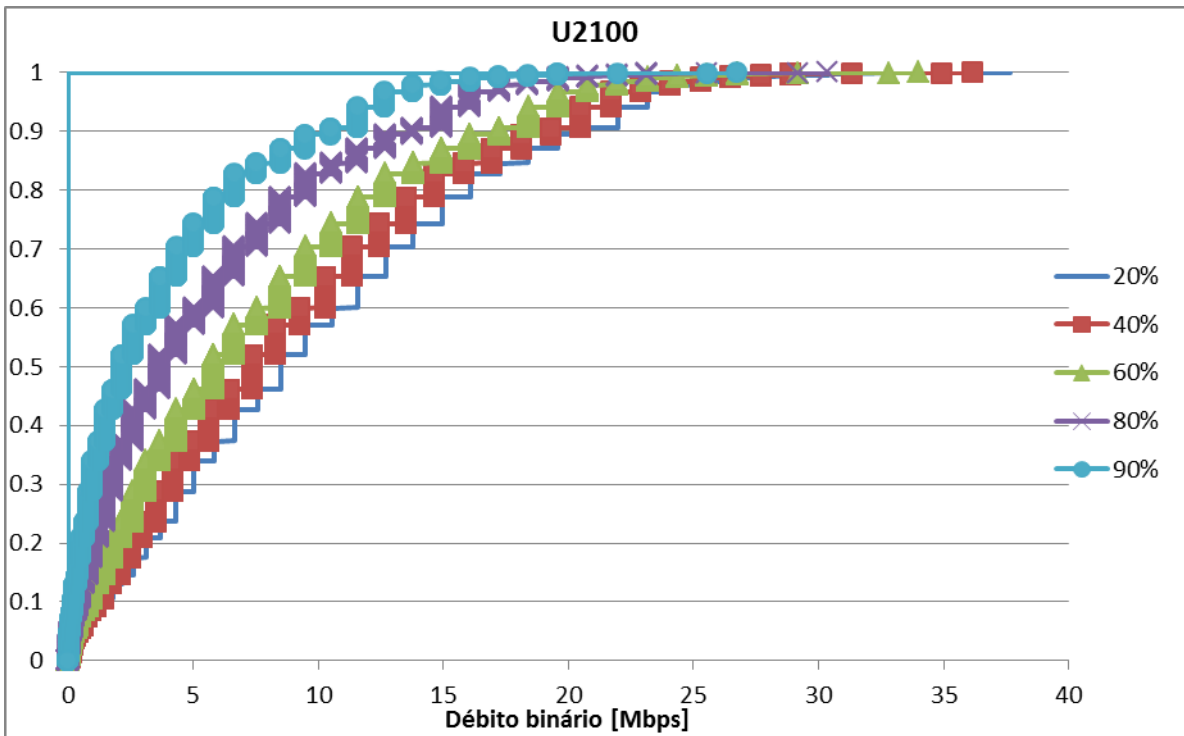


Figura 19 - CDF do débito binário para vários fatores de carga (U2100).

Observando agora os gráficos relativos ao LTE (Figura 20, Figura 21 e Figura 22), percebe-se que estes têm uma variação bem mais acentuada, à medida que o fator de carga aumenta, em relação ao UMTS. Isto deve-se ao facto de o modelo assumir que os recursos (RBs) em LTE são partilhados pelos diversos utilizadores da mesma forma. Ou seja, existindo o dobro de utilizadores em simultâneo, vão existir metade dos recursos para cada um e desta forma apenas será possível atingir metade do débito binário.

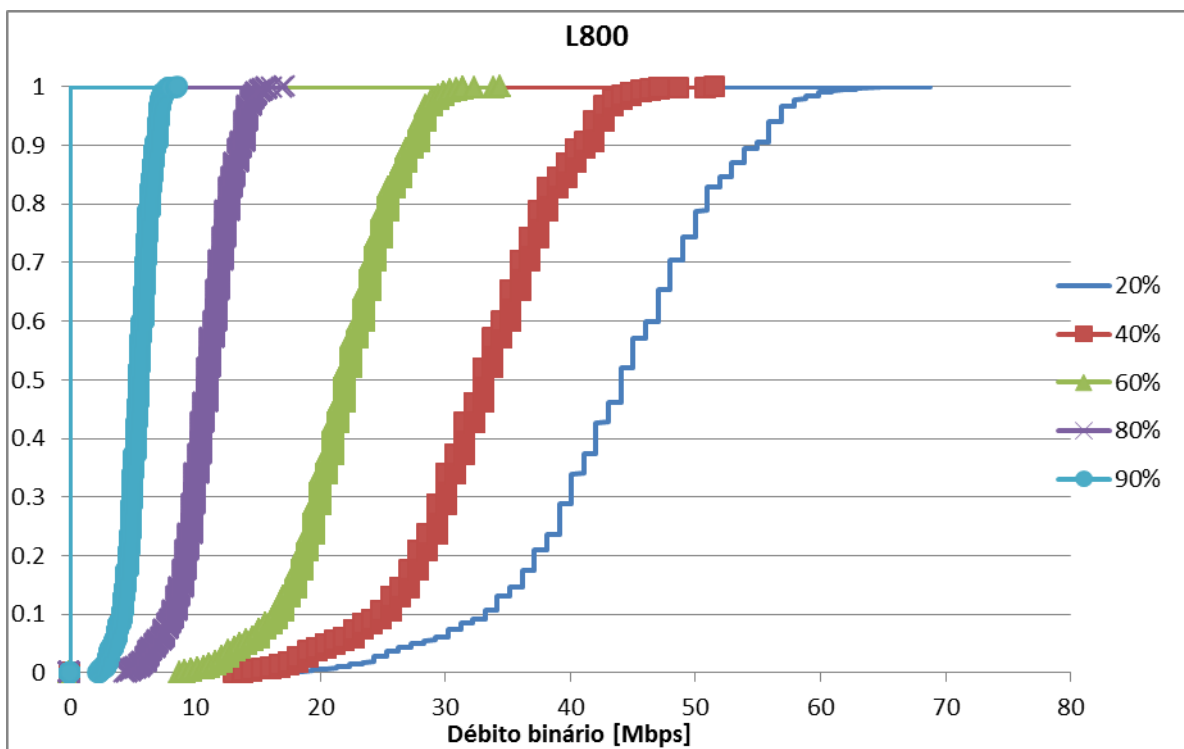


Figura 20 - CDF do débito binário para vários fatores de carga (L800).

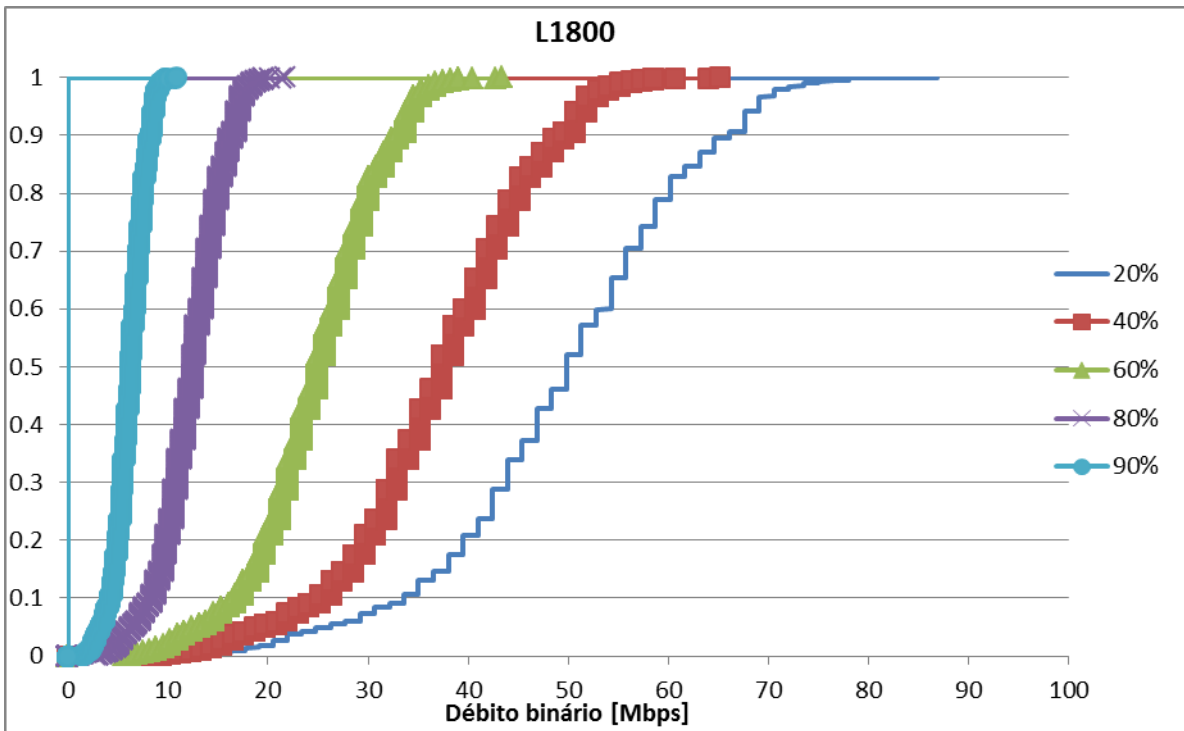


Figura 21 - CDF do débito binário para vários fatores de carga (L1800).

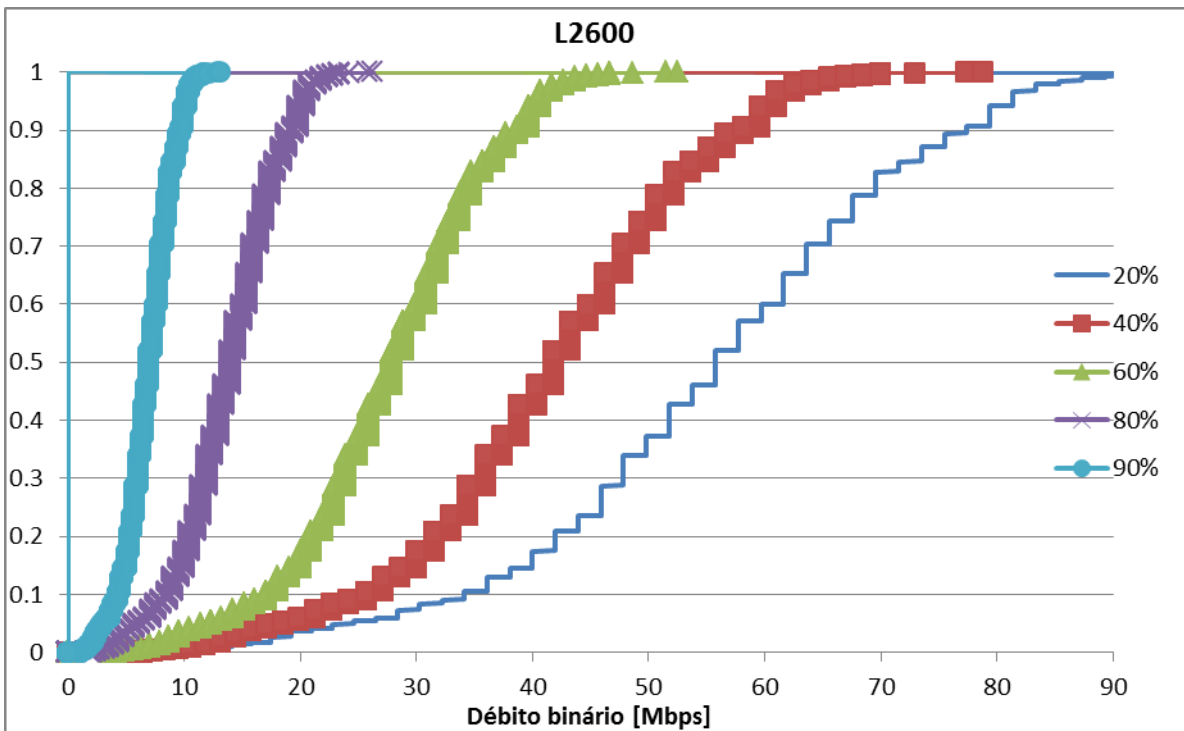


Figura 22 - CDF do débito binário para vários fatores de carga (L2600).

#### 4.4.3 Análise da eficiência espectral

Nesta fase foram criados três cenários, para compreender o comportamento da eficiência espectral com a variação do fator de carga e para vários níveis de cobertura. Foram criados cenários para LTE de baixa, média e elevada carga.

O primeiro cenário assemelha-se a uma rede UMTS típica existente hoje em dia e uma carga de 30 % para LTE:

Tabela 13 - Valores de fator de carga para o cenário 1.

Tecnologia	Fator de carga
U900	20%
U2100	60%
L800	30%
L1800	30%
L2600	30%

Para este cenário obteve-se uma variação da eficiência espectral, para cada nível de cobertura, como se representa na Figura 23.

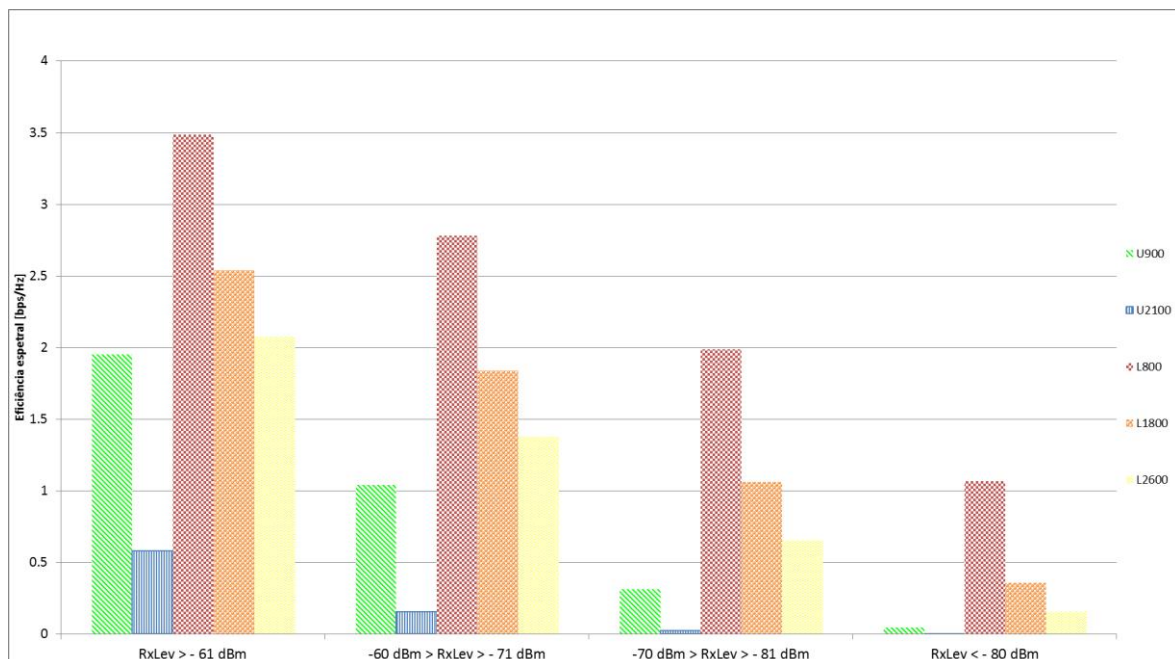


Figura 23 - Eficiência espectral em função do RxLev (cenário 1).

O segundo cenário considera um sistema onde a carga em LTE é baixa:

Tabela 14 - Valores de fator de carga para o cenário 2.

Tecnologia	Fator de carga
U900	20%
U2100	60%
L800	5%
L1800	5%
L2600	5%

Este cenário apresenta a seguinte variação de eficiência espectral:

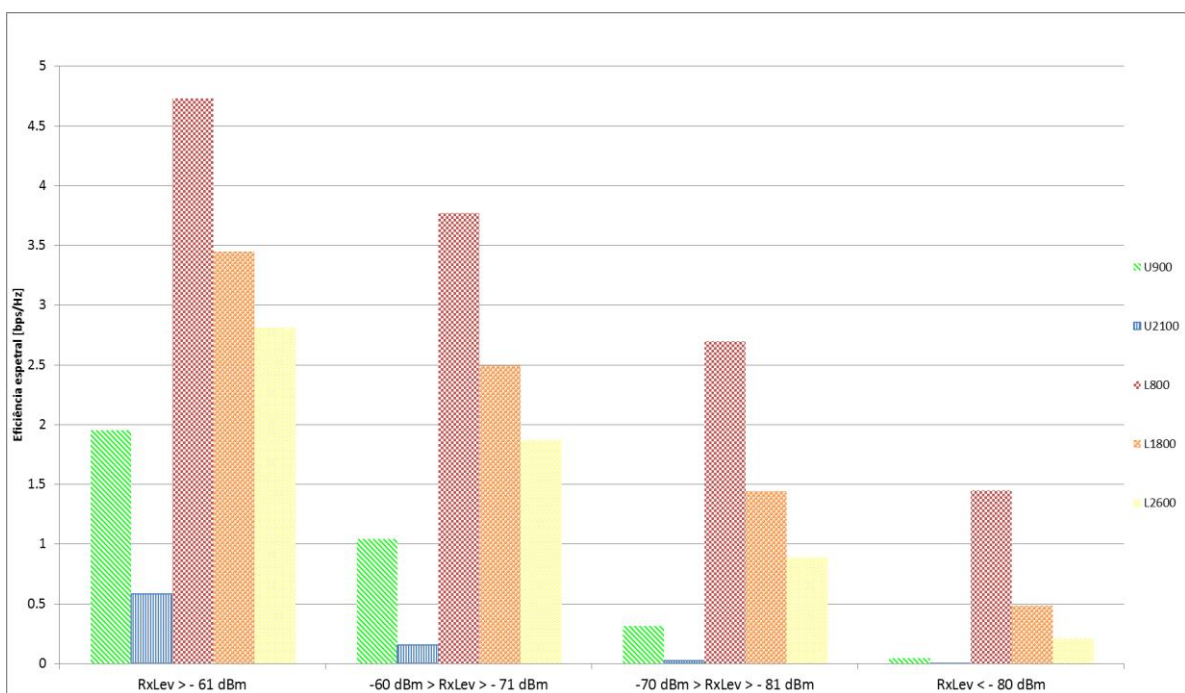


Figura 24 - Eficiência espectral em função do RxLev (cenário 2).

Como terceiro cenário, foi considerado um cenário em que a carga em LTE é bastante elevada:

Tabela 15 - Valores de fator de carga para o cenário 3.

Tecnologia	Fator de carga
U900	20%
U2100	60%
L800	60%
L1800	60%
L2600	60%

É possível observar na Figura 25 a sua eficiência espectral.

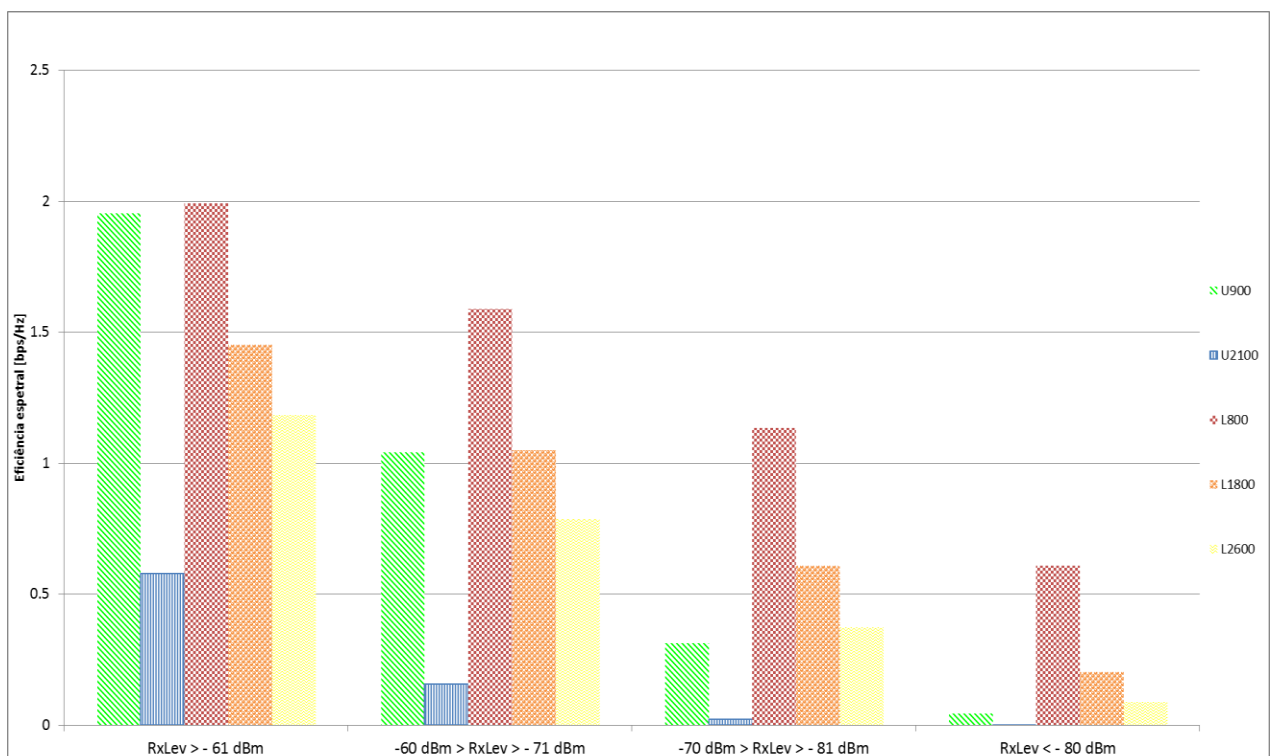


Figura 25 - Eficiência espectral em função do RxLev (cenário 3).

Como se pode verificar em qualquer um dos cenários, existe uma forte redução da eficiência espectral para zonas de fraca cobertura ( $RxLev < -70$  dBm), principalmente nas bandas mais altas.

Comparando agora os diferentes cenários em função do nível de cobertura e analisando o gráfico da Figura 26, é possível verificar que existe uma variação da eficiência espectral. Esta variação acontece, não só devido ao SINR, mas também devido ao número de RBs alocados ao utilizador (com maior carga cada utilizador terá menos RBs disponíveis). Posto isto, existe, na realidade, uma redução do débito binário e da eficiência espectral no ponto de vista de cada utilizador, contudo a eficiência espectral efetiva da célula mantém-se com o aumento da carga.

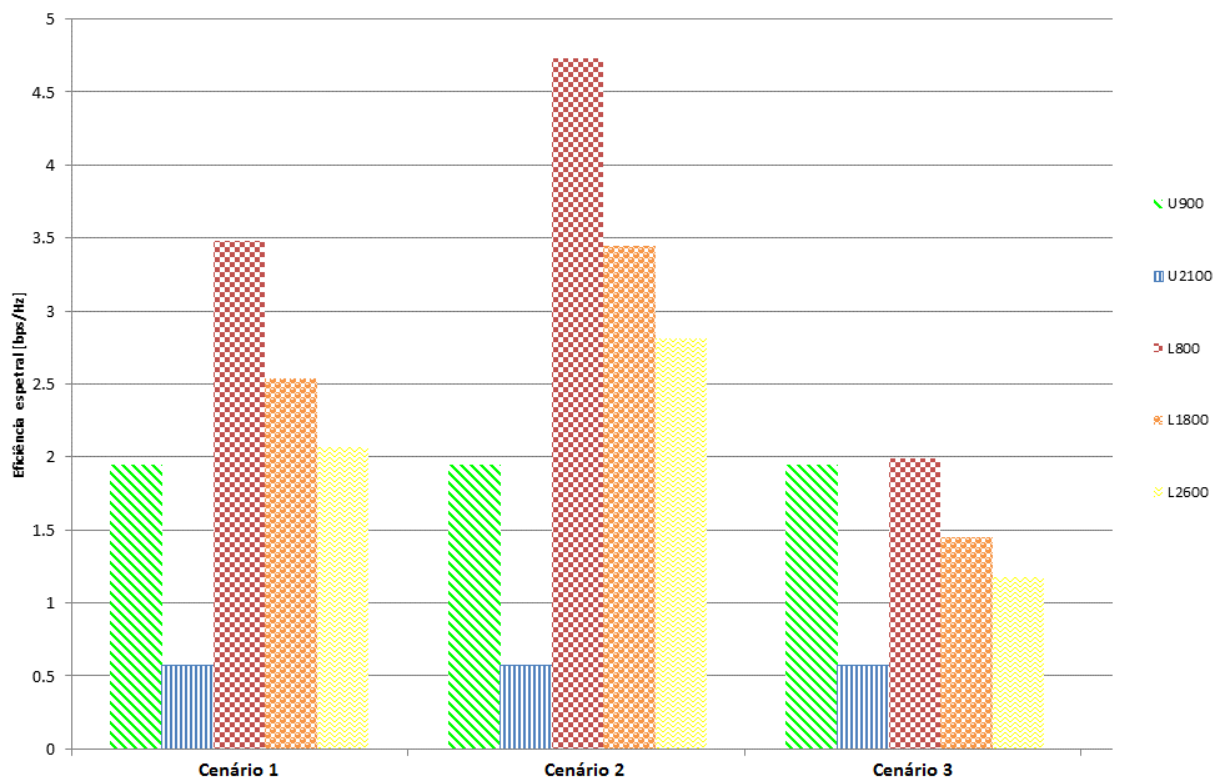


Figura 26 - Eficiência espectral para  $RxLev > -61$  dBm.

O mesmo acontece quando o nível de cobertura é mediano ( $RxLev$  entre -70 e -80 dBm), como se pode ver na Figura 27.

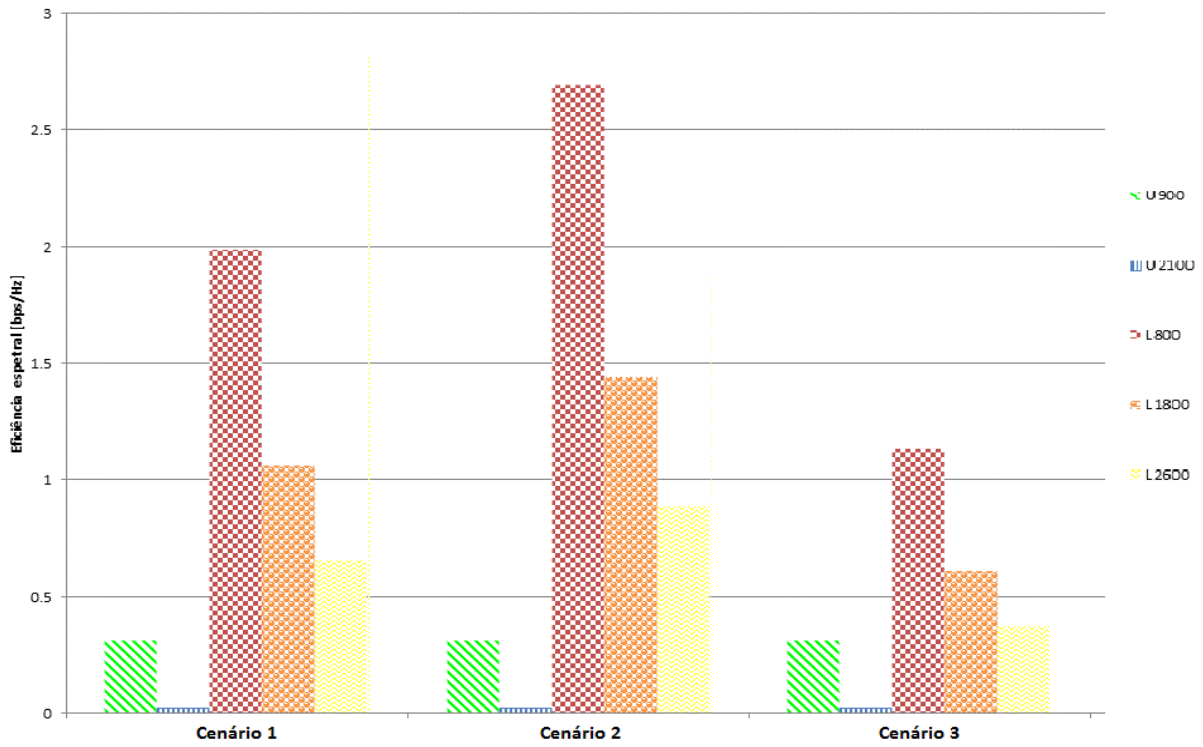


Figura 27 - Eficiência espectral para  $-70 > RxLev > -80$  dBm.

Conclui-se, desta forma, que a eficiência espectral em LTE, varia com o nível de cobertura e não com a carga existente na rede.

#### 4.4.4 Análise do débito binário em função do nível de cobertura

Utilizando os três cenários descritos anteriormente, foi feito o mesmo exercício da secção anterior, desta vez para o débito binário.

Na Figura 28 é possível verificar a variação do débito binário (médio e máximo) para cada tecnologia em função dos valores de *RxLev* recebidos. As colunas a cheio representam os valores de débito binário máximos, enquanto que as colunas padronizadas representam os valores médios.

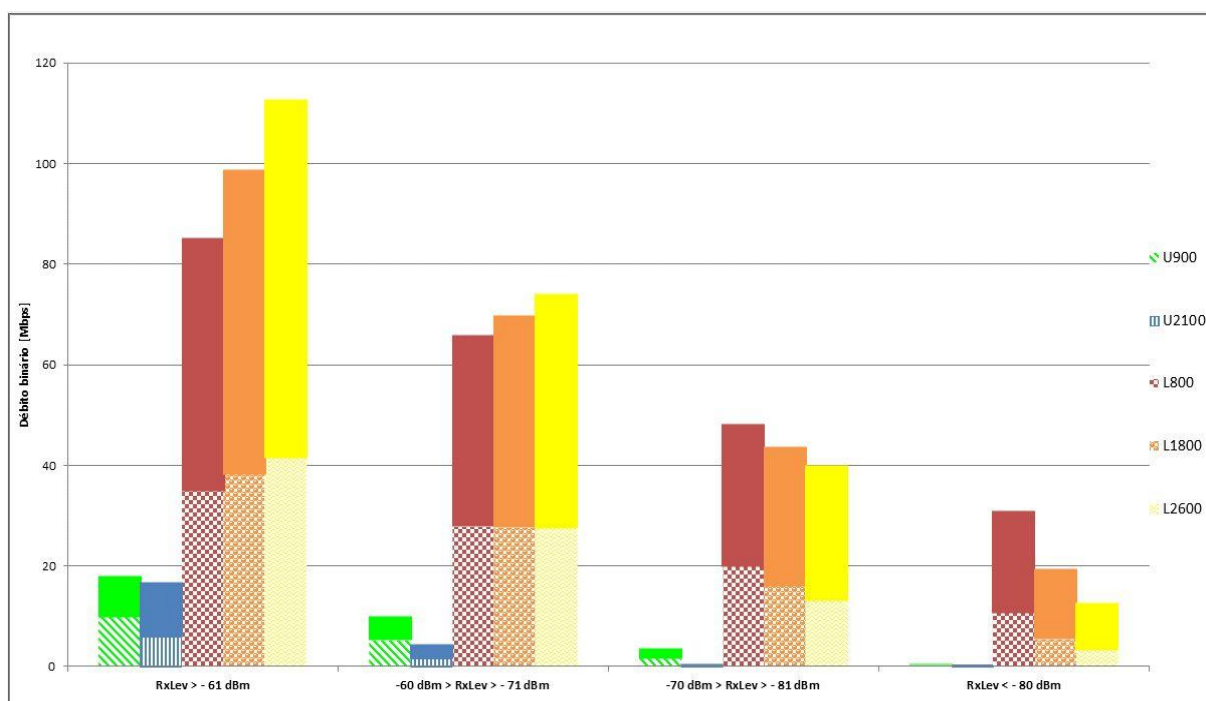


Figura 28 - Débito binário em função do *RxLev* (cenário 1).

Na Figura 29 é possível perceber que, devido à grande diferença de carga entre o U900 (20 %) e o U2100 (60 %), existe uma grande discrepância tanto no débito binário como na eficiência espectral de cada um. Quanto ao LTE, embora a carga seja a mesma para as três tecnologias (30 %), não existe uma diferença significativa no débito binário. Isto acontece, devido às diferenças de atenuação associadas a cada banda. Uma vez que as bandas mais altas possuem uma atenuação maior, a potência recebida (RSRP) será menor, logo existirá um valor de SINR mais reduzido e por sua vez também o de débito binário.

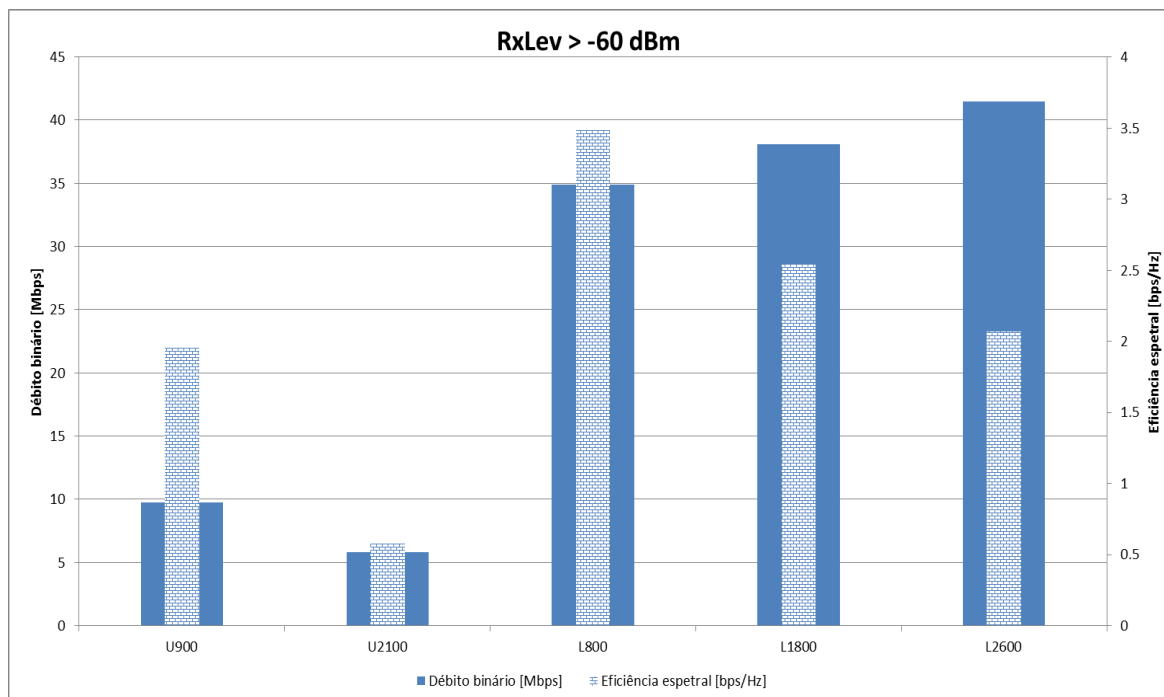


Figura 29 - Débito binário/eficiência energética para RxLev > -60 dBm (cenário 1).

De salientar que estes valores apresentados, são valores médios. Na Figura 28 consegue-se perceber que ambas as tecnologias conseguem ter valores de pico bem mais elevados que os valores médios, como o caso do L2600 que pode chegar aos 110 Mbps de pico, o que representa mais de 40 Mbps de diferença em relação ao seu valor médio.

Fazendo agora o mesmo raciocínio, mas desta vez em zonas em que a cobertura em GSM é mediana ( $RxLev$  entre -70 e -80 dBm). Na Tabela 16 encontra-se os valores de RSCP e RSRP correspondentes para as diferentes bandas.

Tabela 16 - Valores de RSCP e RSRP correspondentes a  $RxLev$  de -70 e -80 dBm (cenário 1)

<b><math>RxLev</math> [dBm]</b>	<b>RSCP [dBm]</b>		<b>RSRP [dBm]</b>		
	<b>U900</b>	<b>U2100</b>	<b>L800</b>	<b>L1800</b>	<b>L2600</b>
-70	-78.5	-88.1	-71.8	-82.8	-88.2
-80	-88.5	-98.1	-81.8	-92.8	-98.2

Na Figura 30 é possível verificar que as bandas mais baixas continuam a ter a melhor eficiência espectral. Quanto ao débito binário, apesar de terem maior largura de banda, as bandas mais altas começam a ter menos débito que as mais baixas. Isto deve-se ao facto de estas apresentarem maior atenuação, e por isso menor SINR, reduzindo assim o seu débito binário.

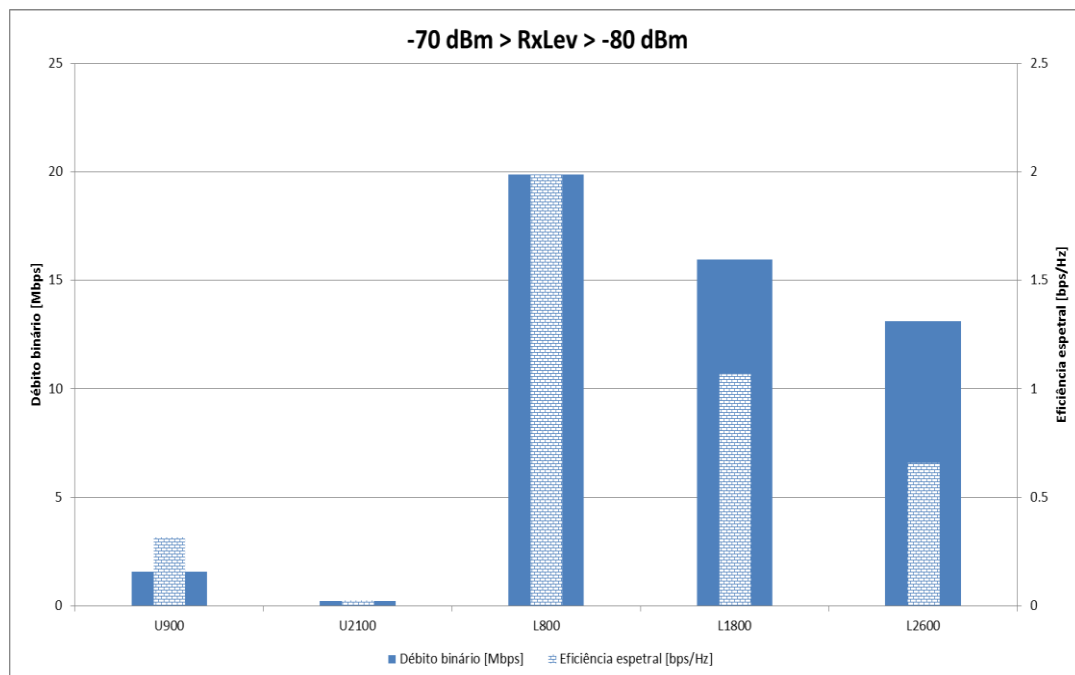


Figura 30 - Débito binário/eficiência energética para  $-70 > RxLev > -80$  dBm (cenário 1).

Comparando agora as diferenças de débito binário para os três cenários e para os diferentes níveis de cobertura. Na Figura 31 é possível verificar que o débito binário em LTE aumentou ligeiramente em relação ao cenário 1. Este comportamento já era expectável uma vez que a carga no sistema baixou, e por sua vez o número de RBs por utilizador aumentou.

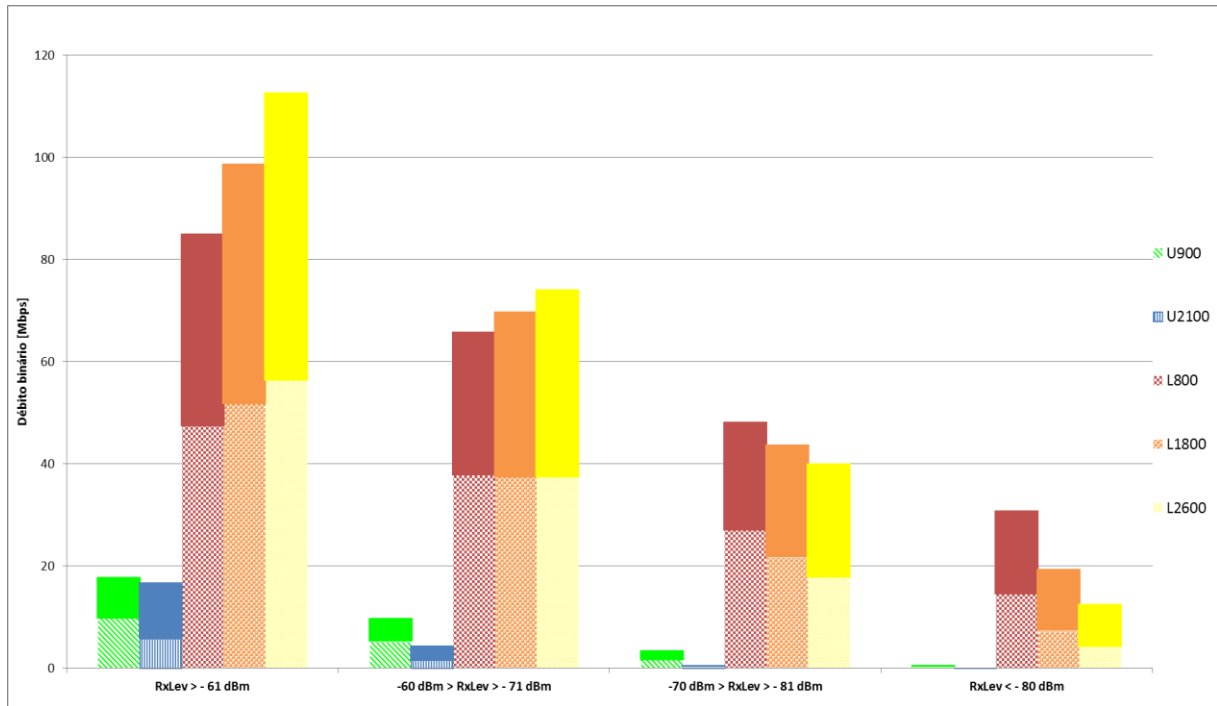


Figura 31 - Débito binário em função do *RxLev* (cenário 2).

Mais uma vez, como seria de esperar e à semelhança do cenário 1 (Figura 28), em que o LTE tem uma carga de 30 %, apesar de a eficiência espectral ser superior nas bandas mais baixas, o débito binário não o é, devido à maior largura de banda.

Analisando a Figura 32 e comparando com o cenário 1 (Figura 29), como seria expectável, tanto o débito binário como a eficiência espectral subiram ligeiramente.

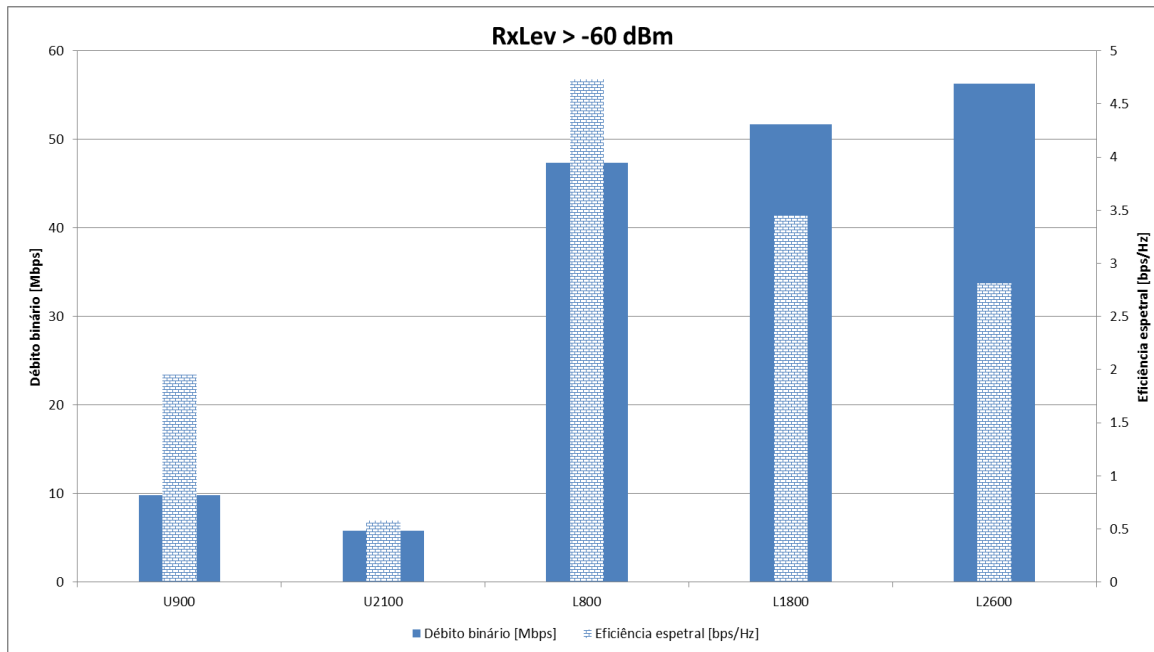


Figura 32 - Débito binário/eficiência energética para  $RxLev > -60$  dBm (cenário 2).

À semelhança das zonas de boa cobertura também nas de cobertura mediana existe um ligeiro aumento do débito binário e da eficiência espectral em relação ao primeiro cenário.

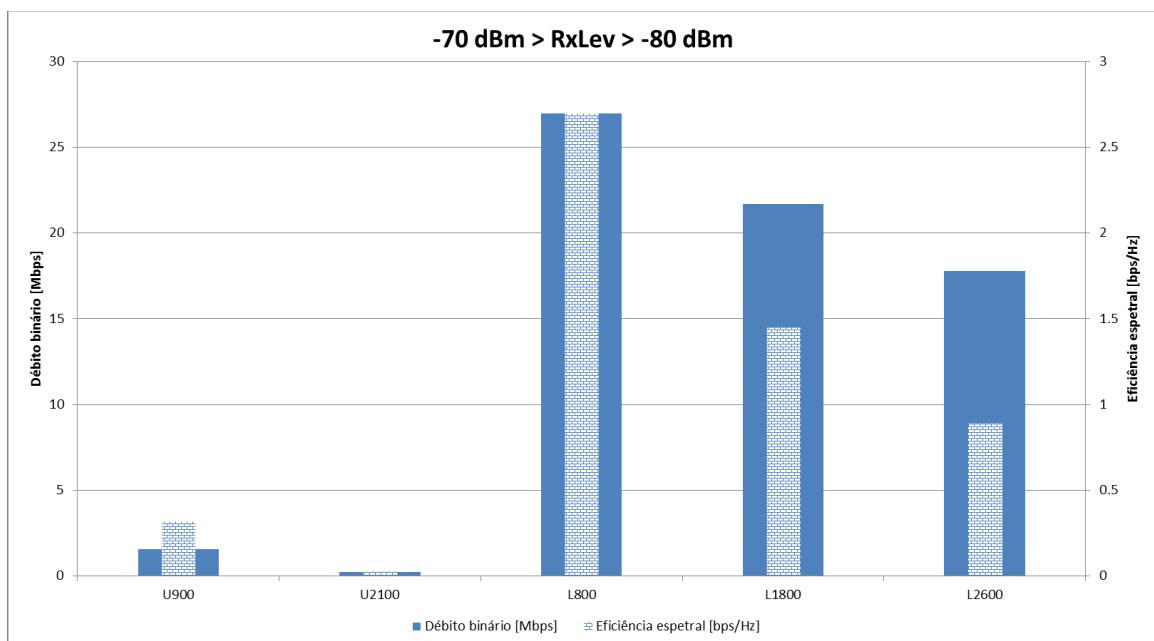


Figura 33 - Débito binário/eficiência energética para  $-70 > RxLev > -80$  dBm (cenário 2).

Quanto ao terceiro cenário, como se pode observar na Figura 34, é possível verificar que os débitos binários médio e máximo diminuem significativamente quando comparados com o segundo cenário (Figura 31). Mais uma vez as bandas mais altas reduzem bastante o seu desempenho em relação às bandas mais baixas quando a cobertura piora.

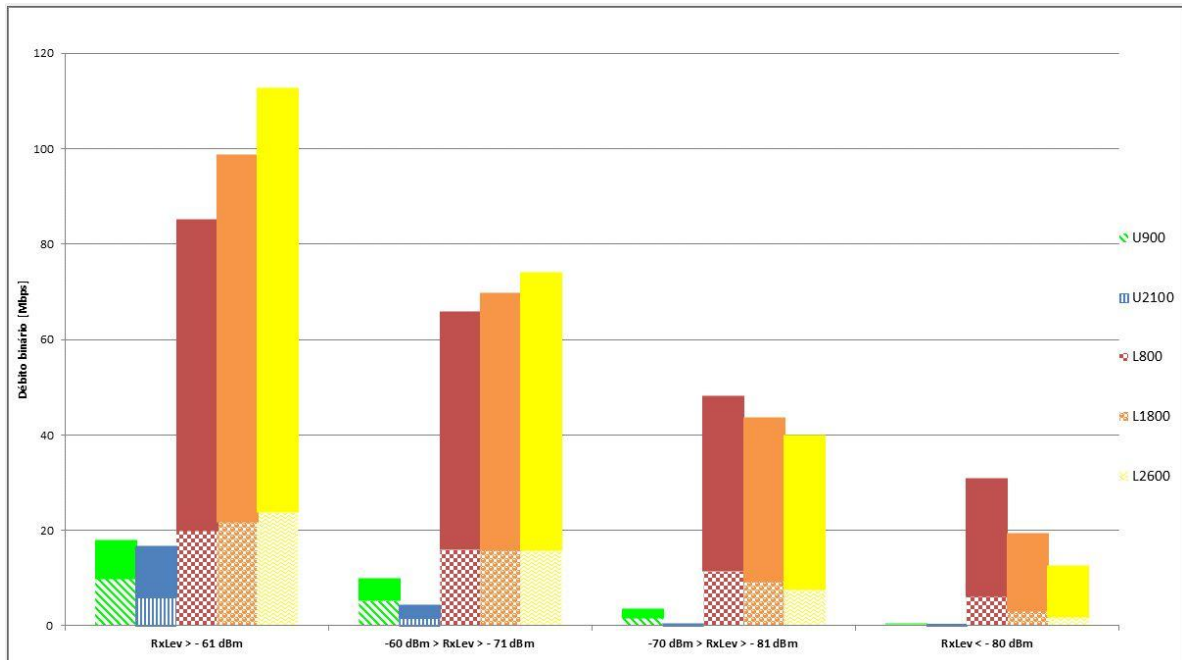


Figura 34 - Débito binário em função do RxLev (cenário 3).

Comparando a Figura 35 com a Figura 36 é possível ver que existe alguma melhoria no débito e na eficiência espectral, contudo é bastante mais significativa nas bandas mais altas.

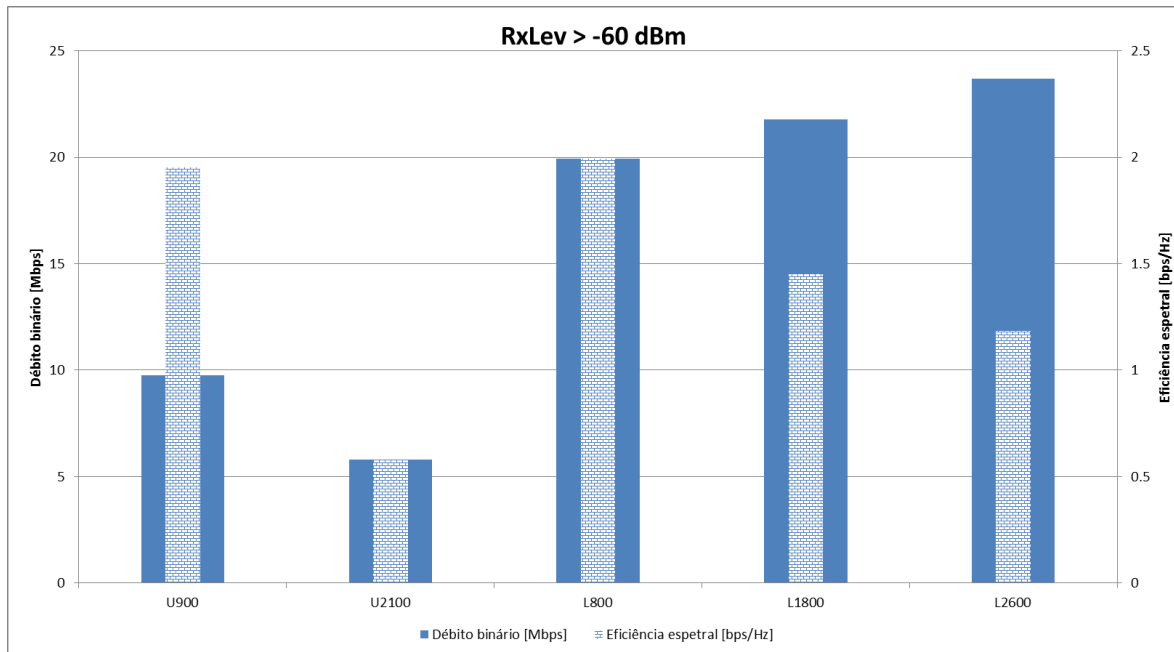


Figura 35 - Débito binário/eficiência energética para  $RxLev > -60$  dBm (cenário 3).

Devido ao grande aumento da carga do segundo cenário (5 %) para o terceiro (60 %), o L1800 e o L2600 registam um débito binário e a eficiência espectral bastante reduzidos quando a cobertura diminui.

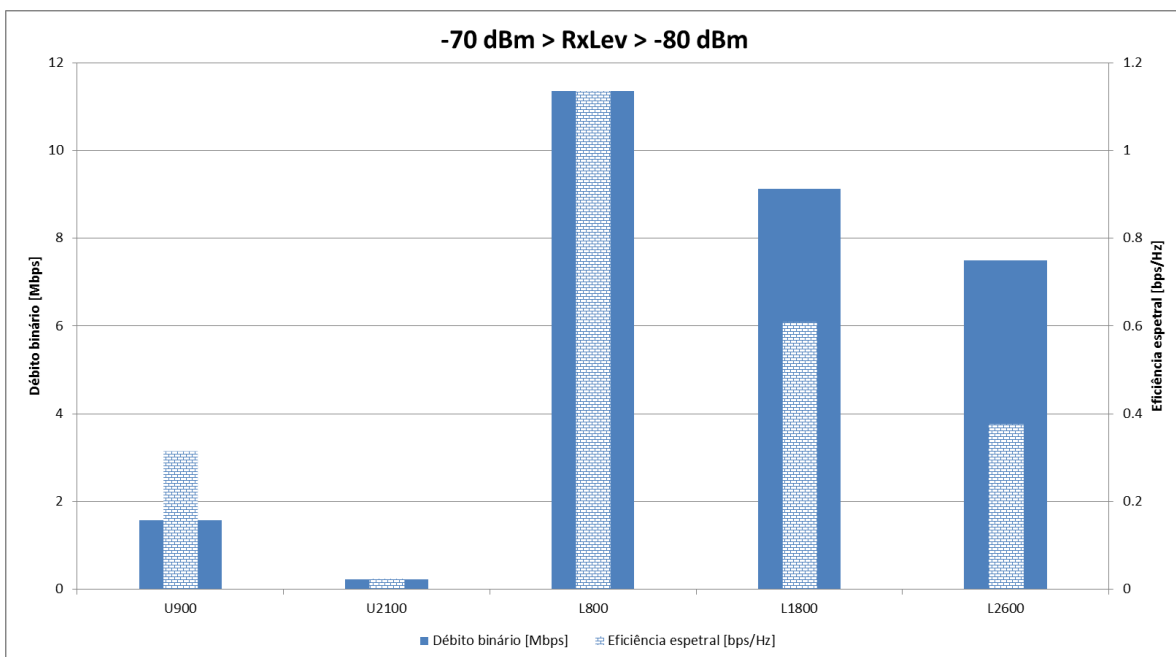


Figura 36 - Débito binário/eficiência energética para  $-70 > RxLev > -80$  dBm (cenário 3).



## 5 Caso de estudo

Como já foi referido no capítulo **Error! Reference source not found.**, foi efetuado um *drive-test* que serviu como caso de estudo. Depois de recolhidas as medidas em GSM, estas foram importadas para a ferramenta. Foi feita uma análise dos resultados obtidos para U900 e L800, comparando também com os resultados medidos em *drive-test*.

Como *inputs* foram utilizados os valores médios de todas as estações-base que cobrem a área de *drive-test*. Por questões de confidencialidade não são aqui descritos quais os valores exatos utilizados em cada estação-base.

Para o cálculo do fator de carga foram recolhidas estatísticas das células de cada uma destas estações-base. No caso do UMTS, foram utilizados contadores referentes à potência utilizada por cada célula, uma vez que nesta tecnologia a potência transmitida varia com a carga do sistema. Sabendo a potência máxima de CPICH das respetivas células é possível calcular o fator de carga respetivo através de:

$$\eta = \frac{P_{média_{tx\_CPICH}}}{P_{máx_{tx\_CPICH}}} \quad (6.1)$$

De acordo com as especificações do fornecedor, documentação proprietária do operador e desta forma confidencial, cada contador indica a percentagem de tempo que uma determinada célula se encontra com um certo valor de potência de transmissão. Sendo que a potência máxima de CPICH representa 100 % de carga.

Quanto ao LTE, este cálculo foi efetuado através do número de RBs utilizados. Uma vez que existe um contador que indica, para cada hora, a percentagem de RBs utilizados. Desta forma, foi necessário calcular a média de cada valor do contador.

Sendo assim, os valores utilizados como *inputs* foram os seguintes:

- Para o GSM:
  - $P_{tx} = 43,5 \text{ dBm}$ ;
  - $G_{tx} = 0 \text{ dBi}$ ;
- Para U900:
  - $P_{txCPICH} = 33,2 \text{ dBm}$ ;
  - $G_{tx} = 15 \text{ dBi}$ ;
  - *Dual carrier*: Não;
  - $\eta = 24,2 \%$ .
- Para L800:
  - $P_{txm\acute{a}x} = 44,8 \text{ dBm}$ ;
  - $G_{tx} = 15 \text{ dBi}$ ;
  - *Número de RBs*: 50;
  - $\eta = 5,9 \%$ .

## 5.1 Análise de RSCP/RSRP

Com o objetivo de validar a ferramenta, foi feita uma análise de RSCP e RSRP calculado pela ferramenta e medido em *drive-test*. Para ser possível efetuar uma comparação mais exata, foi construída uma função densidade cumulativa para o conjunto de pontos obtidos.

Na Figura 37 é possível comparar os resultados medidos e previstos para o RSCP.

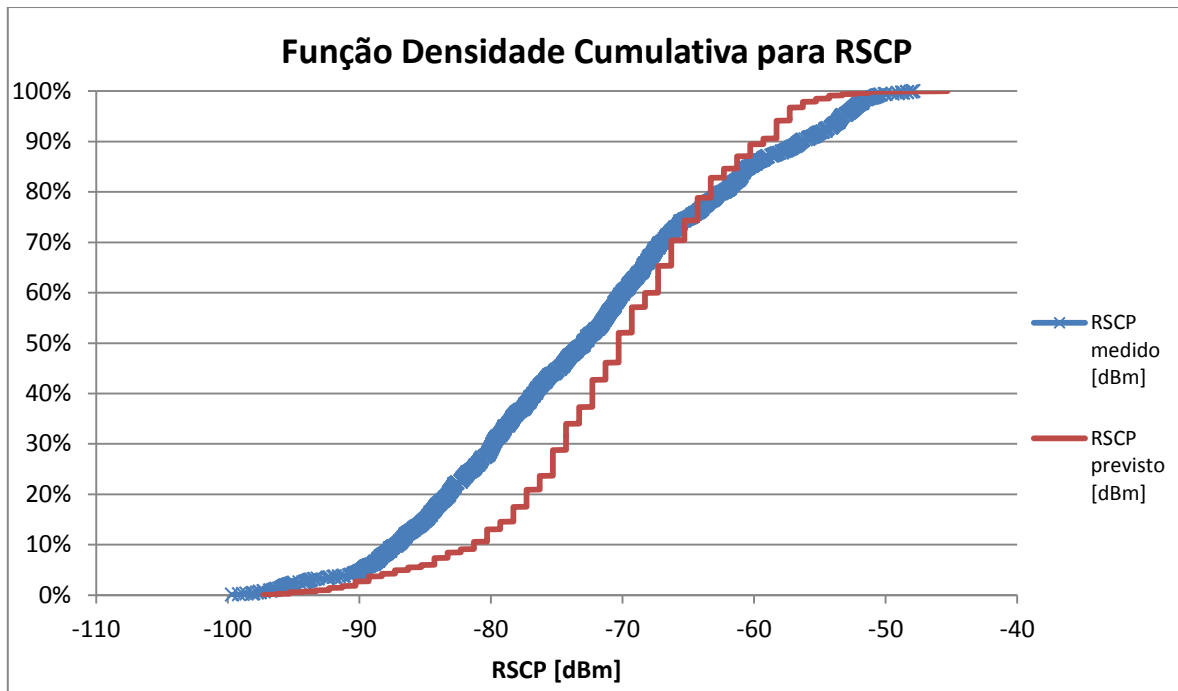


Figura 37 - Função densidade cumulativa para RSCP (UMTS900).

Observa-se, pelo gráfico, que tanto os valores de RSCP máximos e mínimos, medidos e previstos são semelhantes. Os valores máximos são de  $-47,87\text{dBm}$  para o RSCP medido e de  $-45,30\text{ dBm}$  para o previsto, ou seja, uma diferença de  $2,54\text{ dB}$ . Quanto aos valores mínimos, a diferença também é semelhante. Existe uma diferença de  $2,4\text{ dB}$ . Quanto aos valores médios, estes são de  $-72,83\text{ dBm}$  para o RSCP medido e de  $-70,54\text{ dBm}$  para o RSCP previsto, obtendo assim um erro médio relativo de  $3,14\%$ . Este erro pode ser associado ao facto de os valores utilizados como *inputs* serem valores médios dos valores reais. Outro fator que vai influenciar os resultados é o facto de o *tilt* e o tipo de antenas não ser considerado no modelo.

Analisando agora a Figura 38, é possível ver que os valores máximos para o RSRP previsto são maiores que os valores máximos medidos, isto deve-se ao facto de a forma de cálculo do RSRP ser linear (equação 4.14), o que na realidade não acontece devido ao desvanecimento em larga e pequena escala associados ao sinal e devido ao facto, já referido anteriormente, dos *tilts* e tipos de antenas não serem iguais por tecnologia e por estação-base nem serem considerados pelo modelo.

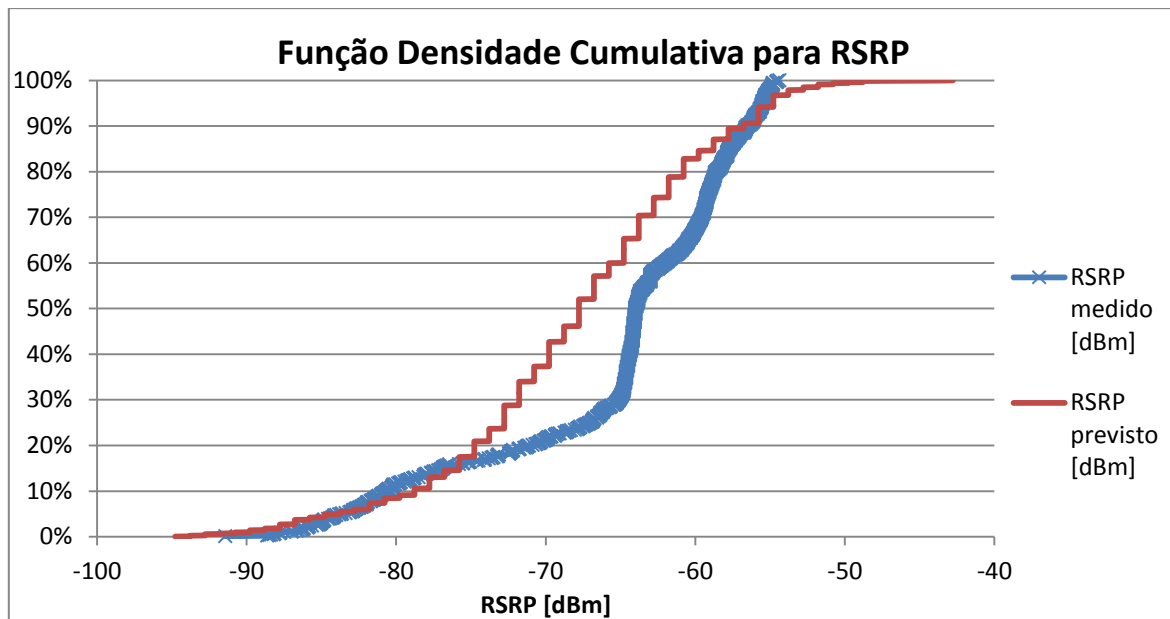


Figura 38 - Função densidade cumulativa para RSRP (L800).

No que diz respeito aos valores médios, o RSRP medido apresenta uma média de -65,25 dBm e o valor previsto de -68,02 dBm. Quanto ao erro relativo, este é de 4,24 %.

## 5.2 Análise do débito binário

Foi feita a mesma análise da secção anterior, mas desta vez para o débito binário.

Na Figura 39 é possível comparar os resultados medidos e previstos correspondentes ao débito binário para o U900.

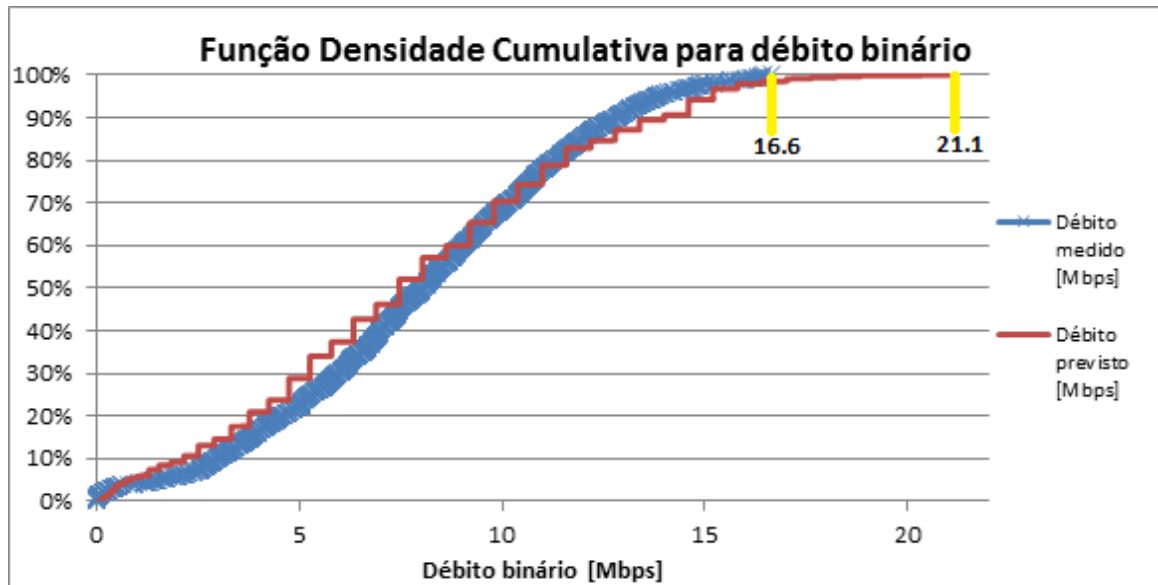


Figura 39 - Função densidade cumulativa para débito binário (U900).

É possível ver na figura anterior que o débito binário máximo previsto está cerca de 4,5 Mbps acima do medido. Isto deve-se, em parte à diferença dos valores de RSCP e também ao modelo utilizado para o cálculo do débito binário (equação 4.20), que não tem em consideração as limitações da tecnologia. Quanto ao débito binário médio, este é de 7,96 Mbps para os valores medidos e de 7,78 Mbps para os valores previstos. Com isto, obteve-se um erro relativo de 2,37 %.

Na Figura 40, encontra-se a função densidade cumulativa dos valores de débito binário medidos e previstos para o L800.

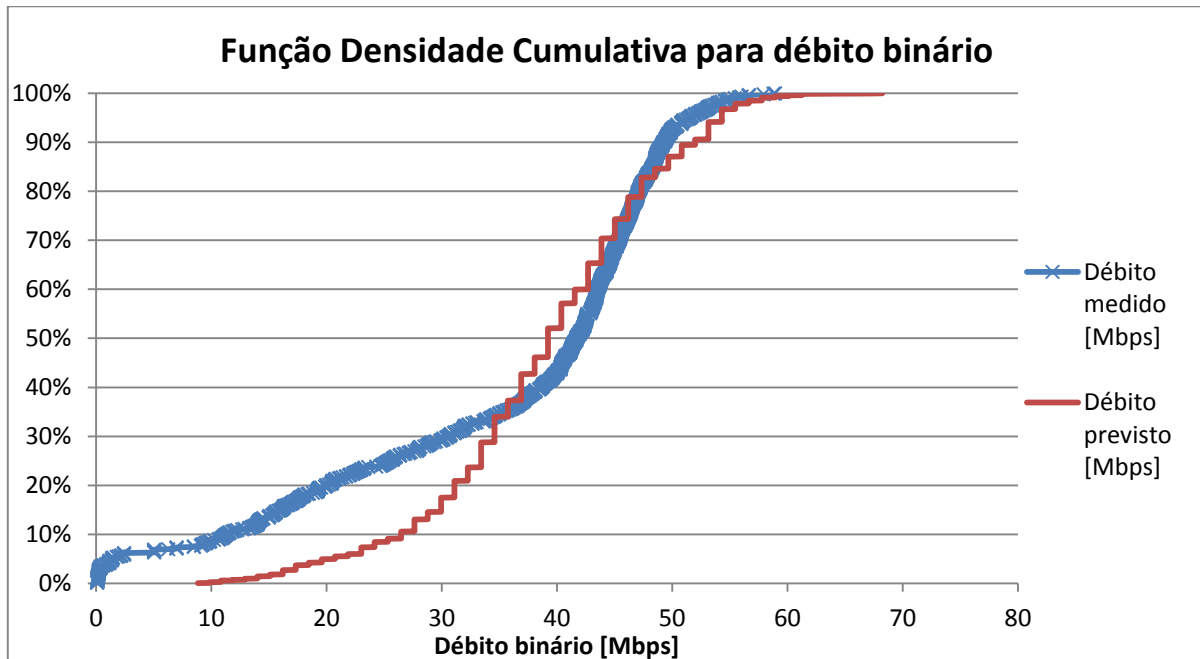


Figura 40 - Função densidade cumulativa para débito binário (L800).

É possível ver no gráfico da figura anterior que, até débitos de cerca de 30 Mbps, o débito previsto está ligeiramente (cerca de 10 Mbps) acima do débito medido. Outro aspeto a salientar é o facto do débito binário previsto mínimo ser de 10 Mbps, este valor corresponde ao débito binário correspondente ao RSRP mínimo. Relativamente aos valores médios, estes são de 35,45 Mbps (medido) e de 38,96 Mbps (previsto), apresentando assim um erro relativo de 9,91 %.

### 5.3 Análise em função do RxLev

De forma a analisar quais as zonas em que foram obtidos melhores resultados, foi feita uma divisão por RxLev. Para cada coordenada em que foram recolhidas medidas, foi correspondido um valor de RxLev medido, RSCP, RSRP e débitos binários medidos e previstos. Para isso foi necessário reduzir a escala de coordenadas de 6 para 4 casa decimais e calcular as respetivas médias de cada variável.

Nos gráficos da Figura 41 e da Figura 42 é possível ver a evolução do RSCP e RSRP medidos e previstos em função do RxLev.

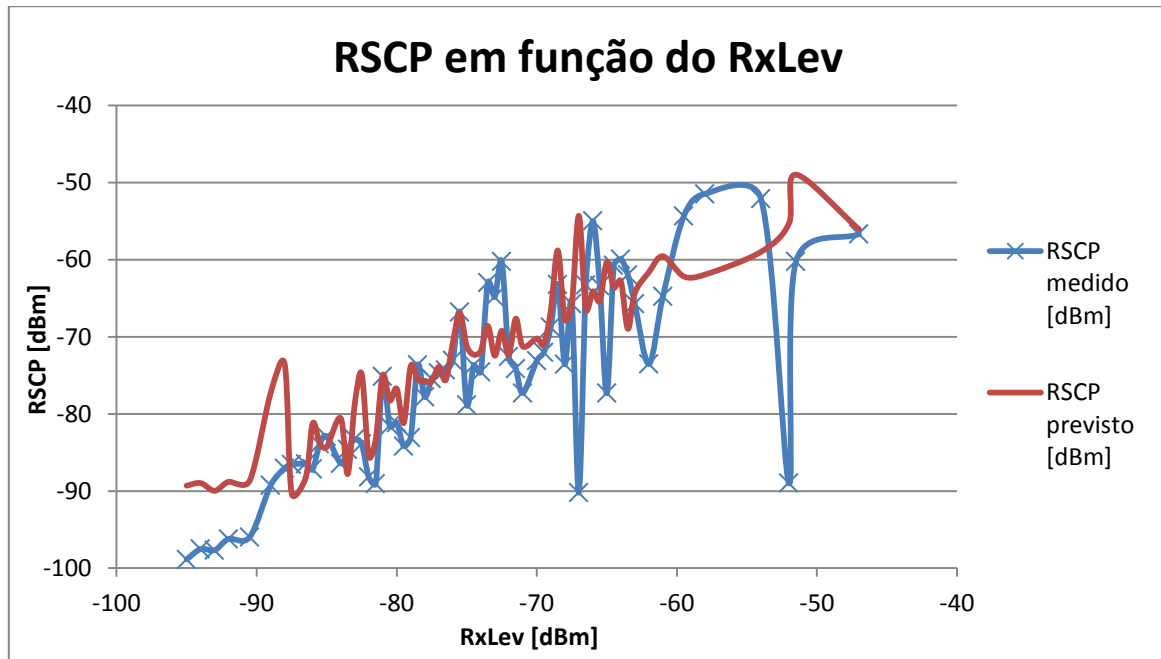


Figura 41 - Gráfico de RSCP (U900) em função do RxLev.

No gráfico da figura anterior é possível ver que o RSCP medido e previsto são semelhantes, apresentando assim, como se irá verificar mais adiante um baixo erro de previsão.

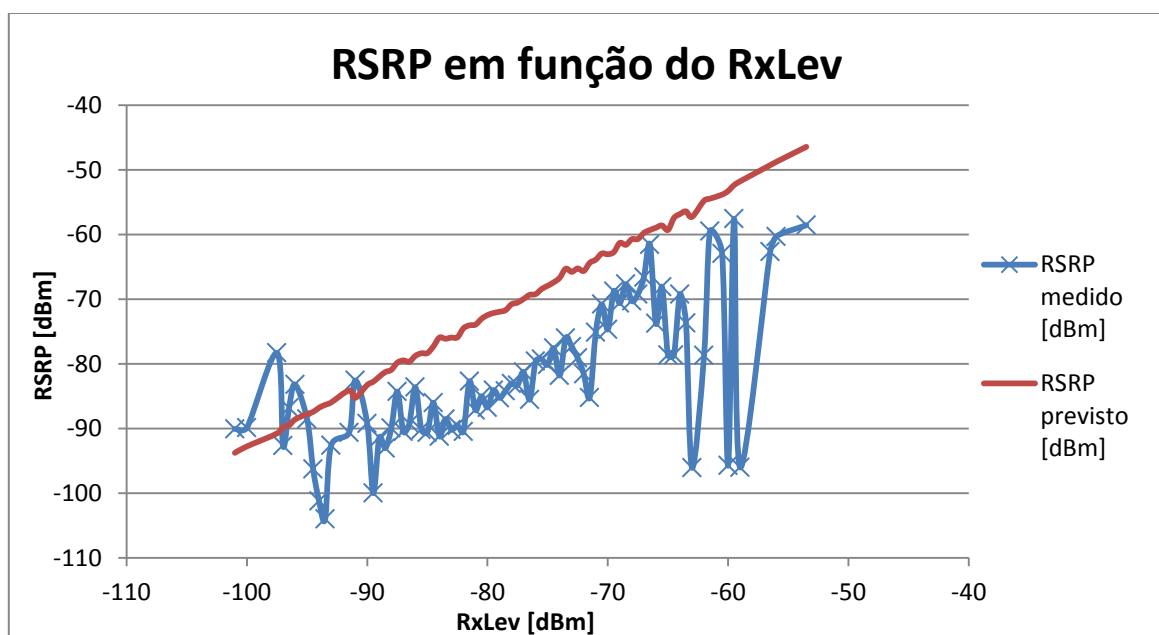


Figura 42 - Gráfico de RSRP (L800) em função do RxLev.

Quanto ao RSRP, que pode ser observado na Figura 42, consegue-se ver que o RSRP previsto está cerca de 10 dB acima do RSRP medido. Esta diferença de potência deve-se aos erros associados às fórmulas utilizadas, como por exemplo a fórmula de cálculo de  $\Delta_{L800}$  (equação 4.9), bem como dos *inputs* utilizados que, como já foi referido, são valores médios de todas as estações-base que fornecem cobertura à área em questão.

Foi dividida toda área de *drive-test* em três partes, cada uma com valores de RxLev diferentes. Uma com RxLev abaixo dos -80 dBm, outra entre os -80 e os -70 dBm e uma terceira acima dos -70 dBm. Em cada uma destas frações foram calculados os valores médios do RSCP e o RSRP medidos e previstos e os respetivos débitos binários, bem como a média do erro relativo de cada uma destas variáveis. Para o cálculo do erro relativo foram retirados 10 % das amostras com maior erro (*outliers*).

Na Tabela 17 encontra-se a síntese de resultados obtidos para o U900. Como já se tinha observado pelo gráfico da Figura 41, os valores de RSCP previstos são bastante próximos dos medidos. Quanto aos valores de débito binário, apesar do erro relativo ser demasiado alto para a zona em que o RxLev é baixo (RxLev menor que -80 dBm) a diferença entre o débito previsto e medido não é superior a 1 Mbps.

Tabela 17 - Análise de resultados por RxLev (U900).

<b>U900</b>			
	<i>RxLev &lt; -80dBm</i>	<i>-80dBm &lt; RxLev &lt; -70dBm</i>	<i>RxLev &gt; -70dBm</i>
<b>RSCP medido [dBm]</b>	-87.75	-73.43	-65.58
<b>RSCP previsto [dBm]</b>	-83.10	-72.44	-62.03
<b>Erro relativo [%]</b>	5.40	4.61	9.06
<b>Débito binário medido [Mbps]</b>	3.08	6.98	7.51
<b>Débito binário previsto [Mbps]</b>	2.27	6.53	12.35
<b>Erro relativo [%]</b>	26.30	18.25	61.49

Na Tabela 18 encontram-se os mesmos resultados mas desta vez para o L800. Quanto ao RSRP, percebe-se facilmente que à medida que os valores de RxLev aumentam a diferença entre os valores previstos e medidos vai sendo maior e conseqüentemente também o erro vai aumentando. Pode-se concluir daqui que a fórmula de cálculo do RSRP não poderá ser linear em relação ao RxLev.

Tabela 18 - Análise de resultados por RxLev (L800).

<b>L800</b>			
	<i>RxLev &lt; -80dBm</i>	<i>-80dBm &lt; RxLev &lt; -70dBm</i>	<i>RxLev &gt; -70dBm</i>
<b>RSRP medido [dBm]</b>	-89.61	-80.26	-71.52
<b>RSRP previsto [dBm]</b>	-81.86	-67.62	-56.35
<b>Erro relativo [%]</b>	9.88	14.97	17.23
<b>Débito binário medido [Mbps]</b>	18.70	24.29	30.60
<b>Débito binário previsto [Mbps]</b>	23.02	39.40	52.49
<b>Erro relativo [%]</b>	52.06	61.13	77.27

Quanto ao débito binário, este encontra-se demasiado otimista maioritariamente devido ao facto do RSRP o ser também. Desta forma corrigindo os valores de RSRP, existirá uma melhoria significativa na previsão do débito binário. Como se pode observar pela Tabela 10, uma diferença de 10 dB pode significar uma diminuição de cerca de 12 Mbps no débito binário.

Na Tabela 19 é possível observar os valores de débito binário previsto e respetivos erros, quando utilizados os valores de RSRP medidos.

Tabela 19 - Análise do débito binário, utilizando RSRP medido, por RxLev (L800).

<b>L800</b>			
	<i>RxLev &lt; -80dBm</i>	<i>-80dBm &lt; RxLev &lt; -70dBm</i>	<i>RxLev &gt; -70dBm</i>
<b>Débito binário medido [Mbps]</b>	18.70	24.29	30.60
<b>Débito binário previsto [Mbps]</b>	14.66	24.91	35.06
<b>Erro relativo [%]</b>	22.22	4.43	17.32



Fazendo uma análise ao RSCP do U900, consegue-se identificar que as zonas onde a cobertura em GSM diminui, também diminui em UMTS (Figura 44).



Figura 44 - Vista de RSCP medido (em cima) e previsto (em baixo) em *Google Earth*.

Comparando os resultados medidos com os previstos, percebe-se que em determinadas áreas o RSCP previsto é ligeiramente superior ao RSCP medido. Mais uma vez, isto acontece

devido às zonas de fronteira de célula, que estão otimizadas (com valores de *tilts* e potências diferentes) e que não estão a ser considerados no modelo.

Na Figura 45 é possível perceber que o mesmo comportamento do UMTS se repete em LTE. Quando o RxLev aumenta o RSRP também aumenta. Quando se comparam os valores medidos com os previstos percebe-se, claramente, o ligeiro aumento do RSRP previsto. Esta diferença corresponde à já mencionada anteriormente (cerca de 10 dB).

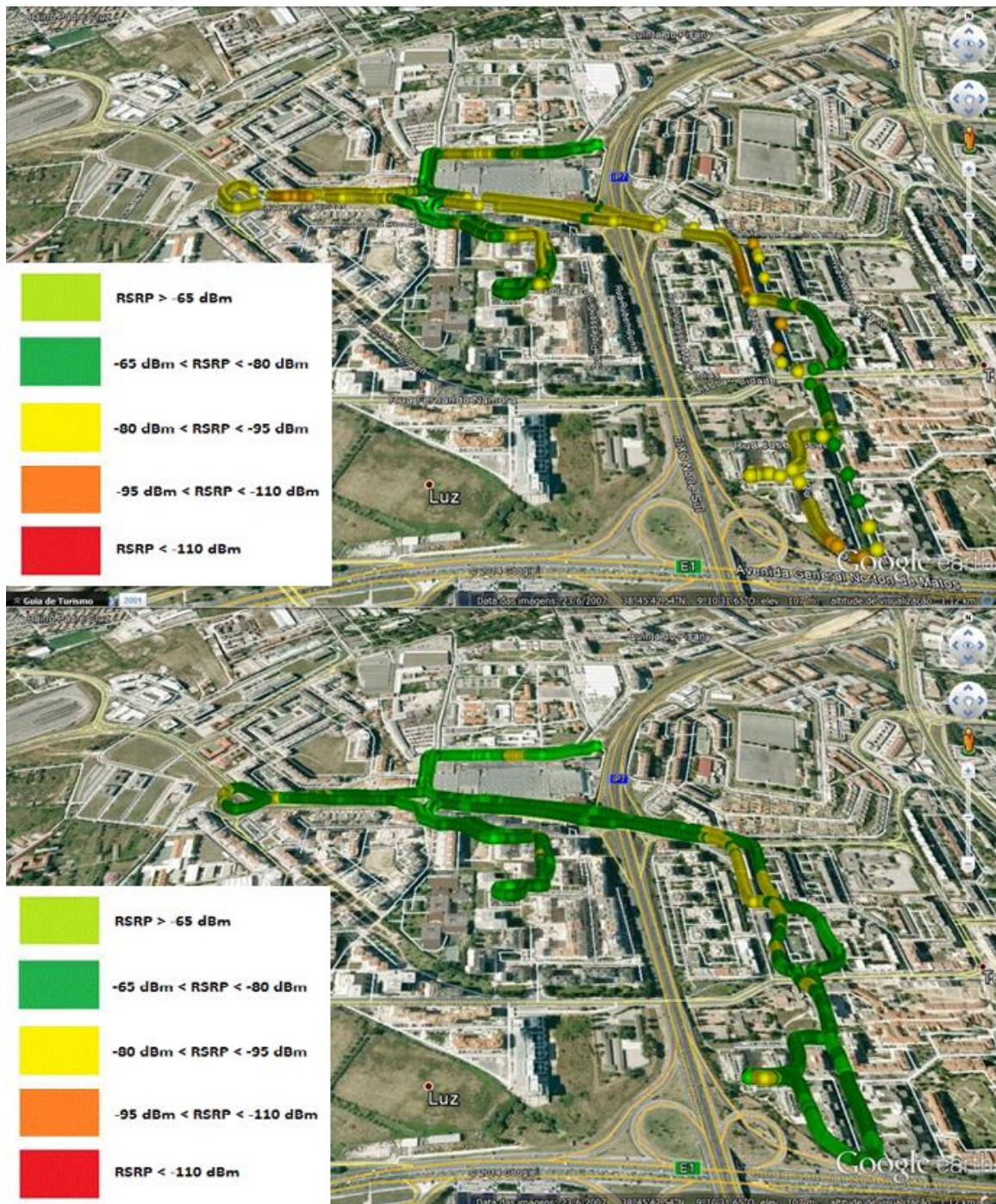


Figura 45 - Vista de RSRP medido (em cima) e previsto (em baixo) em Google Earth.

Fazendo agora uma análise ao débito binário de cada tecnologia, é possível verificar as diferenças de débito binário previsto e medido na Figura 46. Aqui vêem-se algumas zonas em que o débito previsto é ligeiramente inferior ao medido. Se for feita uma análise à Figura 43 percebe-se que estas zonas são as zonas em que o RxLev é menor (maioritariamente menor do -70 dBm). Noutras zonas o débito previsto está acima do medido, estas são as zonas em que o RxLev é maior.

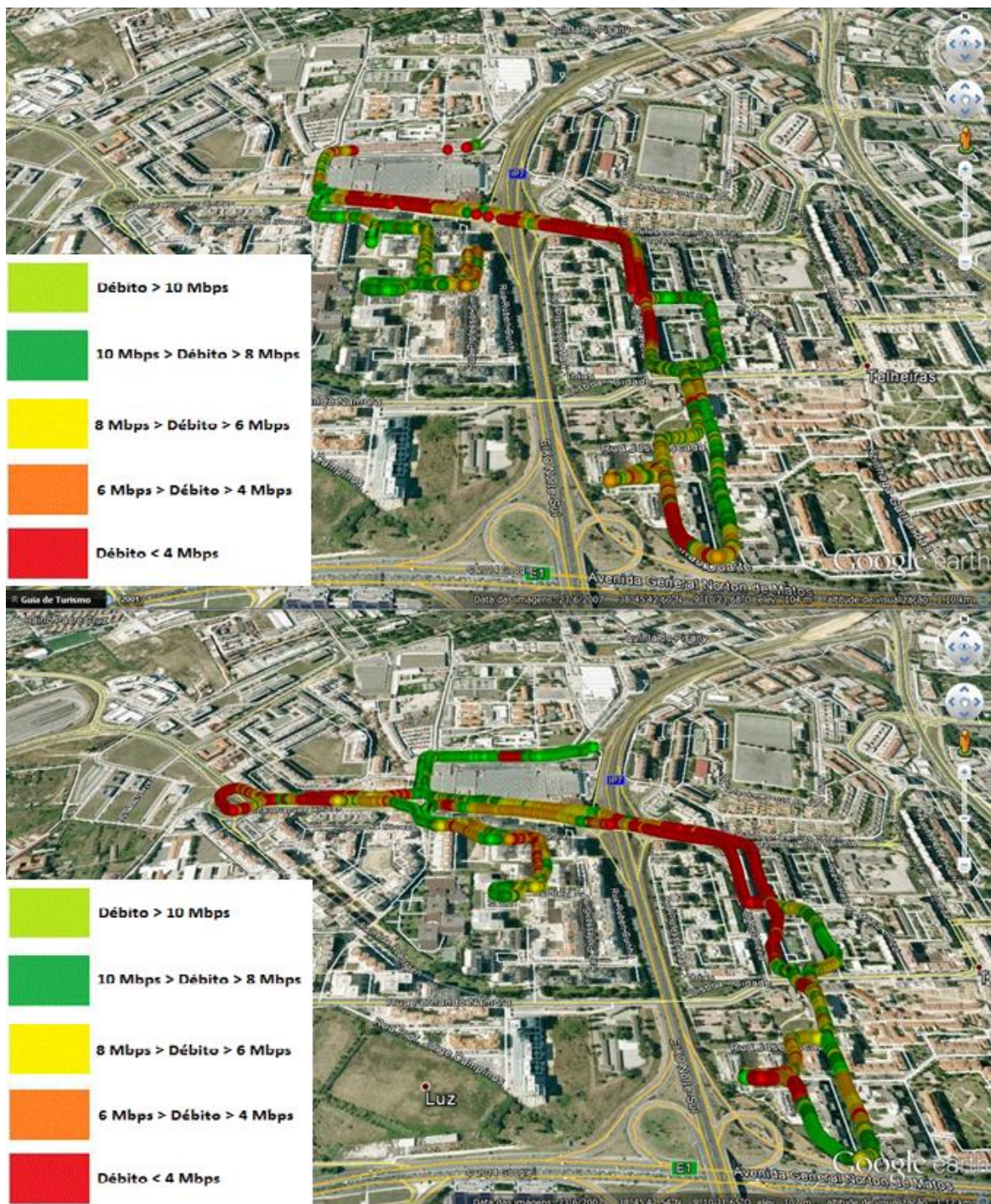


Figura 46 - Vista de débito medido (em cima) e previsto (em baixo) em Google Earth (U900).

Na Figura 47 é possível visualizar a diferença do débito binário medido e previsto. Na maior parte das zonas o débito binário previsto é bastante otimista em relação ao medido, como já tinha sido observado na Tabela 18.

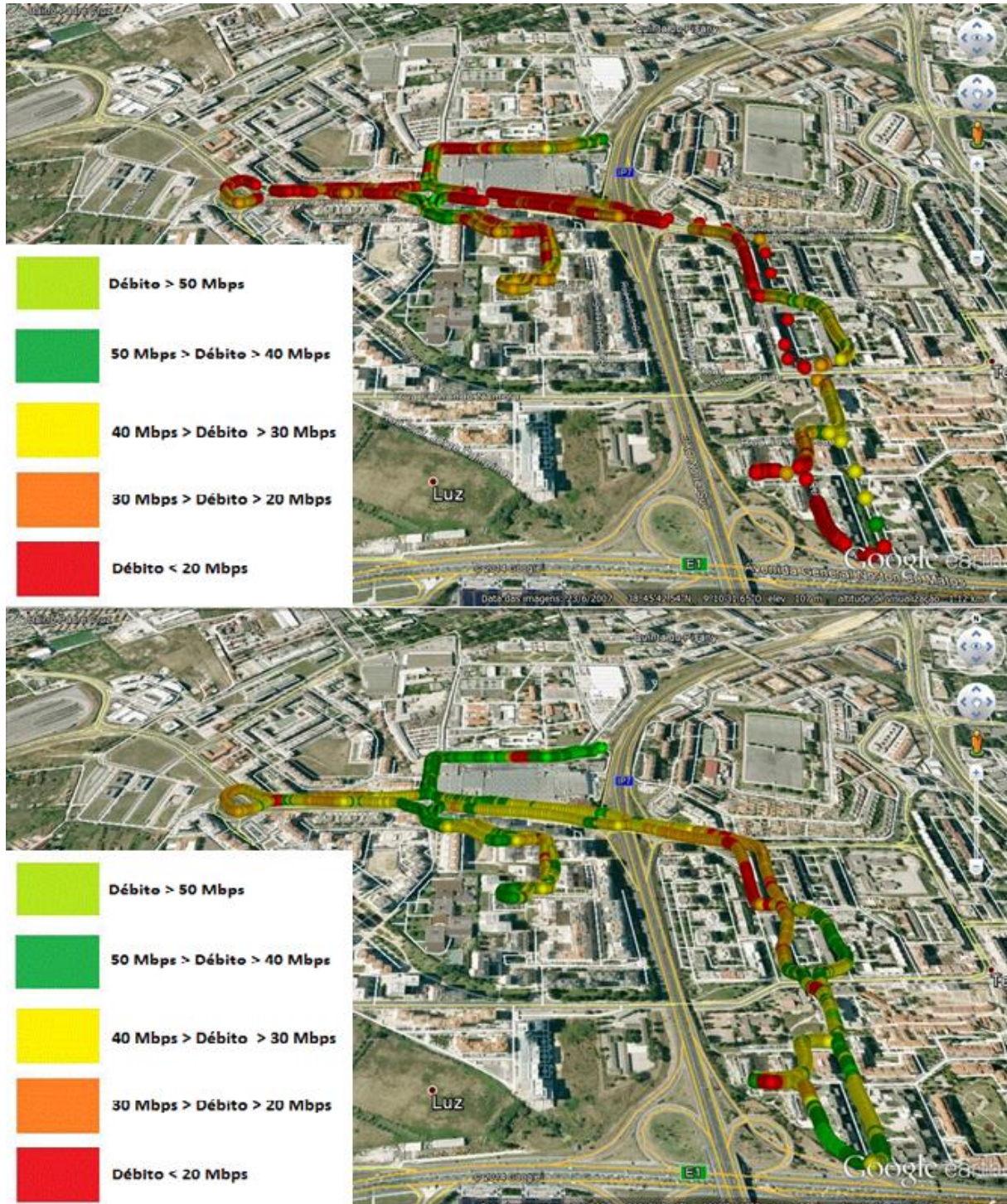


Figura 47 - Vista de débito medido (em cima) e previsto (em baixo) em Google Earth (L800).

## 6 Conclusões

O principal objetivo desta tese foi o desenvolvimento de um algoritmo de previsão de desempenho das tecnologias UMTS e LTE com base em medidas GSM co-localizadas. Este algoritmo foi desenvolvido baseado em estatísticas de GSM recolhidas numa rede em funcionamento e pertencentes a um operador Português. A previsão, feita a nível de potência recebida de ambas as tecnologias (RSCP e RSRP) e de débito binário, tem em conta não só o tipo de tecnologia, mas também a banda de frequência utilizada e largura de banda. O modelo faz uma previsão de UMTS nas bandas dos 900 e 2100 MHz e de LTE nas bandas dos 800, 1800 e 2600 MHz.

Como foi possível observar no Capítulo 5, foi efetuada uma validação do modelo para as bandas de 900 MHz em UMTS e 800 MHz em LTE. Como se pode verificar pela Tabela 17 o UMTS apresenta valores bastante aceitáveis. A nível de RSCP existe sempre um erro inferior a 10%. Quanto ao débito binário, apesar de existir um erro relativo mais elevado, as diferenças de débito medido e previsto não são significativas (menos de 1 Mbps), ou seja, a nível de utilizador não é notória uma diferença significativa. Apenas quando o RxLev é maior do que -70 dBm é que esta diferença, de cerca de 5 Mbps, começa a ter algum impacto. Relativamente ao LTE, foi encontrada uma ligeira diferença dos valores de RSRP previstos em relação aos medidos, esta diferença aumenta à medida que o RxLev também aumenta. Esta discrepância nos valores de RSRP é algo significativa, uma vez que vai influenciar os resultados obtidos para o débito binário.

Esta diferença nos resultados está associada aos erros estatísticos das fórmulas utilizadas no modelo de previsão e aos *inputs* fornecidos na ferramenta que, como já foi referido anteriormente, variam de estação-base para estação-base ao longo de toda a área de *drive-test*. Poderia ser introduzido um fator corretivo que corrigisse este caso em concreto, contudo esse fator corretivo poderia não ser válido para outros cenários, cujas bandas utilizadas, valores de *tilt* e de fatores de carga seriam diferentes. Uma forma de contornar esta questão seria, com base em *drive-tests* efetuados noutras zonas, desenvolver um modelo de cálculo de RSCP e RSRP que seja dependente do valor de *tilt*, desta forma já seria possível obter valores de RSCP e RSRP mais próximos da realidade e conseqüentemente o débito binário previsto seria mais realista.

Apesar de existir um ligeiro erro associado, a ferramenta poderá ser bastante útil no terreno, ao nível do planeamento e otimização de redes móveis. Com esta ferramenta é possível estimar a evolução de cada par tecnologia/banda com a variação de parâmetros, tais como: potências, ganhos, perdas, larguras de banda ou até mesmo a utilização de *dual carrier* em UMTS. Com isto é possível tomar decisões à cerca da validade da implementação de determinadas tecnologias ou do aumento de largura de banda. É também possível obter uma previsão da evolução da tecnologia com o aumento da carga no sistema, o que permite ter uma ideia do comportamento da rede no futuro (assumindo que existirá um aumento da utilização do LTE).

Como trabalho futuro, para além da possibilidade de um modelo retificativo em função dos *tilts* já mencionado anteriormente, seria também interessante efetuar uma validação (à semelhança da já efetuada nesta tese) dos resultados relativos às restantes tecnologias/bandas. Seria útil obter um modelo que tivesse em conta a utilização de MIMO e que já estivesse preparado para o LTE-*Advanced* considerando adicionalmente a agregação de portadoras.

## 7 Referências

- [1] P. R. T. Bergamo, “www.sj.ifsc.edu.br,” 2009. [Online]. Available: <http://www.sj.ifsc.edu.br/~mdoniak/ComunicacoesMoveis1/Cap%C2%A1tulo1-%20Com%20Moveis%20tecnologo%202009-1.pdf>. [Acedido em 2014].
- [2] Autoridade da Concorrência, Março 2009. [Online]. Available: [http://www.concorrenca.pt/SiteCollectionDocuments/Estudos\\_e\\_Publicacoes/Comunicacoes\\_Electronicas/02\\_Relatorio\\_Comunicacoes\\_Moveis\\_2010.pdf](http://www.concorrenca.pt/SiteCollectionDocuments/Estudos_e_Publicacoes/Comunicacoes_Electronicas/02_Relatorio_Comunicacoes_Moveis_2010.pdf). [Acedido em 2014].
- [3] GSMA, “GSMA,” [Online]. Available: <http://www.gsma.com/aboutus/history>. [Acedido em 2014].
- [4] Teleco, Setembro 2013. [Online]. Available: [http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbandcel/pagina\\_5.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbandcel/pagina_5.asp).
- [5] 3GPP, “Release 96 do 3GPP,” [Online]. [Acedido em 2014].
- [6] 3GPP, “Release 97 do 3GPP,” [Online]. [Acedido em 2014].
- [7] Ericsson, “GPRS EDGE Radio Dimensioning and Performance Workshop,” Ericsson.
- [8] Janeiro 2013. [Online]. Available: [http://wireless.arcada.fi/MOBWI/material/CN\\_4\\_4.html](http://wireless.arcada.fi/MOBWI/material/CN_4_4.html).
- [9] M. Rahnema, UMTS Network Planning Optimization and Inter Operation with GSM, John Wiley & Sons, 2008.
- [10] 3GPP, “Release 99 TS 23.002 do 3GPP”.
- [11] T. A. (. Holma H.(Ed.), "WCDMA for UMTS – HSPA Evolution", 4ª edição ed., J. W. & Sons, Ed., 2007.
- [12] ScienceDirect, “www.sciencedirect.com,” Agosto 2011. [Online]. Available: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CCkQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.paper.edu.cn%2Fjournal%2FdownloadCount%2F1005-8885\(2011\)04-0014-15&ei=zjkoVMfBM4bnyQOh04DgDA&usg=AFQjCNFzVnc-758N12oI2KFBjhONJL5PeQ&sig2=q7lrLbufHsxjGpKucpUAVg&](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0CCkQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.paper.edu.cn%2Fjournal%2FdownloadCount%2F1005-8885(2011)04-0014-15&ei=zjkoVMfBM4bnyQOh04DgDA&usg=AFQjCNFzVnc-758N12oI2KFBjhONJL5PeQ&sig2=q7lrLbufHsxjGpKucpUAVg&). [Acedido em 2014].
- [13] 3GPP, “Release 7 do 3GPP”.

- [14] M. Rumney, "LTE and the Evolution to 4G Wireless", A. Technologies, Ed., 2009.
- [15] Agilent Technologies, "LTE and the Evolution to 4G Wireless", Agilent Technologies, 2009.
- [16] 3GPP, "Release 8 do 3GPP".
- [17] Vodafone, Agosto 2014. [Online]. Available: <http://press.vodafone.pt/2014/06/09/vodafone-lanca-o-primeiro-equipamento-com-velocidades-ate-300-mbps-o-vodafone-4g-b4000/>.
- [18] [Online]. Available: <http://www.antenna-theory.com/basics/friis.php>. [Acedido em 2014].
- [19] John Wiley and Sons, Ltd, LTE, The UMTS Long Term Evolution, John Wiley and Sons, Ltd, 2009.
- [20] ISEL-DEETC, Maio 2014. [Online]. Available: <http://thoth.cc.e.ipl.pt/classes/Com/1314i/LI31N/resources/2557..>
- [21] [Online]. Available: [http://www.gsmarena.com/sony\\_ericsson\\_w995-2682.php](http://www.gsmarena.com/sony_ericsson_w995-2682.php).
- [22] Março 2014. [Online]. Available: <http://www.4gltemall.com/blog/tag/zte-k5006z/>.
- [23] Janeiro 2013. [Online]. Available: [www.vodafone.pt](http://www.vodafone.pt).
- [24] Janeiro 2013. [Online]. Available: <http://ltesignaling.blogspot.pt/2011/09/lte-standards-and-standard-roadmap.html>.
- [25] T. Rappaport, "Wireless Communications: Principles and Practice", 2ª edição ed., Prentice-Hall, 2001.

## Anexo A

Foram programados dois *drive-tests*, um com o objetivo de servir para o desenvolvimento do modelo matemático a utilizar e o segundo de servir como caso final de estudo.

O equipamento utilizado (propriedade da Vodafone) foi um computador portátil com o *software TEMS Investigation 15.1*, um telemóvel *Ericsson W995* [21] e uma placa banda larga *ZTE K5006Z* equipada com um cartão SIM 4G, cujas especificações se podem encontrar em [22].

Numa primeira fase, foi efetuado um *drive-test* com o objetivo de obter uma amostra de medidas UMTS e LTE de uma estação base que já contém estas tecnologias co-localizadas com o GSM. Para isso foi escolhida uma estação-base que se previa ter pouca carga nas tecnologias e bandas escolhidas durante o horário de *drive-test*. Durante os *drive-tests* o telefone foi bloqueado em GSM e a efetuar uma chamada enquanto a placa foi bloqueada a uma das tecnologias e a uma das bandas enquanto fazia *download* de um servidor ftp. Ambos os *drive-tests* foram feitos com a placa em UMTS na banda dos 900 MHz (U900) e LTE na banda dos 800 MHz (L800).

Foi efetuado um percurso à volta da estação base de forma a fazer com que o terminal estivesse sempre ligado à mesma célula e que fosse possível a recolha de medidas com a máxima variação de SINR, enquanto o móvel descarregava ficheiros para que obtivesse o máximo débito possível.

Na Figura 48 e na Figura 49 é possível observar o débito binário instantâneo medido no *drive-test* para U900 e L800, respectivamente.

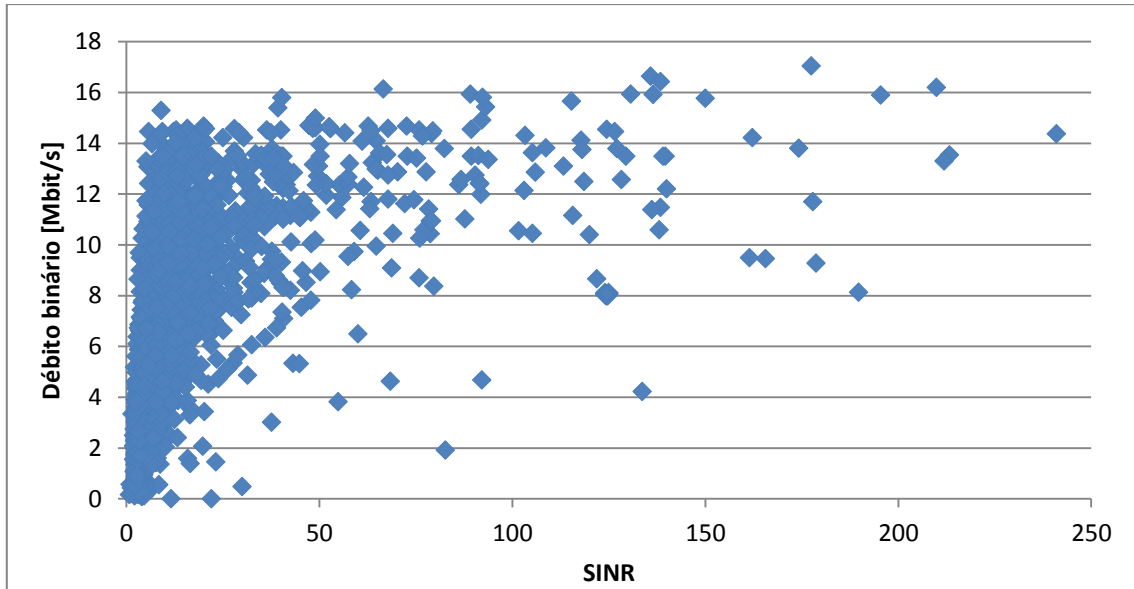


Figura 48 - Débito binário instantâneo medido (U900).

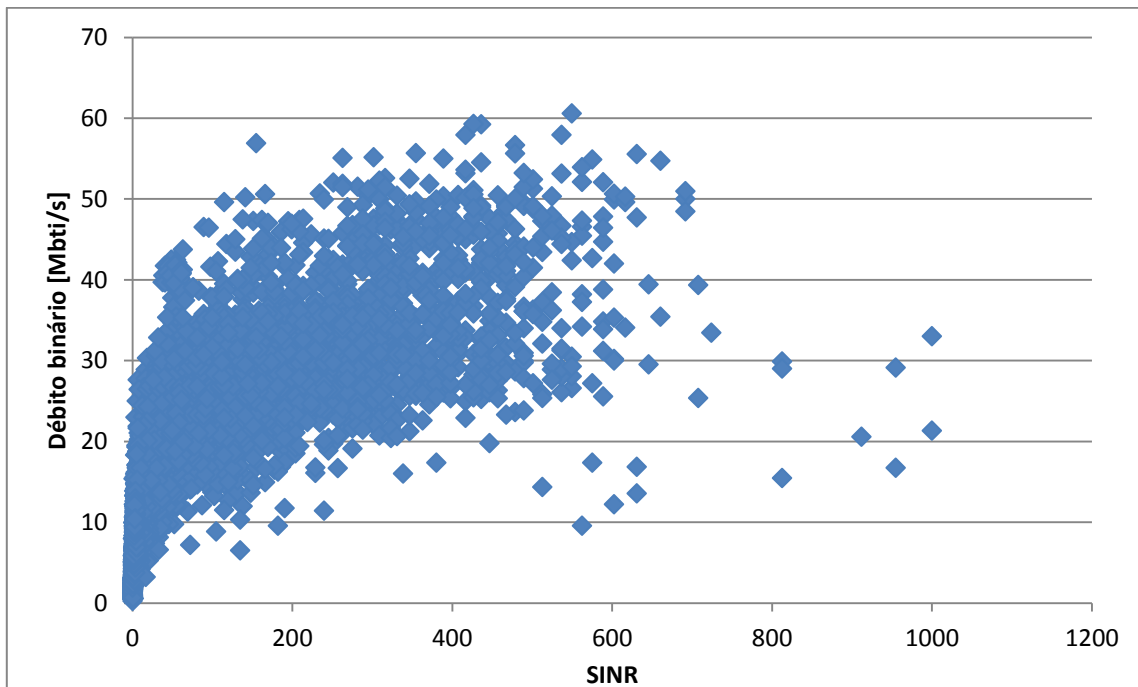


Figura 49 - Débito binário instantâneo medido (L800).

De modo a que fosse possível um melhor estudo dos resultados obtidos, foi feita uma análise do débito binário médio instantâneo e do débito binário máximo para cada uma das tecnologias. Para isso calculou-se a média e o máximo dos resultados instantâneos medidos para cada valor de SINR, separados por 0,5 dB. Na Figura 50 e na Figura 51 é possível visualizar os resultados obtidos.

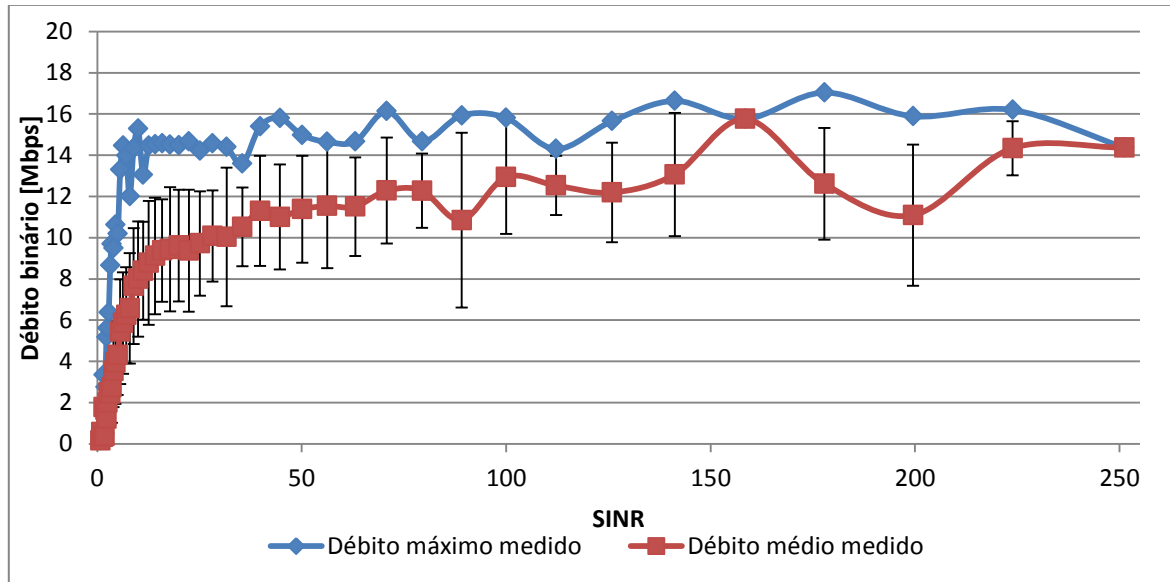


Figura 50 - Débito binário médio e máximo medido (U90).

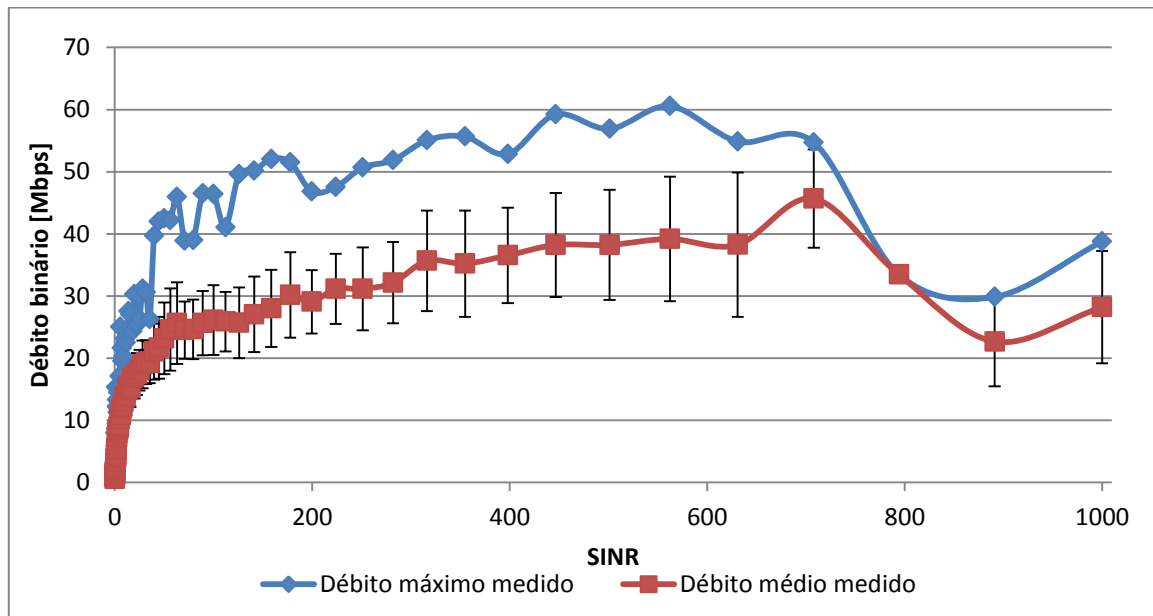


Figura 51 - Débito binário médio e máximo medido (L800).

Posteriormente foi efetuado um segundo *drive-test*, este serviu como caso de estudo cujos resultados serão apresentados no capítulo 0. Este teste foi efetuado da mesma forma que o primeiro, sempre com o móvel em GSM e em chamada enquanto a placa de banda larga fazia *download* de ficheiros de um servidor ftp, quer em U900 como em L800.

Para este *drive-test* foi escolhida uma área que continha as três tecnologias (GSM900, U900 e L800) co-localizadas, desta forma seria possível efetuar as medições nas três tecnologias em simultâneo. Na Figura 52 está representado o percurso efetuado, onde foi tido o cuidado de passar mais do que uma vez na mesma zona de forma a obter mais medidas na mesma área de teste. Por razões de confidencialidade não são reveladas as posições das estações base.

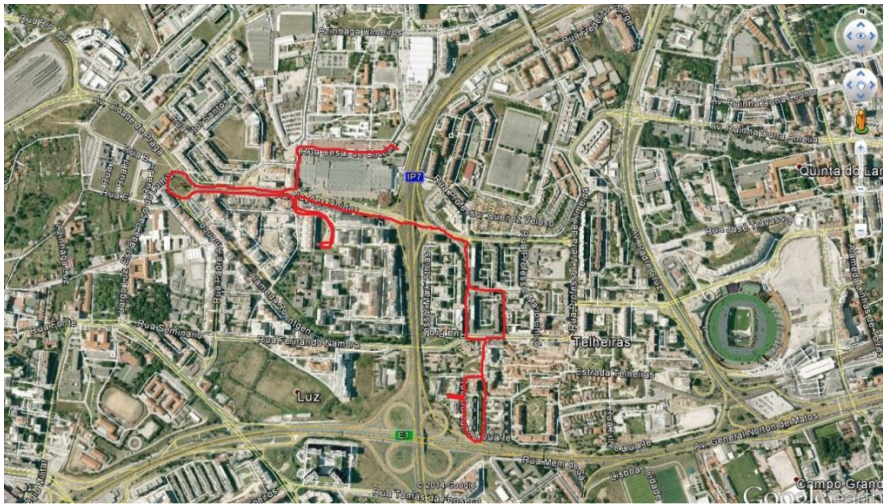


Figura 52 - Percurso efetuado para o caso de estudo.

Durante ambos os *drive-tests* foi sempre monitorizado no computador, através do TEMS, os valores de *RxLev*, *Received Signal Code Power (RSCP)* e *Reference Signal Received Power (RSRP)* bem como os débitos binários de cada tecnologia. Um exemplo pode ser visto na Figura 53.

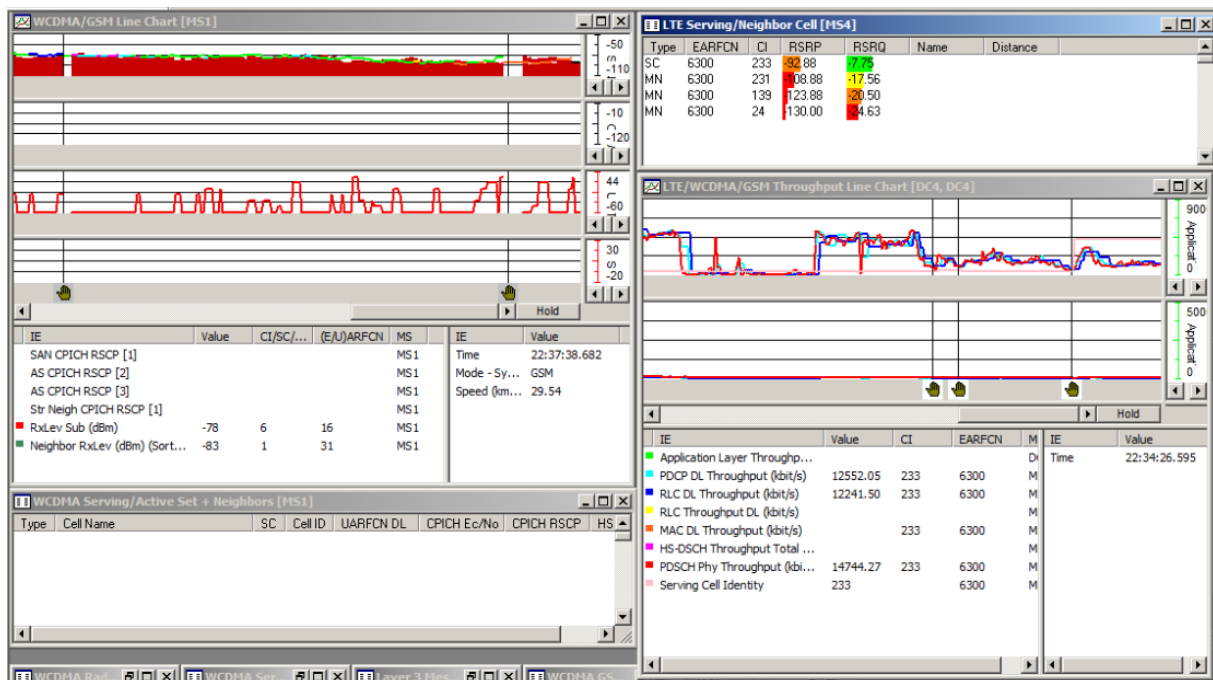


Figura 53 - Medições no TEMS durante *drive-test*.

## Anexo B

SINR [dB]	Débito binário médio medido [Mbps]	Expressão matemática [Mbps]	Erro relativo [%]
-1	0,17	1,54	827,28
0	0,57	1,83	221,30
1,5	0,33	2,32	599,47
2	1,77	2,50	41,31
2,5	0,37	2,69	619,36
3	1,64	2,89	76,52
3,5	1,22	3,09	154,13
4	1,99	3,31	65,83
4,5	2,49	3,53	41,94
5	2,43	3,75	54,29
5,5	2,74	3,99	45,62
6	3,53	4,23	19,82
6,5	3,94	4,47	13,65
7	4,31	4,72	9,70
7,5	5,44	4,98	8,46
8	5,86	5,24	10,67
8,5	6,24	5,50	11,85
9	6,58	5,77	12,28
9,5	7,65	6,04	21,10
10	8,00	6,31	21,05
10,5	8,39	6,59	21,47
11	8,78	6,87	21,73
11,5	9,12	7,15	21,55
12	9,38	7,44	20,73
12,5	9,44	7,72	18,23
13	9,61	8,01	16,69
13,5	9,36	8,30	11,37
14	9,72	8,59	11,62
14,5	10,09	8,88	11,96
15	10,04	9,18	8,58
15,5	10,52	9,47	10,02
16	11,30	9,77	13,58
16,5	11,00	10,06	8,55
17	11,38	10,36	9,00
17,5	11,54	10,66	7,65
18	11,51	10,95	4,82
18,5	12,28	11,25	8,38
19	12,28	11,55	5,91
19,5	10,85	11,85	9,23
20	12,94	12,15	6,09
20,5	12,53	12,45	0,64
21	12,19	12,75	4,61
21,5	13,07	13,05	0,12
22	15,76	13,35	15,27
22,5	12,62	13,66	8,25
23	11,09	13,96	25,80
23,5	14,34	14,26	0,58
24	14,37	14,56	1,33

## Anexo C

SINR [dB]	Débito binário médio medido [Mbps]	Expressão matemática [Mbps]	Erro relativo [%]
-8,5	0,69	0,71	1,88
-8	0,57	0,79	37,92
-7,5	0,89	0,88	1,54
-7	1,35	0,97	27,59
-6,5	0,89	1,08	21,74
-6	1,11	1,20	8,04
-5,5	1,15	1,33	15,40
-5	1,42	1,47	3,46
-4,5	1,51	1,63	8,07
-4	1,54	1,80	16,44
-3,5	1,71	1,98	15,61
-3	1,87	2,18	16,63
-2,5	1,91	2,39	25,20
-2	2,21	2,62	18,37
-1,5	2,35	2,87	22,16
-1	2,95	3,13	6,34
-0,5	2,49	3,41	37,18
0	3,79	3,71	1,98
0,5	3,26	4,03	23,77
1	3,90	4,37	12,05
1,5	4,91	4,72	3,99
2	4,33	5,09	17,46
2,5	5,42	5,48	1,10
3	5,38	5,88	9,27
3,5	7,35	6,30	14,28
4	7,24	6,73	6,99
4,5	7,79	7,18	7,85
5	8,41	7,64	9,13
5,5	8,53	8,12	4,80
6	8,84	8,60	2,68
6,5	9,10	9,10	0,03
7	10,11	9,61	4,96
7,5	11,03	10,13	8,12
8	10,80	10,66	1,31
8,5	11,90	11,19	5,91
9	12,16	11,74	3,50
9,5	12,95	12,29	5,06
10	13,72	12,85	6,38
10,5	13,84	13,41	3,11
11	14,79	13,98	5,50
11,5	15,48	14,55	5,98
12	15,24	15,13	0,70
12,5	16,76	15,72	6,23
13	16,96	16,30	3,89
13,5	17,44	16,89	3,15
14	18,06	17,48	3,22
14,5	18,98	18,08	4,74
15	19,35	18,67	3,51
15,5	19,21	19,27	0,32
16	21,06	19,87	5,62
16,5	21,66	20,48	5,48
17	23,18	21,08	9,08

17,5	24,61	21,69	11,89
18	25,64	22,29	13,04
18,5	24,51	22,90	6,58
19	24,63	23,51	4,57
19,5	25,64	24,12	5,94
20	26,13	24,73	5,37
20,5	25,89	25,34	2,11
21	25,69	25,95	1,01
21,5	27,04	26,56	1,75
22	28,00	27,18	2,95
22,5	30,15	27,79	7,84
23	29,06	28,40	2,27
23,5	31,16	29,02	6,86
24	31,15	29,63	4,87
24,5	32,14	30,25	5,88
25	35,66	30,86	13,47
25,5	35,21	31,48	10,61
26	36,54	32,09	12,16
26,5	38,22	32,71	14,42
27	38,22	33,32	12,82
27,5	39,18	33,94	13,38
28	38,25	34,55	9,65
28,5	45,66	35,17	22,98
29	33,45	35,79	6,99
29,5	22,67	36,40	60,60
30	28,20	37,02	31,25

## Anexo D

<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>RxLev</b>
38.769493	-9.11389	-54
38.769493	-9.11389	-53
38.769493	-9.11389	-53
38.769493	-9.11389	-54
38.769493	-9.11389	-55
38.769493	-9.11389	-54
38.769493	-9.11389	-55
38.769493	-9.11389	-55
38.769493	-9.11389	-55
38.769493	-9.11389	-54
38.769493	-9.11389	-54
38.769493	-9.11389	-53
38.769493	-9.11389	-54
38.769493	-9.11389	-57
38.769493	-9.11389	-57
38.769493	-9.11389	-57
38.769493	-9.11389	-56
38.769493	-9.11389	-57
38.769493	-9.11389	-58
38.769493	-9.11389	-58
38.769493	-9.11389	-60
38.769493	-9.11389	-55
38.769493	-9.11389	-53
38.769493	-9.11389	-52
38.769493	-9.11389	-52
38.769493	-9.11389	-52
38.769493	-9.11389	-53
38.769493	-9.11389	-53
38.769493	-9.11389	-52
38.769493	-9.11389	-52