



ISEL – INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

ADEETC – ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA DE ELETRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES E DE
COMPUTADORES

MEET – MESTRADO EM ENGENHARIA ELETRÓNICA E TELECOMUNICAÇÕES

DISSERTAÇÃO

Desenvolvimento de Modelos de Capacidade para Redes Móveis 3G e 4G Usando Dados de Desempenho Reais

DIOGO SANTOS RIBEIRO PARRACHO

(Licenciado em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e de
Computadores)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e
Telecomunicações na área de especialização em Telecomunicações

Orientador: Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Co-orientação: Doutora Iola Maria Silvério Pinto

Mestre David Eduardo Correia Duarte

Presidente: Doutor António João Nunes Serrador

Júri: Doutor Pedro Manuel de Almeida Carvalho Vieira

Doutor António José Castelo Branco Rodrigues

Dezembro de 2018

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Pedro Vieira e Professora Doutora Iola Pinto, pela disponibilidade demonstrada ao longo do desenvolvimento da dissertação, tendo sido um apoio fundamental para a realização da mesma e na tomada de decisões .

À Celfinet pelo apoio, informação e dados disponibilizados, essenciais para o desenvolvimento dos dois modelos originados no âmbito desta dissertação, a referir o Eng. David Duarte que foi parte importante, principalmente, no modelo de capacidade de *Quarta Geração* (4G).

Agradeço à minha namorada Alexandra Galvão Mourato, por toda a força, apoio e carinho, que foram cruciais, para mim, ao longo desta caminhada. Agradeço, igualmente, aos meus colegas do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa mais importantes, nomeadamente, Ângelo Fernandes, Francisco Conceição, João Henriques e Miguel Santos pela amizade, apoio e motivação demonstrada, foram parte importante para conseguir concluir o curso.

Finalmente, gostaria de agradecer à minha família, especialmente aos meus pais e irmã por todo o apoio, permitindo-me chegar cada vez mais longe.

Resumo

A utilização de redes móveis é cada vez mais intensa e com exigências maiores, por parte dos utilizadores, o que exige uma gestão de recursos da rede mais eficiente, juntamente com modelos de capacidade realistas. O aumento da população nas grandes cidades força os operadores a aumentar a densidade das células para conseguir servir os utilizadores com bons níveis de Qualidade de Serviço (*Quality of Service* (QoS)), o que implica um maior investimento, por parte dos operadores, nos sistemas de telecomunicações. Assim, considera-se pertinente o desenvolvimento de estudos que viabilizem a obtenção de planos estratégicos sobre otimização dos sistemas ou, pelo menos, um conhecimento mais pormenorizado dos mesmos, ao nível da capacidade. Tais estudos suportam a tomada de decisão no que respeita à configuração das redes, compatível com a concretização de objetivos de poupança energética e de possíveis limites de capacidade, de forma a permitir, aos operadores, investimentos mais assertivos e de menor risco. O trabalho desenvolvido nesta dissertação visa propor modelos de capacidade para estações base *Terceira Geração* (3G) e 4G, numa tentativa de modelo unificado multi-tecnologia. A investigação surgiu no âmbito de uma rede real, permitindo verificar o efeito da variação do tráfego, voz e dados, na potência transmitida de uma estação base, bem como na utilização dos recursos rádio, sendo estes os pontos de partida para os modelos.

O objetivo, para o modelo de capacidade 3G, é apresentar uma plataforma multi-serviços baseada em curvas de admissão, dependendo de algumas características das células, que são calculadas com base em medidas reais. O modelo considera as curvas de admissão baseadas no modelo Multidimensional Erlang-B, que define o limite máximo de utilização de recursos para um determinado QoS, permitindo gerir o tráfego entre vários serviços. O método proposto assume diferentes restrições específicas para cada ambiente de tráfego, tendo por base o desempenho da rede. Para estimar as características da célula, para os serviços de voz e *Packet Switched* (PS) *Release 99* (R99), é proposto um método, baseado no modelo de Regressão Linear Múltipla (RLM) que depende de *Key Performance Indicators* (KPI)s coletados a partir de uma rede móvel real. Para o serviço *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA), é definida uma abordagem diferente, pois há um tempo bem definido para transmitir dados (*Transmission Time Interval* (TTI)) juntamente com outros parâmetros importantes, como o *Channel Quality Indicator* (CQI) e a *Block Error Rate* (BLER), que devem ser considerados.

Relativamente ao modelo de capacidade 4G, o objetivo é apresentar uma plataforma de capacidade baseada, igualmente, em medições reais. A essência do método proposto é a implementação de um modelo de RLM, baseado em condições de propagação, qualidade de canal e atrasos para uma célula específica. São fornecidas informações sobre as possíveis limitações de recursos e algumas sugestões de melhorias do sistema, de forma a eliminar essas limitações. Esta abordagem gera o débito máximo

da célula, em *busy hour*, tendo em conta condições realistas.

De modo a validar os resultados dos modelos RLM, foram utilizadas métricas como a correlação de Pearson, *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) e *Root Mean Square Error* (RMSE). Para o modelo de capacidade 3G, para duas células, obtiveram-se valores do R^2 ajustado superiores a 84,52%, de MAPE inferiores a 0,91% e do coeficiente de correlação superiores a 81,43%. Também se conseguiu uma redução da potência transmitida da célula, superior a 20% face à potência máxima da célula. No modelo de capacidade 4G foi possível detetar problemas de capacidade em nove células, numa análise de 89 no total. Nos modelos RLM aplicados obtiveram-se valores do R^2 ajustado superiores a 92,8%, de MAPE inferiores a 10,25% e do coeficiente de correlação de 96,36%.

Palavras-chave: Comunicações Móveis, Rede de Acesso Rádio, Capacidade, Multi serviço, Tráfego.

Abstract

The mobile networks utilization is increasingly high and with greater demands, by users, which implies a better efficient resource network management coupled with a realistic capacity model. Increased population in large urban cities forces operators to increase cell density to serve users with good QoS levels, which implies a greater investment, by the operators, in telecommunication systems. Therefore, it is considered relevant to develop studies that make it possible to obtain strategic plans on system optimization or, at least, a more detailed knowledge of it, at a capacity level. These studies support decision making with regard to the networks configuration compatible with the energy saving achievement targets and possible capacity limits, in order to allow operators to make more assertive and less risky investments. In this dissertation, the developed work aims to propose capacity models for 3G and 4G base stations, in a multi-technology unified model attempt. The research was carried out within a real network, allowing to verify the effect of the voice and data traffic variation on the base station transmitted power, as well as the use of radio resources, which are the models starting points.

For 3G capacity model, the objective is to present a multi-service platform based on admission curves, depending on some cell characteristics, which are calculated based on real measurements. The model considers admission curves based on the Multidimensional Erlang-B model, which defines the maximum limit of resource utilization for a given QoS, and will manage traffic between several services. The proposed method takes different specific constraints for each traffic environment based on network performance. To estimate the cell characteristics, for Voice and Packet Switched (PS) Release 99 (R99) services, a method is proposed, based on the Multiple Linear Regression model and dependent on Key Performance Indicators (KPI) taken from a live mobile network. For High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) service, a different approach is set since there is a well defined time to transmit data (TTI) along with other important features, like CQI and BLER, to be considered.

Regarding the 4G capacity model, the objective is to present a capacity platform based also on real measurements. The core of the proposed method is the deployment of a *Multiple Linear Regression* (MLR) model, based on propagation conditions, channel quality and delays for a specific cell. Information about how to locate the resource bottleneck and the related handling suggestions are provided. This approach outputs the maximum cell throughput at the busy hour under realistic conditions. The method was developed using real data extracted from a live mobile network.

In order to proceed with validation, metrics such as the Pearson correlation, MAPE and RMSE were used. For the 3G capacity model, for two cells, values of adjusted R^2 higher than 84,52%, MAPE lower than 0,91% and correlation coefficient higher than 81,43% were obtained. A reduction

in cell transmitted power was also achieved, over 20% against the cell maximum power. In the 4G capacity model it was possible to detect capacity problems in nine cells, in 89 total analysed cells. In the applied MLR models, values of adjusted R^2 higher than 92,8%, MAPE lower than 10,25% and correlation coefficient higher than 96,36% were obtained.

Keywords: Mobile Communications, Radio Access Networks, Capacity, Multiservice Traffic.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
<i>Abstract</i>	v
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Acrónimos	xv
Lista de Símbolos	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	4
1.3 Estrutura do documento	4
1.4 Publicações	4
2 Estado da Arte	7
2.1 <i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	8
2.1.1 Arquitetura	9
2.1.2 Interface Rádio	13
2.1.3 Estrutura de canais UMTS	13
2.1.4 <i>Spreading Factor</i>	17
2.1.5 Capacidade	19
2.1.6 <i>High Speed Downlink Packet Access</i>	20
2.2 <i>Long Term Evolution</i>	22
2.2.1 Arquitetura	22
2.2.2 Técnicas de Acesso Múltiplo ao Meio	25
2.2.3 Portadores (Bearers) e Sessões EPS	26
2.2.4 Classes de Qualidade de Serviço	28

2.2.5	Capacidade	29
3	Metodologia	33
3.1	<i>Key Performance Indicators</i>	34
3.2	Análise Descritiva dos Dados	35
3.3	<i>Machine Learning</i>	35
3.3.1	<i>Headroom</i>	36
3.3.2	Modelo de Regressão Linear Múltipla	36
3.3.3	Diagnóstico e Análise do Modelo	38
3.3.4	Validação do Modelo e Indicadores de Desempenho	39
3.3.5	Regressão <i>Stepwise</i>	41
3.3.6	Distribuições de probabilidade	42
4	Modelo de Capacidade 3G	45
4.1	Introdução	46
4.2	Modelo Multidimensional Erlang B	46
4.3	Implementação do Algoritmo	49
4.3.1	Introdução	49
4.3.2	Caracterização do número de utilizadores para Voz e PS R99	50
4.3.3	Caracterização do número de utilizadores para HSDPA	53
4.3.4	Configuração da Curva de Admissão	57
4.3.5	Determinação do tráfego recolhido estatisticamente	59
5	Modelo de Capacidade 4G	61
5.1	Introdução	62
5.2	Primeiro Método: Determinação do número máximo de utilizadores	62
5.2.1	Primeira abordagem	63
5.2.2	Segunda abordagem	65
5.3	Segundo Método: Capacidade máxima de tráfego	65
5.3.1	Monitorização de recursos da célula	66
5.3.2	Estimativa do ritmo de transmissão máximo da célula	67
6	Análise e validação de resultados	69
6.1	Introdução	70
6.2	Modelo de capacidade 3G	70
6.2.1	Célula A	70
6.2.2	Célula B	80
6.3	Modelo de capacidade 4G	86
6.3.1	Detecção de células com problemas de capacidade	86
6.3.2	Estimativa da capacidade da célula pelo modelo RLM	87

7 Conclusões	91
7.1 Síntese	92
7.2 Trabalho Futuro	93
A Tabelas 3GPP para cálculo do débito máximo da célula	99
B Descrição dos KPIs	103
C Resultados do primeiro método do modelo de capacidade 4G	107
C.1 Primeira abordagem	107
C.2 Segunda abordagem	111

Lista de Figuras

1.1	Crescimento de subscrições nas redes móveis.[1].	2
1.2	Crescimento do tráfego de voz e dados nas redes móveis.[2].	3
2.1	Arquitetura da rede UMTS. [5].	10
2.2	Arquitetura da rede UMTS na <i>Release</i> 5. [7].	12
2.3	Arquitetura de protocolos WCDMA. [8].	13
2.4	Tipos de canais na UTRAN. [5].	13
2.5	Mapeamento dos canais UMTS. Adaptado de [9].	17
2.6	Fases do processo de <i>spreading</i>	18
2.7	Fases do processo de <i>spreading</i>	18
2.8	<i>Spreading Factor</i> usado em HSDPA.	20
2.9	Diferenças entre arquitetura 3G e 4G. [19].	23
2.10	Arquitetura da rede LTE. Adaptado de [20].	24
2.11	Técnicas de múltiplo de acesso usadas em LTE. [19].	25
2.12	<i>Physical Resource Block</i> . Adaptado de [21].	26
2.13	Visão geral de portador/sessão <i>Evolved Packet System</i> (EPS).	27
2.14	Constelações de símbolos em quadratura e fase.	30
3.1	Reta de regressão linear.	37
4.1	Diagrama de estados de Markov para dois serviços. [39].	47
4.2	<i>Slots</i> de potência dos serviços e canais de potência. Adaptado de [38].	49
4.3	Utilização dos serviços de Voz e dados PS R99.	51
4.4	Mapeamento da categoria dos UE para as tabelas de CQIs. [42].	55
4.5	Mapeamento da categoria dos UE para as tabelas de CQIs. [42].	56
5.1	Porcentagem de utilização dos vários serviços LTE.	64
6.1	Gráficos para validação do modelo RLM.	71
6.2	Potência de canais dedicados medida vs estimada.	72
6.3	Varição da Curva de Admissão com a Probabilidade de Bloqueio.	74
6.4	Varição da Curva de Admissão com o R_{target}	75
6.5	Varição da Curva de Admissão com reserva de <i>slots</i> para <i>handovers</i>	76
6.6	Região de Admissão para $R_{target} = 671,8$ kbps.	77

6.7	Região de Admissão para $R_{target} = 826,3$ kbps.	78
6.8	Região de Admissão para $R_{target} = 826,3$ kbps.	79
6.9	Gráficos para validação do modelo RLM.	81
6.10	Potência de canais dedicados medida vs estimada.	83
6.11	Região de Admissão para $R_{target} = 983,4$ kbps.	84
6.12	Região de Admissão para $R_{target} = 511,6$ kbps.	85
6.13	Gráficos para validação do modelo RLM.	88
6.14	Capacidade máxima da célula B.	88
6.15	Gráficos para validação do modelo RLM.	89
6.16	Capacidade máxima da célula G.	90
A.1	Valor do TBS mapeado dos Índices de TBS (até 26A) com o N° PRBs.	100
A.2	Valor do TBS mapeado dos Índices de TBS (restantes) com o N° PRBs.	101
C.1	Valores Medidos vs Previstos da Utilização de PRBs.	107
C.2	Resíduos vs Valores Estimados.	108
C.3	Normal QQ-Plot.	109
C.4	Valores Medidos vs Previstos dos valores máximos de utilizadores ativos.	111
C.5	Resíduos vs Valores Estimados.	112
C.6	Normal QQ-Plot.	113

Lista de Tabelas

2.1	<i>Channel Elements</i> por serviço.	19
2.2	Definição das categorias dos UE, para HSDPA. [12].	21
2.3	Parâmetros de QoS normalizados. [23].	29
2.4	Características da largura de banda no LTE.	30
2.5	<i>Throughput</i> de <i>Downlink</i> (DL) para LTE, em Mbps, relativo a cada modulação.	31
2.6	Características da largura de banda no LTE. Adaptado de [26].	32
2.7	Cálculo do débito máximo a partir dos MCSs.	32
4.1	Exemplo para encontrar mínimo múltiplo comum para 3 serviços.	58
4.2	Tráfego de voz das estatísticas	59
4.3	Tráfego de PS R99 das estatísticas	60
4.4	Tráfego de HSDPA das estatísticas	60
5.1	Variáveis independentes selecionadas para o modelo RLM.	68
6.1	Modelo RLM com as <i>features</i> selecionadas.	71
6.2	Modelo RLM com os R_{MAC-d} de Voz e PS R99.	72
6.3	Sumário das características dos serviços.	73
6.4	Sumário das estatísticas referentes à célula A.	77
6.5	Sumário dos resultados referentes à célula A.	80
6.6	Modelo RLM com as <i>features</i> selecionadas.	81
6.7	Modelo RLM com os R_{MAC-d} de Voz e PS R99.	82
6.8	Sumário das características dos serviços de voz e PS R99.	82
6.9	Sumário das estatísticas referentes à célula B.	83
6.10	Sumário das características do serviço HSDPA.	84
6.11	Sumário dos resultados referentes à célula B.	85
6.12	Análise das <i>features</i> selecionadas na rede.	86
6.13	Células com problemas no <i>Downlink</i>	87
6.14	Resultados para as células com problemas no <i>Downlink</i>	90
A.1	Mapeamento entre índices de MCS e TBS.	99
C.1	Resultados estatísticos do modelo RLM.	108
C.2	Resultados da estimativa do número máximo de utilizadores.	110

C.3	Resultados da estimativa do número máximo de utilizadores, para as restantes células.	110
C.4	Resultados estatísticos do modelo RLM.	112
C.5	Resultados da estimativa do número máximo de utilizadores.	113

Acrónimos

2G <i>Segunda Geração</i>	CM <i>Configuration Management</i>
3G <i>Terceira Geração</i>	CN <i>Core Network</i>
3GPP <i>Third Generation Partnership Project</i>	CPCH <i>Common Packet Channel</i>
4G <i>Quarta Geração</i>	CPICH <i>Common Pilot Channel</i>
AC <i>Alternating Current</i>	CPU <i>Central Processing Unit</i>
ACF <i>Função de Autocorrelação</i>	CQI <i>Channel Quality Indicator</i>
ACK <i>Acknowledgement</i>	CC <i>Channelization Code</i>
AICH <i>Acquisition Indicator Channel</i>	CS <i>Circuit Switched</i>
AMR <i>Adaptive Multi-Rate</i>	CSCF <i>Call Session Control Function</i>
APN <i>Access Point Name</i>	CSICH <i>CPCH Status Indication Channel</i>
AUC <i>Authentication Center</i>	CTCH <i>Common Traffic Channel</i>
ATM <i>Asynchronous Transfer Mode</i>	DCCH <i>Dedicated Control Channel</i>
BCCH <i>Broadcast Control Channel</i>	DCH <i>Dedicated Channel</i>
BCH <i>Broadcast Channel</i>	DL <i>Downlink</i>
BLER <i>Block Error Rate</i>	DPCCH <i>Dedicated Physical Control Channel</i>
BSC <i>Base Station Controller</i>	DPDCH <i>Dedicated Physical Data Channel</i>
CCCH <i>Common Control Channel</i>	DRB <i>Data Radio Bearer</i>
CCH <i>Control Channel</i>	DSCH <i>Downlink Shared Channel</i>
CD/CA-ICH <i>Collision Detection/Channel Assignment Indicator Channel</i>	DSSS <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
CDF <i>Cumulative Distribution Function</i>	DTCH <i>Dedicated Traffic Channel</i>
CE <i>Channel Element</i>	E-AGCH <i>Enhanced Absolute Grant Channel</i>
	E-DCH <i>Enhanced Dedicated Channel</i>

E-DPCCH <i>Enhanced Dedicated Physical Control Channel</i>	HSCSD <i>High Speed Circuit Switched Data Service</i>
E-DPDCH <i>Enhanced Dedicated Physical Data Channel</i>	HSDPA <i>High Speed Downlink Packet Access</i>
E-HICH <i>Enhanced Hybrid Indicator Channel</i>	HS-DPCCH <i>High Speed Dedicated Physical Control Channel</i>
EIR <i>Equipment Identity Register</i>	HS-DPDCH <i>High Speed Dedicated Physical Data Channel</i>
EPC <i>Evolved Packet Core</i>	HS-DSCH <i>High Speed Downlink Shared Channel</i>
EPS <i>Evolved Packet System</i>	HSPA <i>High Speed Packet Access</i>
eNB <i>Evolved Node B</i>	HS-PDSCH <i>High Speed Physical Downlink Shared Channel</i>
E-RAB <i>EPS Radio Access Bearer</i>	HSS <i>Home Subscriber Server</i>
E-RGCH <i>Enhanced Relative Grant Channel</i>	HS-SCCH <i>High Speed Shared Control Channel</i>
ETSI <i>European Telecommunications Standards Institute</i>	HSUPA <i>High Speed Uplink Packet Access</i>
E-UTRAN <i>Evolved UTRAN</i>	HWN <i>Heterogeneous Wireless Network</i>
FACH <i>Forward Access Channel</i>	IA <i>Inteligência Artificial</i>
FCCH <i>Frequency Correction Channel</i>	ICNC <i>International Conference on Computing, Networking and Communication</i>
FDD <i>Frequency Division Duplex</i>	ID <i>Identification Number</i>
FDMA <i>Frequency Division Multiple Access</i>	IMT-2000 <i>International Mobile Telecommunications 2000</i>
FTP <i>File Transfer Protocol</i>	IMS <i>IP Multimedia Subsystem</i>
GBR <i>Guaranteed Bit Rate</i>	IP <i>Internet Protocol</i>
GGSN <i>Gateway GPRS Support Node</i>	ITU <i>International Telecommunication Union</i>
GMSC <i>Gateway MSC</i>	KPI <i>Key Performance Indicators</i>
GTP <i>GPRS Tunnelling Protocol</i>	LB <i>Largura de Banda</i>
GPRS <i>General Packet Radio Services</i>	LCM <i>Least Common Multiple</i>
GSM <i>Global System for Mobile Communications</i>	LTE <i>Long Term Evolution</i>
HARQ <i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>	MAC <i>Medium Access Control</i>
HLR <i>Home Location Register</i>	MAPE <i>Mean Absolute Percentage Error</i>
HS <i>High Speed</i>	

MCS <i>Modulation and Coding Scheme</i>	PCRF <i>Policy Control and Charging Rules Function</i>
MGCF <i>MGW Control Function</i>	PDN <i>Packet Data Network</i>
MGW <i>Media Gateway</i>	P-GW <i>PDN Gateway</i>
ME <i>Mobile Equipment</i>	PDSCH <i>Physical Downlink Shared Channel</i>
MIMO <i>Multiple-Input Multiple-Output</i>	PICH <i>Page Indicator Channel</i>
ML <i>Machine Learning</i>	PLMN <i>Public Land Mobile Network</i>
MLR <i>Multiple Linear Regression</i>	PM <i>Performance Management</i>
MME <i>Mobility Management Entity</i>	PRACH <i>Physical Random Access Channel</i>
MRF <i>Media Resource Function</i>	PS <i>Packet Switched</i>
MSC <i>Mobile Switching Center</i>	PSTN <i>Public Switched Telephone Network</i>
NA <i>Not Available</i>	PRB <i>Physical Resource Block</i>
NACK <i>Negative Acknowledgement</i>	QAM <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
NaN <i>Not a Number</i>	QCI <i>QoS Class Identifier</i>
NIL <i>Not In List</i>	QoE <i>Quality of Experience</i>
NSS <i>Network Switching System</i>	QoS <i>Quality of Service</i>
OFDM <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	QPSK <i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
OFDMA <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>	R99 <i>Release 99</i>
OMC <i>Operations and Maintenance Center</i>	RAB <i>Radio Access Bearer</i>
OMS <i>Operations and Maintenance Subsystem</i>	RAN <i>Radio Access Network</i>
OVSF <i>Orthogonal Variable Spreading Factor</i>	RACH <i>Random Access Channel</i>
PACF <i>Função de Autocorrelação Parcial</i>	RAT <i>Radio Access Technology</i>
P-CCPCH <i>Primary Common Control Physical Channels</i>	PRB <i>Physical Resource Block</i>
PCCH <i>Paging Control Channel</i>	RE <i>Resource Element</i>
PCH <i>Paging Channel</i>	RF <i>Radio Frequência</i>
PCM <i>Pulse Code Modulation</i>	RLC <i>Radio Link Control</i>
PCPCH <i>Physical Common Packet Channel</i>	RLM <i>Regressão Linear Múltipla</i>
	RMSE <i>Root Mean Square Error</i>
	RNC <i>Radio Network Controller</i>

RNS <i>Radio Network Subsystems</i>	TCH <i>Traffic Channel</i>
RRC <i>Radio Resource Control</i>	TDD <i>Time Division Duplex</i>
SAE <i>System Architecture Evolution</i>	TDMA <i>Time Division Multiple Access</i>
SC <i>Scrambling Codes</i>	TEID <i>Tunnel Endpoint Identifier</i>
SCH <i>Synchronization Channel</i>	TFCI <i>Transport Format Combination Indicator</i>
SCCH <i>Shared Control Channel</i>	TIC <i>Tecnologias de Informação e Comunicação</i>
S-CCPCH <i>Secondary Common Control Physical Channels</i>	TTI <i>Transmission Time Interval</i>
SC-FDMA <i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>	UE <i>User Equipment</i>
SDCCH <i>Stand-alone Dedicated Control Channel</i>	UL <i>Uplink</i>
SDH <i>Synchronous Digital Hierarchy</i>	UMTS <i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
SF <i>Spreading Factor</i>	URSI <i>União Rádio Científica Internacional</i>
SGSN <i>Serving GPRS Support Node</i>	USCH <i>Uplink Shared Channel</i>
S-GW <i>Serving Gateway</i>	USIM <i>UMTS Subscriber Identity Module</i>
SIM <i>Subscriber Identity Module</i>	UTRA <i>UMTS Terrestrial Radio Access</i>
SINR <i>Signal to Interference and Noise Ratio</i>	UTRAN <i>UMTS Terrestrial RAN</i>
SIP <i>Session Initiation Protocol</i>	VLR <i>Visitor Location Register</i>
SISO <i>Single-Input Single-Output</i>	VoIP <i>Voice over IP</i>
SLA <i>Service Level Agreement</i>	VoLTE <i>Voice over LTE</i>
SMS <i>Short Message Service</i>	WPMC <i>Wireless Personal Multimedia Communications</i>
SSE <i>Sum of Squared Error</i>	WCDMA <i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
TBS <i>Transport Block Size</i>	

Lista de Símbolos

β_i	Coefficientes de Regressão
δ_j	Probabilidade de bloqueio de QoS do serviço j
η	<i>Activity factor</i>
λ	Ritmo total de chamadas na célula
λ_j	Ritmo total de chamadas no serviço j
$\lambda_{[dados]}$	Tráfego do serviço PS R99 dos KPI
$\lambda_{n,j}$	Ritmo de chamadas de novos utilizadores do serviço j
$\lambda_{h,j}$	Ritmo de chamadas de <i>handovers</i> do serviço j
$\mu_{[dados]}$	Capacidade do canal do serviço PS R99
μ_j	Ritmo total de saída de utilizadores do serviço j
$\mu_{n,j}$	Ritmo de saída de utilizadores do serviço j
$\mu_{h,j}$	Ritmo de saída de <i>handovers</i> do serviço j
A	Tráfego total oferecido na célula
$ActiveUE_{DL}$	Número médio de utilizadores Activos em <i>Downlink</i> (KPI)
$ActiveUE_{Max}$	Número máximo de utilizadores Activos em <i>Downlink</i> (KPI)
A_j	Tráfego oferecido pelo serviço j
$A_{[Voz]}$	Tráfego de Voz
$A_{[HSDPA]}$	Tráfego de HSDPA
$A_{[PSR99]}$	Tráfego de PS R99
$BLER$	Valor do BLER
d	<i>duty cycle</i>
$EnergyPerBit_{Voz}$	Características da célula para o serviço de voz
$EnergyPerBit_{PSR99}$	Características da célula para o serviço PS R99
$gran$	Granularidade das amostras
I_{TBS}	Índice de TBS mapeado do índice MCS
I_{TTI}	Intervalo entre os tempos de TTI
K	Capacidade máxima de uma célula
M_j	Unidades de capacidade ocupadas por utilizador que usa o serviço j .

n_j	Número de utilizadores no serviço j
\bar{n}_i	Número médio de utilizadores de voz no débito i
N_j	Número máximo de utilizadores no serviço j
N_{PRB}	Número de PRBs para uma dada LB
$N_{powerslots(Voz)}, N_{users(Voz)}$	Número máximo de <i>slots</i> / utilizadores do serviço de voz
$N_{powerslots(HSDPA)}, N_{users(HSDPA)}$	Número máximo de <i>slots</i> / utilizadores do serviço HSDPA
$N_{powerslots(PSR99)}, N_{users(PSR99)}$	Número máximo de <i>slots</i> / utilizadores do serviço PS R99
$P_{B,j}$	Probabilidade de bloqueio do serviço j
P_{CCH}	Potência dos canais de controlo
P_{DCH}	Potência de cada canal dedicado
$\bar{P}_{DSCH-TX}$	Características da célula para o serviço HSDPA
P_{HSDPA}	Potência de cada canal HSDPA
\bar{P}_{HSDPA}	Potência média utilizada pela célula para o serviço HSDPA
$PRB_{[Utilization]}$	Utilização de PRBs
$P_{TOTNonHS}$	Potência transmitida sem canais HSDPA da célula
P_{Total}	Potência máxima da célula
Q_j	Constante de normalização do serviço j
$R_{achievable}(MAC-hs)$	Débito binário máximo alcançável num TTI
<i>ratio</i>	Razão entre débito por utilizador HSDPA dos KPI e $R_{achievable}$
\bar{R}_{Bkgm}	Débito binário total do serviço <i>Background</i> com o débito m
\bar{R}_{Intm}	Débito binário total do serviço Interativo com o débito m
\bar{R}_{Intm}	Débito binário total do serviço <i>Streaming</i> com o débito m
$R_{MAC-d[Voz]}$	Débito binário do serviço de voz
$R_{MAC-d[PSR99]}$	Débito binário do serviço PS R99
R_{target}	Débito binário de QoS para serviço HSDPA
$T_{celula,total}$	Tempo total de espera na célula
$ThrpDL$	Débito binário da célula em <i>Downlink</i> teórico
$Thrp'_{DL}$	Débito binário da célula em <i>Downlink</i> medido
$ThrpDL_{UE}$	Débito binário médio por utilizador na célula
V_{TBS}	Valor do TBS
x_i	Variáveis independentes
y	Variável dependente medida

1

Introdução

1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura do documento	4
1.4	Publicações	4

Neste capítulo faz-se uma breve descrição do trabalho desenvolvido, referenciando os objetivos e a motivação que estiveram na sua origem, apresentando também a sua estrutura e as publicações que surgiram desta dissertação.

1.1 Motivação

A indústria de comunicações móveis tem tido, nos últimos anos, um crescimento intenso quer a nível do número de utilizadores (Figura 1.1), quer a nível de novos serviços e novas exigências para garantir um elevado nível de *Quality of Service* (QoS). É primordial que não ocorram falhas, nem latências elevadas na prestação dos serviços, uma vez que os utilizadores estão cada vez mais exigentes.

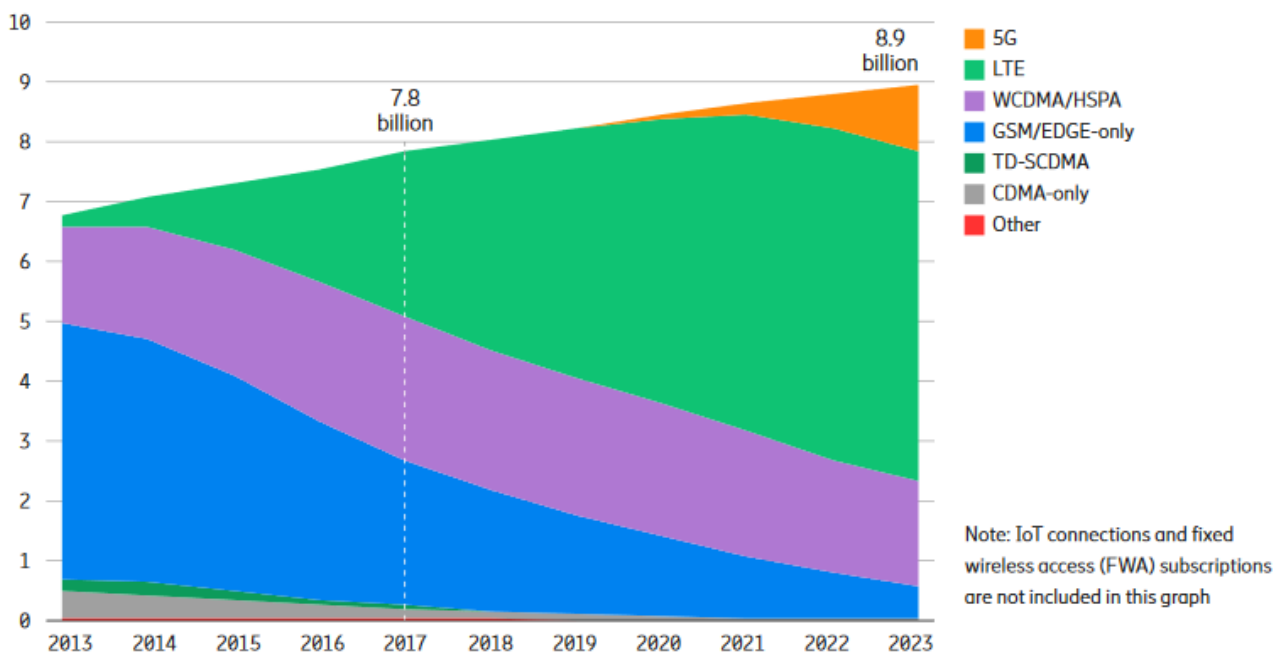


Figura 1.1: Crescimento de subscrições nas redes móveis.[1].

A prestação de serviços móveis a vários milhares de milhões de utilizadores, em todo o mundo, está associada a um custo de infraestruturas e consumo de energia. A evolução tecnológica do lado do consumidor, baseada numa enorme troca de dados, necessita de uma estrutura de rede altamente disponível, com recursos abundantes. A resposta a estes desafios é possível devido às novas e mais eficientes Radio Access Technologies (RATs), e devido à melhoria da eficiência da comunicação entre a *Radio Access Network* (RAN) e o *core* da rede.

Atualmente, a maioria dos operadores de comunicações móveis operam, simultaneamente, em diferentes RATs e diferentes faixas de frequência, levando ao conceito de *Heterogeneous Wireless Networks* (HWNs). Este facto, associado à necessidade de maior capacidade, de modo a satisfazer os utilizadores, ávidos por grandes volumes de dados (Figura 1.2), como acesso à Internet e a *streams* de vídeos, leva os operadores a planear a rede com uma densidade de estações base ainda maior, aumentando assim os custos.

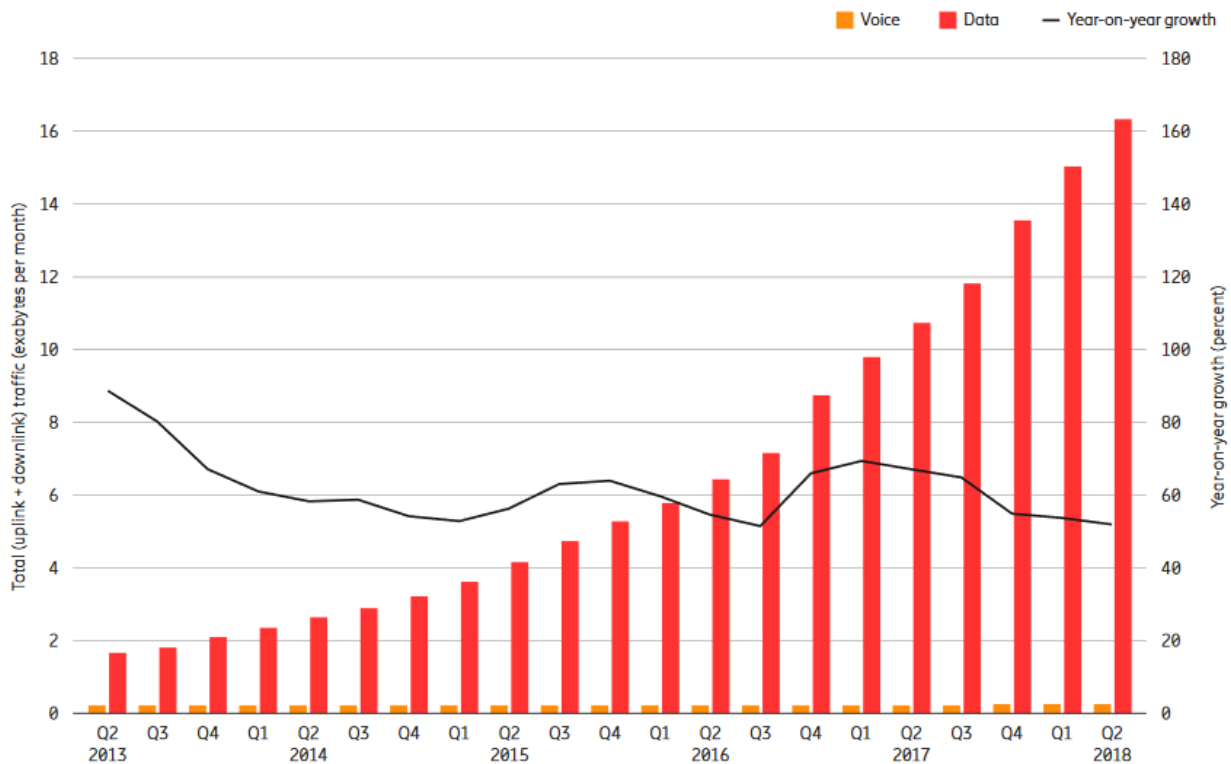


Figura 1.2: Crescimento do tráfego de voz e dados nas redes móveis.[2].

É essencial para um operador de comunicações móveis otimizar os recursos e infraestruturas existentes e tornar eficientes os investimentos para melhoria da rede.

O dimensionamento de capacidade é uma tarefa crítica na gestão das redes móveis. Nesse processo, o objetivo dos operadores é estimar os requisitos futuros a nível de tráfego e, conseqüentemente, estimar o investimento necessário nos recursos de forma a detetar limites de capacidade na rede, antecipadamente. Contudo, o crescimento do tráfego e as capacidades rádio não são facilmente previsíveis, o que faz com que os operadores estejam constantemente a rever as suas previsões de planeamento, para garantir bons níveis de QoS e *Quality of Experience* (QoE) aos utilizadores.

No dimensionamento de redes móveis, estimar a capacidade máxima da rede de acesso rádio (RAN) é um passo inicial. A capacidade da célula é definida como o requisito máximo de tráfego para satisfazer uma restrição de QoS. Quando a capacidade da célula é excedida, os níveis de QoS e QoE atingem valores inaceitáveis, principalmente para a elevada exigência dos utilizadores. Assim, uma estimativa precisa da capacidade da célula é necessária para garantir um QoS adequado com o menor investimento possível. Um método de estimativa robusto deve garantir que todos os requisitos de QoS sejam satisfeitos, simultaneamente [3].

O desempenho da taxa de transmissão de dados, em *Downlink* (DL), é frequentemente considerado como a métrica significativa que define a satisfação do utilizador final, relativamente ao desempenho da rede móvel, pois afeta diretamente a velocidade de *download* de dados para diferentes serviços, como *streaming* e navegação na Web. Para além disso, os utilizadores exigem que a resposta da rede aos seus pedidos seja quase imediata, estando igualmente ligada à taxa de transmissão de dados, em DL, e às latências praticadas na rede. Pode-se dizer, partindo dessa perspectiva, que a melhoria do débito de DL é a principal prioridade das otimizações das redes móveis [4].

1.2 Objetivos

O trabalho desenvolvido nesta dissertação visa propor um modelo de capacidade para estações base de *Terceira Geração* (3G) e de *Quarta Geração* (4G) que correspondem nomeadamente às tecnologias *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) e *Long Term Evolution* (LTE), baseado em medidas estatísticas registadas por um operador real. Para tal, é necessário fazer uma caracterização das estações envolvidas, tanto ao nível da configuração como do perfil de tráfego gerado.

Serão analisadas diversas medidas estatísticas com o intuito de escolher as que irão integrar os modelos a desenvolver.

Os modelos serão desenvolvidos numa base de avaliação de capacidade célula a célula, uma vez que existem fortes variações a nível de tráfego e qualidade de propagação rádio, podendo comprometer a precisão do modelo. A capacidade da célula terá por base níveis de QoS que se pretende garantir para o utilizador.

Após a análise dos resultados, será possível identificar células que estejam com problemas de capacidade, bem como determinar a potência mínima necessária numa determinada célula para garantir o nível de QoS e absorver o tráfego real medido. Desta forma será possível diminuir a potência da célula e, conseqüentemente, poupar energia.

As medidas estatísticas são obtidas através de um operador real. O presente estudo é apresentado em parceria com a CELFINET, empresa portuguesa de consultoria em telecomunicações.

1.3 Estrutura do documento

A dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. No capítulo 1 realiza-se uma breve introdução sobre o âmbito em que se insere esta dissertação, a sua motivação, quais os seus objetivos principais e publicações associadas. No capítulo 2 apresentam-se as várias áreas de conhecimento e tecnologias consideradas no desenvolvimento do trabalho. No capítulo 3 descrevem-se as metodologias que foram base para os modelos, bem como as métricas para validação dos modelos estatísticos desenvolvidos. No capítulo 4 é descrita a metodologia utilizada para a realização do modelo de capacidade 3G. No capítulo 5 descreve-se o processo de desenvolvimento do modelo de capacidade 4G. O capítulo 6 apresenta os modelos desenvolvidos, bem como os resultados obtidos e sua validação. No capítulo 7 descrevem-se as principais conclusões, bem como algumas ideias para o desenvolvimento de um possível trabalho futuro. No final do documento são incluídos anexos que contêm informações mais específicas e detalhadas.

1.4 Publicações

Durante o desenvolvimento desta dissertação foram elaborados e submetidos três artigos científicos para uma conferência nacional (12.º Congresso do Comité Português da *União Rádio Científica Internacional* (URSI)) e duas internacionais (21.º simpósio internacional sobre *Wireless Personal Multimedia Communications* (WPIC) 2018 e o *Workshop em Computing, Networking and Communication*

(CNC) 2019, parte integrante da *International Conference on Computing, Networking and Communication (ICNC) 2019*).

- Parracho, D., Duarte, D., Vieira, P. e Pinto, I., “An Improved Capacity Model based on Radio Measurements for a 4G and beyond Wireless Network”, *Wireless Personal Multimedia Communications 2018 (WPMC 2018)*, Chiang Rai, Tailândia, 25 a 28 de novembro de 2018 (Apresentado).
- Parracho, D., Duarte, D. e Vieira, P. e Pinto, I., “Um Modelo Regressivo de Capacidade para Redes Móveis 4G Usando Dados de Desempenho Reais”, *12º Congresso do Comité Português da URSI*, Lisboa, Portugal, 14 de dezembro de 2018 (Apresentado);
- Parracho, D., Duarte, D., Vieira, P. e Pinto, I., “An Enhanced Capacity Model based on Network Measurements for a Multi-Service 3G System”, *Workshop on Computing, Networking and Communication 2019 (CNC 2019)*, Honolulu, Hawaii, 18 a 21 de fevereiro de 2019 (Aceite);

2

Estado da Arte

2.1	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	8
2.1.1	Arquitetura	9
2.1.2	Interface Rádio	13
2.1.3	Estrutura de canais UMTS	13
2.1.4	<i>Spreading Factor</i>	17
2.1.5	Capacidade	19
2.1.6	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>	20
2.2	<i>Long Term Evolution</i>	22
2.2.1	Arquitetura	22
2.2.2	Técnicas de Acesso Múltiplo ao Meio	25
2.2.3	Portadores (Bearers) e Sessões EPS	26
2.2.4	Classes de Qualidade de Serviço	28
2.2.5	Capacidade	29

Neste capítulo são apresentadas as várias áreas, quer no âmbito tecnológico como teórico, estudadas e consideradas relevantes no desenvolvimento do trabalho, as quais fornecem informação técnica e científica necessária para compreensão do mesmo. Foram estudados quer o funcionamento, quer a estrutura das tecnologias de comunicações móveis 3G e 4G a fim de conseguir definir modelos de capacidade para ambas. Para além disso, foram estudados modelos estatísticos, como o Regressão Linear Múltipla (RLM), e formas de medir e validar os modelos estatísticos aplicados no trabalho. É também dada uma visão geral da constante evolução tecnológica ao nível das comunicações móveis, por ser essencial à compreensão do trabalho realizado.

2.1 *Universal Mobile Telecommunications System*

Paralelamente à implementação e evolução generalizadas da *Segunda Geração* (2G) de sistemas de comunicação móvel durante os anos 90, a *International Telecommunication Union* (ITU) iniciou o processo de definição do padrão para sistemas móveis de 3G, referido como *International Mobile Telecommunications 2000* (IMT-2000). O UMTS é um membro chave da família global de sistemas de comunicação móvel 3G, tendo sido iniciado pelo *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) na Europa. Em 1998, o *Third Generation Partnership Project* (3GPP) foi formado por organizações de desenvolvimento de normas, de todas as regiões do mundo, para continuar o trabalho de especificação técnica para o UMTS. Desta forma, resolveu-se o problema de tentar manter, em paralelo, o desenvolvimento de especificações alinhadas em múltiplas regiões no mundo [5].

O UMTS é visto como o sucessor dos sistemas de comunicação móvel 2G, como o *Global System for Mobile Communications* (GSM) e de sistemas 2G evoluídos, como o *General Packet Radio Services* (GPRS). O 3G UMTS traz uma evolução e melhorias ao nível da capacidade, taxas de transmissão e novos serviços, relativamente ao sistema de 2G. Fornece acesso móvel global de alta velocidade para uma grande variedade de serviços, incluindo voz, acesso à Internet, videoconferência e aplicações gerais de multimédia (transmissão de imagens e vídeos). Cada serviço tem as suas próprias características de tráfego e requisitos específicos de QoS, a serem cumpridos pela rede. Por exemplo, atrasos *end-to-end*, *jitter*¹, perda de pacotes e taxas de bloqueio. Nas redes UMTS multi serviços, o objetivo principal é oferecer suporte à QoS necessária para vários serviços, a fim de oferecer uma boa QoE ao utilizador final nas aplicações de dados móveis, minimizando os custos da rede para obter uma utilização eficiente dos recursos. Ao contrário do 2G, que foi desenvolvido principalmente para transmissão de voz, o 3G foi desenvolvido para serviços de dados.

As principais melhorias dos sistemas 3G em comparação com 2G são:

- Débitos de transmissão de dados mais altos;
- Taxas de dados variáveis para permitir largura de banda sob requisitos;
- Suporte de taxas de dados assimétricas, em DL e *Uplink* (UL), para transferir tráfego comutado por pacotes. Por exemplo, navegação na web, *download* / *upload* de ficheiros;
- Provisionamento de QoS para várias aplicações e serviços. Por exemplo, taxas de erros e atrasos garantidos;

¹Jitter: variação estatística do atraso na entrega de dados numa rede, ou seja, pode ser definida como a medida de variação do atraso entre os pacotes sucessivos de dados.

- Suporte de diferenciação de QoS. Por exemplo, distinção entre serviços em tempo real sensíveis a atrasos e pacotes de dados em *best effort*;
- Maior eficiência espectral.

O UMTS começou por utilizar o espectro dos 1920 aos 1980 MHz, para UL, e 2110 aos 2170 MHz para DL, tendo canais de 5 MHz de largura de banda em torno de uma portadora de 2 GHz, com taxas até 2 Mbps para utilizadores com pouca mobilidade, e até 144 kbps em situações de elevada mobilidade. No entanto, foram adicionadas novas bandas pela ITU, como a dos 806 aos 960 MHz, 1710 aos 1885 MHz e 2500 aos 2690 MHz, [6]. O UMTS pode ainda ser implementado na banda do 2G.

A interface rádio do UMTS é baseada na tecnologia *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA), que utiliza o método *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS), para fornecer acesso múltiplo por divisão no código para atingir velocidades mais elevadas e suportar mais utilizadores, em comparação com a implementação do *Time Division Multiple Access* (TDMA) e *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), utilizados nas redes 2G [5]. No 3GPP, o WCDMA é denominado de *UMTS Terrestrial Radio Access* (UTRA) e tem dois modos de operação, nomeadamente, *UTRA-Frequency Division Duplex* (FDD) e *UTRA-Time Division Duplex* (TDD). No modo de operação FDD, as transmissões de dados em UL e DL são realizadas em bandas de frequência diferentes, enquanto que no modo de operação TDD, as transmissões são realizadas numa banda comum mas, em instantes de tempo diferentes. Na Europa, o modo de operação usado é o UTRA-FDD.

A *Release 99* (R99) foi a primeira versão das especificações da tecnologia 3G. Quando se constatou a necessidade de maiores taxas de dados surgiu o *High Speed Packet Access* (HSPA) como atualização do WCDMA. A introdução do HSPA foi realizada por etapas: a *Release 5* introduziu o *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) que permitiu uma maior taxa de transferência de dados variando entre 0,9 a 14,4 Mbit/s e a *Release 6* introduziu o *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA), que permitiu uma taxa de transferência de dados de 0,72 a 5,76 Mbit/s. De modo a enfrentar mais uma vez o avanço tecnológico o HSPA evoluiu para HSPA+ (*Release 7*), trazendo melhorias ao nível do atraso e capacidade, permitindo velocidades de transmissão de dados até 28 Mbps.

2.1.1 Arquitetura

Uma rede UMTS é composta por três principais grupos (ilustrados na Figura 2.1): *User Equipment* (UE) para interagir com o utilizador e a interface rádio, *UMTS Terrestrial RAN* (UTRAN) responsável pelas funcionalidades rádio e *Core Network* (CN) que serve de meio de comunicação com redes externas. As suas funcionalidades e interfaces lógicas que as interligam estão bem definidas e especificadas pelas normas do 3GPP.

Relativamente ao GSM, existem algumas alterações na arquitetura, ao nível do UE e UTRAN, as diferenças são ao nível protocolar, com a introdução de uma nova interface na UTRAN, enquanto que ao nível do CN não foram realizadas alterações, pelo que são compatíveis e, conseqüentemente, o GSM e UMTS partilham a CN, [5].

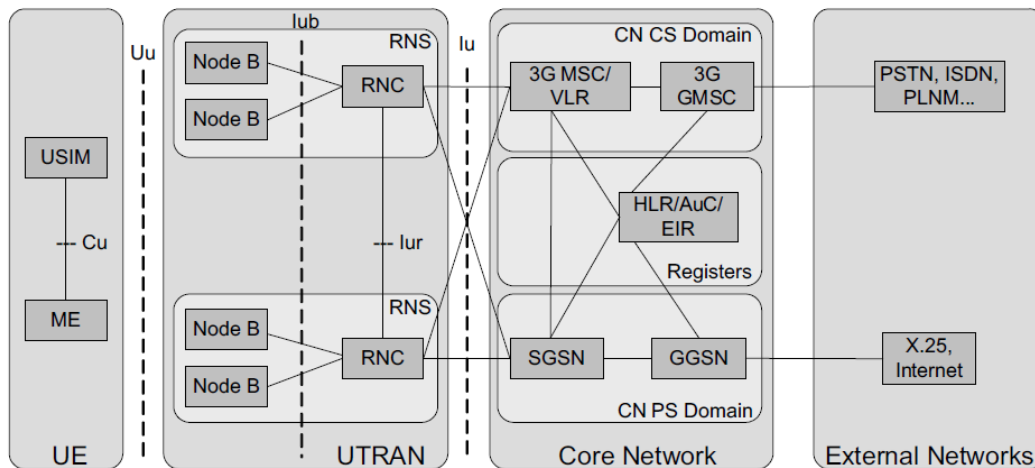


Figura 2.1: Arquitetura da rede UMTS. [5].

O UE é constituído por dois módulos, o *Mobile Equipment* (ME), que é o terminal rádio que manipula as comunicações na interface Uu (interface rádio), e o *UMTS Subscriber Identity Module* (USIM), que é um cartão inteligente que contém os dados confidenciais de cada utilizador, como a identidade, executa algoritmos de autenticação e armazena chaves de segurança. Como se pode verificar, pela Figura 2.1, o USIM e o ME comunicam entre si pela interface Cu interna e o UE acede à rede fixa através da interface rádio Uu, ao comunicar com as estações base, denominadas de *NodeB*.

A UTRAN, que estabelece conectividade entre o UE e a CN, contém um ou mais *Radio Network Subsystems* (RNS), cada um constituído por um *Radio Network Controller* (RNC) e vários *NodeB*, o RNC gere e controla os recursos rádio dos vários *NodeB* sob seu domínio, enquanto que o *NodeB* faz a conversão entre os diferentes protocolos entre as interfaces Uu e Iub, também gere e realiza escalonamento dos recursos rádio entre os vários UE e gere uma ou mais células. O RNC serve de comunicação entre os vários *NodeB* do seu domínio, bem como entre *NodeB* do domínio de RNC's que estejam ligados diretamente, pela interface Iur. Ao contrário do GSM, que para comunicação entre controladores adjacentes, tinha que recorrer à parte CN, foi uma alteração que serviu para melhorar a resposta do sistema aos utilizadores e evitar congestionamentos desnecessários, na CN .

A CN é o *backbone* do sistema UMTS, este interliga a rede de acesso rádio a outras redes externas, como a *Public Switched Telephone Network* (PSTN), a Internet ou outras redes de dados, como a *Asynchronous Transfer Mode* (ATM), *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH) ou X.25. A CN do UMTS evoluiu a partir das atuais redes 2G baseadas em GSM / GPRS, pelo que fornece compatibilidade retroativa e interoperabilidade entre GSM / GPRS e UMTS. Desta forma, permite que os operadores móveis GSM procedam diretamente para os sistemas UMTS ao substituir, simplesmente, as RAN, sem mudanças significativas na arquitetura da CN. A rede CN divide-se, principalmente entre o domínio de *Circuit Switched* (CS) e o *Packet Switched* (PS), uma vez que as redes externas e as tecnologias são diferentes.

Uma rede móvel é oficialmente designada como *Public Land Mobile Network* (PLMN). Uma rede UMTS pode ser composta por várias sub redes designadas PLMN, cada uma dessas sub redes contém todos os elementos necessários para uma rede UMTS, e portanto uma PLMN é suficiente para ter uma rede UMTS.

Os elementos funcionais no domínio CS são:

- *Mobile Switching Center* (MSC): Responsável pelo tratamento das chamadas de comutação de circuitos, ou seja, configuração e encaminhamento de chamadas e *Short Message Service* (SMS), bem como outros serviços, como chamadas em conferência e faxes, também realiza a gestão de mobilidade entre sistemas (*handovers*²).
 - *Visitor Location Register* (VLR): É uma base de dados que armazena cópias dos perfis de serviço e informações de posição dos assinantes que estão a ser servidos no momento, que serve de consulta ao MSC.
- *Gateway MSC* (GMSC): Oferece interfaces para várias redes externas (PLMN, PSTN);

Os elementos funcionais no domínio PS são:

- *Serving GPRS Support Node* (SGSN): É responsável por retransmitir pacotes da rede rádio para o *gateway* da CN. Além disso, também lida com gestão de mobilidade e sessão dos utilizadores.
- *Gateway GPRS Support Node* (GGSN): Serve como um *gateway* para as redes de comutação de pacotes externas.

Os elementos comuns aos dois domínios são:

- *Home Location Register* (HLR): Base de dados do operador móvel que inclui detalhes de assinantes, como o número associado, detalhes de cobrança, parâmetros do estado do dispositivo móvel, bastante útil caso um SMS não seja entregue. Estes dados estão acessíveis a todos os MSC e VLR;
- *Authentication Center* (AUC): Lida com as chaves de autenticação e criptografia para cada assinante registado nas bases de dados HLR e VLR
- *Equipment Identity Register* (EIR): Base de dados que armazena informações sobre a identidade do equipamento móvel e impede as chamadas de móveis dados como roubados, chamadas não autorizadas ou de estações base com defeito.

As interfaces utilizadas para comunicar entre elementos da rede são:

- *Cu*: Interface elétrica entre o cartão *Subscriber Identity Module* (SIM) e o ME;
- *Uu*: Interface rádio WCDMA que permite o UE aceder à parte fixa da rede;
- *Iu*: Faz a ligação da UTRAN à CN;
- *Iur*: Permite *soft handovers* entre RNC;
- *Iub*: Conecta o *NodeB* ao RNC.

De maneira a motivar a concorrência entre diferentes fabricantes, todas as interfaces são abertas e normalizadas.

A evolução do 3G também trouxe alterações ao nível da arquitetura, nomeadamente na CN (Figura 2.2). A *Release 4* incluiu, no domínio CS, o *Media Gateway* (MGW) ao dividir o MSC em servidor MSC e MGW, onde o servidor MSC assegura as funcionalidades de controlo, enquanto que os dados

²Handover: Processo que ocorre quando um dispositivo móvel é transferido de uma célula para outra sem perder a sua ligação. Assegura a mobilidade.

2.1.2 Interface Rádio

A interface rádio UTRAN está dividida em várias camadas protocolares, onde cada camada tem as suas funções bem definidas. Existem dois tipos de fluxos de dados, os de controlo e os dados do utilizador. O fluxo de controlo é responsável por transmitir dados de sinalização, enquanto que o fluxo de dados transmite os dados de utilizador. Existem três camadas na interface rádio: física, ligação (dividida entre *Medium Access Control (MAC)* e *Radio Link Control (RLC)*) e de rede. A Figura 2.3 ilustra a arquitetura de protocolos na interface rádio.

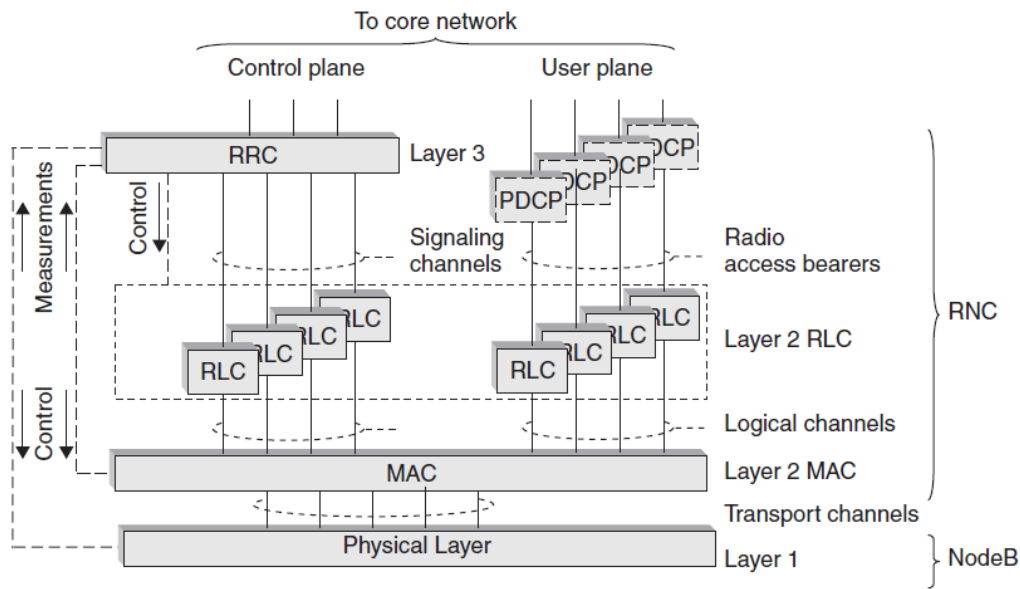


Figura 2.3: Arquitetura de protocolos WCDMA. [8].

2.1.3 Estrutura de canais UMTS

Na UTRAN, como já referido, o UMTS usa a técnica WCDMA como tecnologia de múltiplo acesso ao meio, contudo também usa técnicas de divisão no tempo com uma estrutura de *slots* e tramas, bem definidos, para fornecer a transmissão dos dados.

Quando um utilizador solicita estabelecer ligação com o *NodeB* para transmitir dados pela rede de acesso rádio, a UTRAN precisa de alocar recursos rádio e de transporte para essa ligação. As alocações de recursos são tratadas pela configuração de canais, em UMTS, existem três camadas de canais (físicos, transporte e lógicos), ilustrados na Figura 2.4.

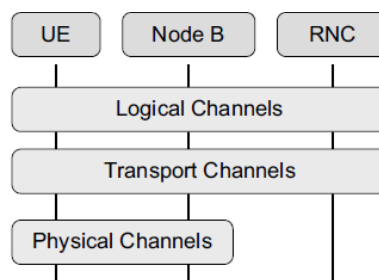


Figura 2.4: Tipos de canais na UTRAN. [5].

Na camada mais alta dos canais, a camada MAC fornece serviços de transmissão de dados para a camada RLC através dos canais lógicos. Um conjunto de tipos de canais lógicos é definido para diferentes tipos de serviços oferecidos pela camada MAC, onde cada tipo de canal lógico é definido pelo tipo de informação que se pretende transmitir. Na realidade, os canais lógicos tratam-se de diferentes tarefas lógicas que a rede e o terminal devem executar. Os canais de transporte realizam uma transferência de informação entre o UE e o domínio de acesso, onde definem como e com que características os dados são transferidos pela interface rádio. Através da qual, os canais de transporte são mapeados na camada física em diferentes canais físicos (Figura 2.5).

Canais Lógicos

Os canais lógicos estão divididos em duas categorias: controlo e tráfego.

- Canais Controlo

- **Broadcast Control Channel (BCCH)**: Canal de DL usado para difundir informações de controlo do sistema para os UE da célula.
- **Common Control Channel (CCCH)**: Canal de DL e UL usado para transferir informações de controlo comuns para ou de vários UE.
- **Dedicated Control Channel (DCCH)**: Canal de DL e UL usado para transferir informações de controlo específicas de e para cada UE.
- **Paging Control Channel (PCCH)**: Canal de DL usado para transmitir informações de *paging* e notificações aos UE da UTRAN e CN.
- **Shared Control Channel (SCCH)**: Canal de DL e UL usado para transmitir informação de controlo partilhada. É usado apenas no modo de operação TDD.

- Canais Tráfego

- **Common Traffic Channel (CTCH)**: Canal de DL usado para difundir informação de utilizadores dedicada para todos ou um grupo específico de UE.
- **Dedicated Traffic Channel (DTCH)**: Canal de DL e UL usado transferir dados ou tráfego do utilizador.

Canais de Transporte

Os canais de transporte estão divididos em dois tipos: comuns e dedicados.

- Canais Comuns

- **Broadcast Channel (BCH)**: Canal de DL usado para transportar a informação de sistema para os UE's da célula.
- **Common Packet Channel (CPCH)**: Canal de UL usado para transmissão de dados em rajada. Removido na *Release 5*.

- **Downlink Shared Channel (DSCH)**: Canal partilhado para transmissão de dados ou informações de controlo para os UE. Usado apenas em modo TDD e removido na *Release* 5.
 - **Forward Access Channel (FACH)**: Canal de DL usado para transportar mensagens de sinalização de dados e controlo dos utilizadores. Transporta dados em *broadcast* ou *multicast*.
 - **High Speed Downlink Shared Channel (HS-DSCH)**: É canal de transporte de dados HSDPA, partilhado por vários UE.
 - **Paging Channel (PCH)**: Canal de DL que transporta dados de procedimentos de *paging* (para modo suspensão) e é usados para estabelecer as ligações entre os UE e o *NodeB*. É um canal sempre transmitido para toda a célula.
 - **Random Access Channel (RACH)**: Canal de UL usado para obter acesso ao sistema pela primeira vez, embora também possa transportar dados. Cria o par de canais RACH/FACH, sempre recebidos na célula toda.
 - **Uplink Shared Channel (USCH)**: Canal partilhado para transmissão de dados ou informações de controlo dos UE para os *NodeB*. Usado apenas em modo TDD e removido na *Release* 5.
- Canais Dedicados
 - **Dedicated Channel (DCH)**: Canal de DL e UL usado para transportar dados de um determinado UE. Cada UE tem o seu próprio canal DCH dedicado em ambas direções.
 - **Enhanced Dedicated Channel (E-DCH)**: Canal de UL usado para transporte de dados HSUPA.

Canais Físicos

- **Acquisition Indicator Channel (AICH)**: Canal de DL usado para informa um UE sobre o canal DCH que pode utilizar para comunicar com o *NodeB*. Esta atribuição de canal ocorre como resultado de um pedido de serviço de acesso aleatório bem sucedido do UE.
- **Collision Detection/Channel Assignment Indicator Channel (CD/CA-ICH)**: Canal de DL utilizado para indicar se a atribuição do canal está ativa ou inativa para o UE.
- **Common Pilot Channel (CPICH)**: Canal de DL transmitido por todos os *NodeB* para os UE's estimarem o tempo para desmodulação do sinal. Além disso, é usado como *beacon* para os UE's determinarem qual a célula com melhor nível de sinal.
- **CPCH Status Indication Channel (CSICH)**: Canal de DL que transporta o *status* do CPCH e também pode transportar alguns dados intermitentes ou de rajada.
- **Dedicated Physical Control Channel (DPCCH)**: Canal de DL e UL que transporta informações de controlo de/para o UE. Transporta bits piloto e o *Transport Format Combination Indicator* (TFCI) que serve para informar o recetor qual o formato do pacote de dados recebido.
- **Dedicated Physical Data Channel (DPDCH)**: Canal de DL e UL usado para transmitir dados.

- **Enhanced Absolute Grant Channel (E-AGCH)**: Canal HSDPA que estabelece e informa os UE's do limite absoluto de recursos energéticos que o UE pode usar, para garantir o serviço. Serve para informar quais os UE's a serem escalonados para transmitir dados.
- **Enhanced Dedicated Physical Control Channel (E-DPCCH)**: Canal HSUPA, em DL e UL, que transporta os dados de controlo requeridos pelo *NodeB* para descodificar os canais em UL com dados, inclui o TFCI do canal E-DCH.
- **Enhanced Dedicated Physical Data Channel (E-DPDCH)**: Canal HSUPA que transporta os dados dos UE. Cada utilizador pode transmitir até quatro canais E-DPDCH com um *Spreading Factor* (SF) de SF256 a SF2. O número de E-DPDCH e os seus SF variam de acordo com a taxa de dados requerida.
- **Enhanced Relative Grant Channel (E-RGCH)**: Canal de DL usado para aumentar, diminuir ou manter o limite de recursos energéticos para garantir o serviço. Este canal HSUPA é, geralmente, usado para alterações relativamente pequenas durante a ocorrência transmissão de dados. As mudanças mais abruptas são tratadas pelo E-AGCH.
- **High Speed Dedicated Physical Control Channel (HS-DPCCH)**: Canal HSDPA que transmite sinalização de *feedback* relacionada com dados transmitido no HS-DSCH, incluindo o *HARQ-Acknowledgement* (ACK), *HARQ-Negative Acknowledgement* (NACK) e informação de *CQI*.
- **High Speed Physical Downlink Shared Channel (HS-PDSCH)**: Canal HSDPA que transporta dados do utilizador no HS-DSCH.
- **High Speed Shared Control Channel (HS-SCCH)**: Canal de DL que contém informação de sinalização relacionada com o canal HS-DSCH.
- **Primary Common Control Physical Channels (P-CCPCH)**: Canal de DL que transporta o canal BCH. Existe apenas um P-CCPCH por célula e é usado para transportar informação de sincronismo, identificação do sistema, controlo de acesso em *broadcast* para todos os utilizadores.
- **Physical Common Packet Channel (PCPCH)**: Canal de DL destinado especificamente para transportar pacotes de dados. Em operação, o UE monitoriza o sistema para verificar se está ocupado e, caso não esteja, transmite uma rajada de dados para acesso. É feita retransmissão se não houver nenhuma confirmação do *NodeB*. Removido na *Release 5*.
- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)**: Canal de UL que partilha informação de controlo para os UE na célula. Removido na *Release 5*.
- **Page Indicator Channel (PICH)**: Canal de DL que fornece informação ao UE para que este possa entrar em *sleep mode* para poupar bateria quando fica à espera de informação pelo canal PCH. Desta forma, quando é preciso que o UE receba informação do canal PCH, são enviados dados pelo PICH para determinar a frequência com que o UE precisa de consultar o PCH para verificar se tem dados a receber.
- **Physical Random Access Channel (PRACH)**: Canal de DL que permite que o UE transmita informação de acesso aleatória em rajada para tentativas de acesso à rede. Transporta o canal RACH.
- **Secondary Common Control Physical Channels (S-CCPCH)**: Canal de DL que trans-

porta o canal FACH, que fornece informações de controlo, e o canal PCH, que fornece mensagens para os UE registados na rede.

- **Synchronization Channel (SCH):** Canal de DL que permite que os UE sincronizem com a rede. É usado para pesquisa da célula e transmitir informações de sincronização. É constituído por dois subcanais (primário e secundário).

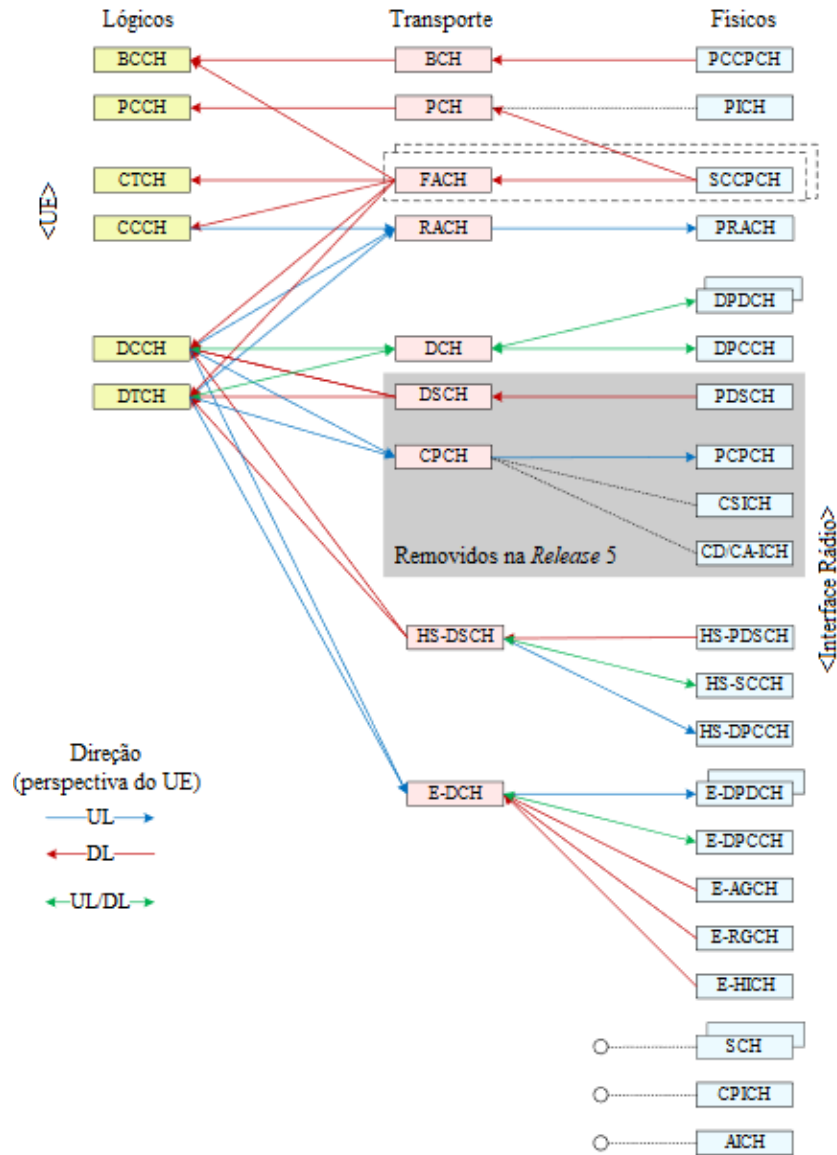


Figura 2.5: Mapeamento dos canais UMTS. Adaptado de [9].

Para o âmbito deste trabalho é importante reter que existe um conjunto de canais de controlo e de tráfego, que ocupam recursos energéticos da estação base, que será a base do algoritmo do modelo de capacidade 3G.

2.1.4 Spreading Factor

Como referido anteriormente, o UMTS utiliza a tecnologia WCDMA como mecanismo de transporte na interface rádio, contrariamente aos métodos utilizados pela geração anterior, que utiliza as

tecnologias TDMA e FDMA. Nesta tecnologia, a divisão dos utilizadores não é realizada no tempo nem na frequência, mas sim no código, denominado de processo de *spreading* (espalhamento).

O processo de *spreading* é constituído por duas fases, primeiro é realizado o *spreading*, que consiste em espalhar a informação a transmitir pelo espectro disponível (canais 5 MHz), seguido de um processo denominado de *scrambling*, códigos gerados pseudo aleatoriamente que fornecem a separação entre os diferentes UEs, em UL, ou diferentes células, em DL. As duas fases usam códigos com características especiais, os *Channelisation Code* (CC) e *Scrambling Codes* (SC), respetivamente, com mostra a Figura 2.6.

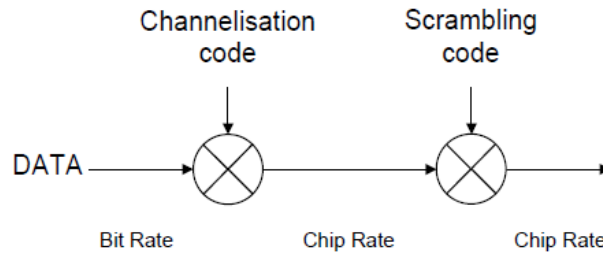


Figura 2.6: Fases do processo de *spreading*.

Os códigos são baseados no *Orthogonal Variable Spreading Factor* (OVSF), que permite que o SF seja alterado sem modificar a ortogonalidade entre os códigos. Como tal, é possível fazer uma árvore de *channelization codes*, onde cada nível possui um SF diferente, como mostra a Figura 2.7. O SF é a razão entre a taxa de *chip* e a taxa de transmissão da informação. Em UMTS, a taxa de *chip* é igual a 3,84 Mchip/s, [10].

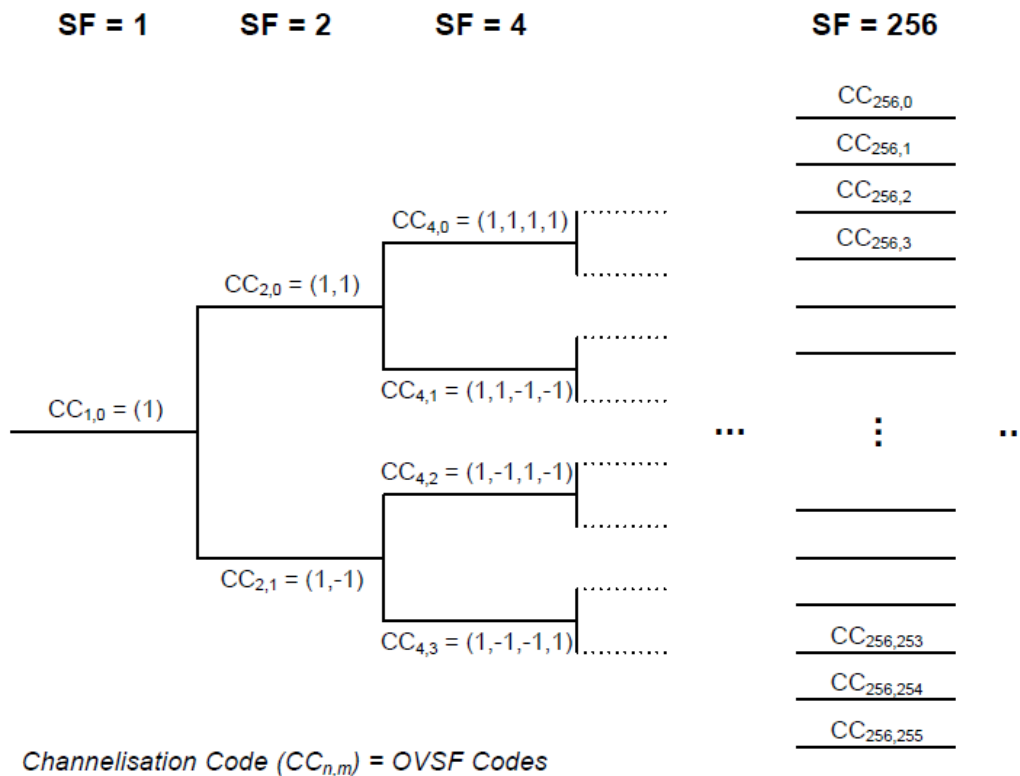


Figura 2.7: Fases do processo de *spreading*.

O número de códigos disponíveis depende do SF, o que significa que se for usado um SF de 4, apenas 4 códigos estarão disponíveis, mas se o SF for de 128, o número de códigos disponíveis é de 128. Assim, o número máximo de códigos é uma limitação para o número máximo de utilizadores servidos ao mesmo tempo. Além disso, um único utilizador pode usar um ou mais códigos, [11].

Os canais de controlo também usam códigos, onde alguns deles são alocados num específico CC, que depende se o canal é em UL ou DL. Por exemplo, em UL, o canal DPCCH tem sempre o código $CC_{256,0}$ e o E-DPCCH tem o código $CC_{256,1}$. Analogamente, em DL, o canal primário CPICH tem o código $CC_{256,0}$ e o canal P-CCPCH usa o código $CC_{256,1}$, [12].

2.1.5 Capacidade

Um *Channel Element* (CE) é o recurso de banda base necessário para o *NodeB* fornecer capacidade para um canal de voz. Quanto maior o número de CE's disponível numa estação base, maior será a capacidade disponível para os utilizadores. O número de CE's varia com o tipo de serviço, voz ou dados, com o débito binário, bem como com o número de utilizadores em simultâneo. O número máximo de CE's num *NodeB*, para UL e DL, é limitado pelo *hardware* e pela licença de capacidade paga pelo operador.

Os recursos são geridos tanto pelo *NodeB* como pelo RNC, garantindo um uso adequado. O *NodeB* gere os recursos dinamicamente e rapidamente ajusta o número de CE's que podem ser consumidos com base no serviço usado. Por exemplo, no caso do serviço de voz *Adaptive Multi-Rate* (AMR) a 12,2 kbps, tanto para UL como DL, é necessário apenas um CE para estabelecer um canal rádio. No caso de serviços de dados R99, são necessários mais recursos, de acordo com a Tabela 2.1 para um determinado fabricante de equipamentos.

Tabela 2.1: *Channel Elements* por serviço.

Serviço	UL CE	DL CE
AMR 12,2k	1	1
CS 64k	3	2
PS 64k	3	2
PS 128k	5	4
PS 384k	10	8

A *Release 99* possui alguns serviços, como serviços de *person-to-person* e serviços de *content-to-person*. Os serviços de *person-to-person* podem ser CS, onde a voz AMR está incluída, com taxas de transmissão de 4,75 kbps a 12,2 kbps, e PS, onde são incluídas as classes conversacional, *streaming*, interativa e de *background*, com taxas de transmissão de 8, 16, 32, 64, 128, 144, 256 e 384 kbps. Os serviços de *content-to-person* são todos PS e incluem funções como navegação na web, *streaming* de áudio e vídeo, etc. Existe a priorização de serviços, em que a voz normalmente é o serviço de maior prioridade, seguido pelos serviços de PS de *person-to-person* e, por fim, pelos serviços de *content-to-person*.

2.1.6 High Speed Downlink Packet Access

O HSDPA foi incluído na *Release 5* do UMTS, com o objetivo de aumentar a taxa de transmissão de dados por pacote, reduzir o atraso e atingir débitos de pico superiores, com modulação adaptativa e *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ), [13]. A modulação em HSDPA começa com *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK), sendo introduzida a modulação *16-Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) na *Release 5* e a modulação *64-QAM* na *Release 7*, [14]. O HSDPA também usa adaptação de *link*, isto é, ajusta a modulação e os parâmetros de codificação em cada *Transmission Time Interval* (TTI), que tem 2 milissegundos de duração.

No HSDPA, o escalonamento, em DL, passou do RNC para o *NodeB*. Com esta mudança, as decisões de escalonamento são feitas com latência mais reduzida, pois são realizadas mais próximas da interface rádio. Além dos canais da *Release 99* que também são usados na *Release 5*, como DCH, DSCH e FACH, surgiram novos canais físicos e de transporte com esta versão. O canal que transporta os dados é o HS-DSCH. Os novos canais físicos de DL são o HS-SCCH e HS-PDSCH, enquanto que o novo canal físico de UL é o HS-DPCCH, [9]. O HS-SCCH é o canal que transporta a informação da camada física necessária para decodificar os dados do canal HS-DSCH, o HS-PDSCH é usado para transportar o HS-DSCH e o HS-DPCCH, este último, tem as informações relacionadas com HARQ (ACK e NACK) e *Channel Quality Indicator* (CQI).

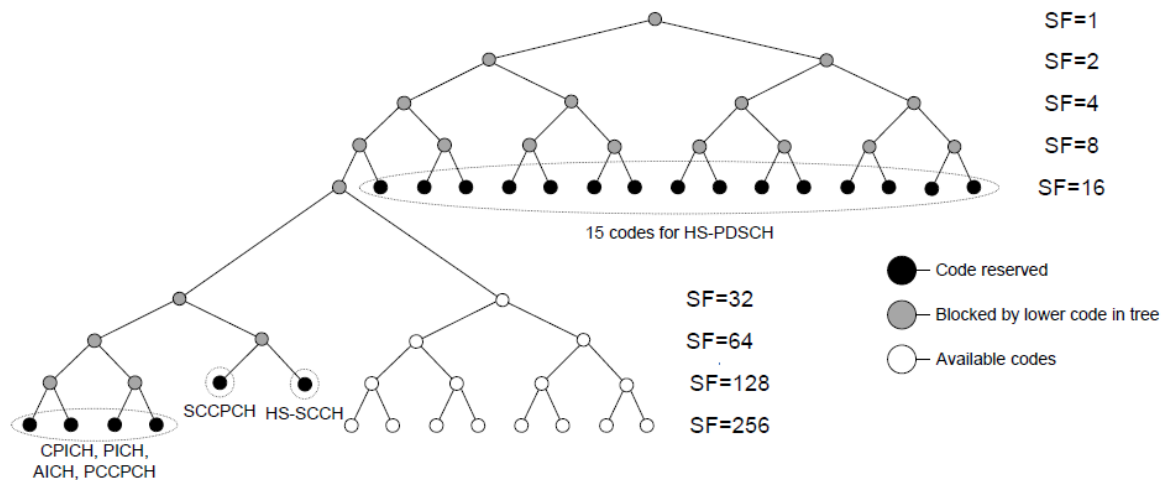


Figura 2.8: *Spreading Factor* usado em HSDPA.

O HS-SCCH tem um SF de 128 e o SF do canal de dados HS-DSCH é de 16. Cada CC corresponde a um código HS-PDSCH, com um máximo de 15, já que o último código é usado para sinalização (Figura 2.8). Um utilizador pode usar de 1 até 15 códigos, no mesmo TTI, no entanto, é comum gastar 5, 10 ou 15 códigos. Isto significa que, no mínimo, existe apenas um utilizador HSDPA, quando o utilizador precisa de 15 códigos HS-PDSCH e, no máximo, 3 utilizadores HSDPA, quando cada utilizador usa 5 códigos HS-PDSCH, [7].

Como mencionado, em DL são transportados os dados e, em UL, são transportadas informações de controlo. Esta informação de controlo consiste em medidas que os UE realizam e reportam ao *NodeB*, ou seja, os CQIs, que tem uma sub-trama HS-DSCH com o *Transport Block Size* (TBS), o número

de códigos HS-PDSCH e a modulação. TBS e o número máximo de códigos HS-PDSCH dependem também da categoria do UE, que introduzirá o intervalo mínimo inter-TTI. Este intervalo é o tempo necessário para que o UE consiga decodificar os pacotes recebidos, entre o início do TTI e o início do TTI seguinte. O valor de inter-TTI varia com a categoria atribuída ao UE. O CQI depende das condições de propagação e da distância do UE ao *NodeB*, [15].

Com as informações de CQI, é possível calcular o débito máximo alcançável ($R_{achievable(MAC-hs)}$), por TTI .

$$R_{achievable(MAC-hs)} = \frac{V_{TBS}}{0,002 \times I_{TTI_{min}}} \quad (2.1)$$

onde $I_{TTI_{min}}$ é o mínimo intervalo inter-TTI para uma dada categoria e V_{TBS} é o valor do TBS.

De forma a ser mais perceptível a importância, no débito máximo alcançável, da categoria do UE, o número máximo de códigos HS-PDSCH, o mínimo intervalo inter-TTI e o V_{TBS} , apresenta-se a Tabela 2.2 . Esta exemplifica a variação do débito no canal HS-DSCH em cada TTI, consoante os CQI reportados. De notar que existem 38 categorias de UE definidas, mas só serão apresentadas algumas delas, [12].

Tabela 2.2: Definição das categorias dos UE, para HSDPA. [12].

Categoria	Códigos HS-PDSCH	$I_{TTI_{min}}$ [ms]	V_{TBS} [bits]	$R_{achievable(MAC-hs)}$ [Mbps]
1	5	3	7298	1,22
4	5	2	7298	7,30
7	10	1	14411	7,21
11	5	2	3630	3,63
14	15	1	42192	21,1
21	15	1	23370	11,7
30	15	1	42192	21,1
38	15	1	42192	21,1

No HSDPA, a transmissão de dados não ocupa todo o tempo de canal, durante o tempo que o UE se encontra ligado ao *NodeB*. Os dados são transmitidos em rajada, ou seja, são transmitidos durante alguns milissegundos e, assim que não hajam dados, o utilizador deixa o canal livre. Caso o tempo de TTI termine e ainda hajam dados para transmitir, esse utilizador pode ser escalonado, novamente, no próximo TTI, dependendo do tipo de escalonamento que seja considerado, [16]. Tendo em consideração a existência da transmissão em rajada, pode acontecer que o canal esteja completamente livre por algum tempo, se nenhum utilizador, ligado àquele *NodeB*, tiver dados para receber.

Um vez que cada utilizador consome apenas um par de TTIs, é possível alocar muitos utilizadores, porque os códigos HS-PDSCH são alocados ao utilizador, apenas quando este tem dados para receber. Caso contrário, o UE é alocado a um código de DL dos canais de controlo, havendo apenas troca de informação de sinalização.

Os recursos alocados e o débito que o UE consegue atingir dependem da categoria do UE, do

intervalo mínimo inter-TTI, bem como qual ou quais as modulações que podem ser usadas e também o número de códigos HS-DSCH. Para cada categoria do UE, estes parâmetros essenciais à transmissão de dados estão especificados pelo 3GPP, [13]. O número de categorias do UE tem aumentado com as novas *Releases*, de forma a ser possível a implementação das novas funcionalidades que foram surgindo e haver uma compatibilidade entre as várias *Releases*.

2.2 Long Term Evolution

O LTE é uma tecnologia de comunicações móveis 4G, desenvolvido igualmente pelo 3GPP, resultando do desenvolvimento de um sistema de rádio de banda larga comutada somente por pacotes, e foi especificado pela primeira vez na *Release 8* do 3GPP, [17]. O DL em LTE utiliza o *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) como seu esquema de acesso múltiplo e o UL usa *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA). Ambas as soluções conferem ortogonalidade entre os utilizadores, diminuindo a interferência e aumentando a capacidade da rede. A alocação de recursos em ambas as ligações, ascendente e descendente, é feita no domínio da frequência, com uma resolução de 180 kHz e consistindo em doze sub-portadoras de 15 kHz cada. A alta capacidade do LTE deve-se ao facto de o escalonamento de pacotes ser realizado no domínio da frequência, a partir da técnica *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). A principal diferença entre a alocação de recursos em UL e em DL, é que a primeira é contínua, para permitir a transmissão de uma única portadora, enquanto que a segunda usa *Physical Resource Block* (PRB)s de diferentes partes do espectro e de uma forma dinâmica. Os PRBs são recursos de frequência e tempo que ocupam 12 subportadoras de 15 kHz cada e um intervalo de tempo de 0,5 ms. Ao adotar a solução de portadora única de UL, o LTE permite um projeto eficiente do amplificador de potência do terminal, o que é essencial para a vida útil da bateria do terminal. Dependendo do espectro disponível, o LTE permite flexibilidade de espectro que pode variar de 1,4 MHz até 20 MHz. Em condições ideais, a largura de banda de 20 MHz pode fornecer taxas de transmissão até 172,8 Mbps ao utilizador, em DL, com *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) de 2x2 e 340 Mbps com MIMO 4x4. a taxa de transmissão, em UL, pode chegar até 86,4 Mbps.

O surgimento da quarta geração de redes móveis marca uma forte mudança nas comunicações, tratando-se de um sistema de comunicações móveis totalmente novo. Implementaram-se redes exclusivamente comutadas por pacotes, [17], colocando os serviços de dados como principal área de negócio dos operadores móveis, conceito *All-IP*.

Em suma, o LTE especifica débitos superiores, maior eficiência espectral, menor latência, flexibilização da largura de banda do canal, redução dos custos e compatibilidade com outras gerações de redes.

2.2.1 Arquitetura

O LTE, contrariamente ao UMTS, não suporta ligações através de comutação de circuitos. Esta arquitetura de rede considera a implementação de serviços baseados totalmente em pacotes IP, ou seja, cada serviço é construído em cima do protocolo IP. Por se basear neste protocolo, com a transição de

redes combinando comutação de circuitos e pacotes, a arquitetura do sistema deve ser simples.

Como tal, o conceito LTE consiste na rede de acesso rádio, [18], *Evolved UTRAN* (E-UTRAN), e no núcleo da rede, *Evolved Packet Core* (EPC), caracterizado pela simplicidade, eficiência e escalabilidade.

A rede utilizada é considerada mais simples do que as redes anteriores, pelo facto de já não possuir serviços CS e por ter uma arquitetura mais simples comparativamente à arquitetura UMTS HSPA (Figura 2.9), além disso, os pacotes são processados e encaminhados no núcleo EPC, o que melhora a taxa de transmissão e o tempo de latência.

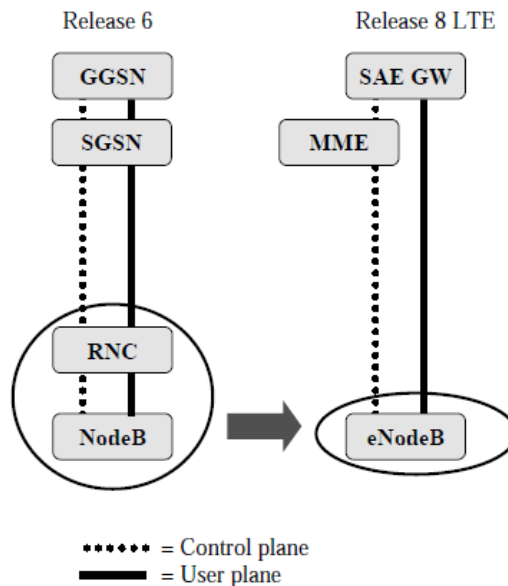


Figura 2.9: Diferenças entre arquitetura 3G e 4G. [19].

A Figura 2.9, mostra as simplificações feitas na arquitetura 4G face à arquitetura 3G, onde todos os protocolos de rádio, gestão de mobilidade, compressão de cabeçalhos e todas as retransmissões de pacotes são realizados nas estações base, denominadas de *Evolved Node B* (eNB) por se tratarem de uma evolução das estações base da rede 3G (*NodeB*). O eNB inclui todas as funções e algoritmos que, na rede 3G, estavam localizados no RNC, diminuindo a interface rádio para apenas um elemento, que se traduz num redução de latência.

LTE corresponde à evolução do acesso por rádio através da E-UTRAN, juntamente com uma evolução dos aspectos não-rádio, denominada *System Architecture Evolution* (SAE), que inclui a rede EPC. A combinação de LTE e SAE forma o *Evolved Packet System* (EPS), que fornece conectividade IP ao utilizador a uma *Packet Data Network* (PDN) para aceder à Internet, além de executar diferentes serviços simultaneamente, como *File Transfer Protocol* (FTP) e *Voice over IP* (VoIP). Os recursos oferecidos pelo LTE são suportados através de vários elementos de rede EPS com diferentes funções.

A Figura 2.10 mostra a arquitetura de rede global, que engloba os elementos de rede e as interfaces normalizadas. A rede compreende a rede principal (isto é, EPC) e a rede de acesso (isto é, E-UTRAN). A rede de acesso possui apenas um nó, o eNB, que estabelece ligações com os UEs.

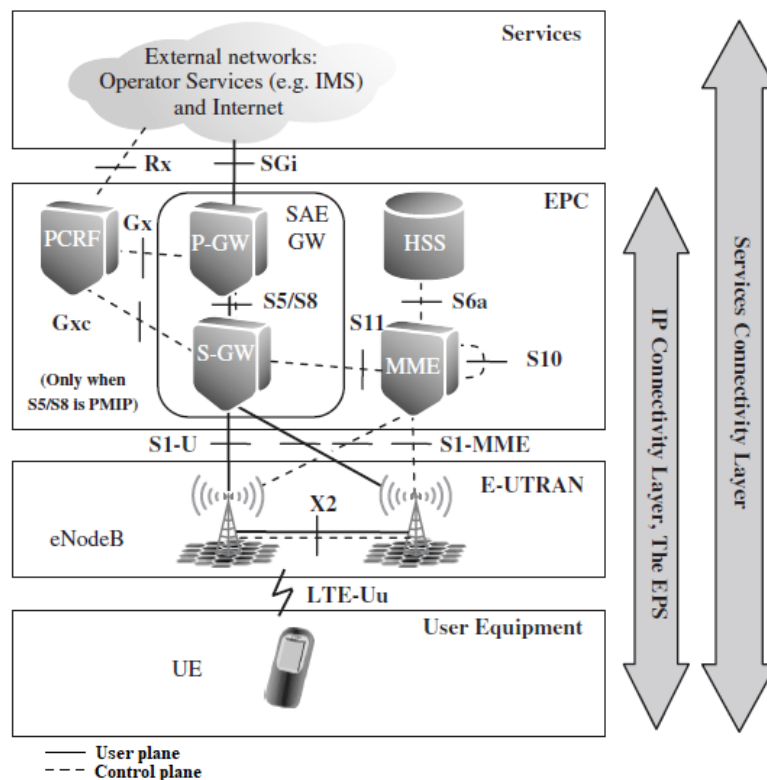


Figura 2.10: Arquitetura da rede LTE. Adaptado de [20].

A E-UTRAN é apenas constituída por vários eNBs. Ao contrário da tecnologia anterior, não existe qualquer controlador centralizado para o tráfego dos utilizadores. Todas as tarefas e funcionalidades de rádio passam a ser realizadas nos eNB's.

A rede EPC é formada por, [20]:

- *Mobility Management Entity* (MME): equivalente ao HLR e ao VLR na rede UMTS. Neste nó é processada a sinalização entre o UE e o núcleo da rede. Através da interação com o HSS realiza a gestão do acesso do UE à rede;
- HSS: responsável pelo registo e pelo controlo das informações de cada dispositivo móvel;
- *Serving Gateway* (S-GW): realiza a transição entre a rede de acesso rádio e a rede EPC. Encaminha os pacotes de dados para o eNB e realiza a contabilização e o controle dos dados do utilizador;
- *PDN Gateway* (P-GW): serve como ponto de entrada/saída do tráfego de dados do UE e de interface entre as redes LTE e as redes de pacotes exteriores. É responsável pela atribuição de endereços IP aos UE;
- *Policy Control and Charging Rules Function* (PCRF): responsável pela política de controlo, tomada de decisões de pedidos multimédia e controlo de tarifação de serviços de dados.

Analisando a arquitetura verifica-se a existência das seguintes interfaces, [20]:

- *X2*: para que seja possível a realização de *handovers* entre eNBs e realiza a gestão de carga e interferência;

- *S1-U*: interfaces entre o núcleo e as redes de acesso rádio;
- *S11*: realiza a troca de sinalização entre o S-GW e o MME;
- *S6a*: permite a transferência de dados de subscrição e de autenticação entre o MME e o HSS;
- *S5/S8*: realiza a ligação em termos de plano de utilizador e a gestão dessa ligação entre S-GW e P-GW;
- *SGi*: interface entre o P-GW e as redes externas, permitindo, por exemplo, o acesso à Internet.
- *Gx*: permite a transferência das políticas de QoS e das regras de tarifação.

2.2.2 Técnicas de Acesso Múltiplo ao Meio

De forma a cumprir todos os requisitos definidos para o LTE, foram adotadas técnicas mais avançadas e eficientes, na interface rádio, de múltiplo acesso ao meio.

A primeira grande alteração, face à tecnologia anterior, foi adotar uma abordagem multiportadora. Relativamente ao *DL* foi adotada a técnica OFDMA, que se trata de uma técnica com maior eficiência espectral e dinâmica na definição da largura de banda a usar, tornando-se na primeira gerção de redes móveis com largura de banda variável. Para o *UL*, foi adotada a técnica SC-FDMA, em que a transmissão é feita sobre uma única portadora, o que permite que os UEs não gastem tanta energia para transmitir, tornando esta rede de mais baixo consumo e, conseqüentemente, permite aumentar a autonomia da bateria do UE, bem como baixar a complexidade do móvel.

Ambos os esquemas apresentam o domínio da frequência como uma nova dimensão de flexibilidade, que introduziu uma nova maneira de melhorar não apenas a eficiência espectral do sistema, mas também para minimizar os problemas de desvanecimento e interferência. Os dois esquemas apresentam-se na Figura 2.11.

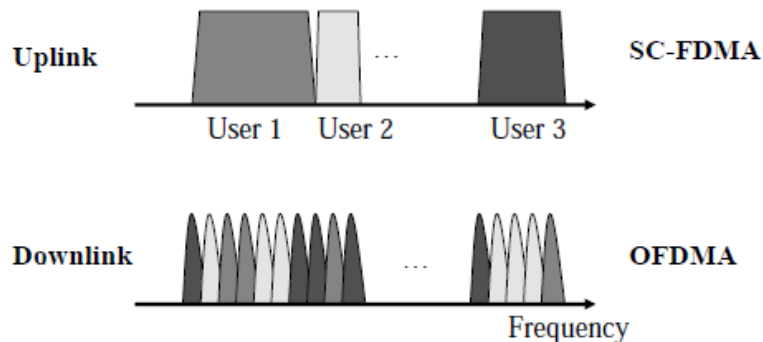


Figura 2.11: Técnicas de múltiplo de acesso usadas em LTE. [19].

De modo a superar o efeito de desvanecimento de multipercurso³ existente no UMTS, esta rede utiliza a técnica OFDM para a transmissão do sinal. Para transportar dados o OFDM utiliza um grande número de subportadoras para a transmissão. Esta pode ser realizada por um número de subportadoras paralelas, [21]. No LTE, como já referido, cada subportadora é de 15 kHz, sendo um PRB um conjunto de 12 subportadoras consecutivas com um total de 180 kHz, o que no domínio do

³Desvanecimento multipercurso: Nas comunicações móveis, o sinal que chega ao recetor é fruto da composição de ondas eletromagnéticas que percorreram trajetórias distintas através de diferentes mecanismos de propagação, resultando assim em flutuações no nível de sinal recebido.

tempo, equivale a 7 símbolos OFDM. Dependendo da largura de banda da portadora, o LTE suporta um número variável de PRB's.

A Figura 2.12 ilustra um *Physical Resource Block*.

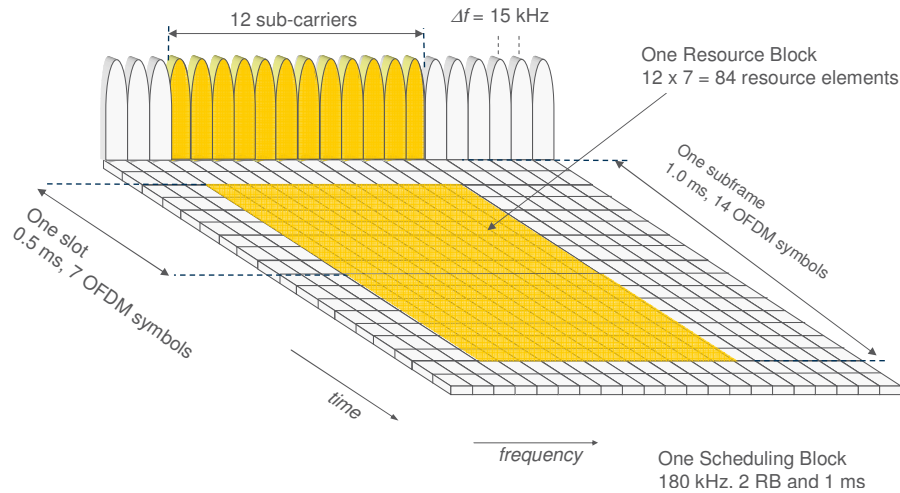


Figura 2.12: *Physical Resource Block*. Adaptado de [21].

Inicialmente, o LTE foi concebido para oferecer apenas serviços de dados. Embora a voz tenha vindo a perder relevância nos últimos anos, continua a gerar grandes receitas para os operadores móveis. Então surgiu a iniciativa de criação de um padrão nativo LTE que suportasse voz, designado *Voice over LTE* (VoLTE). Esta norma prevê mecanismos para suportar comunicações multimédia, como voz, vídeo em tempo real, texto, transferência e partilha de ficheiros.

Esta abordagem insere o serviço de voz em IP, sendo assim totalmente baseado em comutação de pacotes. Este facto permite que não haja dependência de outras redes 2G ou 3G para assegurar o serviço. Assim, existindo cobertura LTE num determinado território, os operadores poderão finalmente deixar de investir nas redes anteriores.

2.2.3 Portadores (Bearers) e Sessões EPS

Como já referido, o LTE transporta pacotes de dados através de protocolos que são usados na Internet, protocolos IP. No entanto, os mecanismos de transporte são mais complexos, porque o LTE precisa de ter em conta duas questões que a Internet não suporta. O primeiro é a mobilidade, uma vez que, na Internet, um dispositivo permanece ligado ao mesmo ponto de acesso, durante um tempo significativo e perde a ligação a qualquer servidor externo, se o ponto de acesso for alterado. Coisa que não é espectável de acontecer a um utilizador LTE, onde se espera que este se mova e esteja, constantemente, a mudar de estação base e não pode haver falha da ligação, mesmo que temporariamente. A segunda questão é o QoS, um termo que descreve o desempenho da rede a partir de parâmetros como o débito de transmissão garantido, taxa máxima de erros e atraso máximo. A Internet, na maioria dos protocolos usados, não oferece garantias de QoS, que significa que, por exemplo, o desempenho de uma chamada VoIP, numa rede congestionada, seja provavelmente fraca. Pelo contrário, o LTE pode oferecer garantias de QoS, pode até atribuir diferentes níveis de QoS a diferentes fluxos de dados e a diferentes utilizadores.

Para resolver estas duas questões, o LTE transporta os dados de uma parte do sistema para outra a partir dos denominados portadores EPS, [22]. Um portador EPS pode ser considerado como um canal de dados bidirecional, que transfere os dados, entre dois pontos, pela rota certa, através da rede e com qualidade de serviço correta. Mais concretamente, um portador EPS é um canal através do qual os pacotes IP são entregues através da rede LTE, isto é, entre um UE e um PDN (passando pelos vários nós entre eles, eNBs, S-GW e P-GW). Um UE pode ter vários portadores EPS simultaneamente, como tal, cada portador EPS é dotado de um *Identification Number* (ID), que é alocado por um MME, [22].

A ligação IP entre um UE e um P-GW é chamada de sessão EPS, cada sessão é representada por um endereço IP do UE e um ID PDN (também denominado por *Access Point Name* (APN)). Uma sessão EPS pode ter mais do que um portador EPS para transmissão de dados do utilizador (pacotes IP) e aplica a política de QoS obtida por um PCRF.

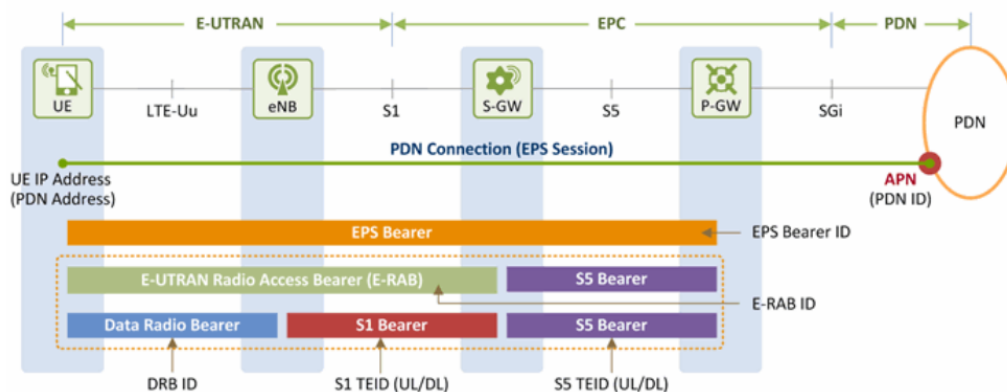


Figura 2.13: Visão geral de portador/sessão EPS.

Como se pode observar, pela Figura 2.13, um portador EPS é, na verdade, uma concatenação de portadores entre os vários nós de uma rede LTE (*Data Radio Bearer* (DRB), portadores *S1* e *S5*). O DRB é o portador EPS estabelecido na interface Uu (entre o UE e o eNB, onde os pacotes são entregues por um DRB, diferentes DRBs têm DRB IDs diferentes e são alocados pelo eNB. O portador *S1* é estabelecido na interface *S1-U* (entre o eNB e o S-GW), os pacotes são entregues através de um túnel *GPRS Tunneling Protocol* (GTP), estes são identificados pelo seu *Tunnel Endpoint Identifier* (TEID), que é atribuído pelos extremos do túnel GTP, ou seja, o eNB e S-GW. Por fim, o portador *S5* é estabelecido na interface *S5*, através de um túnel GTP, entre o S-GW e o P-GW e são também identificados pelo seu TEID. Também existem os portadores *EPS Radio Access Bearer* (E-RAB), que consiste na concatenação do portador DRB com o *S1* e interliga diretamente um UE ao S-GW, estes são identificados por um E-RAB ID, atribuídos por um MME.

Ter uma sessão EPS estabelecida significa que:

1. Foi selecionado um PDN através do qual um utilizador deve usar serviços (pela entrada do utilizador ou com base nas informações de assinatura providenciadas por um HSS);
2. Um endereço IP a ser usado no PDN foi atribuído ao utilizador;
3. As regras de política a serem aplicadas aos pacotes IP do utilizador (QoS e regras de tarifação) foram selecionadas;
4. Um portador EPS padrão para entrega de pacotes IP através da rede LTE foi estabelecido.

Através desta sessão EPS estabelecida, os pacotes IP podem ser trocados entre o utilizador e o PDN de acordo com as regras estabelecidas pelo operador e está sempre ativa. Assim que um UE se liga a um PDN, ao usar o endereço de IP que lhe é atribuído no início de ligação à rede LTE, a ligação IP mantém-se depois de estabelecido um portador EPS *default* e até o UE se desligar da rede LTE. Mesmo quando não exista tráfego para transmitir, o portador EPS *default* mantém-se ativo e pronto para uma possível transmissão de dados.

Após este primeiro portador EPS *default* ser estabelecido, é possível estabelecer mais portadores EPS, caso o portador não seja suficiente para obter o nível de QoS pretendido, [22]. Os novos portadores EPS que sejam estabelecidos denominam-se de portadores EPS dedicados e podem ser criados múltiplos destes portadores, se requisitado pelo utilizador ou pela própria rede LTE. Quando não há tráfego de utilizador, esses portadores EPS dedicados podem ser removidos, enquanto que o *default* nunca é removido e mantém o utilizador ligado à rede LTE. O tráfego IP de ou para o UE é entregue através dos portadores EPS dependendo da classe de QoS na rede LTE.

2.2.4 Classes de Qualidade de Serviço

Um parâmetro importante numa rede LTE é o *QoS Class Identifier* (QCI), que é o mecanismo usado para garantir que o portador EPS alocado ao utilizador garante o QoS apropriado. Trata-se de um número de 8 bits que atua como ponteiro para uma tabela de consulta e define quatro parâmetros de QoS que especificam o tipo de tráfego (tipo de recurso, taxa de pacotes perdidos, atraso máximo, prioridade), [22].

O tipo de recurso divide os portadores EPS em duas classes, *Guaranteed Bit Rate* (GBR) e *non-GBR*. O GBR está associado a um débito de transmissão garantido, trata-se do débito médio mínimo que o UE pode esperar obter, são adequados para serviços em tempo real, como voz, em que o débito garantido pode corresponder à menor taxa de bits do *codec*⁴ de voz usado. O *non-GBR* não recebe tais garantias, portanto, é adequado para serviços que não sejam em tempo real, como navegação na Web ou *download* de ficheiros, em que o débito pode cair para zero. Um portador EPS *default* é sempre um portador *non-GBR*, enquanto que um portador EPS dedicado pode ser GBR ou *non-GBR*.

A taxa de pacotes perdidos é um limite superior para a proporção de pacotes perdidos devido a erros na transmissão e/ou receção. A rede deve aplicá-lo de forma confiável aos portadores GBR, mas portadores *non-GBR* podem ter perdas adicionais de pacotes, se a rede ficar congestionada.

O atraso máximo de pacote é um limite superior, com 98% de confiança ([23]), para o atraso que um pacote recebe entre o UE e o P-GW, cada valor de QCI tem um valor definido e que não deve ultrapassar esse atraso. Serviços mais exigentes a nível de atraso, como a voz, tem um limite superior mais apertado (mais baixo). Por exemplo, a voz tem um atraso máximo de até 150 ms, por ser o limiar de tempo a partir da qual um ser humano se começa aperceber que existem atrasos numa conversa.

Finalmente, a prioridade do QCI determina a ordem na qual os pacotes de dados são manipulados, quer isto dizer que se dois fluxos de dados chegarem ao mesmo tempo de serem processados, o fluxo que apresentar um QCI com menor prioridade é processado em primeiro lugar, para que este tenha um atraso menor. A prioridade define a importância do respetivo fluxo de dados, por exemplo, o serviço

⁴Codec: acrónimo de codificador/descodificador, dispositivo de *hardware* ou *software* que codifica/descodifica sinais.

de voz tem maior prioridade (menor valor) que um serviço *streaming* de vídeo, porque é mais grave para um utilizador, notar um atraso numa conversa do que quando está a ver um vídeo em *streaming*.

Alguns QCIs, usados nas redes LTE, foram normalizados e estão associados aos parâmetros de QoS referidos, alguns exemplos de QCIs e respetivos parâmetros de QoS estão listados na Tabela 2.3. Os portadores EPS que usem essas classes podem esperar receber QoS consistente, mesmo se um UE se encontrar em *roaming*⁵. Os operadores de rede podem definir outros QCIs específicos da sua rede, contudo é provável que estes funcionem apenas com UEs que não se encontrem em *roaming*.

Tabela 2.3: Parâmetros de QoS normalizados. [23].

QCI	Tipo de Recurso	Taxa de Pacotes Perdidos	Atraso Máximo [ms]	Prioridade	Exemplo de Serviços
1	GBR	10e-2	100	2	Voz
2	GBR	10e-3	150	4	Vídeo chamada
3	GBR	10e-3	50	3	Jogos em tempo real
4	GBR	10e-6	300	5	<i>Streaming</i> Vídeo (<i>Buffered</i>)
5	<i>Non-GBR</i>	10e-6	100	1	Sinalização IMS
6	<i>Non-GBR</i>	10e-6	300	6	Web, mail, FTP
7	<i>Non-GBR</i>	10e-3	100	7	Voz, Vídeo e jogos em tempo real
8	<i>Non-GBR</i>	10e-6	300	8	Web, mail, FTP
9	<i>Non-GBR</i>	10e-6	300	9	Web, mail, FTP

A Tabela 2.3 exemplifica apenas alguns QCIs, nomeadamente os que foram coletados nos dados referentes à rede 4G, contudo existem mais e alguns foram introduzidos em *Releases* mais recentes. Por exemplo, os QCI 65, 66, 69 e 70 foram introduzidos na *Release* 12, enquanto que os 75 e 79 foram introduzidos na *Release* 14. Cada um com os seus parâmetros de QoS associados e com um propósito de uso bem definido.

2.2.5 Capacidade

Os eNBs transmitem e recebem tráfego dos utilizadores através do canal rádio associado, sendo o volume diretamente proporcional à largura de banda do canal. O 3GPP definiu canais de 5, 10 e 20 MHz, entre outros. De modo a estimar o débito de pico máximo disponível de uma estação LTE, é necessário perceber como esta maximiza os recursos disponíveis no canal rádio. O principal fator prende-se com a qualidade do sinal recebido pelo terminal móvel, [24]. Quanto mais próximo o terminal se encontrar da estação base, melhor a qualidade do sinal, maximizando, deste modo, o débito recebido. Os débitos são também afetados por outros fatores, como o número de utilizadores em simultâneo, mobilidade, interferência ou espaço *indoor* / *outdoor*. O padrão LTE define três tipos de modulação: QPSK, 16-QAM e 64-QAM, como ilustrado na Figura 2.14.

⁵Roaming: é um termo utilizado em comunicações móveis referente a um serviço que permite utilizar a rede móvel em áreas fora da localidade em que o UE está registado.

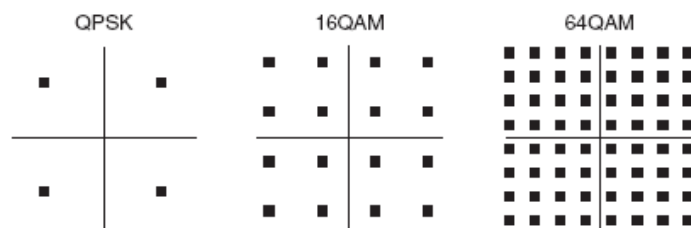


Figura 2.14: Constelações de símbolos em quadratura e fase.

Nas *Releases* mais recentes foi adicionada a modulação 256-QAM. Quanto mais perto da fronteira da área de cobertura da célula, o terminal se encontrar, menos robusta será a modulação, tipicamente QPSK, diminuindo assim o débito recebido. Por outro lado, o uso de esquemas de múltiplas antenas, tanto no emissor como no recetor, MIMO permite aumentar o desempenho. É importante relembrar que o débito máximo é um valor teórico, ou seja, é o débito em condições rádio ideais.

A Tabela 2.4 resume o número de PRBs, máxima Largura de Banda (LB) ocupada, banda de guarda e número de *Resource Element* (RE)s que varia em função da largura de banda utilizada.

Tabela 2.4: Características da largura de banda no LTE.

LB [MHz]	5	10	20
Nº de PRBs	25	50	100
Máxima LB ocupada [MHz]	4,5	9	18
Banda de guarda [kHz]	250	500	1000
Nº de RE's	4200	8400	16800

Relembrando a Figura 2.12 da secção 2.2 do capítulo 2 e assumindo uma largura de banda de 20 MHz, o número de REs de uma *subframe* (1 ms) é dado por, [17]:

$$12_{Subportadoras} \times 7_{SimbolosOFDMA} \times 100_{PRB's} \times 2_{slots} = 16800_{RE's}. \quad (2.2)$$

Assumindo uma modulação de 64-QAM sem codificação, o débito binário é dado por:

$$6_{bits/simbolo} \times 16800_{RE's/1ms} = 100,8 Mbps. \quad (2.3)$$

A Tabela 2.5 resume os valores teóricos de *throughput*, em DL, para as largura de banda típicas, tendo em conta a codificação e o esquema de antenas.

Tabela 2.5: *Throughput* de DL para LTE, em Mbps, relativo a cada modulação.

Esquema	LB [MHz]	QPSK	16-QAM	64-QAM
SISO	5	8,4	16,8	25,2
	10	16,8	33,6	50,4
	20	33,6	67,2	100,8
MIMO 2x2	5	16,8	33,6	50,4
	10	33,6	67,2	100,8
	20	67,2	134,4	201,6
MIMO 4x4	5	33,6	67,2	100,8
	10	67,2	134,4	201,6
	20	134,4	268,8	403,2

Na sequência da Equação 2.3 e considerando o esquema MIMO 2x2, o débito binário é o dobro, ou seja, 201,6 Mbps. Neste ponto, é necessário subtrair a sobrecarga relacionada com a sinalização, sincronização e codificação, estima-se que seja cerca de 25%, [25]. Assim, o máximo débito binário (*throughput*), em condições rádio ideais, pode ser dado por:

$$0,75 \times 201,6 = 151,2 \text{ Mbps.} \quad (2.4)$$

Este valor de débito binário máximo teórico pode ainda subir para cerca de 302,4 Mbps ao considerar MIMO 4x4.

Esta abordagem não tem em conta os valores de CQI que, tal como no UMTS, são reportados pelos UE de forma a ser perceptível a que condições rádio cada UE está sujeito, pois quanto piores estas condições, menos débito o UE conseguirá obter. A partir do valor de CQI reportado por um UE, o eNB seleciona o *Modulation and Coding Scheme* (MCS) correspondente, devido a um mapeamento entre os CQIs e os MCSs. Quanto maior o MCS mais bits podem ser transmitidos por unidade de tempo. Tendo em conta os valores de CQI, apresenta-se na Tabela 2.6, o mapeamento para os MCS definido pelo 3GPP, [26].

Com os valores apresentados na Tabela 2.6 e aplicando o valor da taxa de código, de um dado CQI, aos débitos calculados anteriormente, obtém-se o débito útil, pois os bits de enchimentos (que não transmitem dados úteis) deixam de ser incluídos nos cálculos, com aplicação da taxa de código. Por outro lado, é possível calcular o débito a partir do índice de MCS, que depende dos CQI, como já referido. Esta associação entre os CQIs e os índices de MCS é específica de cada fornecedor de equipamentos (*vendor*). Os índices de MCS vão desde o 0 até ao 31 e existem tabelas que mapeiam estes índices a uns índices de TBS, [26]. A partir destes índices de TBS é possível saber qual o valor de TBS consoante o número de PRBs que a célula tem disponível, que variam consoante a largura de banda utilizada. Sabendo que cada TTI tem 1 ms e o valor do TBS para o número máximo de PRBs, consegue-se calcular o débito máximo da célula. As tabelas referentes aos índices MCS, aos TBS e PRBs encontram-se no Anexo A.

Tabela 2.6: Características da largura de banda no LTE. Adaptado de [26].

CQI	Antes <i>Rel.12</i>		Após <i>Rel.12</i>	
	Modulação	Taxa de Codificação	Modulação	Taxa de Codificação
1	QPSK	0,0762	QPSK	0,0762
2	QPSK	0,1172	QPSK	0,1885
3	QPSK	0,1885	QPSK	0,4385
4	QPSK	0,3008	16-QAM	0,3691
5	QPSK	0,4385	16-QAM	0,4785
6	QPSK	0,5879	16-QAM	0,6016
7	16-QAM	0,3691	64-QAM	0,4551
8	16-QAM	0,4785	64-QAM	0,5537
9	16-QAM	0,6016	64-QAM	0,6504
10	64-QAM	0,4551	64-QAM	0,7539
11	64-QAM	0,5537	64-QAM	0,8525
12	64-QAM	0,6504	256-QAM	0,6943
13	64-QAM	0,7539	256-QAM	0,7783
14	64-QAM	0,8525	256-QAM	0,8634
15	64-QAM	0,9258	256-QAM	0,9258

Tendo em conta que cada TTI tem 1 ms e assumindo uma largura de banda de 10 MHz, que corresponde a 50 PRBs, apresentam-se os débitos da célula para alguns índices de MCS, na Tabela 2.7, para as tabelas de *Releases* inferiores à 12.

Tabela 2.7: Cálculo do débito máximo a partir dos MCSs.

Índice de MCS	Modulação	Índice de TBS	Nº PRBs	TBS	Débito Máximo [Mbps]
5	QPSK	5		4392	4,392
15	16-QAM	14	50	15264	15,264
20	64-QAM	18		22920	22,920

De notar que estes débitos são os brutos, ou seja, inclui sinalização, sincronização e codificação. Contudo, verifica-se que o débito disponível varia bastante com o índice de MCS com a variação das modulações.

3

Metodologia

3.1	<i>Key Performance Indicators</i>	34
3.2	Análise Descritiva dos Dados	35
3.3	<i>Machine Learning</i>	35
3.3.1	<i>Headroom</i>	36
3.3.2	Modelo de Regressão Linear Múltipla	36
3.3.3	Diagnóstico e Análise do Modelo	38
3.3.4	Validação do Modelo e Indicadores de Desempenho	39
3.3.5	Regressão <i>Stepwise</i>	41
3.3.6	Distribuições de probabilidade	42

Neste capítulo realiza-se uma introdução à metodologia utilizada no desenvolvimento dos modelos de capacidade. Explicando quais os tipos de dados utilizados, os conceitos estatísticos aplicados e as métricas para validação dos modelos. Bem como a explicação dos métodos de selecção de variáveis e distribuições de probabilidades que serão usadas.

3.1 *Key Performance Indicators*

Um *Key Performance Indicators* (KPI) é uma métrica quantificável do desempenho de operação e/ou processos essenciais das redes móveis. Os KPIs consistem em medições de desempenho da rede móvel. Estes permitem avaliar o desempenho da rede, a fim de proporcionar uma melhor utilização dos recursos, permitindo identificar lacunas no funcionamento da rede e possibilitando, assim, a sua otimização.

Os KPIs resultam de cálculos estatísticos baseados em contadores instalados nos equipamentos que integram a rede e que podem registar vários indicadores (por exemplo, *handovers* com falha, tipos de *handover*, potência transmitida, tráfego de voz e dados, etc.). São especificados através da definição e medição de certos parâmetros de entrada/saída do sistema interno da rede e também através da manutenção e operações por parte do operador, sendo que os obrigatórios são definidos pelo 3GPP, [27]. As unidades de medida obrigatórias associadas aos KPIs são dadas em percentagem, intervalo de tempo, Erlang e kbps.

Os KPIs auxiliam na análise de *Performance Management* (PM) da rede e também são utilizados para verificar se todos os elementos, nos vários níveis da rede, estão a funcionar e configurados corretamente a fim de atingirem as metas compartilhadas.

Os KPIs são reportados pela estação base e podem ser medidos a cada quarto de hora ou noutro intervalo relevante, dependendo da granularidade especificada. Alguns KPIs são específicos de cada fabricante de equipamentos.

As suas categorias são definidas da seguinte forma:

- Acessibilidade: mede a probabilidade de um utilizador aceder dentro de tolerâncias especificadas aos serviços solicitados;
- Retenção: avalia a capacidade da rede para manter a qualidade dos serviços solicitados por um utilizador num determinado nível;
- Integridade: indica o grau em que um serviço é fornecido sem deficiências excessivas, ou seja, são relativos à qualidade da ligação;
- Mobilidade: capacidade do sistema para permitir o movimento dentro da rede, ou seja, relativo a *handovers*;
- Utilização: indica a utilização dos recursos da rede, como a taxa de transferência na interface específica.

Além das categorias dos KPIs, existe ainda o tipo de medida que é recolhida:

- **Média**: reflete um valor de medição médio com base em vários resultados da amostra;
- **Rácio**: reflete a percentagem de ocorrência de um caso específico;

- **Cumulativo:** reflete uma medida cumulativa, ou seja, acumulada ao longo do tempo.

Os valores dos KPIs devem estar dentro dos limites definidos, dependendo do tipo de ambiente (urbano, suburbano ou rural), a fim de atender aos requisitos de desempenho da rede, bem como os *Service Level Agreements* (SLAs).

A lista de KPIs utilizados no âmbito desta dissertação para a construção dos modelos de capacidade encontram-se descritos no Anexo B.

3.2 Análise Descritiva dos Dados

A análise exploratória dos dados permite descrever alguns padrões e características dos dados que são fundamentais para a sua modelação. Não existe um procedimento padrão para construir um modelo confiável, mas bons modelos surgem dos dados e adaptam-se a novas informações.

A análise descritiva é a fase inicial no processo de estudo dos dados registados. Utilizam-se métodos de estatística descritiva para organizar, resumir e descrever os aspectos importantes de um conjunto de características observadas ou comparar tais características entre dois ou mais conjuntos. As ferramentas descritivas são os muitos tipos de gráficos e tabelas e também medidas de síntese como percentagens, índices e médias. Ao sumarizar-se os dados, perde-se informação, pois não se têm as observações originais. Contudo, esta perda de informação é pequena quando comparada com o ganho que se tem com a clareza da interpretação proporcionada.

A descrição dos dados também tem como objetivo identificar anomalias, até mesmo resultante do registo incorreto de valores, e dados dispersos, aqueles que não seguem a tendência geral do restante conjunto de dados.

3.3 *Machine Learning*

Machine Learning (ML) é uma área de conhecimento que envolve conceitos de diversas áreas, nomeadamente da Estatística, das Bases de Dados e das Ciências da Computação, em particular da Inteligência Artificial. Fornece aos sistemas a capacidade de aprender e melhorar automaticamente a partir da experiência. O ML é suportado pelas técnicas estatísticas, com o objectivo de extrair informações e valor dos dados brutos registados em bases de dados, expressando-as de uma forma compreensível de modo a poderem ser usadas para uma variedade de propósitos, nomeadamente a modelação preditiva. Está intimamente relacionado com (e frequentemente se sobrepõe a) estatísticas computacionais, pelo que tem uma forte ligação com a otimização matemática, que fornece métodos, teoria e domínios de aplicação, [28].

O processo de aprendizagem começa com a análise descritiva dos dados, a fim de procurar padrões nos mesmos e tomar melhores decisões no futuro com base na sua análise. O objetivo principal é permitir que os computadores aprendam automaticamente sem intervenção humana ou assistência. A capacidade de aprendizagem automática, por parte dos computadores, apresenta uma vantagem, pois conforme os modelos são expostos a novos dados, o modelo torna-se capaz de se adaptar de forma independente. Os modelos de ML podem ser:

- **Supervisionado:** para fazer previsões no futuro (*forecasting*);
- **Não supervisionado:** para obter conhecimento dos dados;
- **Semi supervisionado:** para obter conhecimento dos dados para realizar previsões.

Ao desenvolver o modelo, é importante garantir que este pode ser generalizado para diferentes conjuntos de dados.

No presente estudo, são abordados modelos supervisionados, uma vez que se pretende, essencialmente, prever uma dada variável dependente à custa de variáveis independentes de forma a encontrar uma relação entre elas. Os modelos utilizados baseiam-se na análise de Regressão Linear Múltipla, cujos principais conceitos se descrevem no Subsecção 3.3.2.

3.3.1 *Headroom*

Ainda no âmbito do conceito de ML, realizou-se um algoritmo de ajuste da potência de transmissão de célula para o modelo de capacidade 3G, denominado de *headroom*. O *headroom* é um valor percentual que indica se a potência que a célula transmite está em excesso ou em falta e expressa qual potência de transmissão que a célula deve utilizar. O *headroom* é calculado tendo como referência o pior caso das estatísticas da célula, ou seja, o valor que se encontra mais próximo da curva de admissão. Para determinar a percentagem, calcula-se a diferença entre o valor de referência de tráfego e a curva de admissão, que será a percentagem que é possível reduzir ou é necessário aumentar para ajustar a curva de admissão ao ponto de referência.

No modelo de capacidade 4G o *headroom* indica a diferença entre o maior valor de débito da célula registado nos dados e os dois limites de capacidade estimados pelo modelo. Um representa o valor médio do débito da célula estimado, em cada observação, tendo em conta os valores médios dos CQIs e MCSs e o outro limite representa o valor máximo desses mesmo valores estimados.

Estes valores percentuais servem para se perceber se as células têm margem de capacidade ou se estão a chegar ao seu limite.

3.3.2 Modelo de Regressão Linear Múltipla

Muitos dos problemas em engenharia envolvem explorar as relações existentes entre duas ou mais variáveis, [29]. Considera-se que duas variáveis quantitativas estão linearmente associadas quando a alteração do valor de uma (dita independente) provocar alterações no valor da outra (dita dependente). A regressão linear simples considera apenas um preditor x e uma variável dependente y . A variável y está relacionada com x pela Equação 3.1.

$$y = \beta_0 + x\beta_1 + \varepsilon \quad (3.1)$$

onde o valor esperado de y é obtido pela soma de uma função linear de x com um termo aleatório que representa o erro, ε . Este permite suportar a variabilidade da variável y que não é explicada pela função linear em x . O coeficiente β_0 é o termo independente e o coeficiente β_1 representa a variação média de y provocada por uma variação unitária de x .

A Figura 3.1 representa a reta de regressão ilustrando o método dos mínimos quadrados, onde os desvios (ϵ_i) entre os valores observados e estimados devem ser mínimos.

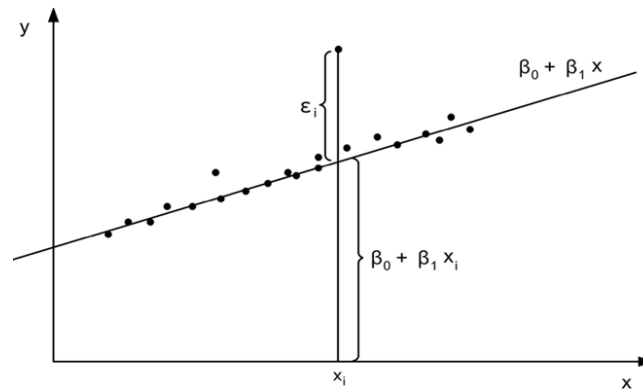


Figura 3.1: Reta de regressão linear.

A regressão linear simples está limitada a uma variável regressora, contudo, existem inúmeros casos em que se pretende aplicar mais que uma variável. A regressão linear múltipla trata-se da regressão linear com duas ou mais variáveis explicativas (x_i), em que a relação com a variável dependente y dá-se por:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_n x_{in} + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.2)$$

onde y_i representa o valor da variável resposta na observação i , x_i são os valores da i -ésima observação das n variáveis explicativas, β_i são os coeficientes da regressão e ϵ_i corresponde aos erros aleatórios

Método dos Mínimos Quadrados

O método dos mínimo quadrados é uma técnica matemática de otimização que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados, minimizando a soma dos quadrados das diferenças (*Sum of Squared Error* (SSE)) entre o valor estimado e os dados observados, em função dos coeficientes. A cada observação ($y_i, x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}$), para $i = 1, \dots, n$, está associado um erro e o objetivo é encontrar os coeficientes ($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$) que minimizem a soma dos quadrados dos erros, SSE.

$$SSE = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{1i} - \beta_2 x_{2i} - \dots - \beta_n x_{ni})^2 \quad (3.3)$$

Para determinar os coeficientes ($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$) de modo a minimizar o SSE , resolve-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial SSE}{\partial \beta_0} = 0 \quad \wedge \quad \frac{\partial SSE}{\partial \beta_1} = 0 \quad \wedge \quad \dots \quad \wedge \quad \frac{\partial SSE}{\partial \beta_n} = 0. \quad (3.4)$$

ou seja, os coeficientes estimados são dados por, [28]:

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T y. \quad (3.5)$$

Pressupostos do Modelo

Na construção de um modelo de regressão devem-se considerar os pressupostos inerentes à utilização do modelo de regressão linear para fins inferenciais. A verificação de pressupostos é realizada com recurso à análise dos resíduos, [30], através de testes e de métodos gráficos, que permitem identificar desvios relativamente aos pressupostos distribucionais dos erros. A partir dos testes e verificações é possível realizar ações para melhorar o modelo, desde que estas não alterem, de forma significativa, os resultados originais. Assim, assume-se que o modelo deve satisfazer os seguintes pressupostos, [31]:

- Homoscedasticidade¹ dos resíduos;
- Independência estatística dos resíduos;
- Normalidade da distribuição dos resíduos;
- Linearidade dos parâmetros.

3.3.3 Diagnóstico e Análise do Modelo

Para averiguar sobre o pressuposto de homoscedasticidade utiliza-se a representação gráfica dos resíduos *versus* valores ajustados. Este gráfico deve apresentar pontos dispostos aleatoriamente distribuídos em torno do zero, sem qualquer tipo de padrão definido. Para verificar a homoscedasticidade pode ser, também, utilizado o teste de Breusch Pagan, [32].

Para analisar o pressuposto de independência dos resíduos pode-se observar a representação gráfica dos resíduos no instante de tempo t versus os resíduos no instante de tempo $t - 1$. A existência de um padrão retilíneo neste gráfico é indicativa de presença de autocorrelação. Para analisar o grau de dependência dos dados pode ser utilizada a Função de Autocorrelação (ACF), dada pela correlação entre valores sucessivos da mesma série temporal, [33]. É também possível utilizar o teste de Durbin Watson, [31], que permite testar a hipótese de ausência de autocorrelação e cuja estatística de teste toma valores entre zero e quatro. Caso o valor da estatística de teste seja próximo de zero então existe autocorrelação dos resíduos.

A normalidade dos resíduos pode ser analisada através de alguns gráficos, nomeadamente o normal QQ-Plot e o histograma dos resíduos normalizados. No gráfico normal QQ-Plot visualiza-se a distribuição de probabilidades dos valores observados versus valores esperados, representada por uma diagonal. Caso a normalidade se verifique, as observações registadas aproximam-se dessa diagonal, sem nenhum afastamento significativo. No histograma dos resíduos procura-se uma aproximação evidente

¹Homoscedasticidade: Fenómeno estatístico que ocorre quando o modelo apresenta variâncias para Y e X iguais para todas as observações, ou seja, não apresenta forte dispersão dos dados em torno de uma reta.

em relação à forma simétrica da distribuição normal. Existem ainda alguns testes de normalidade, como os testes de Shapiro Wilk, Anderson Darling e Jarque Bera, [31], que permitem verificar se a distribuição de probabilidade associada a um conjunto de dados pode ser aproximada pela distribuição normal, [34].

Para analisar a linearidade averigua-se se a relação entre variáveis independentes e a variável dependente é linear, com base em gráficos de dispersão e também por análise dos resíduos. A linearidade é verificada caso os resíduos se encontrem em torno de zero, independentemente do número de observações, de forma a conseguir-se um modelo o mais preciso possível.

3.3.4 Validação do Modelo e Indicadores de Desempenho

De modo a validar a qualidade do ajuste da regressão são analisados alguns indicadores, designadamente para a regressão simples, o coeficiente de determinação R^2 e para a regressão múltipla deve utilizar-se como indicador de variabilidade explicada pelas variáveis independentes, o coeficiente de determinação ajustado R_a^2 , [35].

O coeficiente de determinação R^2 é uma medida de variabilidade explicada, e portanto, permite quantificar a capacidade explicativa do modelo, variando entre 0 e 1. Mas deve-se ter em conta que $R^2 \simeq 1$ não significa que o modelo se encontre bem ajustado, pois a adição de uma variável faz aumentar o valor deste coeficiente, mesmo que tenha muito pouco poder explicativo sobre a variável de resposta.

Assim, é preferível utilizar o coeficiente de determinação ajustado, dado pela Equação (3.6), sendo uma medida ajustada do coeficiente de determinação e que penaliza quando variáveis pouco explicativas são adicionadas, ou seja, caso se adicione variáveis inúteis, o R_a^2 diminuirá, caso contrário irá aumentar. Logo,

$$R_a^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-(k+1)} \right) (1 - R^2) \quad (3.6)$$

onde n é o número de observações e k é o número de regressores/variáveis independentes consideradas no modelo.

O coeficiente de correlação de Pearson é um indicador da existência de associação linear entre duas variáveis quantitativas, sendo obtido como se descreve em (3.7).

$$R = \frac{n \sum(x.y) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n \sum y^2 - (\sum y)^2}}, \quad -1 \leq R \leq 1 \quad (3.7)$$

onde x e y são duas variáveis quantitativas distintas e n o número de observações. Quanto mais próximo de 1 (ou 100%) estiver o valor absoluto do coeficiente de correlação, maior é a associação entre as duas variáveis. O sinal do coeficiente indica o sentido da associação, se positivo as duas variáveis variam no mesmo sentido, e se negativo variam em sentidos opostos.

Com o intuito de avaliar, numa perspectiva inferencial, a associação linear entre a variável independente e a variável dependente, realiza-se um teste de hipóteses ao coeficiente de correlação. Na hipótese nula postula-se a nulidade do coeficiente e na hipótese alternativa estabelece-se a não nulidade. Se a hipótese nula for verdadeira significa que as variáveis não estão linearmente associadas.

Como resultado do teste de hipóteses obtém-se o p-value, que se pode interpretar como um indicador da concordância entre a hipótese nula e a evidência da amostra. Assim, quando o p-value é inferior ou igual ao nível de significância fixado, usualmente 0.05, deve rejeitar-se a hipótese nula. Nesse caso conclui-se que o coeficiente de correlação é significativamente diferente de zero.

Para avaliar os resultados obtidos após a utilização do modelo desenvolvido, consideram-se três métricas: *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), *Root Mean Square Error* (RMSE) e o valor do coeficiente de correlação linear.

De modo a medir a diferença entre a previsão (y_i') e a observação (y_i), para a i -ésima observação, é utilizada a métrica de erro definida por:

$$e_i = y_i' - y_i. \quad (3.8)$$

Um bom indicador relativo do erro médio é o MAPE, e obtém-se por:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{e_i}{y_i} \right| \right) \times 100. \quad (3.9)$$

O indicador de erro MAPE é bastante útil, uma vez que simplifica a interpretação de resultados, pois é independente da escala de medida e é facilmente aplicável. Mede o erro normalizado em termos percentuais, como tal, deseja-se que o seu valor seja o mais próximo de zero. Contudo, em certos conjuntos de dados não pode ser aplicado, caso hajam observações com valores nulos, por se tornar numa divisão por zero.

O RMSE é obtido pela raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre o valor previsto e o observado, sendo dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i)^2}. \quad (3.10)$$

A utilização e interpretação do RMSE é mais apropriada quando a variável resposta segue distribuição normal, tornando-o mais sensível à detecção de *outliers*, permitindo mostrar desvios mais significativos. Este indicador apresenta a desvantagem de ser uma medida absoluta, o que a torna dependente das unidades de medida em que se encontra a variável. Neste sentido entre estes dois indicadores é preferível utilizar o MAPE, dado que é uma medida relativa. Tendo como objectivo validar o modelo ajustado, pode-se utilizar o coeficiente de correlação amostral como indicador de associação linear entre os valores previstos e os valores observados.

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se a linguagem R[®], para criação e análise dos modelos, uma vez que disponibiliza muitas ferramentas estatísticas. Utilizou-se também o SQL Server[®] para extração dos dados dos servidores.

Os testes estatísticos bilaterais consideraram-se significativos quando os respetivos *p-values* forem inferiores ao nível de significância de 0,05.

3.3.5 Regressão *Stepwise*

Em estatística, a regressão *stepwise* é um método de ajuste de modelos de regressão no qual a escolha de variáveis preditivas é realizada por um procedimento automático, [36]. Em cada passo, uma variável é considerada ser adicionada ou removida do conjunto de variáveis explicativas com base num critério pré-especificado. Geralmente, é assumida a forma de uma sequência de testes F ou testes t, mas outras técnicas são possíveis, como por exemplo o valor do R^2 ajustado. Existem três métodos para seleção de variáveis explicativas:

- **Seleção *Forward*:** O modelo inicia-se sem qualquer variável explicativa. Sendo adicionada e testada uma variável de cada vez a partir de um critério de ajuste do modelo definido. A seleção *forward* começa por escolher a variável que representa a maior variação na variável dependente (y), sendo esta a variável com maior correlação simples com y . Em cada iteração seguinte, a variável responsável por um aumento significativo da variabilidade explicada é adicionada ao modelo. A seleção continua até que todas as variáveis tenham sido testadas.
- **Eliminação *Backward*:** O modelo inicia-se com todas as variáveis explicativas candidatas. A exclusão de cada variável dependente resulta da que for responsável por um aumento menos significativo da variabilidade explicada. Repete-se este processo até que nenhuma variável possa ser eliminada sem uma perda significativa do ajuste;
- **Eliminação Bidirecional:** Trata-se da combinação dos dois métodos anteriores, testa em cada passo, a inclusão e a remoção de variáveis. Este método é mais preciso, uma vez que os dois métodos anteriores não entram em conta com o efeito que adição ou exclusão de uma variável pode ter nas contribuições de outras variáveis para o modelo (efeitos supressores). Contudo, é naturalmente um modelo que exige maior capacidade de processamento.

Se a pesquisa for finalizada quando um critério de paragem é encontrado, a seleção *forward* poderá ser computacionalmente mais eficiente, porque os testes são realizados em subconjuntos com menor número de variáveis. O método *forward* garante alguma otimização para conjuntos de variáveis pequenos, enquanto que o *backward* garante a mesma otimização para conjuntos de variáveis maiores. O método bidirecional pode apresentar perdas de performance consideráveis quando o conjunto de variáveis é muito elevado, contudo apresenta uma seleção de variáveis estatisticamente mais significativa.

3.3.6 Distribuições de probabilidade

Na teoria da probabilidade, uma distribuição de probabilidade descreve a característica aleatória inerente às variáveis associadas a uma experiência aleatória, [37]. O conceito de experiência aleatória surgiu para descrever um processo real de natureza experimental, em que o acaso intervém com resultados possíveis bem identificados.

Flutuações e variabilidade estão presentes na observação de um fenómeno, independentemente da sua natureza, além disso quase todas as medidas possuem uma parte de erro intrínseco. A distribuição de probabilidade pode modelar incertezas e descrever fenómenos físicos, biológicos, económicos, entre outros. O domínio da estatística permite o encontro das distribuições de probabilidade adaptadas aos fenómenos aleatórios.

O conceito de distribuição estatística é formalizado matematicamente pela teoria da medida, uma distribuição estatística é uma medida muitas vezes vista como uma distribuição que descreve o comportamento de uma variável aleatória discreta ou contínua, [37]. O estudo de uma variável aleatória de acordo com uma distribuição de probabilidade discreta revela o cálculo de somas e de séries, enquanto que o estudo de uma variável aleatória de acordo com uma distribuição de probabilidade absolutamente contínua revela o cálculo de integrais. As funções caracterizadoras de uma variável aleatória são a função de distribuição e a função de probabilidade, no caso discreto e a função de densidade de

probabilidade, no caso contínuo. Existem inúmeras distribuições de probabilidade, cada uma com a sua função específica. No âmbito desta dissertação interessa conhecer as apresentadas de seguida [37].

Distribuição Normal

A distribuição normal é uma das distribuições de probabilidade mais utilizadas para modelar fenómenos naturais ou dados univariados de uma população ou de uma experiência. A distribuição normal, também denominada distribuição gaussiana, é uma distribuição de probabilidade absolutamente contínua e parametrizada pela sua média (número real μ) e desvio padrão (número real positivo σ). A função de densidade de probabilidade da distribuição é dada por:

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad \sigma > 0. \quad (3.11)$$

Esta distribuição é vulgarmente denotada por $N(\mu, \sigma^2)$, a sua distribuição cumulativa é dada por:

$$F(x|\mu, \sigma) = \int_{-\infty}^x f(t|\mu, \sigma) dt. \quad (3.12)$$

Existe uma infinidade de distribuições normais, cada uma com sua própria média (μ) e desvio padrão (σ). A distribuição normal com média 0 e desvio padrão 1 é chamada de distribuição normal padrão. A distribuição normal apresenta as seguintes características:

- É simétrica em relação à média;
- Os valores de média, moda e mediana são iguais;
- A área total sob a curva é igual a 100%, com as observações distribuídas 50% à esquerda da média e os restantes 50% à direita;
- A área sob a curva normal contida no intervalo $\mu \pm \sigma$ é de 68,26%, $\mu \pm 2\sigma$ é de 95,44% e $\mu \pm 3\sigma$ é de 99,74%.

Assim sendo, a curva apresenta uma área central, em torno da média, onde se localizam os pontos com maior ocorrência. Nas caudas, possui áreas menores, progressivamente mais próximas de ambas as extremidades, em que são encontrados valores muito baixos de x (à esquerda) ou muito altos (à direita), ambos com ocorrências consideravelmente baixas.

Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson é uma distribuição de probabilidade de variável aleatória discreta que expressa a probabilidade de uma série de eventos ocorrer num certo período de tempo, se estes eventos ocorrem independentemente de quando ocorreu o último evento. Os eventos que ocorrem durante um período de tempo ou espaço devem satisfazer as seguintes condições:

1. O número de eventos que ocorrem em intervalos de tempo disjuntos são independentes;
2. O número médio de eventos, num pequeno intervalo de tempo δ é $\delta\lambda$, onde $\lambda > 0$, representa o valor médio da distribuição para um intervalo de tempo unitário;
3. É improvável que dois ou mais eventos ocorram num intervalo de tempo muito curto;

4. A probabilidade de se observar um certo número de eventos num intervalo de tempo δ depende apenas da duração de δ e não da localização do intervalo.

A probabilidade de que existam exatamente k ocorrências (onde k é um inteiro não negativo) de uma distribuição de Poisson com média λ é dada por:

$$f(k|\lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.13)$$

onde λ é um número real, igual ao número esperado de eventos que ocorrem num dado intervalo de tempo. Por exemplo, se o tempo médio entre duas ocorrências consecutivas é 2 minutos, e se se pretende saber o número médio de eventos que ocorrem num intervalo de 20 minutos, o valor de λ terá de ser recalculado, vindo $\lambda = \frac{20}{2} = 10$.

Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é vulgarmente usada para modelar o tempo de vida de um fenómeno, pois é a única distribuição, absolutamente contínua, com propriedade de falta de memória. Representa a distribuição no tempo (ou outra unidade) até à avaria dos bens de natureza complexa, com componentes de diferentes distribuições de vida, exibindo a característica de ter uma taxa de avarias constante com tempo de operação. Esta distribuição, com suporte semi-infinito, depende de um parâmetro λ (denominado de intensidade) e a sua função de densidade é definida por::

$$f(x, \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & \text{se } x \geq 0 \\ 0, & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

4

Modelo de Capacidade 3G

4.1	Introdução	46
4.2	Modelo Multidimensional Erlang B	46
4.3	Implementação do Algoritmo	49
4.3.1	Introdução	49
4.3.2	Caracterização do número de utilizadores para Voz e PS R99	50
4.3.3	Caracterização do número de utilizadores para HSDPA	53
4.3.4	Configuração da Curva de Admissão	57
4.3.5	Determinação do tráfego recolhido estatisticamente	59

Neste capítulo, começa-se por explicar o modelo usado para definir a curva de admissão que trata de especificar a capacidade máxima de uma célula 3G. De seguida mostram-se os métodos e algoritmos usados para determinar os parâmetros de entrada para aplicar o modelo.

4.1 Introdução

A curva de admissão é definida num sistema de eixos cartesianos, onde cada eixo representa o tráfego de cada serviço, em Erlang, sendo a dimensão do sistema definida pelo número de serviços que se pretende representar. Existem vários métodos de controlo de admissão possíveis de serem usados no algoritmo, contudo, nem todos são capazes de considerar multiserviços. Havendo uns métodos demasiado simplistas e/ou pouco pessimistas na determinação da capacidade de um sistema, tendo em conta a utilização de vários serviços. Estudos anteriores mostram que um bom método para ser aplicado no algoritmo é o Multidimensional de Erlang B, excluindo modelos como o *Reduced Load Approximation*, *Single Resource Intersection* e *Reduced Load Approximation with Erlang Fixed Point*, [38].

Para introduzir o modelo Multidimensional de Erlang B é necessário definir as variáveis que servirão de *inputs*, seja:

- K , Capacidade máxima de uma célula, em unidades adimensionais.
- S , Número de serviços.
- M_j , Unidades de capacidade, em unidades adimensionais, ocupadas por utilizador que usa o serviço j .
- δ_j , Probabilidade de bloqueio de QoS do serviço j (tipicamente, definido pelo operador).

4.2 Modelo Multidimensional Erlang B

O modelo Multidimensional Erlang B surgiu com a necessidade de se determinar a probabilidade de bloqueio de um grupo de fluxos independentes, tendo por base o modelo de Erlang B, usado no dimensionamento de redes de serviços de voz (PSTN, GSM, etc.). Nesta abordagem considera-se um grupo de canais lógicos numa célula e assume-se que todos os fluxos de tráfego (novos utilizadores ou *handovers*, de todos os serviços) são bem modelados com o processo de Poisson. Define-se $\lambda_{n,j}$ e $\lambda_{h,j}$ como a taxa de chegada de utilizadores novos e de *handovers*, respetivamente, $\mu_{n,j}$ e $\mu_{h,j}$ como a taxa de saída de utilizadores e de *handovers* de cada serviço j . Adicionalmente, assume-se uma distribuição exponencial para a duração do fluxo em cada serviço. Posto isto, o processo de chegada de utilizadores (novos e *handovers*), na sua totalidade, é uma sobreposição de processos de Poisson dos vários serviços, [39]. Significa que também é um processo de Poisson com taxa de chegada total, na célula, dada por

$$\lambda = \sum_{j=1}^S (\lambda_{n,j} + \lambda_{h,j}). \quad (4.1)$$

Considerando os pressupostos assumidos, o tempo total de espera é modelado por uma distribuição

hiper-exponencial, sendo definido por:

$$f(t) = \sum_{j=1}^S \frac{\lambda_{n,j} + \lambda_{h,j}}{\sum_{i=1}^S (\lambda_{n,i} + \lambda_{h,i})} (\mu_{n,j} + \mu_{h,j}) e^{-(\mu_{n,j} + \mu_{h,j})t} = \sum_{j=1}^S \frac{\lambda_j}{\lambda} \mu_j e^{-\mu_j t} \quad (4.2)$$

onde $\lambda_j = \lambda_{n,j} + \lambda_{h,j}$ e $\mu_j = \mu_{n,j} + \mu_{h,j}$ são as taxas de chegada de utilizadores e a taxa de saída de utilizadores do serviço j , respetivamente. O valor médio do tempo total de espera pode ser determinado por:

$$T_{\text{célula,total}} = \sum_{j=1}^S \frac{\lambda_j}{\lambda} \frac{1}{\mu_j} = \frac{\sum_{j=1}^S \frac{\lambda_j}{\mu_j}}{\lambda} = \frac{\sum_{j=1}^S A_j}{\lambda} = \frac{A}{\lambda} \quad (4.3)$$

onde A_j é o tráfego oferecido pelo serviço j , enquanto que A é o tráfego total oferecido na célula, que inclui todos os serviços. Este modelo tem como objetivo calcular a probabilidade de bloqueio para cada serviço, tendo em conta o tráfego oferecido em cada um. Para tal, são definidos estados dependentes do número de utilizadores em cada serviço e calculadas as probabilidades de ocorrência desses estados, a partir de um diagrama de Markov (Figura 4.1), [39]. Seja N_j o número máximo de utilizadores no serviço j , um estado definido como (i, m) , para dois serviços, e o incremento de 1, em i ou m , indica que outro utilizador está a utilizar um serviço na célula. Quer isto dizer que para o estado $(1,2)$ existe um utilizador a usar o serviço 1 e dois utilizadores a usar o serviço 2.

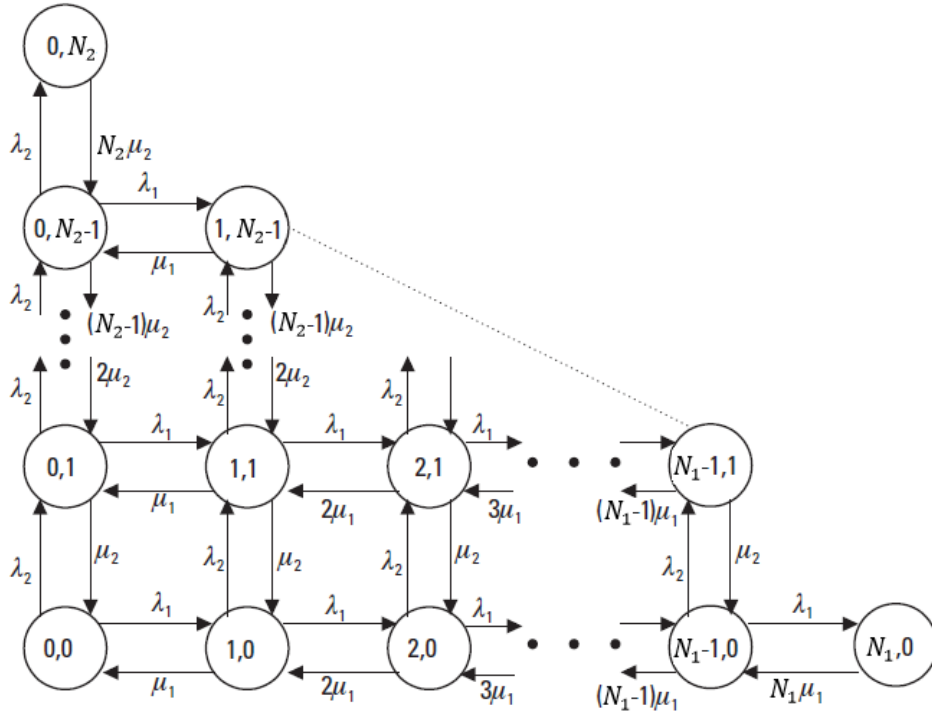


Figura 4.1: Diagrama de estados de Markov para dois serviços. [39].

Seja $p(n_1, n_2, \dots, n_j)$ o estado de probabilidade dum sistema com n_1 utilizadores no serviço 1, n_2 utilizadores no serviço 2, ... , n_S utilizadores no serviço S. Dada a independência dos utilizadores de diferentes serviços, a probabilidade de cada estado é calculada, para cada serviço individualmente, uma vez que o número máximo de utilizadores em cada serviço pode não ser igual. Sendo calculada

da seguinte forma:

$$p(n_1, n_2, \dots, n_S) = p(n_1)p(n_2)\dots p(n_S) = \prod_{j=1}^S Q_j \frac{A_j^{n_j}}{n_j!} \quad (4.4)$$

com Q_j a constante de normalização de cada serviço, que se consegue obter a partir de uma expansão binomial da distribuição de Poisson, obtendo-se para o serviço j :

$$Q_j = \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_j} \left(\frac{A_j^i}{i!}\right)}. \quad (4.5)$$

Para calcular a probabilidade de bloqueio para cada serviço, dependente do número de utilizadores em cada serviço, é necessário considerar a capacidade disponível na célula. Além disso, diferentes tipos de serviços requerem diferentes unidades de capacidade (largura de banda, Erlang, canais lógicos, potência, etc.). Assim, uma chamada de voz pode exigir apenas uma unidade de capacidade, enquanto que uma transmissão multimédia pode exigir várias unidades, em simultâneo. No entanto, a capacidade máxima da célula será igual para todos os serviços. Sendo M_j o número de unidades de capacidade exigidas por um utilizador a usar o serviço j e K a capacidade máxima da célula, então é necessário respeitar as seguintes limitações:

$$\sum_{j=1}^S M_j n_j \leq K. \quad (4.6)$$

Tendo estas limitações em conta e assumindo que não são reservadas unidades de capacidade para *handovers*, pode-se calcular a probabilidade de bloqueio para o serviço j , pela Equação 4.7.

$$P_{B,j} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{m=1}^{n_2} \dots \sum_{z=1}^{n_S} p(i, m, \dots, z). \quad (4.7)$$

Contudo, apenas são somados os valores das probabilidades de estado que cumprem a seguinte restrição:

$$K - M_j + 1 \leq iM_1 + mM_2 + \dots + zM_S \leq K. \quad (4.8)$$

Se for pretendido reservar unidades de capacidade para *handovers*, a probabilidade de bloqueio calcula-se da mesma forma, a partir da Equação 4.7, contudo a restrição a aplicar depende do número de unidades que se pretende reservar w , sendo:

$$K - (1 + w)M_j + 1 \leq iM_1 + mM_2 + \dots + zM_S \leq K. \quad (4.9)$$

Após o cálculo da probabilidade de bloqueio para cada serviço, dependendo do tráfego oferecido por cada, é comparada a probabilidade de bloqueio calculada, $P_{B,j}$, com a probabilidade de bloqueio definida como QoS, δ_j , sendo admissíveis apenas as probabilidades de bloqueio que são inferiores ou iguais à probabilidade de bloqueio de QoS ($P_{B,j} \leq \delta_j$). Uma vez que se estiverem acima, não se cumpre a QoS especificada para aquele serviço. Quer isto dizer que o tráfego de cada serviço, em Erlang, determina-se quando todas as probabilidades de bloqueio calculadas sejam superiores à probabilidade de bloqueio de QoS ($P_{B,1} > \delta_1 \wedge P_{B,2} > \delta_2 \wedge \dots \wedge P_{B,S} > \delta_S$). Significando que se

encontrou a primeira violação dos *inputs* de QoS.

4.3 Implementação do Algoritmo

Conhecido o modelo Multidimensional de Erlang B (Secção 4.2), é necessário apresentar os cálculos necessários à obtenção dos parâmetros de entrada para o modelo, nomeadamente, as unidades de capacidade de cada serviço, M_j , a máxima capacidade da célula, K , e as respetivas probabilidades de bloqueio definidas por QoS (que são definidas pelo operador), δ_j . Os parâmetros são calculados tendo em conta estatísticas reais fornecidas por um operador, tendo estes sido estudados a fim de selecionar apenas os KPIs de interesse para a implementação do modelo Multidimensional de Erlang B.

4.3.1 Introdução

Pretende-se determinar o número máximo de utilizadores possíveis de alocar a uma determinada célula, para cada serviço (N_j). Para tal, considera-se o ambiente de propagação a que a célula está sujeita e os limites de capacidade da mesma, tanto quanto possível. Uma vez que se trata de uma tecnologia multiserviço, *multirate* e multirecurso, é necessário estabelecer uma relação entre os vários serviços, de forma a ser possível dese obter um recurso que seja comum a todos os serviços. A melhor forma de se obter este recurso é a partir da potência despendida pela célula, uma vez que é comum a todos os serviços, variando apenas a potência necessária para alocar cada serviço.

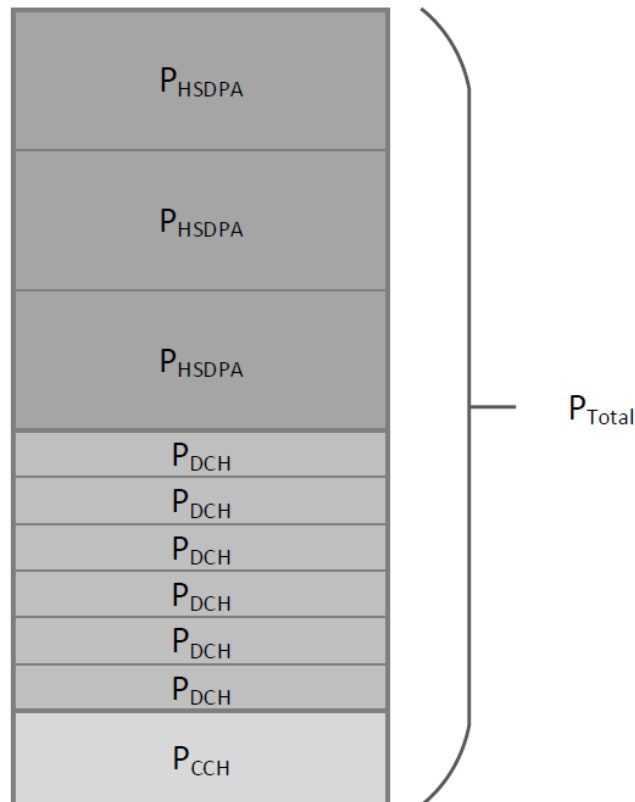


Figura 4.2: *Slots* de potência dos serviços e canais de potência. Adaptado de [38].

O objetivo passa por realizar o cálculo de *slots* de potência para cada serviço, tratando-se da

potência necessária para alocar um utilizador ao respetivo serviço e, quando somados, não podem ultrapassar a potência máxima da célula (Figura 4.2). Caso a célula tenha utilizadores suficientes, nos vários serviços, para debitar a potência máxima, significa que está no limite da sua capacidade. Para calcular o número máximo de *slots* de potência é assumido que a potência máxima da célula está alocada a um serviço de cada vez (voz, PS R99 ou HSDPA), sem esquecer de retirar a potência alocada aos canais de controlo (P_{CCH}). Desta forma, definiram-se as denominadas características da célula, $EnergyPerBit$ para voz e PS R99 e $\bar{P}_{DSCCH-TX}$ para HSDPA. As fórmulas das características foram baseadas em [40], sendo realizadas melhorias porque a característica não era totalmente representativa do comportamento das células, principalmente nas taxas de escalonamento (TTI) e de dados.

A potência total da célula será o somatório das várias potências alocadas aos vários canais que transportam os serviços.

$$P_{Total} = \sum P_{HSDPA} + \sum P_{DCH} + P_{CCH}. \quad (4.10)$$

Estas características da célula são determinadas tendo em conta as estatísticas reais retiradas de células, ou seja os KPI. De forma ajustar o modelo para se obter um limite de capacidade com maior precisão possível.

4.3.2 Caracterização do número de utilizadores para Voz e PS R99

Os utilizadores de voz e PS R99 são alocados nos canais dedicados (DCH), que transportam vários serviços, como os AMR com diferentes débitos binários e os vários PS R99 (8, 16, 32, 64, 128, 144, 256 e 384 kbps). Apesar dos utilizadores de voz e PS R99 partilharem os mesmos canais de transporte de dados, pretende-se separar estes dois serviços para efeito de cálculo da capacidade da célula, onde:

- **Voz** - O débito do serviço de voz é constituído por todos os débitos do AMR (4.75, 5.15, 5.9, 6.7, 7.4, 7.95, 10.2 e 12.2 kbps) e por CS a 64 kbps.
- **PS R99** - O débito do serviço PS R99 é contituído por todos os débitos disponíveis em PS (8, 16, 32 ,64 128, 144, 256 e 384 kbps).

Foram analisadas estatísticas de 4 células a que se teve acesso, conclui-se que os utilizadores de voz utilizam praticamente apenas o AMR 12.2 kbps (Figura 4.3a) e que os utilizadores de PS R99 utilizam maioritariamente o débito de 8 kbps e, em seguida, o de 64 kbps (Figura 4.3b), sendo estes consideravelmente menos que os utilizadores de voz. Apesar disso, o algoritmo tem em consideração todos os débitos mencionados, uma vez que se não existirem utilizadores, é possível retirar esses débitos do cálculo da característica de célula, caso estatisticamente não façam sentido incluir. Assim, consideram-se todos os débitos disponíveis, já que as redes dos operadores podem ter células que usem os débitos que, estatisticamente, são desprezáveis, nas células cujos dados foram coletados.

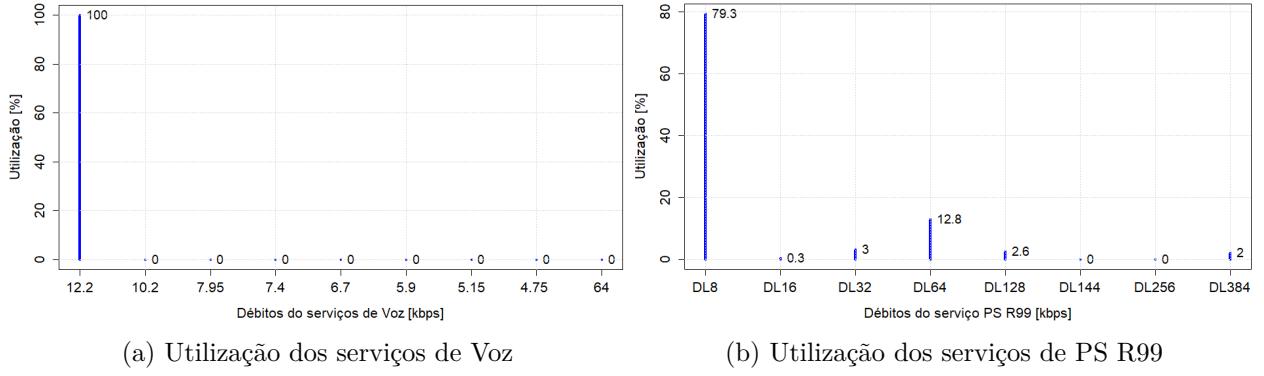


Figura 4.3: Utilização dos serviços de Voz e dados PS R99.

Como estes serviços partilham os mesmos canais de dados (DCH), é necessário determinar qual a potência que está a ser utilizada para esses mesmos canais. Para tal, assumindo que a potência está alocada apenas ao serviço de voz e PS R99 (não usa HSDPA), a potência é dividida pelos canais dedicados (DCH) e de controlo (*Control Channel* (CCH)). Sendo a soma dos dois a potência total utilizada, denominada de $P_{TOTNonHS}$ (Equação 4.11).

A potência dos canais de controlo (P_{CCH}) é determinada pelas estatísticas dos KPIs, uma vez que está sempre presente, mesmo quando não existe tráfego de dados. Desta forma, consegue-se determinar a potência alocada aos canais de controlo ao medir a potência total transmitida ($P_{TOTNonHS}$) quando há pouco ou não existe tráfego de dados. Nesta situação, assume-se que $P_{TOTNonHS} = P_{CCH}$, que acontece, tipicamente, durante a noite. Sabendo a potência dos canais de controlo, pode-se determinar a potência alocada aos canais dedicados, nas restantes horas do dia.

$$P_{TOTNonHS}(W) = P_{CCH} + P_{DCH} \Leftrightarrow P_{DCH} = P_{TOTNonHS} - P_{CCH}. \quad (4.11)$$

Uma vez que existem estatísticas de 24 horas por dia com uma granularidade de 30 minutos, é possível encontrar uma meia hora sem tráfego ou, pelo menos, com o mínimo possível para determinar a potência dos canais de controlo (P_{CCH}). A potência total transmitida sem HSDPA ($P_{TOTNonHS}$) é obtida pelo KPI $VS.MeanTCP.NonHS$, para determinar a potência alocada aos serviços de voz e PS R99 (P_{DCH}).

Para determinar o número máximo de utilizadores para estes serviços é necessário calcular a característica da célula para ambos os *EnergyPerBit*, que se trata de uma relação entre o tráfego e a potência transmitida da célula. Esta pode ser vista como:

$$EnergyPerBit(mJ/kb) = \frac{\sum_{samples}(P_{DCH} \times R_{MAC-d}^2)}{\sum_{samples}(R_{MAC-d} \times R_{MAC-d}^2)} \quad (4.12)$$

onde *samples* designa todas as estatísticas recolhidas da célula, em períodos de meia hora, durante os vários dias. R_{MAC-d} trata-se do débito binário igualmente retirado das estatísticas para os canais DCH, em DL. No serviço de voz os KPIs fornecem o número médio de utilizadores para os vários débitos. Pelo que é necessário multiplicar os respetivos débitos pelo número de utilizadores para se determinar o débito total para a voz. Já para os serviços PS R99, os KPIs oferecem o débito total usado pelos vários utilizadores em cada um dos débitos possíveis, bastando para isso realizar o somatório.

$$R_{MAC-d_{[voz]}}(kbps) = \sum \bar{n}_i \times i \quad (4.13)$$

sendo $i = [4.75, 5.15, 5.9, 6.7, 7.4, 7.95, 10.2, 12.2, 64]$ kbps e \bar{n}_i o número médio de utilizadores retirados dos KPIs, respeitante a cada débito. Para o serviço PS R99, é apenas o somatório dos débitos médios retirados dos KPIs, como já referido, quer para serviços interativos (\bar{R}_{Int}), *streaming* (\bar{R}_{Str}) e em *background* (\bar{R}_{Bkg}).

$$R_{MAC-d_{[PSR99]}}(kbps) = \sum (\bar{R}_{Int_m} + \bar{R}_{Bkg_m} + \bar{R}_{Str_m}) \quad (4.14)$$

com $m = [8, 16, 32, 64, 128, 144, 256, 384]$.

O *EnergyPerBit* é calculado a partir de uma RLM, a partir da potência utilizada pela célula ($P_{TOTNonHS}$) e dos débitos calculados para o serviço de voz ($R_{MAC-d_{[voz]}}$) e PS R99 ($R_{MAC-d_{[PSR99]}}$), fazendo uma adaptação da Equação 4.11, ao substituir o P_{DCH} :

$$P_{TOTNonHS}(W) = EnergyPerBit_{voz} \times R_{MAC-d_{[voz]}} + \\ + EnergyPerBit_{PSR99} \times R_{MAC-d_{[PSR99]}} + P_{CCH}. \quad (4.15)$$

A ideia, inicialmente, para o cálculo do P_{CCH} seria, a partir de medições da potência da célula, nas horas de menor tráfego. Contudo, tendo em consideração a necessidade de realizar um modelo RLM para determinar as características da célula para os serviços de voz e PS R99, decidiu-se realizar um primeiro modelo RLM com vários KPIs de forma a determinar, com maior precisão, o valor de P_{CCH} e, conseqüentemente, reduzir o erro na previsão da capacidade da célula. O método adotado para determinar o P_{CCH} é apresentado, em maior detalhe, no Capítulo 6.

Para se determinar o número máximo de utilizadores para os serviços de voz e PS R99, tira-se partido novamente dos dados estatísticos de forma a calcular a percentagem que cada débito tem na contribuição do débito total, $R_{MAC-d_{[voz]}}$ e $R_{MAC-d_{[PSR99]}}$, respetivamente.

Para o serviço de voz é possível calcular o número máximo de utilizadores pela seguinte Equação:

$$N_{powerslots(Voz)} = N_{users(Voz)} = \sum \left(\underbrace{\frac{\bar{n}_i \times i}{R_{MAC-d_{[voz]}}}}_{\text{percentagem}} \times \underbrace{\frac{P_{Total} - P_{CCH}}{EnergyPerBit_{voz}} \times i}_{N_{users}i} \right) \quad (4.16)$$

sendo, mais uma vez, $i = [4.75, 5.15, 5.9, 6.7, 7.4, 7.95, 10.2, 12.2, 64]$ kbps e P_{Total} a potência máxima que a célula consegue transmitir. Basicamente, calcula-se o número máximo de utilizadores em cada débito (sendo sempre arredondado para baixo, pois não existem meios utilizadores) considerando a contribuição de cada débito, em percentagem, para o débito total. Para o serviço de PS R99 o cálculo é idêntico.

$$\begin{aligned}
N_{powerslots(PSR99)} &= N_{users(PSR99)} = \\
&= \sum \left(\underbrace{\frac{\bar{R}_{Int_m} + \bar{R}_{Bkg_m} + \bar{R}_{Str_m}}{R_{MAC-d[PSR99]}}}_{\text{percentagem}} \times \underbrace{\frac{(P_{Total} - P_{CCH})}{EnergyPerBit_{PSR99}} \times m}_{N_{users}m} \right) \quad (4.17)
\end{aligned}$$

sendo $m = [8, 16, 32, 64, 128, 144, 256, 384]$. Mais uma vez, determina-se o número máximo de utilizadores por cada débito e o peso de cada valor calculado entra para o número máximo de utilizadores total consoante a contribuição de cada débito para o débito total do serviço PS R99.

Falta perceber como se determina o número máximo de utilizadores para o serviço HSDPA, que requer outros pressupostos.

4.3.3 Caracterização do número de utilizadores para HSDPA

Um aspeto crítico no modelo de capacidade 3G está na modelação e análise do serviço HSDPA, de forma a se conseguir visualizar e caracterizar o desempenho de alta velocidade (*High Speed* (HS)) que o utilizador experiencia. Ao contrário dos serviços de voz e PS R99, o tráfego HSDPA é transportado num canal HS semelhante ao DCH (HS-DSCH) que consome recursos que poderiam ser alocados aos restantes serviços (não HSDPA). Este canal transporta tráfego HSDPA, em DL, e é partilhado pelos vários utilizadores. O acesso ao canal HS-DSCH é controlado por um escalonador rápido e para obter acesso é necessário que o utilizador seja escalonado para o efeito, pois nem todos os utilizadores estão em atividade ao mesmo tempo. O intervalo de tempo de transmissão (TTI) é de 2 ms, como já referido, onde são escalonados apenas alguns utilizadores para receber tráfego.

O HSDPA faz uso eficiente dos vários recursos disponíveis após os requisitos de todos os canais DCH estarem satisfeitos, a partir do qual começa a consumir potência, CC de SF 16 em DL e largura de banda da *interface Iub*. Pelo que, para além de prever a probabilidade de bloqueio para cada serviço, é necessário estimar a disponibilidade de recursos para os utilizadores HSDPA de forma a garantir um determinado débito de QoS (R_{target}). Para tal, é necessário estimar os recursos HSDPA por utilizador, que devem refletir tanto o débito de QoS como o ambiente rádio sentido pelos utilizadores em cada célula.

Para o HSDPA, a determinação da característica da célula requer a criação de um parâmetro de entrada do modelo, uma vez que o débito para cada utilizador é variável. Desta forma, é estabelecido um valor de referência como parâmetro de QoS, denominado de R_{target} , que entrará no cálculo da característica da célula.

A característica da célula é a potência necessária para servir um utilizador, denominada de $\bar{P}_{DSCH-TX}$, para um determinado débito (R_{target}). Fazendo analogia à Figura 4.2, a $\bar{P}_{DSCH-TX}$ é a potência de um *slot* P_{HSDPA} .

Esta característica deve refletir o ambiente rádio sentido pelos utilizadores, o que significa que pode variar em cada meia hora de estatísticas recolhidas e analisadas, dependendo da variação do ambiente de propagação. Contudo, para efeitos de cálculo da capacidade assume-se, como referência,

a *busy hour*, por ser a hora em que mais utilizadores existem e um maior volume de tráfego é gerado, desta forma a capacidade da célula terá em conta o pior caso para evitar um subdimensionamento.

A $\bar{P}_{DSCCH-TX}$ é calculada com base na potência a ser usada pela célula para o serviço HSDPA, numa relação de parâmetros que indica a utilização dos TTIs e, por outra relação que indica a taxa de dados atribuída aos utilizadores, originando na Equação 4.18.

$$\bar{P}_{DSCCH-TX}(W) = \frac{\bar{P}_{HSDPA} \times d \times \eta}{I_{TTI}} \quad (4.18)$$

onde \bar{P}_{HSDPA} é a potência média utilizada pela célula para o serviço HSDPA, d é o *duty cycle*, η é o *activity factor*, que representa os utilizadores ativos no escalonamento e I_{TTI} é o intervalo entre os tempos de TTI.

A potência média, \bar{P}_{HSDPA} , é calculada pelos KPIs, sendo esta igual à diferença entre os KPI $VS.MeanTCP$ (potência total da célula, em média) e $VS.MeanTCP.NonHS$. O *duty cycle*, d , trata-se de uma relação entre débitos, nomeadamente o débito de QoS (R_{target}) e o débito máximo alcançável por um utilizador num dado TTI, consoante as condições rádio ($R_{achievable}$), que é dada por:

$$d = \frac{R_{target}}{R_{achievable(MAC-hs)}}. \quad (4.19)$$

O *duty cycle* servirá para fazer um equilíbrio da potência, de acordo com o débito de dados que a célula deve alcançar e o débito que consegue, no máximo, proporcionar a cada utilizador, de acordo com as condições rádio sentidas, ou seja, o CQI mais reportado pelos utilizadores. Servindo também para adaptar a potência necessária à necessidade dos utilizadores, a fim de evitar desperdício de potência.

Como já referido, o R_{target} é um parâmetro para avaliação de QoS e, como tal, é um parâmetro que será definido pelo operador. O $R_{achievable}$ foi apresentado na Secção 2.1 e adaptado de [40], onde se adicionou o parâmetro *Block Error Rate* (BLER), de forma a que o débito alcançável calculado seja o mais próximo da realidade, atendendo aos vários fatores que podem influenciar esse valor, para além de se conseguir obter o valor a partir das estatísticas, [41]. O $R_{achievable}$ é então calculado segundo a Equação 4.20.

$$R_{achievable(MAC-hs)} = \frac{V_{TBS} \times (1 - BLER)}{0.002 \times I_{TTI}}. \quad (4.20)$$

Conforme explicado na Secção 2.1, o débito binário alcançável depende do CQI, uma vez que o V_{TBS} é atribuído consoante a categoria do UE e o CQI reportado pelo mesmo. Nas estatísticas, existem KPIs que contém os valores de CQIs reportados pelos UEs, como anunciado no Anexo B, denominados de $VS.UsedCQI$, que varia de 0 a 39. No entanto, a soma dos CQIs usados é diferente do número médio de utilizadores HSDPA, obtido pelo KPI $VS.HSDPA.UE.Mean.Cell$, pois um utilizador pode enviar mais que um *report* do CQI.

Para resolver esta situação, de forma a se determinar qual o valor de CQI a usar e, conseqüentemente, o valor do V_{TBS} a aplicar no cálculo do $R_{achievable(MAC-hs)}$, é calculada a *Cumulative Distribution Function* (CDF) dos *reports* de CQI a fim de se determinar a mediana de cada dia, na *busy hour*.

O motivo de se utilizar a mediana e não a média, por exemplo, é que a mediana não é influenciada por valores extremamente altos ou baixos, como a média, assim consegue-se determinar o valor à qual metade dos *reports* estão abaixo e a outra metade está acima.

Depois de determinada a mediana do CQI para cada dia, é preciso calcular a categoria do UE. Os valores estatísticos são retirados do KPI *VS.HSDPA.UE.Mean.CAT*, para cada dia, que varia de 1 a 38. Uma vez que a soma de todos os valores retirados do KPI da categoria do UE é igual à média de utilizadores HSDPA medidos, retirados do KPI *VS.HSDPA.UE.Mean.Cell*. Tendo os valores da categoria usada em cada dia, é necessário consultar a tabela representada na Figura 4.4, para se determinar qual a tabela de CQIs a consultar, consoante a categoria obtida [42].

Category	Used CQI mapping table								
	MIMO not configured		MIMO configured and single-stream restriction not configured				MIMO and single-stream restriction configured		
	64QAM not configured	64QAM configured	64QAM not configured		64QAM configured		64QAM not configured	64QAM configured	
			In case of type B or single transport block type A CQI reports	In case of dual transport block type A CQI reports	In case of type B or single transport block type A CQI reports	In case of dual transport block type A CQI reports			
1-6	A	N/A						A	N/A
7 and 8	B	N/A						B	N/A
9	C	N/A						C	N/A
10	D	N/A						D	N/A
11 and 12	E	N/A							
13	C	F	N/A				C	F	
14	D	G	N/A				D	G	
15	C	N/A	C	H	N/A				
16	D	N/A	D	I	N/A				
17	C	F	C	H	N/A		N/A	F	
18	D	G	D	I	N/A		N/A	G	
19	C	F	C	H	F	J	N/A		
20	D	G	D	I	G	K	N/A		
21	C	N/A						C	N/A
22	D	N/A						D	N/A
23	C	F	N/A				C	F	
24	D	G	N/A				D	G	
25	C	N/A	C	H	N/A			N/A	
26	D	N/A	D	I	N/A			N/A	
27	C	F	C	H	F	J	N/A		
28	D	G	D	I	G	K	N/A		
29 and 31	D	G	N/A				D	G	
30 and 32	D	G	D	I	G	K	N/A		
33 and 35	D	G	N/A				D	G	
34 and 36	D	G	D	I	G	K	N/A		
37 and 38	D	G	D	I	G	K	N/A		

Figura 4.4: Mapeamento da categoria dos UE para as tabelas de CQIs. [42].

Sabendo qual a tabela de CQIs a consultar (de A a K), é escolhido o TBS que corresponde à mediana do CQI determinado para cada dia. As várias tabelas de CQIs podem ser consultadas em [42], sendo apenas apresentada a tabela D (Figura 4.5) por ser a mais usada, tendo em consideração os dados disponibilizados.

CQI or CQIs value	Transport Block Size	Number of HS-PDSCH	Modulation	Reference power adjustment Δ	NIR	X_{rv} or X_{rvpb}
0	N/A	Out of range				
1	137	1	QPSK	0	28800	0
2	173	1	QPSK	0		
3	233	1	QPSK	0		
4	317	1	QPSK	0		
5	377	1	QPSK	0		
6	461	1	QPSK	0		
7	650	2	QPSK	0		
8	792	2	QPSK	0		
9	931	2	QPSK	0		
10	1262	3	QPSK	0		
11	1483	3	QPSK	0		
12	1742	3	QPSK	0		
13	2279	4	QPSK	0		
14	2583	4	QPSK	0		
15	3319	5	QPSK	0		
16	3565	5	16-QAM	0		
17	4189	5	16-QAM	0		
18	4664	5	16-QAM	0		
19	5287	5	16-QAM	0		
20	5887	5	16-QAM	0		
21	6554	5	16-QAM	0		
22	7168	5	16-QAM	0		
23	9719	7	16-QAM	0		
24	11418	8	16-QAM	0		
25	14411	10	16-QAM	0		
26	17237	12	16-QAM	0		
27	21754	15	16-QAM	0		
28	23370	15	16-QAM	0		
29	24222	15	16-QAM	0		
30	25558	15	16-QAM	0		

Figura 4.5: Mapeamento da categoria dos UE para as tabelas de CQIs. [42].

Relativamente ao BLER, este é calculado a partir das estatísticas, recorrendo a alguns KPIs, estando a fórmula do cálculo deste parâmetro representada na Equação 4.21.

$$BLER = \frac{VS.NackTotal + VS.DtxTotal}{VS.NackTotal + VS.AckTotal + VS.DtxTotal} \quad (4.21)$$

Os KPIs aplicados ao cálculo do BLER estão descritos no Anexo B. O BLER, tal como nos restantes parâmetros, é calculado para cada dia, na *busy hour*, por ser a hora em que é provável haver mais ocorrências de falha de pacotes. Por fim, falta calcular o I_{TTI} para se poder determinar o $R_{achievable}(MAC-hs)$. O I_{TTI} , na melhor das hipóteses, pode ser de 1 ms, nesta situação obtém-se o máximo do $R_{achievable}(MAC-hs)$, contudo para o cálculo da característica da célula, em HSDPA

($\bar{P}_{DSCH-TX}$), não é necessário determinar o I_{TTI} , uma vez que desenvolvendo a Equação 4.18 este parâmetro desaparece. Ao substituir o *duty cycle* (d) e o $R_{achievable(MAC-hs)}$ pelas Equações 4.19 e 4.20, respetivamente, obtêm-se:

$$\begin{aligned}\bar{P}_{DSCH-TX}(W) &= \frac{\bar{P}_{HSDPA} \times R_{target(MAC-hs)} \times \eta}{I_{TTI} \times R_{achievable(MAC-hs)}} = \\ &= \frac{\bar{P}_{HSDPA} \times R_{target(MAC-hs)} \times \eta \times 0.002 \times \cancel{I_{TTI}}}{\cancel{I_{TTI}} \times V_{TBS} \times (1 - BLER)} = \\ &= \frac{\bar{P}_{HSDPA} \times R_{target(MAC-hs)} \times \eta \times 0.002}{V_{TBS} \times (1 - BLER)}. \quad (4.22)\end{aligned}$$

De modo a se poder determinar a característica da célula para HSDPA, é necessário determinar o *activity factor* para cada dia, novamente na *busy hour*, sendo apenas a razão de dois KPIs:

$$\eta = \frac{VS.HSDPA.All.ScheduledNum}{VS.HSDPA.DataTtiNum.User} \quad (4.23)$$

A designação dos KPI pode ser consultada, igualmente, no Anexo B. Por fim, calcula-se a característica da célula para cada dia disponível nas estatísticas, na *busy hour*, que terá valores diferentes nos vários dias, pois os parâmetros envolvidos variam. Uma vez que para determinar o número máximo de utilizadores é necessário um valor da característica, esta é determinada pela média dos valores calculados para cada dia. Sendo esta a real característica da célula, para o serviço HSDPA. O número máximo de utilizadores HSDPA, na célula, é determinado assumindo que toda a potência disponível (depois de retirada a potência para os canais de controlo) é alocada aos utilizadores HSDPA, tal como para os outros serviços.

$$N_{powerslots(HSDPA)} = N_{users(HSDPA)} = \frac{P_{Total} - P_{CCH}}{\bar{P}_{DSCH-TX}}. \quad (4.24)$$

4.3.4 Configuração da Curva de Admissão

Para determinar a curva de admissão é usado o modelo Multidimensional de Erlang B, apresentado na Subsecção 4.2.

O Vetor M e a capacidade K são construídos tendo em conta o número máximo de utilizadores / *power slots* para cada serviço. O objetivo é encontrar uma proporcionalidade entre os dois serviços, de forma a que se obtenha o mesmo K ao multiplicar a unidade de capacidade de cada serviço (M_j) pelo número máximo de utilizadores desse mesmo serviço (N_j). Isto porque um serviço que tenha um número máximo de utilizadores superior aos outros serviços, significa que a unidade de capacidade necessária por utilizador é inferior, ou seja, é um serviço menos exigente. Naturalmente, ao comparar o serviço de voz com o serviço HSDPA, o serviço de voz terá naturalmente maior capacidade de utilizadores que o serviço HSDPA, pois é um serviço muito menos exigente. Contudo, pode acontecer casos em que o oposto também se verifique, caso, por exemplo o R_{target} seja pouco exigente.

Para se obter a proporcionalidade entre serviços calcula-se o Mínimo Múltiplo Comum (Least Common Multiple (LCM)) entre o número máximo de utilizadores de cada serviço, sendo esse o valor

de K . Como tal, a unidade de capacidade de cada serviço (M_j) será a razão entre o valor de K calculado e o número máximo de utilizadores do respetivo serviço. Isto aplica-se apenas para dois serviços:

$$K = \text{lcm}(N_{users(\text{Service1})}, N_{users(\text{Service2})}) \Rightarrow M_j = \frac{K}{N_{users(\text{Service}j)}}. \quad (4.25)$$

Quando se pretende representar três serviços na curva de admissão que, neste caso, passa a ser uma região/plano de admissão, são necessárias mais iterações para encontrar o LCM entre os três serviços. Nesse caso, calcula-se o mínimo múltiplo comum (LCM) para todas as combinações dos vários serviços, que origina três valores como possíveis divisores comuns. De seguida encontram-se os dois valores mais altos e faz-se novamente o LCM entre esses dois (caso não sejam iguais), sendo esse valor o K final. A partir daí, o cálculo do vetor M é realizado da mesma forma. Como exemplo e para esclarecer melhor a forma do cálculo de K , realizou-se a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Exemplo para encontrar mínimo múltiplo comum para 3 serviços.

N_{Users}	lcm(43,22)	lcm(43,17)	lcm(22,17)	$K = \text{lcm}(946,731)$	M
43					374
22	946	731	374	16082	731
17					946

Outro *input* do modelo é a probabilidade de bloqueio. Para o serviço de voz, a probabilidade de bloqueio é, tipicamente, entre 1 e 2%, definido pelo operador [43]. Para os restantes serviços, PS R99 e HSDPA, não existe nenhuma definição de probabilidade de bloqueio, pois não se tratam de sistemas de comutação de circuitos, mas sim de pacotes. Contudo, para se poder utilizar o modelo Multidimensional de Erlang B, é necessário definir uma probabilidade de bloqueio. Para o HSDPA, a probabilidade de bloqueio será a de um utilizador ter um débito inferior ao do R_{target} . Uma vez que o número de utilizadores HSDPA, nas estatísticas, é um valor médio e que a distribuição dos CQIs reportados segue uma distribuição *log-normal*, como anunciado em [44] "A *log-normally distributed CQI measurement error at the UE with a standard deviation of 1 dB*", é possível assumir que o número de utilizadores HSDPA que têm um débito inferior ao débito médio é igual ao número de utilizadores HSDPA com débitos superiores referente a esse mesmo débito médio. Quer isto dizer que a média do débito é igual à mediana, como tal, a probabilidade de bloqueio para o serviço HSDPA pode ser assumida como 50%.

Para o serviço PS R99, a situação é idêntica ao serviço HSDPA, uma vez que em *packet switching* o débito é variável, pelo facto do meio de propagação ser inconstante, poder haver congestionamentos na rede, poder haver retransmissões de pacotes, etc. Quer isto dizer que se pode assumir que a probabilidade de todos os utilizadores, por exemplo, do serviço PS R99 a 8 kbps, terem débitos inferiores ou superiores a este débito médio pode ser de 50%, como para o serviço HSDPA. Uma vez que uns utilizadores estarão em melhores condições rádio que outros, significa que alguns podem ter mais que 8 kbps e outros menos. Sendo que o mesmo se aplica para os restantes débitos possíveis.

Como tal, a probabilidade de bloqueio para o serviço PS R99 está associada com a probabilidade de se conseguir obter um débito médio, por utilizador, no valor definido para o respetivo serviço. Por exemplo, para o serviço PS R99 64 kbps, haver pelo menos 50% dos utilizadores com um débito médio igual a 64 kbps.

4.3.5 Determinação do tráfego recolhido estatisticamente

A curva de admissão é representada, nos seus eixos, em Erlang. O que significa que as estatísticas de cada serviço têm que ser convertidas para essa unidade de tráfego. Para o serviço de voz, o Erlang já é uma unidade usada, pelo que a conversão é direta. Para tal, usa-se a Equação 4.26, onde é realizado o somatório do número de utilizadores médio, retirado dos KPI, em cada débito disponibilizado para voz.

$$A_{[Voz]} = \frac{\sum (\bar{n}_i) \times gran}{60} \quad (4.26)$$

onde, como já referido, $i = [4.75, 5.15, 5.9, 6.7, 7.4, 7.95, 10.2, 12.2, 64]$ e $gran$ é a granularidade das amostras, neste caso de 30 minutos. Na Tabela 4.2 apresentam-se alguns exemplos com estatísticas reais.

Tabela 4.2: Tráfego de voz das estatísticas

Célula	Dia	Hora	Nº Médio Utilizadores	Tráfego [Erl]
A	27/04	9:30	15,38	7,69
	01/05	12:30	5,58	2,79
B	22/05	17:00	4,05	2,02
	26/05	20:30	3,85	1,92

Para calcular o tráfego, em Erlang, para o serviço PS R99, é usada a Equação 4.27, onde $\lambda_{m[dados]}$ é o tráfego, em bps, retirado dos KPIs e $\mu_{m[dados]}$ é a capacidade do canal, também em bps, [45]. Por exemplo, para o serviço PS R99 a 8 kbps, o $\mu_{m[dados]} = 8$ kbps. Para o serviço PS R99 a 64 kbps, o $\mu_{m[dados]} = 64$ kbps.

$$A_{[PSR99]} = \sum \frac{\lambda_{m[dados]}}{\mu_{m[dados]}} \quad (4.27)$$

sendo $m = [8, 16, 32, 64, 128, 144, 256, 384]$ os vários débitos disponíveis no serviços PS R99 e, consequentemente, a capacidade de canal. De igual forma, apresentam-se, na Tabela 4.3, alguns exemplos da conversão de dados para Erlang.

Tabela 4.3: Tráfego de PS R99 das estatísticas

Célula	Dia	Hora	Tráfego [kbps]	Capacidade do Canal [kbps]	Tráfego [Erl]
A	27/04	9:30	6,03	8	0,75
	01/05	12:30	17,65 / 21,21	8 / 64	2,54
B	22/05	17:00	5,73	8	0,72
	26/05	20:30	14,01	8	1,75

Para o serviço HSDPA, parte-se da Equação 4.27, contudo é preciso fazer umas adaptações. Uma vez que o serviço HSDPA não tem um débito definido por canal, como os serviços de voz e PS R99 têm, sendo variável consoante o tipo de serviço a ser prestado, em que uns exigem maiores débitos que outros. Por exemplo, ver um vídeo, em *streaming*, exige maior débito que consultar uma página Web. A primeira ideia para definir um débito de canal para HSDPA foi utilizar o R_{target} , uma vez que era um valor estático, mas, desta forma, as estatísticas iriam alterar quando se alterasse o valor de R_{target} . O que impossibilita uma comparação entre duas curvas com valores de R_{target} diferentes, pois as estatísticas eram influenciadas pelo R_{target} . Como tal, a alternativa passou por usar o $R_{achievable(MAC-hs)}$, já que este débito era determinado tendo em conta as condições de propagação rádio a que a célula está sujeita e define o débito máximo, por TTI, que um utilizador consegue obter. Introduziu-se, para o cálculo do tráfego do serviço HSDPA, em Erlang, uma relação de débitos, em bps.

$$ratio = \frac{R_{UtilizadorHSDPA[Amostra]}}{R_{achievable(MAC-hs)}}. \quad (4.28)$$

Além disso, o serviço HSDPA não usa todos os TTI, como descrito anteriormente, com o KPI $VS.HSDPA.All.ScheduledNum$. O que significa que, para o caso do HSDPA, é possível saber a quantidade de meia hora (granularidade dos dados) em que são realmente transmitidos dados. Tendo em conta que um TTI tem a duração de 2 ms e uma hora tem 3,6e6 ms, o tráfego, em Erlang, é determinado segundo a Equação 4.29.

$$A_{[HSDPA]} = VS.HSDPA.UE.Mean.Cell \times ratio \times \frac{VS.HSDPA.All.ScheduledNum \times 2ms}{3,6e6}. \quad (4.29)$$

Para o serviço HSDPA, alguns exemplos são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Tráfego de HSDPA das estatísticas

Célula	Dia	Hora	Nº Médio	KPI	$R_{achievable}$	$R_{UtilizadorHSDPA}$	Tráfego
			Utilizadores	All.ScheduledNum	[Mbps]	[Mbps]	[Erl]
A	27/04	13:30	14,42	644400	1,24	0,498	2,07
	01/05	01:00	20,77	652500	1,26	0,594	3,55
B	22/05	16:00	12,71	368550	2,49	2,28	2,38
	26/05	17:00	41,54	852300	1,81	0,893	9,70

5

Modelo de Capacidade 4G

5.1	Introdução	62
5.2	Primeiro Método: Determinação do número máximo de utilizadores	62
5.2.1	Primeira abordagem	63
5.2.2	Segunda abordagem	65
5.3	Segundo Método: Capacidade máxima de tráfego	65
5.3.1	Monitorização de recursos da célula	66
5.3.2	Estimativa do ritmo de transmissão máximo da célula	67

Neste capítulo, descrevem-se os vários passos que foram dados no desenvolvimento do modelo de capacidade 4G, onde, inicialmente, se tentou criar um modelo RLM para os vários serviços e aplicar um modelo idêntico ao utilizado no modelo de capacidade 3G, para delinear a curva de admissão. Contudo, devido à dependência com os dados, não foi possível aplicar um modelo com separação dos serviços, uma vez que era usado, essencialmente, apenas um dos serviços. Como tal, o modelo tenta estabelecer o débito máximo da célula e, a partir de certos dados da mesma, é verificado se os requisitos de QoS estão a ser cumpridos.

5.1 Introdução

Pretende-se estimar a capacidade máxima de uma célula 4G a partir de um modelo RLM que tente descrever a percentagem de utilização média dos PRBs, na célula, onde as variáveis independentes são os KPIs obtidos da mesma. Tendo em consideração que se usaram modelos estatísticos, foi necessário realizar processos de limpeza dos dados e preenchimento dos valores omissos, quando se tinham dados suficientes para o efeito. Numa primeira abordagem foram analisados os dados e as suas várias *features* para se perceber se seria possível aplicar um modelo que diferenciasse os vários serviços disponíveis na tecnologia LTE. De seguida, usaram-se modelos estatísticos (como o método de seleção de variáveis *stepwise*) para eliminar *features* que não tivessem importância para descrever a variável dependente (percentagem de utilização média de PRBs) ou que fossem demasiado correlacionadas com a mesma. O objetivo começou por se tentar estimar o número máximo de utilizadores na célula por serviço. Para tal, uma das variáveis independentes tinha que ser a *feature* que contava o número médio e/ou máximo dos utilizadores por serviço. A partir do modelo RLM, o objetivo seria forçar a percentagem de utilização de PRBs para 100% e determinar o número de utilizadores ao isolar essa *feature* no modelo RLM. Para os dados que se utilizou, não foi possível de distinguir o tráfego por serviço, uma vez que a maioria dos serviços não continha dados e como tal, não eram considerados como variáveis independentes do modelo estatístico. Como tal, decidiu-se usar o mesmo método para determinar o número máximo de utilizadores para a célula toda, independentemente do serviço, o que originou alguns resultados. Mas, tendo em conta que apenas um serviço tinha dados suficientes para se estimar o número de utilizadores, não foi possível aplicar o modelo desta forma, sendo necessária outra abordagem.

O objetivo desta nova abordagem passa por estimar a capacidade máxima de tráfego de cada célula para um sistema LTE, sob específicas e diferentes restrições para cada ambiente de tráfego. É baseado em dados de desempenho da rede como CQI, MCS e latências.

5.2 Primeiro Método: Determinação do número máximo de utilizadores

Para a realização do modelo de capacidade 4G foram utilizados dados de 2 meses com granularidade horária, e com cerca de uma centena de KPIs.

Começou-se por limpar e realizar o preenchimento de amostras em falta (com valores *Not Available*

(NA), *Not a Number* (NaN) ou *Not In List* (NIL)), a partir do estudo estatístico dos restantes dados. Existem inúmeros métodos estatísticos para se realizar o preenchimento de amostras em falta. Como os dados se tratam de séries temporais e que existe uma certa sazonalidade semanal nos mesmos, ou seja, em certas células, o nível de tráfego registado numa segunda feira é muito idêntico ao que se registará na segunda feira seguinte, a menos que hajam mudanças muito significativas ou acontecimentos esporádicos, na área de serviço dessa célula. Como tal, o método de preenchimento de dados foi com recurso à média dos dados para os restantes dias de uma dada *feature*, mas apenas para dias da semana e hora iguais ao dos dados em falta, de forma tentar minimizar o erro introduzido com o preenchimento das amostras em falta. Para *features* com muitos dados em falta, assumiu-se que, com mais de metade dos dados em falta, essas *features* não eram consideradas e, conseqüentemente, eliminadas dos dados a considerar para o modelo.

5.2.1 Primeira abordagem

Considerando os dados após o pré processamento inicial, procedeu-se ao desenvolvimento do modelo, onde a primeira ação é o tratamento dos dados para a seleção das *features* que serão as variáveis independentes a incluir no modelo RLM, pelos seguintes passos:

1. Determina-se a variável dependente, ou seja, a percentagem de utilização de PRBs. A partir da razão de duas *features* registadas, a média de PRBs utilizados, em cada hora, e o máximo de PRBs configurados na célula;
2. Transformam-se certas *features*, como as referentes aos CQI e MCS utilizados na célula. Onde se determina a mediana dos CQIs e MCSs usados para cada hora. Trata-se da mediana porque esta não é influenciável por valores muito altos ou muito baixos e garante-se, assim, que metade dos utilizadores usaram valores de CQI e MCS abaixo do valor da mediana e a outra metade acima do mesmo valor. Pretende-se com esta transformação incluir no modelo *features* que caracterizem o tipo de ambiente de propagação a que a célula está sujeita, uma vez que são *features* sensíveis às condições de propagação rádio;
3. Eliminam-se *features* que tenham alta correlação com a variável dependente, onde se definiu um *threshold* de 75%, ou seja, *features* com valores de correlação superior ao do *threshold* são eliminadas;
4. De seguida utilizam-se modelos de regressão, nomeadamente o método de seleção *sepwise*, para determinar as *features* que demonstram ter importância estatisticamente significativa para o modelo RLM que descreve a variável dependente;
5. Realiza-se o primeiro modelo RLM com a variável dependente e as restantes *features* já filtradas pelos métodos descritos. Faz-se uma avaliação do valor *p-value* determinados no modelo RLM e elimina-se a *feature* com maior valor de *p-value*, desde que superior ao *threshold* definido (0.05, ou seja, 5%). É um processo iterativo, onde após se eliminar uma *feature*, caso hajam *features* com valores de *p-value* superior ao *threshold*, aplica-se novamente o modelo RLM e faz-se a mesma verificação até não haverem *features* com *p-values* superiores ao *threshold*.

Tendo determinado o modelo *RLM* com as *features* filtradas, pretende-se forçar a variável dependente para 100%, o que significa que será a capacidade máxima da célula, uma vez que os recursos rádio estão todos ocupados. Para 100% da percentagem de utilização dos PRBs, isola-se a *feature* correspondente ao número médio de utilizadores ativos na célula, no modelo RLM, de forma a se determinar qual será esse valor considerando uma utilização dos recursos rádio máximo. O modelo RLM resulta na Equação 5.1 para um dado número n de *features* selecionadas.

$$PRB_{[Utilization]}(\%) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i(c) \quad (5.1)$$

onde $PRB_{[Utilization]}(\%)$ é a variável dependente, β_0 é o valor constante do modelo e os x_i tratam-se das *features* selecionadas que descrevem a variável dependente para uma dada célula c .

Para se determinar o número máximo de utilizadores ativos na célula, é necessário inverter a Equação 5.1 de forma a isolar a *feature* que se pretende estimar, neste caso, o número de utilizadores ativos por TTI em DL, ou seja, para $i = i_0$. A Equação 5.2 representa a equação utilizada para estimar o número máximo de utilizadores.

$$x_{i_0} = ActiveUE_{DL} = \frac{PRB_{[Utilization]}(\%) - \beta_0 - \sum_{i=1, i \neq i_0}^n \beta_i x_i(c)}{\beta_{i_0}}. \quad (5.2)$$

Ao forçar $PRB_{[Utilization]}(\%) = 100$, determina-se o número máximo de utilizadores ativos para cada hora ($ActiveUE_{DL}$), sendo o número máximo a média de todas as horas determinadas. Inicialmente, o objetivo era determinar este $ActiveUE_{DL}$ para cada serviço, ou seja, por cada QCI. Contudo, para os dados das células disponibilizados no âmbito deste trabalho, o tráfego era essencialmente de um só serviço, o QCI 8. Na Figura 5.1, pode-se ver a percentagem de utilização dos vários serviços disponíveis que, neste caso, vão do QCI 1 ao 9, embora hajam mais QCIs em LTE, apenas estes foram coletados.

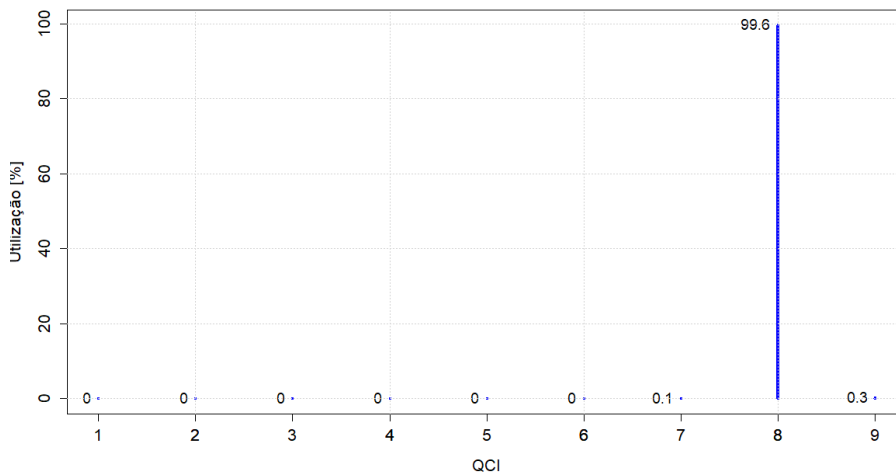


Figura 5.1: Percentagem de utilização dos vários serviços LTE.

Pode-se observar que 99.6% da utilização dos serviços recai sobre o QCI 8, havendo ainda 0.1% no QCI 7 e 0.3% no QCI 9. Ou seja, não existem dados suficientes nos restantes serviços para se realizar um modelo multisserviço, para este *set* de dados. De notar que esta percentagem foi calculada tendo

em conta o volume de tráfego de cada serviço em todas as células disponíveis no *set* de dados.

Contudo, foram feitos testes para verificar se a teoria de cálculo do número máximo de utilizadores para a célula, apresentava resultados credíveis. Realizaram-se testes, a algumas células que podem ser consultados na Secção C.1 no Anexo C.

Os resultados levaram a que se fosse optado outras formas de estimar o número máximo de utilizadores, o que levou a estudar outras abordagens.

5.2.2 Segunda abordagem

Pelos resultados inconsistentes da primeira abordagem, optou-se por outra abordagem, onde se alterou a variável dependente, deixando de ser a percentagem de utilização dos PRBs e passou a ser a *feature* que mede o máximo de utilizadores em cada hora. Contudo, como o número máximo de utilizadores varia com a taxa de dados atribuída a cada um, concluiu-se que para além de se forçar $PRB_{[Utilization]}(\%) = 100$, seria necessário também estabelecer um débito para cada utilizador (R_{target}).

Desta forma, realizou-se a mesma forma de seleção de *features* para descreverem a evolução da variável dependente e, no final, acrescenta-se (caso não façam parte) as *features* a serem forçadas a um certo valor, nomeadamente, a percentagem de utilização dos PRBs e a taxa de dados por utilizador. O modelo RLM resulta na Equação 5.3.

$$ActiveUE_{Max} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i(c) + \beta_{n+1} PRB_{[Utilization]}(\%)(c) + \beta_{n+2} ThrpDLUE(Mbps)(c) \quad (5.3)$$

onde $ActiveUE_{Max}$ é o número máximo de utilizadores medido e $ThrpDLUE(Mbps)(c)$ é débito médio por utilizador naquela célula, em cada hora. Sendo os x_i as *features* selecionadas pelo modelo e os β_i os seus respetivos coeficientes.

Para estimar o número máximo de utilizadores, força-se novamente o $PRB_{[Utilization]}(\%) = 100$ e o $ThrpDLUE(Mbps)(Mbps) = R_{target}$, definido em Mbps, o que fará variar o número máximo de utilizadores, uma vez que para taxas de dados inferiores, mais utilizadores são possíveis de servir, para o mesmo número máximo de PRBs disponíveis. O número máximo de utilizadores na célula é determinado pelo máximo dos valores determinados pela Equação 5.3 depois de forçar as duas *features*, ou seja, será o $max(ActiveUE_{Max})$.

Da mesma forma, foram realizados testes para verificar esta segunda abordagem cujos resultados se apresentam na Secção C.2 no Anexo C.

5.3 Segundo Método: Capacidade máxima de tráfego

Para o segundo método, pretende-se realizar uma monitorização dos recursos de cada célula de forma a detetar células com problemas de capacidade tendo em conta umas condições definidas previamente. Caso sejam detetadas células com problemas é realizada uma análise às condições rádio para indicar sugestões de melhoria. Também para essas células, estima-se a capacidade máxima da

célula, em ritmo de transmissão, para verificar se as células apresentam margens de capacidade para as condições rádio a que se encontram sujeitas.

5.3.1 Monitorização de recursos da célula

Pretende-se com a monitorização de recursos perceber se a célula está com alguma escassez de recursos que possam comprometer o nível de QoS dos UE. De notar que a insuficiência de recursos pode ser determinada pelo uso de mais de um tipo de recurso de serviço. Nesta abordagem, apenas o débito na ótica do utilizador, em DL, é considerado. O aumento de tráfego leva a um aumento contínuo da utilização dos PRBs, como já referido, e, conseqüentemente, os débitos por utilizador diminuem à medida que um número crescente de utilizadores compartilha os PRBs, que são limitados. A utilização de PRBs reflete o grau de uso da largura de banda na interface rádio, enquanto que o débito por utilizador reflete a sua QoE.

Monitorizar estes dois parâmetros, em conjunto, pode refletir a experiência do utilizador sob um determinado uso de largura de banda pela interface rádio [46]. Com o modelo construído e as limitações de capacidade identificadas, a capacidade da célula (ritmo de transmissão máxima da célula) pode ser obtida para as condições de propagação rádio a que a célula está sujeita. Se uma variável independente é considerada como uma limitação da célula, como a percentagem de utilização de PRBs ($PRB.UtilRate$), é possível encontrar o ritmo de transmissão máxima da célula, assumindo o mesmo CQI, MCS e atrasos. Assim, a dependência de fatores como a localização específica do utilizador e as rápidas flutuações da interferência inter-célula são calculados na média.

A monitorização de recursos consiste em analisar os KPI, na *busy hour*, e verificar se cumprem umas dadas condições, com limites definidos pelo *vendor* e que, naturalmente, podem ser alterados pelo operador. Pretende-se com a monitorização de recursos encontrar as células que mostram sinais de limite de capacidade e posteriormente determinar o débito máximo da célula.

De acordo com [46], assume-se as seguintes condições: se o uso de PRBs, em DL, atingir ou exceder 70% e o ritmo de transmissão por utilizador for menor que um limite definido (3 Mbps, definido pelo *vendor*) por três dias consecutivos, numa semana:

- Se o CQI médio da célula for menor que o valor mediano, é necessário aumentar o débito da célula através de uma otimização da *performance* Radio Frequência (RF).
- Se o CQI médio da célula for maior que o valor mediano, é aconselhável adicionar portadoras ou expandir a largura de banda da portadora existente. Sendo a última opção, adicionar eNBs.

Para uma monitorização precisa, todos os recursos são monitorizados durante as *busy hours*, uma vez que é o período em que o sistema ou uma célula está a passar por um consumo máximo de recursos, naquele respectivo dia. O método de cálculo do CQI médio é o seguinte [46]:

$$Avg.CQI = \frac{\sum(Y \times CQI.DL.Y)}{\sum(CQI.DL.Y)} \quad (5.4)$$

onde $CQI.DL.Y$ indica o número de *reports* realizado pelos UE do CQI com o valor Y .

5.3.2 Estimativa do ritmo de transmissão máximo da célula

O ritmo de transmissão de dados de *DL*, em *LTE*, num UE é determinada por três fatores: alocações de TTI para o UE no domínio do tempo, alocações de PRBs por TTI e definição do MCS por PRB alocado, tendo em conta as condições de RF a que o UE está sujeito. O nível de MCS varia consoante o nível *Signal to Interference and Noise Ratio* (SINR) medido no UE, ou seja, quanto maior o SINR maior será o nível de MCS e, conseqüentemente, maiores débitos o UE consegue atingir. Para além disso, as alocações de PRB e TTI dependem da carga de tráfego no eNB que serve vários UEs na sua área de cobertura. No caso da carga de tráfego no eNB ser demasiado elevada, o ritmo de transmissão em DL não será elevada, mesmo que o UE tenha bons níveis de SINR medidos [3]. No 3GPP [47], é especificado qual o TBS a ser usado pelo eNB de acordo com o índice MCS e número de PRBs alocados ao UE. Dependendo também das condições RF, podem ser aplicadas várias técnicas de múltiplas antenas, por exemplo, MIMO 2x2 ou MIMO 4x4. Estas técnicas também ajudam a aumentar o ritmo de transmissão (quase em 2 ou 4 vezes, respectivamente). O ritmo de transmissão em DL é então calculada a partir do TBS e do número de fluxos MIMO, como apresentado na Equação 5.5

$$Thrp_{DL} = TBS_{size} \times (NumStreams) \times \frac{1sec}{1ms}. \quad (5.5)$$

O índice MCS determinado pelo eNB é selecionado com base no CQI reportado pelo UE, que indica a qualidade de SINR recebido no UE. Pode-se dizer também que o ritmo de transmissão de DL pode ser re-expressa pelos PRBs alocados para o UE e o SINR recebido no UE, já que o SINR é proporcional ao CQI informado [4].

Ao contrário dos modelos anteriores, a variável dependente, neste modelo RLM, passa a ser o ritmo de transmissão da célula, onde se pretende calcular qual a capacidade máxima da célula, a nível do ritmo de transmissão, tendo em conta os dados de KPI. À semelhança da Equação 5.1, o modelo RLM é idêntico, mudando a variável dependente.

$$Thrp'_{DL}(c) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i(c) \quad (5.6)$$

onde $Thrp'_{DL}$ é o ritmo de transmissão de DL da célula de todos os serviços QCI. x_i são, novamente, as variáveis independentes de dados PM selecionadas em cada célula (c), β_i são os coeficientes de regressão para cada x_i e n é o número de variáveis independentes constituintes do modelo.

À semelhança dos modelos anteriores, as variáveis independentes passaram no algoritmo de seleção de *features* para se conseguir uma boa precisão nos resultados, com o menor número de *features* possível. As *features* apresentadas na Tabela 5.1 são as variáveis independentes mais significativas para a estimativa da capacidade da célula.

Tabela 5.1: Variáveis independentes selecionadas para o modelo RLM.

<i>Features</i>	<i>Descrição</i>
RAB.Est.TimeAvg [ms]	Duração média da configuração do E-RAB na célula
RRC.ConnSetup.TimeAvg [ms]	Duração média da configuração da conexão RRC
PRB.UtilRate [%]	Número médio de PRBs
Avg.MCS	Média de MCS usado pelos UE
Avg.CQI	Média de CQI usado pelos UE, em DL

Depois do modelo RLM construído, mais uma vez, determinar-se a capacidade máxima ao forçar a taxa de utilização de PRBs, sendo:

$$x_1 \equiv PRB.UtilRate \quad (5.7)$$

então o $Thrp'_{DL}$ é máximo quando $x_1 = 100\%$.

Determina-se assim o débito máximo por amostra de forma a gerar dois patamares de capacidade da célula. Onde o primeiro patamar se trata da média de todas as amostras e o segundo é o valor máximo de todas as amostras, sendo este o melhor caso a nível de condições rádio que a célula esteve sujeita. Como já referido, as margens de capacidade determinam-se a partir do algoritmo de *headroom* para os dois patamares determinados.

Tendo em consideração os resultados apresentados no Anexo C, para o primeiro método utilizou-se para o modelo de capacidade 4G desenvolvido o segundo método. Uma vez que para aplicar o primeiro método seriam necessários mais dados de serviços distintos.

6

Análise e validação de resultados

6.1	Introdução	70
6.2	Modelo de capacidade 3G	70
6.2.1	Célula A	70
6.2.2	Célula B	80
6.3	Modelo de capacidade 4G	86
6.3.1	Detecção de células com problemas de capacidade	86
6.3.2	Estimativa da capacidade da célula pelo modelo RLM	87

Neste capítulo são apresentados alguns resultados dos modelos de capacidade 3G e 4G desenvolvidos. Os parâmetros de *input* serão alterados para testar e validar o melhor possível ambos os modelos. Para o modelo de capacidade 3G variar-se-á parâmetros como o R_{target} , probabilidades de bloqueio, nível de potência transmitida, o número e tipo de serviços e o número de *slots* reservados para *handover*. No modelo de capacidade 4G será feita uma monitorização da capacidade num vasto conjunto de células, identificando as mais críticas.

6.1 Introdução

Na Secção 6.2 apresentam-se os resultados do modelo de capacidade 3G com os dados das células disponibilizados. Serão testadas três células e apresentados gráficos com dois e três serviços, fazendo variar os parâmetros de *input* para realizar a comparação entre os vários resultados. Para além disso, será testado o algoritmo de *headroom* para estimar a potência mínima necessária para que a célula consiga absorver todo o tráfego, na *busy hour*. De forma a validar o modelo, usar-se-á o pior caso das estatísticas da célula para verificar se as curvas conseguem descrever a capacidade da célula.

Na Secção 6.3 apresentam-se os resultados ao modelo de capacidade 4G com dados referentes a 89 células, onde o diagnóstico de problemas é realizado, tendo em conta as limitações de capacidade definidas e apresentadas. Relativamente ao cálculo da capacidade máxima da célula (taxa de transmissão), apresentam-se os resultados para as mais críticas.

6.2 Modelo de capacidade 3G

Como apresentado no Subcapítulo 4.3.2, é necessário aplicar um modelo RLM para se determinar a potência média aplicada aos canais de controlo (P_{CCH}) e outro modelo RLM para se determinar a característica de célula (*EnergyPerBit*) para os serviços de voz e dados PS R99. Que serão validados estatisticamente, para cada célula.

6.2.1 Célula A

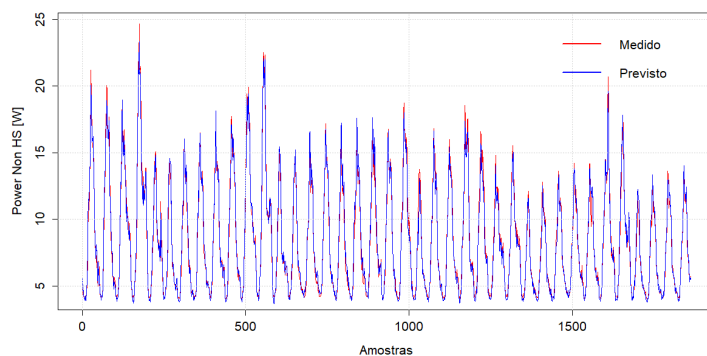
Ao aplicar o modelo RLM com as *features* disponíveis e após serem filtradas a partir dos modelos estatísticos, restaram nove *features* para descrever a potência aplicada aos serviços de voz e PS R99, para a célula A. As características do modelo são apresentadas na Tabela 6.1.

Com as nove *features* selecionadas, incluindo o R_{MAC-d} Voz, obteve-se um β_0 de 3,62 W que representa o P_{CCH} que se pretende calcular com este primeiro modelo RLM. Relativamente aos indicadores de desempenho do modelo, obteve-se um R^2 ajustado de 98,5%, um MAPE de 0,04%, um RMSE de 0,49 W e um coeficiente de correlação de 99,25%. Estes valores indicam que o modelo com as variáveis independentes consegue descrever a variável dependente.

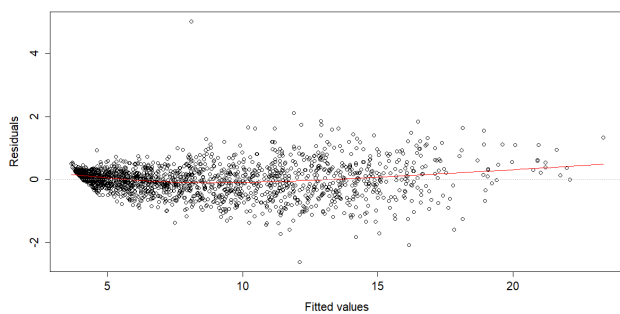
Tabela 6.1: Modelo RLM com as *features* selecionadas.

Variáveis β_i	Estimado	Erro Padrão	<i>t-value</i>	<i>p-value</i>
(Intercept)	3.623	2.095e-02	172.944	< 2e-16
SHO.AS.1RL	4.971e-01	2.247e-02	22.124	< 2e-16
SHO.AS.2RL	5.768e-01	2.032e-02	28.379	< 2e-16
SHO.AS.3RL	3.893e-01	2.482e-02	15.682	< 2e-16
SingleRAB.SF128	-3.933e-01	2.901e-02	-13.558	< 2e-16
SingleRAB.SF256	-1.142e-01	2.536e-02	-4.506	7.03e-06
MultRAB.SF64	-2.071e-01	2.545e-02	-8.139	7.25e-16
MultRAB.SF128	-3.871e-01	2.479e-02	-15.616	< 2e-16
RRC.AttConnEstab.Sum	2.632e-04	4.712e-05	5.585	2.68e-08
R_{MAC-d} Voz	-4.294e-03	1.377e-03	-3.118	0.00185

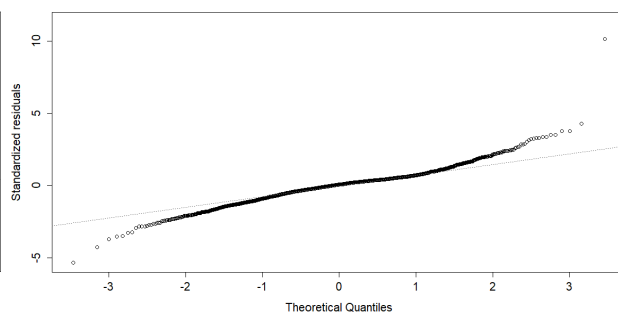
Para analisar adequadamente o modelo, realizou-se o gráfico da potência medida face à estimada (Figura 6.1a), onde se espera que a potência estimada, em cada amostra, seja o mais próximo possível da medida. Para além disso, apresentam-se também os gráficos dos resíduos face aos valores estimados (Figura 6.1b) e o normal QQ-Plot (Figura 6.1c) para validação estatística do modelo.



(a) Potência medida vs estimada.



(b) Resíduos vs Valores Estimados.



(c) Normal QQ-Plot.

Figura 6.1: Gráficos para validação do modelo RLM.

Pelos gráficos apresentados na Figura 6.1, pode-se verificar que a potência estimada descreve com bastante precisão a potência medida, minimizando o erro da estimativa da potência média aplicada aos canais de controlo (P_{CCH}). Além disso, verifica-se que os resíduos estão quase igualmente espaçados, onde não se verifica um padrão não linear à volta da linha horizontal, o que significa que o modelo apresenta linearidade nos resíduos. O gráfico normal QQ-Plot mostra que a distribuição dos resíduos normalizados segue praticamente uma distribuição normal, devido à linearidade entre os quantis teórico (determinados com média zero e desvio padrão unitário) e os resíduos normalizados. No entanto, existem uns valores que representam *outliers*, valores esses que se encontram afastados da reta a tracejado. Contudo, tendo em conta os gráficos e os indicadores de desempenho do modelo, pode-se concluir que é um modelo válido.

Tendo estimado o P_{CCH} , é então aplicado um novo modelo RLM, onde a nova variável dependente é a potência aplicada no modelo anterior mas subtraída do valor determinado ($P_{TOTNonHS} - P_{CCH}$), ou seja, a potência dos canais de controlo. O que representa a potência dos canais dedicados (P_{DCH}) dos serviços de voz e dados PS R99. As variáveis independentes deste segundo modelo são apenas os R_{MAC-d} de ambos os serviços. Além disso, o modelo é realizado forçando $\beta_0 = 0$, uma vez que não interessa aplicar ou determinar nenhum *offset*. As características deste segundo modelo apresentam-se na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Modelo RLM com os R_{MAC-d} de Voz e PS R99.

Variáveis β_i	Estimado	Erro Padrão	t -value	p -value
R_{MAC-d} Voz	0.044	0.0007	62.70	< 2e-16
R_{MAC-d} PS R99	0.067	0.0048	13.87	< 2e-16

Os valores estimados, na Tabela 6.2, representam a característica da célula para cada serviço (*EnergyPerBit*) e o facto dos valores de p -value obtidos serem muito baixos, é indicativo que ambos R_{MAC-d} são variáveis independentes com importância na estimativa da variável dependente. Para este modelo, obteve-se um R^2 ajustado de 84,52%, um MAPE de 0,34%, um RMSE de 2,47 W e um coeficiente de correlação de 81,43%.

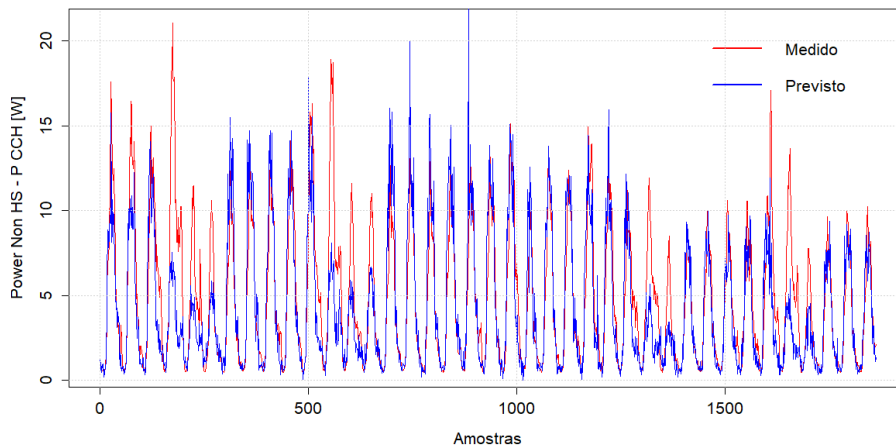


Figura 6.2: Potência de canais dedicados medida vs estimada.

Os indicadores de desempenho do modelo são piores comparativamente ao primeiro modelo, também devido ao facto deste apenas apresentar duas variáveis independentes face às nove do primeiro modelo. Contudo, os resultados são interessantes e aceitáveis para a determinação da característica da célula, havendo sempre um erro associado ao modelo, como era expectável. A potência medida face à estimada apresenta-se na Figura 6.2.

Tendo determinado os valores de *EnergyPerBit* para os serviços de voz e PS R99 e do P_{CCH} a partir dos modelos RLM, pode-se passar para as simulações do modelo de capacidade 3G. Pretende-se variar os *inputs* e verificar se fazem sentido as alterações nas curvas admissão. Para as simulações serão usados os serviços de voz e HSDPA, sendo posteriormente adicionado o serviço PS R99 para os resultados do modelo.

Para as simulações foi atribuído um valor de R_{target} de 700 kbps para HSDPA e assumiu-se a potência máxima da célula, 46 dBm (39,81 W). Um resumo das características dos serviços é apresentado na Tabela 6.3.

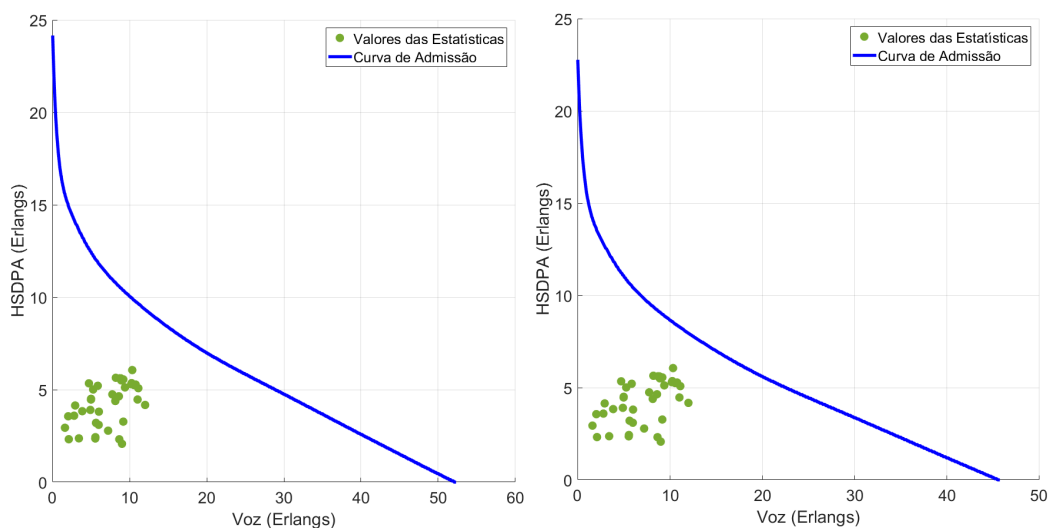
Tabela 6.3: Sumário das características dos serviços.

Serviço	EPB [mJ/kb]	Prob. Bloqueio [%]	P_{CCH} [W]	Nº Utilizadores
Voz	0.044	1	3.62	66
PS R99	0.067	50	3.62	56

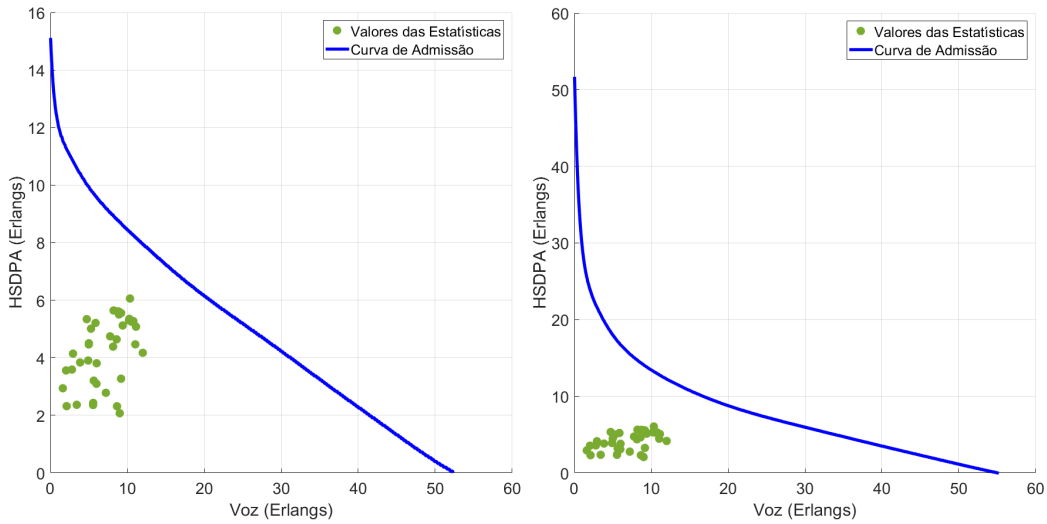
Serviço	$\bar{P}_{DSCH-TX}$ [W]	Prob. Bloqueio [%]	R_{target} [kbps]	Mediana QCI	Nº Utilizadores
HSDPA	2.44	50	700	15	14

Variação da probabilidade de bloqueio

A probabilidade de bloqueio dita o nível de QoS pretendido para cada serviço, onde para voz significa a probabilidade de um utilizador ficar bloqueado, na *busy hour*, quando pretende estabelecer uma chamada. Para os serviços de dados, a probabilidade de bloqueio significa a probabilidade do utilizador conseguir obter o débito estipulado para aquele serviço, R_{target} no caso do HSDPA.



(a) Curva de Admissão sem alterações aos dados na Tabela 6.3. (b) Curva de Admissão com Prob. Bloqueio da Voz a 0,1 %.



(c) Curva de Admissão com Prob. Bloqueio de HSDPA a 25 %. (d) Curva de Admissão com Prob. Bloqueio da Voz a 2 % e HSDPA a 75 %.

Figura 6.3: Variação da Curva de Admissão com a Probabilidade de Bloqueio.

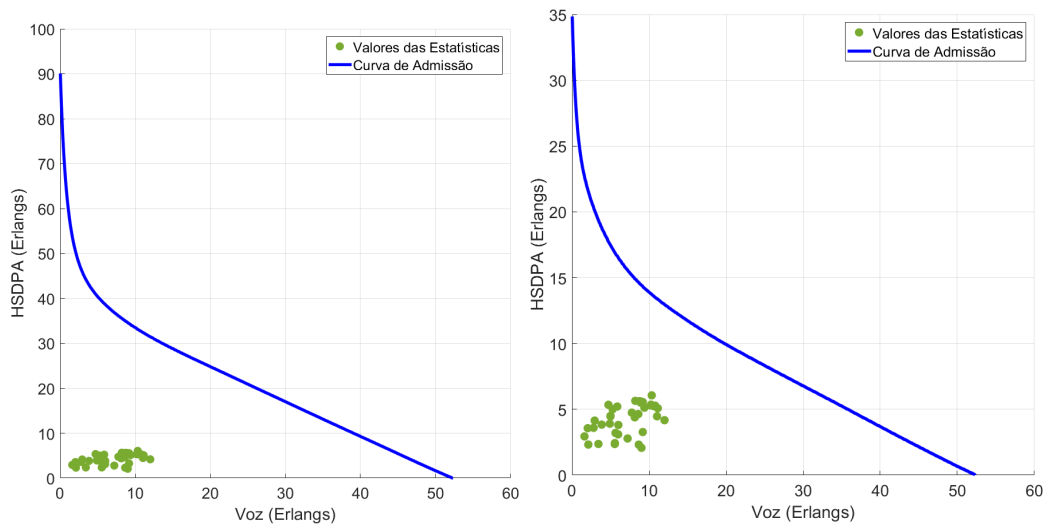
Como se pode verificar pela Figura 6.3 a probabilidade de bloqueio tem uma variação esperada, ou seja, quando se diminui, aumenta-se o nível de QoS e, conseqüentemente, a capacidade diminui no eixo do respetivo serviço. Pode-se verificar na Figura 6.3b que ao diminuir a probabilidade de bloqueio da voz para 0,1%, a capacidade máxima passou para um valor inferior a 50 Erlang, quando para uma probabilidade de bloqueio de 1% apresentava uma capacidade superior a 50 Erlang. O mesmo se verifica para o HSDPA, na Figura 6.3c, diminuindo de uma capacidade superior a 20 Erlang para uma inferior a 16 Erlang, com a diminuição da probabilidade de bloqueio para 25%.

O contrário também se verifica, ou seja, quando se aumenta a probabilidade de bloqueio, aumenta também a capacidade, uma vez que se está a reduzir o nível de QoS. Como se pode ver na comparação entre as Figuras 6.3a e 6.3d, onde se aumentou a probabilidade de bloqueio da voz e HSDPA para 2 e 75%, respetivamente. Nota-se um aumento na capacidade em ambos os eixos da curva de admissão.

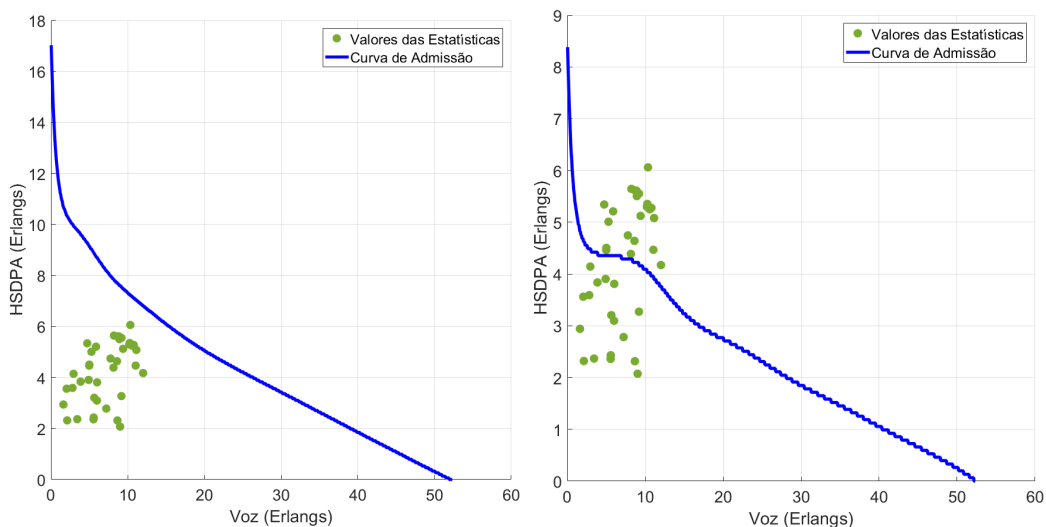
Variação do R_{target}

O R_{target} define o débito por utilizador desejado para o serviço HSDPA, o que significa que quanto maior for o R_{target} desejado, menor será a capacidade da célula no eixo do serviço HSDPA, pois menos utilizadores vão ser servidos. Conseqüentemente, quanto menor o R_{target} , mais utilizadores a célula consegue suportar, aumentando conseqüentemente a capacidade. Até porque pela Equação 4.18, a característica da célula para o HSDPA ($\bar{P}_{DSCH-TX}$) é diretamente proporcional ao R_{target} . Quer isto dizer que um maior valor de R_{target} origina um maior valor de $\bar{P}_{DSCH-TX}$ logo, cada utilizador consome mais potência para obter esse débito e conseqüentemente a célula consegue servir menos utilizadores, uma vez que a potência máxima da célula é limitada. O contrário também se verifica, ou seja, um R_{target} menor resulta num valor de $\bar{P}_{DSCH-TX}$ mais baixo, fazendo com que a célula consiga servir um maior número de utilizadores, para o mesmo valor de potência máxima.

Para testar a variação do R_{target} usaram-se as probabilidades de bloqueio de 1 e 50 % para os serviços de Voz e HSDPA, respetivamente.



(a) Curva de Admissão, $R_{target} = 200$ kbps. (b) Curva de Admissão, $R_{target} = 500$ kbps.



(c) Curva de Admissão, $R_{target} = 1$ Mbps. (d) Curva de Admissão, $R_{target} = 2$ Mbps.

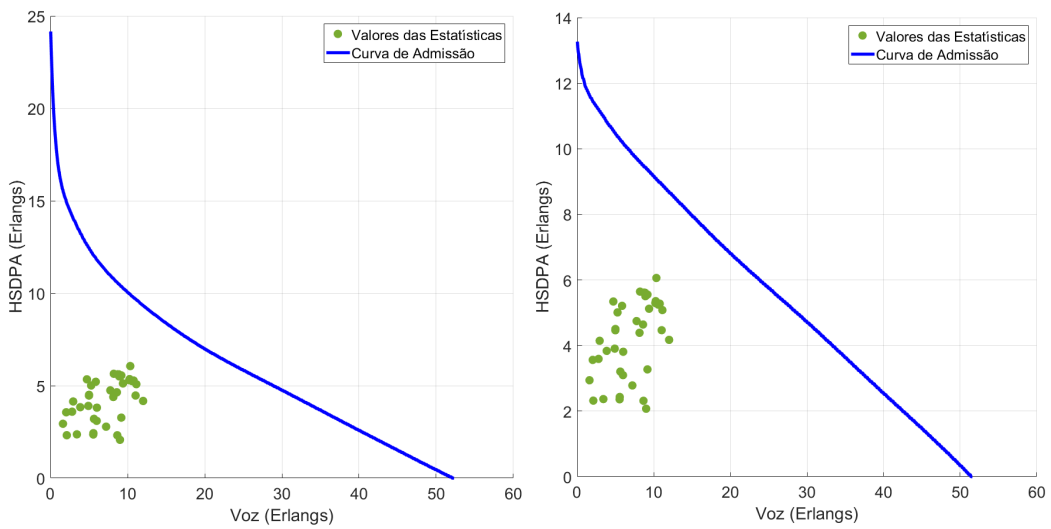
Figura 6.4: Variação da Curva de Admissão com o R_{target} .

Verifica-se que a variação da curva de admissão com o R_{target} vai de encontro ao que é expectável. Com o aumento do R_{target} , há uma diminuição da capacidade da célula ao nível do serviço HSDPA, enquanto que a voz se mantém. Para um $R_{target} = 1$ Mbps, a célula ainda mostra capacidade para absorver todo o tráfego das estatísticas, contudo para um $R_{target} = 2$ Mbps, existem uns quantos valores estatístico acima da curva que significa que, naquela *busy hour*, a célula não teria capacidade para absorver aquela quantidade de tráfego gerada pelos utilizadores.

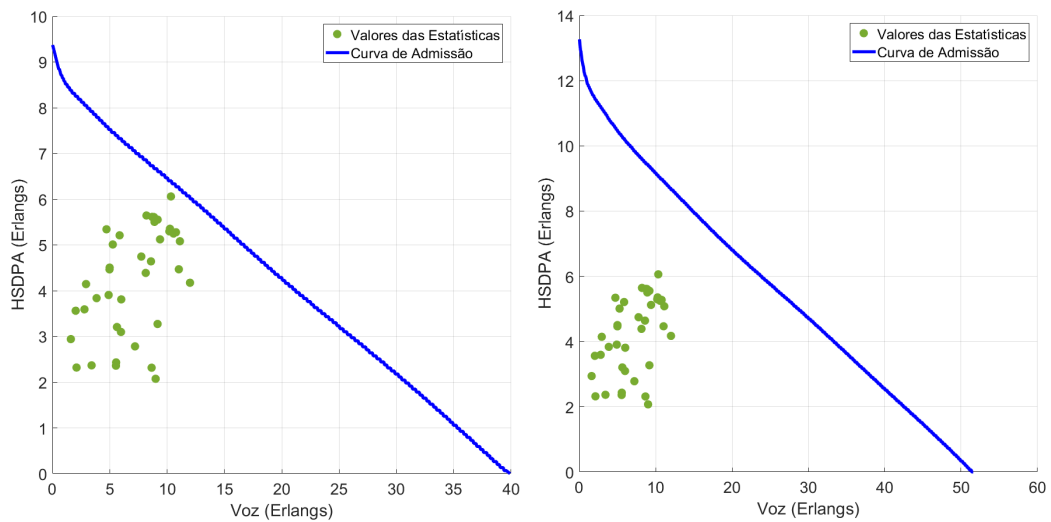
Variação da reserva de *slots* para *handovers*

Para o modelo considerou-se a possível reserva de *slots* de potência para possíveis *handovers*, uma vez que se estima a potência que cada utilizador consome à célula em cada serviço. A reserva pode ser feita especificando um número de *slots* ou uma percentagem do número total de *slots*, sendo que esse valor é assumido para todos os serviços. Era pretendido implementar uma estimativa automática a partir de dados da célula, mas dentro do conjunto de KPIs disponibilizado, não haviam dados relativos a *handovers*, o que impossibilitou a seleção automática de reserva de *slots*.

Para testar a variação da curva de admissão com a reserva de *slots*, que se traduzirá na redução da capacidade da célula, usaram-se, novamente, as probabilidades de bloqueio de 1 e 50% para os serviços de Voz e HSDPA, respetivamente e um R_{target} de 700 kbps.



(a) Curva de Admissão sem reserva de *slots* para *handover*. (b) Curva de Admissão com reserva de 2 *slots* para *handover*.



(c) Curva de Admissão com reserva de 4 *slots* para *handover*. (d) Curva de Admissão com reserva de 20% de *slots* para *handover*.

Figura 6.5: Variação da Curva de Admissão com reserva de *slots* para *handovers*.

Considerando as curvas apresentadas na Figura 6.5, verifica-se que a capacidade diminui com a reserva de *slots* para *handovers*, como se verifica ao comparar a Figura 6.5a, que não tem reserva de *slots*, como as restantes. Também se conclui que a reserva de um número específico de *slots* pode comprometer muito mais a capacidade da célula, uma vez que há serviços com menos *slots* que outros. Nomeadamente, o serviço HSDPA apresenta menos *slots* porque cada utilizador consome muito mais potência que um utilizador do serviço de voz, o que significa que não haverá uma proporcionalidade na reserva de *slots*. Se for definida uma percentagem, existe essa proporcionalidade, pois são reservados mais *slots* para voz que para HSDPA, no entanto, pode-se estar a reservar *slots* a mais para o serviço de voz, o que também pode comprometer esse serviço.

Resultados e Validação do Modelo

Serão realizados testes de forma a validar o modelo a partir dos dados disponíveis. Começar-se-á por aplicar os valores médios de todas as amostras de estatísticas dos KPI, nomeadamente os $VS.MeanTCP$ e $VS.MaxTCP$ como potência da célula, bem como a média do débito por utilizador para o serviço HSDPA como R_{target} , tendo em conta as amostras. Será considerada a *busy hour* como referência para analisar o modelo, verificando se a curva se ajusta a esses dados, ao aplicar nos parâmetros de *input* os valores medidos nessa *busy hour*. Para além disso, serão sempre usados três serviços, caso hajam dados estatísticos que permitam usar todos os serviços.

Para a célula A, as estatísticas da célula que serão úteis para testar o modelo apresentam-se, resumidamente, na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Sumário das estatísticas referentes à célula A.

	VS.MeanTCP	VS.MaxTCP	$R_{UtilizadorHSDPA[Amostra]}$	Potência Máxima	CQI	Nº Utilizadores		
	[dBm/W]	[dBm/W]		[dBm/W]		Voz	PS R99	HSDPA
Valores Médios	44,5 / 27,87	45,9 / 38,64	671,8	46 / 39,81	15	12	1	8
Pior caso	44,4 / 27,23	45,8 / 37,84	826,3	46 / 39,81	11	21	1	9

Para os três serviços, aplicou-se um R_{target} igual ao débito médio na célula (671,8 kbps) retirado dos KPI com a potência máxima configurável. Aplicou-se igualmente o algoritmo de *headroom* para se ajustar a região de admissão à estatística com maior tráfego registada na célula, as regiões de admissão são apresentadas na Figura 6.6.

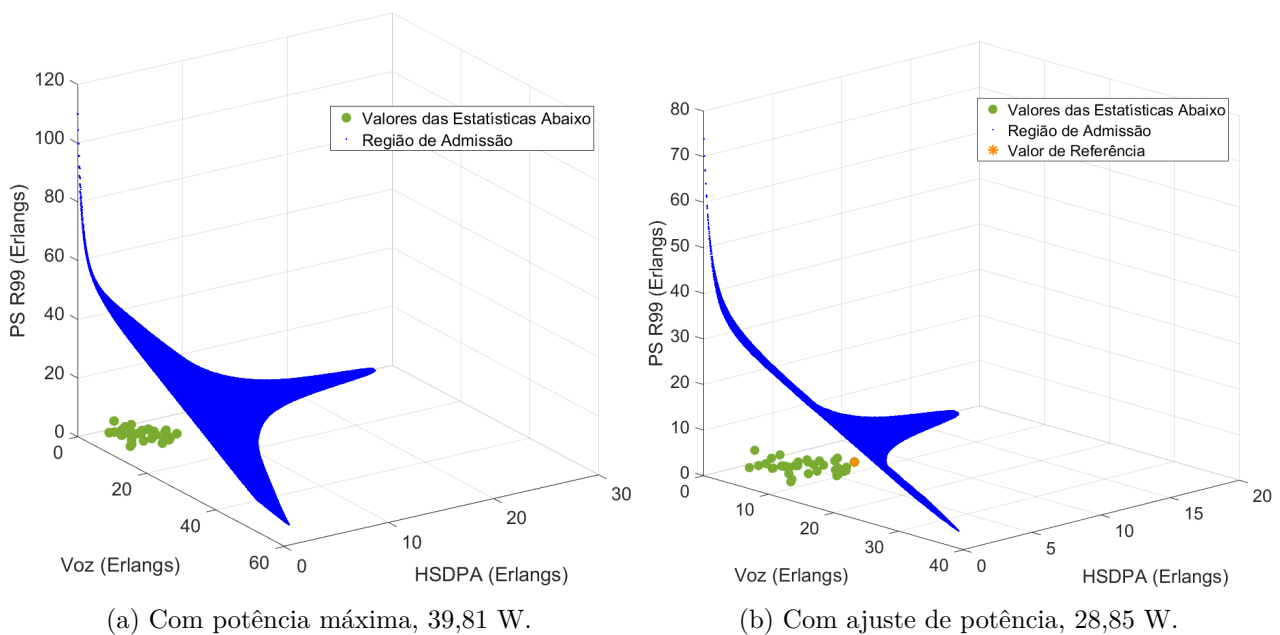


Figura 6.6: Região de Admissão para $R_{target} = 671,8$ kbps.

Pelos resultados obtidos na Figura 6.6, conclui-se que com um $R_{target} = 671,8$ kbps (média do débito por utilizador HSDPA medida) a célula tem capacidade suficiente para absorver todo o tráfego gerado, *busy hour*, com uma alguma margem. Contudo, ao utilizar a potência máxima pode-se estar a desperdiçar energia face ao tráfego que existe na célula. Ao aplicar o algoritmo de *headroom* é determinada e ajustada a potência da célula, tendo em conta os dados estatísticos com maior tráfego (pior caso). Desta forma, obtem-se a potência que ajusta a região de admissão ao pior caso, sempre com uma margem, sendo essa potência válida para as restantes horas do dia, pois apresentarão menos tráfego do que na *busy hour*.

Na Figura 6.6b, pode-se observar que a potência baixou de 39,81 W para 28,85 W, originando uma região de admissão mais próxima do ponto estatístico que representa a *busy hour* daquela célula. Isto traduz-se numa redução de cerca de 27,5% da potência da célula.

De forma a validar o modelo, utilizaram-se os dados estatísticos da *busy hour* (Tabela 6.4), de forma a verificar se o modelo apresentava uma região de admissão com capacidade de absorção desse tráfego. Alterou-se o R_{target} para 826,3 kbps, que representa o débito médio por utilizador no pior caso estatístico, e aplicou-se o modelo com a potência máxima e o algoritmo de *headroom*. Os resultados apresentam-se na Figura 6.7.

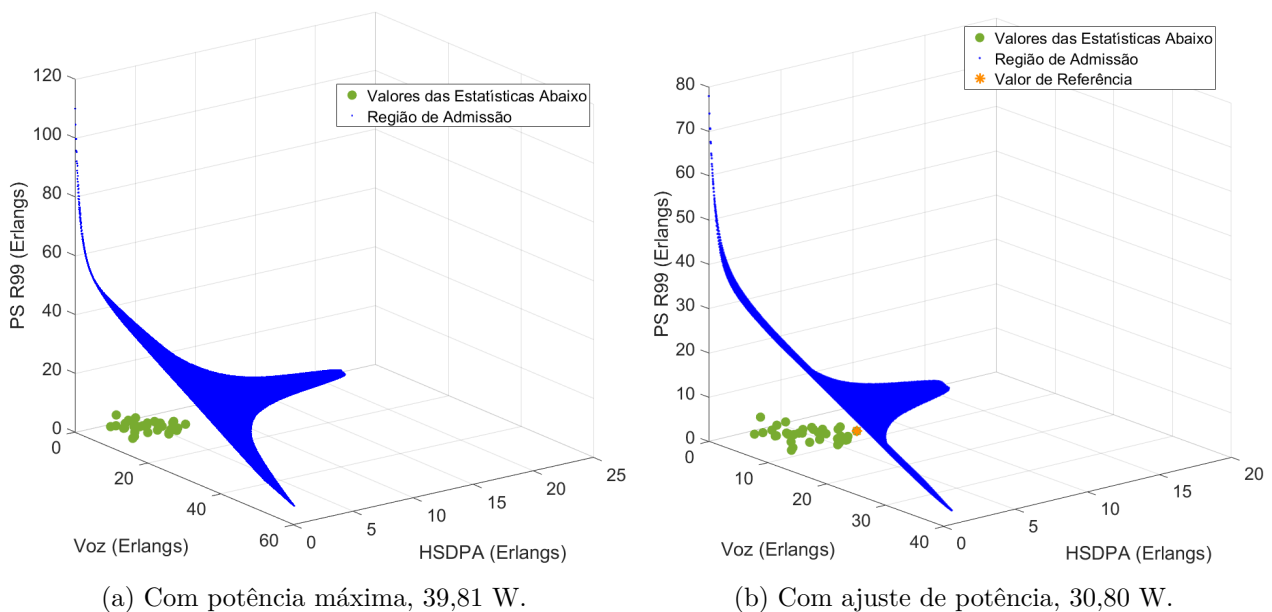


Figura 6.7: Região de Admissão para $R_{target} = 826,3$ kbps.

A Figura 6.7a mostra que a célula tem boa margem de capacidade para a potência máxima, para um $R_{target} = 826,3$ kbps, que se trata de um débito considerável por utilizador. A partir do algoritmo de *headroom* determinou-se uma potência de 30,80 W (Figura 6.7b) que se traduz numa redução de cerca de 22,6% da potência da célula.

Também se realizaram simulações, para o mesmo R_{target} , onde se aplicou a potência média da célula registada nessa *busy hour*, para observar se o ponto estatístico ficava acima ou abaixo da região de admissão realizada a partir dessa potência média. Para a potência média a região de admissão é a apresentada na Figura 6.8a.

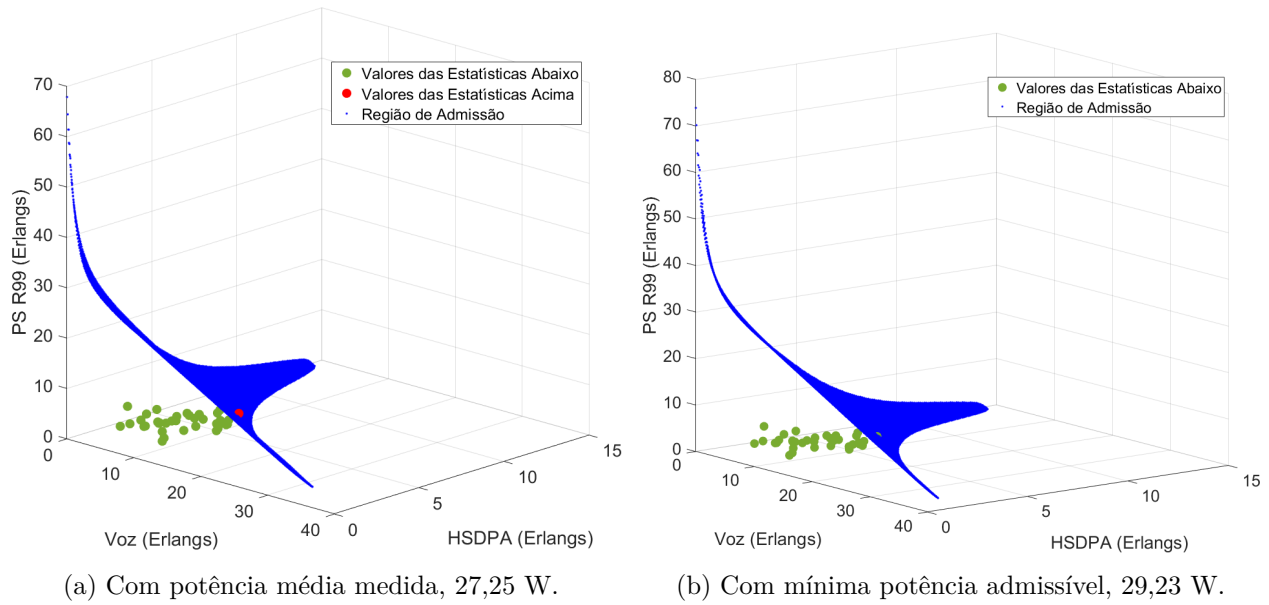


Figura 6.8: Região de Admissão para $R_{target} = 826,3$ kbps.

Pode-se observar, pela Figura 6.8a, que a potência média medida não permite que a célula tenha capacidade para absorver o tráfego gerado no pior caso estatístico, embora a região de admissão esteja bastante perto desse ponto. Este resultado, dá uma boa validação ao modelo, uma vez que existe sempre um erro associado na estimativa da capacidade máxima da célula devido às várias aproximações realizadas para o desenvolvimento do modelo. Para além disso, a potência média da célula registada, naquela *busy hour*, é influenciada pelas oscilações na potência transmitida pela célula devido à variação do número utilizadores e até do tráfego que estes geram, o qual faria com o tipo de serviço. De notar que o valor máximo da potência registado, foi de 37,84 W (Tabela 6.4), que se trata de um valor 10 W acima do valor médio. O que significa que para aquele nível de tráfego, não foi utilizada a potência média da célula e sim um valor superior, pelo que, de certa forma, serve de validação relativamente à precisão do modelo.

Determinou-se, a partir de várias simulações, que a potência mínima para que o modelo tivesse capacidade na célula suficiente para absorver o tráfego de referência era de 29,23 W (Figura 6.8b). Que é ligeiramente inferior ao determinado pelo algoritmo de *headroom* (30,80 W). Esta diferença deve-se ao facto de se ter introduzido, no algoritmo, uma margem de segurança para considerar o erro das aproximações e não comprometer a capacidade da célula estimada.

É possível observar que, no pior caso estatístico, o número de utilizadores HSDPA registado foi de 9 utilizadores (Tabela 6.4) e segundo a tabela de resumo dos resultados das várias simulações, Tabela 6.5, para as potências de 27,25 e 29,23 W, o número máximo de utilizadores HSDPA, para um $R_{target} = 826,3$ kbps, é de 8 utilizadores. Contudo, para a potência determinada pelo algoritmo de *headroom* (30,80 W), o número máximo de utilizadores HSDPA é de 9, o que mostra que é necessário considerar uma certa margem para se determinar a potência mínima necessária na célula para absorver todo o tráfego gerado, na pior *busy hour*, com melhor precisão e sem comprometer as previsões. De notar que, cada utilizador HSDPA necessita de uma potência de cerca de 2,88 W para conseguir obter um débito de 826,3 kbps. Se adicionarmos esse valor à potência média registada ($27,25 + 2,88$), de forma a igualar o número máximo de utilizadores HSDPA com o número registado no pior caso estatístico,

dá uma potência da célula de 30,13 W. Esta valida o modelo e o algoritmo de *headroom*, tendo em conta os erros associados às várias aproximações realizadas para o desenvolvimento do modelo.

Tabela 6.5: Sumário dos resultados referentes à célula A.

R_{target} [kbps]	Potência Célula [W]	$\bar{P}_{DSCCH-TX}$ [W]	Nº Máximo Utilizadores			K	M			Headroom	
			Voz	PS R99	HSDPA		Voz	PS R99	HSDPA	[%]	
671,8	39,81	2,34	66	56	15	9240	140	165	616	-	
	28,85		46	38	10	4370	95	115	437	✓	27,5
826,3	39,81	2,88	66	56	12	1848	28	33	154	-	
	30,80		48	40	9	720	15	18	80	✓	22,6
	29,23		47	38	8	7144	152	188	893	-	
	27,25		43	35	8	12040	280	344	1505	-	

Para os resultados apresentados na Tabela 6.5, nota-se que o número máximo de utilizadores estimado à medida que a potência diminui, também diminui, o que era expectável, já que a potência disponível é inferior. Para a mesma potência de célula, quando se aumenta o R_{target} , o número máximo de utilizadores HSDPA diminui, porque a potência por utilizador HSDPA ($\bar{P}_{DSCCH-TX}$) também aumenta, como se observa quando se passou de um $R_{target} = 671,8$ kbps para 826,3 kbps. Relativamente aos valores de K e M , relembra-se que são unidades adimensionais e que representam o peso que cada serviço tem na capacidade da célula, tendo por base o número máximo de utilizadores em cada serviço. Observa-se que, para o serviço de voz, o valor de M é sempre o mais baixo, isto porque é um serviço menos exigente que os restantes dois serviços. Bem como que, para o serviço HSDPA, o valor de M é sempre o mais alto, porque é o serviço com maior exigência, devido aos débitos por utilizador praticados. Como o K é determinado a partir dos valores M de cada serviço, de forma a encontrar o valor que seja comum a todos os serviços, representando, em unidades adimensionais, a capacidade máxima da célula, este não varia dependentemente da potência da célula.

6.2.2 Célula B

Para a segunda célula, não serão apresentados resultados relativamente à variação de parâmetros de *input*, uma vez que a variação é transversal a qualquer célula. Para esta célula, não é possível realizar regiões de admissão, como tal, obter-se-á para os resultados curvas de admissão, ou seja em duas dimensões, que se deve ao facto de não existir dados num dos serviços (PS R99) para se considerar os 3 serviços, como será explicado.

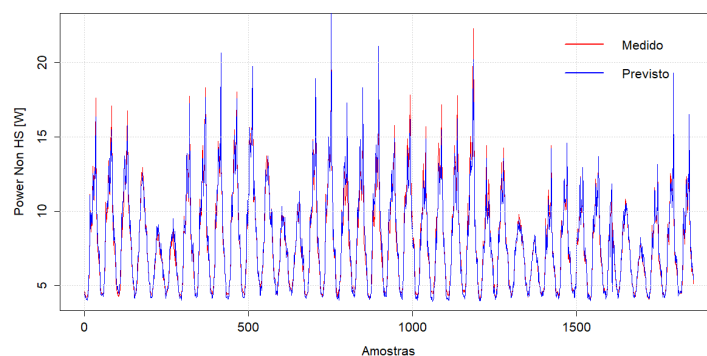
Para esta célula, após aplicação do modelo RLM com as *features* disponíveis e após filtragem das mesmas a partir dos modelos estatísticos, restaram oito *features* para descrever a potência aplicada aos serviços de voz e PS R99. As características do modelo são apresentadas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Modelo RLM com as *features* selecionadas.

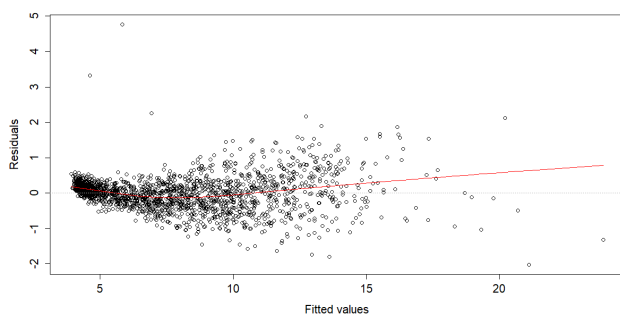
Variáveis β_i	Estimado	Erro Padrão	<i>t-value</i>	<i>p-value</i>
(Intercept)	3.863	2.367e-02	163.185	< 2e-16
SHO.AS.1RL	3.562e-01	1.245e-02	28.603	< 2e-16
SHO.AS.2RL	3.054e-01	1.598e-02	19.117	< 2e-16
SHO.AS.3RL	3.019e-01	2.988e-02	10.103	< 2e-16
SingleRAB.SF256	-1.288e-01	1.421e-02	-9.064	< 2e-16
MultRAB.SF64	9.883e-02	2.021e-02	4.890	1.10e-06
MultRAB.SF256	-3.762e-01	4.655e-02	-8.083	1.13e-15
RRC.AttConnEstab.Sum	3.547e-04	4.112e-05	8.626	< 2e-16
R_{MAC-d} Voz	-9.201e-03	1.498e-03	-6.141	9.99e-10

Com as oito *features* selecionadas, incluindo novamente o R_{MAC-d} Voz, obteve-se um β_0 de 3,86 W (P_{CCH}). Relativamente aos indicadores de desempenho do modelo, obteve-se um R^2 ajustado de 97,69%, um MAPE de 0,04%, um RMSE de 0,48 W e um coeficiente de correlação de 98,85%. Estas representam, novamente, valores suficientes para se assumir o valor P_{CCH} estimado.

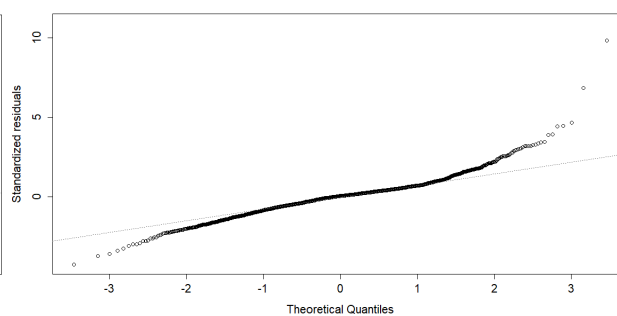
Para análise do modelo para esta nova célula, realizou-se, novamente, o gráfico da potência medida face a estimada pelo modelo (Figura 6.9a), bem como os gráficos dos resíduos face aos valores estimados (Figura 6.9b) e o normal QQ-Plot (Figura 6.9c).



(a) Potência medida vs estimada.



(b) Resíduos vs Valores Estimados.



(c) Normal QQ-Plot.

Figura 6.9: Gráficos para validação do modelo RLM.

A partir dos gráficos apresentados na Figura 6.9, podem-se retirar conclusões idênticas às realizadas para a célula A, uma vez que os gráficos das Figuras 6.9b e 6.9c descrevem curvas muito idênticas. A distribuição dos resíduos não apresenta um padrão não linear e os resíduos normalizados seguem, aproximadamente, uma distribuição normal. Também apresenta uns valores que se podem considerar como *outliers* mas que, novamente, são em quantidade reduzida e que não se realizou o tratamento dos mesmos, por não alterarem os resultados do modelo de uma forma significativa. Relativamente ao gráfico da Figura 6.9a, os valores estimados pelo modelo aproximam-se com precisão dos valores medidos, o que origina uma boa estimativa para a potência média dos canais de controlo (P_{CCH}).

Relembrando que este primeiro modelo RLM serve apenas para estimar o valor de P_{CCH} , posteriormente é aplicado o segundo modelo RLM, nas mesmas condições em que foi aplicado para a célula A. A variável dependente é a potência aplicada no primeiro modelo mas subtraída do valor determinado para os canais de controlo ($P_{TOTNonHS} - P_{CCH}$), sendo as variáveis independentes apenas os R_{MAC-d} de ambos os serviços (voz e PS R99). Da mesma forma que para a célula A, o modelo é realizado forçando $\beta_0 = 0$. As características deste segundo modelo são apresentadas na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Modelo RLM com os R_{MAC-d} de Voz e PS R99.

Variáveis β_i	Estimado	Erro Padrão	<i>t-value</i>	<i>p-value</i>
R_{MAC-d} Voz	0.104	0.0008	127.43	< 2e-16
R_{MAC-d} PS R99	0.017	0.0015	11.28	< 2e-16

Para este modelo obteve-se um R^2 ajustado de 93,09%, um MAPE de 0,91%, um RMSE de 1,36 W e um coeficiente de correlação de 92,51%.

Tendo em consideração os resultados apresentados na Tabela 6.7, é importante notar que o valor de *EnergyPerBit* estimado para o serviço de PS R99 é cerca de 10 vezes inferior ao valor de *EnergyPerBit* estimado para o serviço de voz. O que significa que os dados estatísticos do serviço PS R99, coletados nesta célula, não são suficientes para se considerar este serviço. Isto porque, como se pode observar na Tabela 6.8, este valor de *EnergyPerBit* origina um número máximo de utilizadores muito elevado, sendo incomportável incluir no modelo. O facto do coeficiente determinado pelo modelo para o serviço PS R99 ser muito baixo, significa que esta *feature* não tem influência, de forma significativa, na determinação dos valores estimados da potência da célula.

Tabela 6.8: Sumário das características dos serviços de voz e PS R99.

Serviço	EPB [mJ/kb]	Prob. Bloqueio [%]	P_{CCH} [W]	Nº Utilizadores
Voz	0.104	1	3.86	28
PS R99	0.017	50	3.86	188

Para suportar esta afirmação, realizou-se um modelo onde a única variável dependente era o R_{MAC-d} do serviço de voz. Onde se obteve um R^2 ajustado de 92,62%, um RMSE de 1,41 W, um coeficiente de correlação de 92,38% e o valor do *EnergyPerBit* da voz de 0.109. Estes valores, comparados com os valores obtidos no modelo anterior com a *feature* R_{MAC-d} de PS R99, comprovam que não é uma *feature* significativa para considerar no modelo. O coeficiente determinado, sem essa *feature*, praticamente não variou, passando de 0,104 para 0,109. Como tal, não se considerou o serviço PS R99 nas simulações desta célula.

A potência medida face à estimada é apresentada na Figura 6.10.

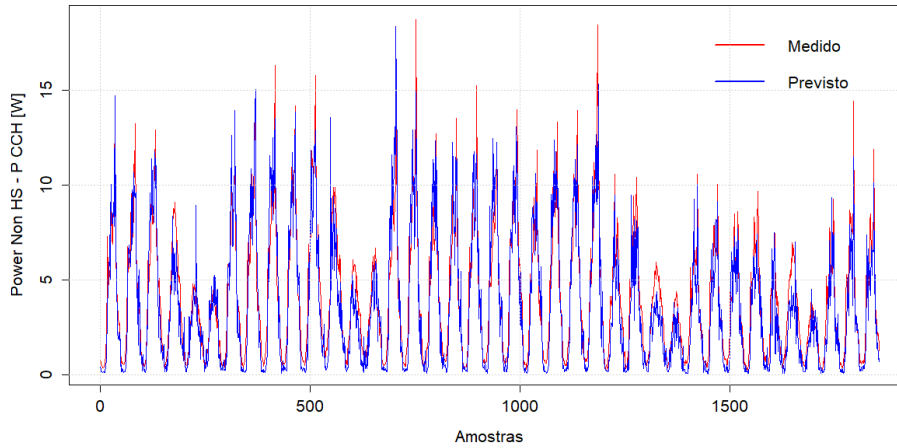


Figura 6.10: Potência de canais dedicados medida vs estimada.

Tendo determinado os valores de *EnergyPerBit* para os serviços de voz e PS R99 e do P_{CCH} a partir dos modelos RLM, passa-se para os resultados do modelo de capacidade 3G para a célula B.

Resultados e Validação do Modelo

Mais uma vez recorre-se aos valores estatísticos determinado a partir dos dados da célula. As estatísticas da célula úteis para testar o modelo apresentam-se, resumidamente, na Tabela 6.9.

Tabela 6.9: Sumário das estatísticas referentes à célula B.

	VS.MeanTCP	VS.MaxTCP	$R_{UtilizadorHSDPA}[Amostra]$	Potência Máxima	CQI	Nº Utilizadores		
	[dBm/W]	[dBm/W]	[kbps]	[dBm/W]		Voz	PS R99	HSDPA
Valores Médios	45 / 31,46	45,9 / 38,64	983,4	46 / 39,81	20	5	0	6
Pior caso	45,6 / 36,64	45,8 / 38,19	511,6	46 / 39,81	16	9	0	5

Pode-se verificar que esta célula apresenta utilizadores com maior exigência a nível de serviço, considerando que o débito médio por utilizador HSDPA é de 983,4 kbps, que é consideravelmente superior ao da célula A. É também perceptível que esta célula apresenta melhores condições de propagação rádio, pois o QCI médio é de 20, enquanto que para a célula A era de 15.

Assumiui-se para valores de R_{target} o débito médio por utilizador HSDPA, inicialmente o valor médio da célula e de seguida o valor medido na *busy hour*. As características do serviço HSDPA para ambos os valores de R_{target} são apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10: Sumário das características do serviço HSDPA.

$\bar{P}_{DSCCH-TX}$ [W]	Prob. Bloqueio [%]	R_{target} [kbps]	Mediana QCI	Nº Utilizadores
1.83	50	983,4	20	19
0,95	50	511,6	20	37

Para um R_{target} de 983,4 kbps, a curva de admissão para potência máxima e a ajustada a partir do algoritmo de *headroom* apresentam-se na Figura 6.11. É possível visualizar que não houve alterações à potência da célula ao aplicar o algoritmo de *headroom*, isto porque o *headroom* calculado foi cerca de 1,07%. Tal como referido anteriormente, o algoritmo de *headroom* apresenta uma margem para considerar as aproximações que são intrínsecas ao modelo de capacidade. Como o valor do *headroom* é inferior à margem definida (3%) para não comprometer a *performance* da célula (no caso de um ajuste de potência), não é realizado nenhum ajuste. Contudo, a célula apresenta capacidade para absorver o tráfego gerado, assumindo um R_{target} de quase 1 Mbps.

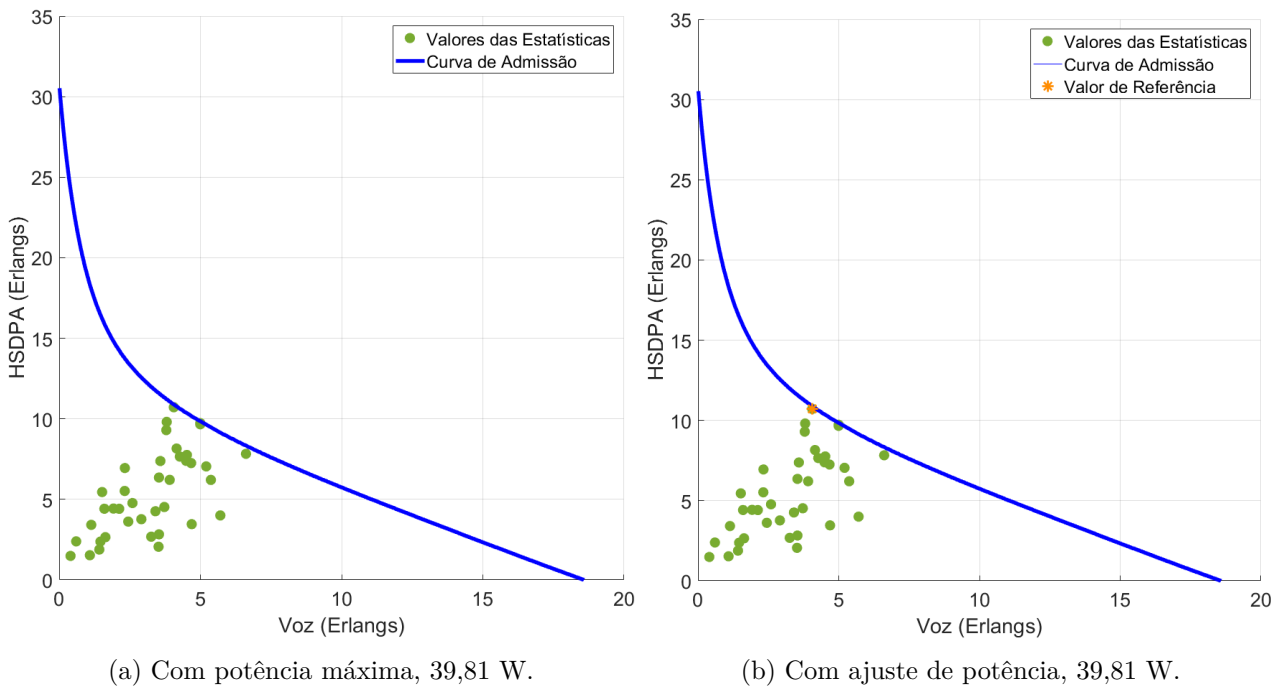


Figura 6.11: Região de Admissão para $R_{target} = 983,4$ kbps.

Para um R_{target} de 511,6 kbps é expectável que a capacidade aumente e que haja ajuste de potência ao aplicar o algoritmo de *headroom*, pois o débito por utilizador HSDPA é menos exigente e praticamente metade do valor médio da célula.

É importante notar, pela Figura 6.12b, que o ponto estatístico de referência para o pior caso mudou, relativamente ao usado no exemplo anterior (Figura 6.11b). Esta alteração deve-se ao facto de se ter em conta, na determinação do pior caso estatístico, os valores de M atribuídos a cada serviço. Pois quanto menor for o número máximo de utilizadores de um serviço, mais exigente esse serviço é, como tal, tem maior peso no tráfego gerado.

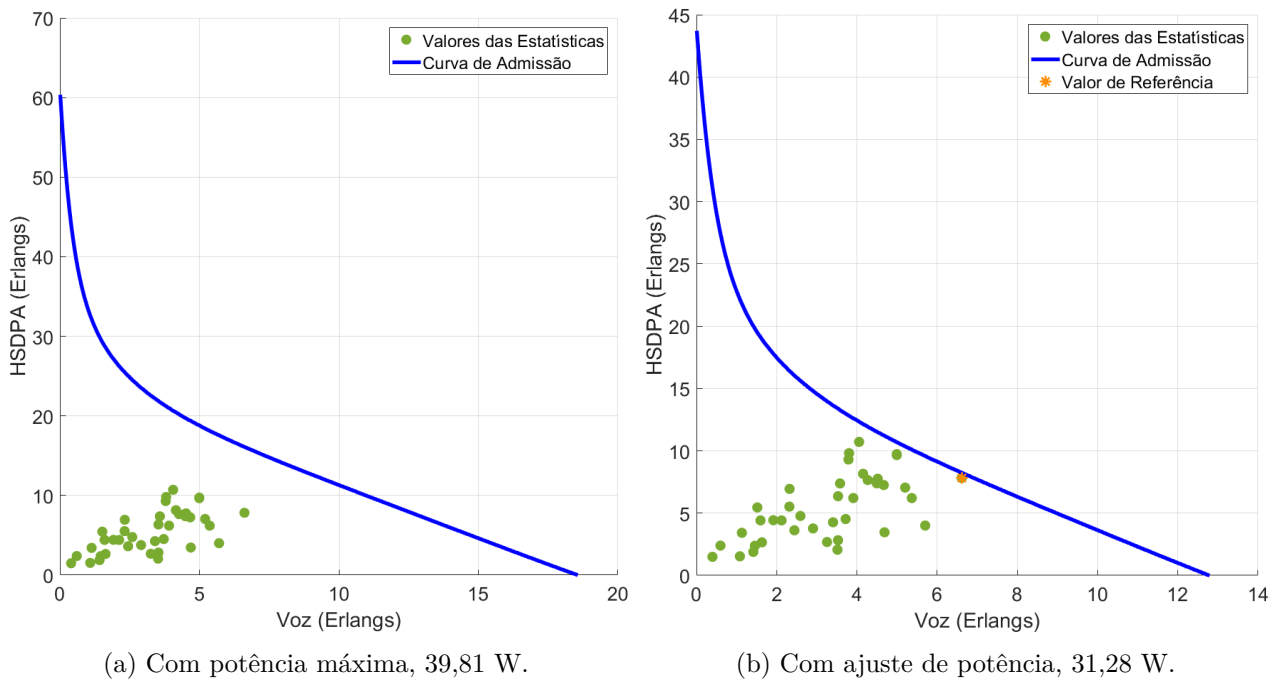


Figura 6.12: Região de Admissão para $R_{target} = 511,6$ kbps.

O ponto estatístico de referência é alterado pelo facto de, para um $R_{target} = 511,6$ kbps, se conseguir obter um número máximo de utilizadores no serviço HSDPA superior ao serviço de voz, como mostra a Tabela 6.11. Esta situação deve-se às boas condições de propagação rádio a que a célula está sujeita, bem como pelo facto do R_{target} ser baixo e, conseqüentemente, não muito exigente para a célula. Nesta situação, foi possível ajustar a potência para 31,28 W, com um *headroom* de 21,4%, representando uma poupança considerável na energia consumida pela célula.

Tabela 6.11: Sumário dos resultados referentes à célula B.

R_{target} [kbps]	Potência Célula [W]	$\bar{P}_{DSCH-TX}$ [W]	Nº Máximo Utilizadores		K	M		Headroom	
			Voz	HSDPA		Voz	HSDPA	[%]	
511,6	39,81	0,95	28	37	1036	37	28	-	
	31,28		21	28	84	4	3	✓	21,4
983,4	39,81	1,83	28	19	532	19	28	-	
	39,81		28	19	532	19	28	✓	1,07

6.3 Modelo de capacidade 4G

Para o teste do modelo de capacidade 4G final, usou-se um novo *set* de dados, com dados PM e *Configuration Management* (CM) registados de uma rede LTE constituída por 89 células (12 *sites* de duas operadoras) em diferentes ambientes, urbano, suburbano e rural. Foram usadas três portadoras na banda dos 800, 2100 e 2600 MHz com larguras de banda de 10, 15 e 20 MHz. As medições da rede foram coletadas com uma granularidade horária durante um mês.

6.3.1 Detecção de células com problemas de capacidade

Do conjunto de *features* disponível no *set* de dados, as mais significantes para o modelo foram, como já referido, as apresentadas na Secção 5.3, na Tabela 5.1. Sendo estas *features*, os preditores candidatos para o modelo RLM a ser aplicado para estimar o débito máximo da célula ($Thrp'_{DL}(c)$). Analisaram-se as *features* selecionadas para todas as células cujos resultados se apresentam na Tabela 6.12. A ampla gama de valores observados na tabela é uma evidência clara das diferentes condições da rede, sendo óbvio a necessidade de estimar a capacidade da célula individualmente.

As variáveis independentes devem ser agnósticas à célula, ou seja, apenas variáveis relacionadas com a qualidade do canal (*Avg.MCS* e *Avg.CQI*), atrasos no estabelecimento de ligações com o eNB (*RAB.Est.TimeAvg* e *RRC.ConnSetup.TimeAvg*) ou taxas de utilização (*PRB.UtilRate*) são consideradas. Este tipo de *features* permite, por exemplo, estimar a capacidade da célula sem o volume de tráfego ou o número de utilizadores, uma vez que são específicos para cada célula.

Tabela 6.12: Análise das *features* selecionadas na rede.

Variable x_i	Min	Média	Max	Desvio Padrão
RRC.ConnSetup.TimeAvg [ms]	14	25	240	6.2
RAB.Est.TimeAvg [ms]	14	30	1873	12.9
PRB.UtilRate [%]	14	0.5	97.5	17.3
Avg.CQI	5	10	15	1.6
Avg.MCS	1	14	27	2.9

Das 89 células analisadas e tendo em consideração as condições descritas na Secção 5.3.1, 9 delas apresentaram problemas de capacidade ao nível do DL, com débitos por utilizadores baixos, elevada utilização de PRB e baixos valores de CQI médio, como se identifica na Tabela 6.13. Foi verificado que, em pelo menos três dias numa semana, a utilização de PRBs, em DL, atinge ou excede 70% com um débito por utilizador menor que 3 Mbps.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6.13, para as células com um CQI médio menor ou igual que a mediana ($CQI = 7$), como é o caso das células A, B, C, D, E, F e I, é necessário aumentar

o débito da célula, através da otimização da *performance* RF. Para as restantes células (G e H), é essencial adicionar portadoras ou expandir a largura de banda da portadora existente, uma vez que as condições de propagação rádio são relativamente boas.

Tabela 6.13: Células com problemas no *Downlink*.

Célula	Avg.CQI	PRB.UtilRate [%]	Thrp UE [Mbps]
A	6	72.7	2.612
B	7	93.9	1.136
C	7	85.9	2.044
D	7	85.8	2.100
E	6	90.1	1.264
F	7	80.4	2.133
G	8	91.3	1.976
H	10	90.6	2.842
I	7	79.6	2.571

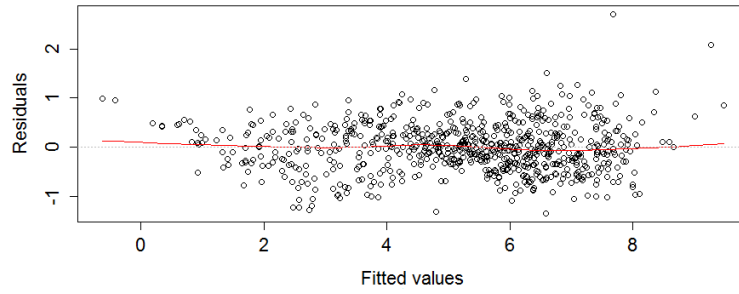
6.3.2 Estimativa da capacidade da célula pelo modelo RLM

Com as variáveis selecionadas a partir dos métodos estatísticos já mencionados, o modelo RLM final, por célula, foi construído. Considerando as duas células com mais problemas de capacidade (B e G), aplicou-se o modelo RLM de forma a estimar o débito máximo da célula, tendo em conta as *features* mencionadas. Esta é uma forma de testar o modelo realizado e perceber se as células ainda têm margem de capacidade.

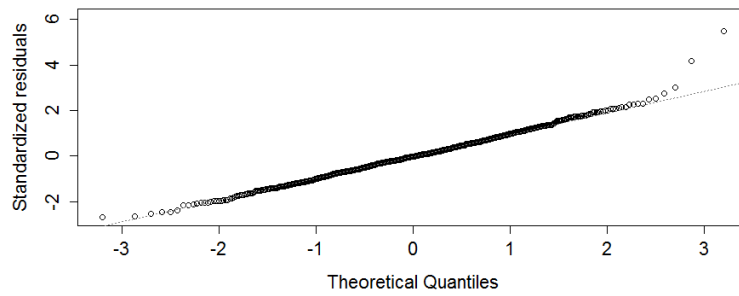
Uma vez que o débito máximo da célula é calculado em cada amostra, tendo em consideração as propagações rádio dessa amostra, significa que se obtém uma oscilação desse débito, já que as condições rádio e interferência também variam facilmente de hora para hora. Como tal, o modelo apresenta dois *thresholds* para o débito máximo da célula, onde num é realizado a média de todas as amostras, ou seja, têm-se em consideração as condições rádio, em média, a que a célula está sujeita. No outro caso, é usado o máximo de todas as amostras, onde são consideradas as melhores condições a que a célula esteve sujeita, sendo este o débito máximo que a célula consegue obter.

Célula B

Com as *features* selecionadas obteve-se um R^2 ajustado de 92,8%, um MAPE de 10,25%, um RMSE de 0,502 Mbps e um coeficiente de correlação de 96,36%. Para analisar e validar adequadamente o modelo apresentam-se, na Figura 6.13, os gráficos dos resíduos face aos valores estimados (Figura 6.13a) e o normal QQ-Plot (Figura 6.13b).



(a) Resíduos vs Valores Estimados.



(b) Normal QQ-Plot.

Figura 6.13: Gráficos para validação do modelo RLM.

Pela Figura 6.13a, observa-se que o traçado a vermelho é praticamente linear, como tal, não existe um padrão não linear na distribuição dos resíduos. Além disso, estes seguem uma distribuição normal como se conclui da análise da Figura 6.13b, em que os resíduos normalizados apresentam uma relação linear para além do segundo quantil da distribuição normal.

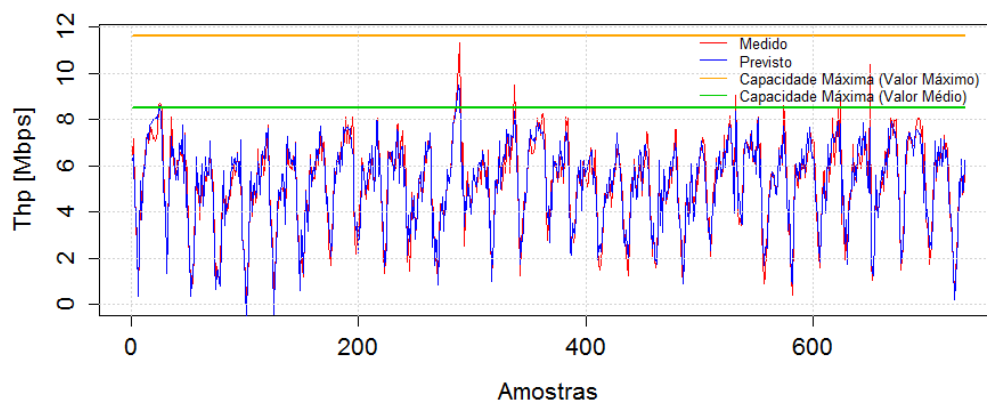


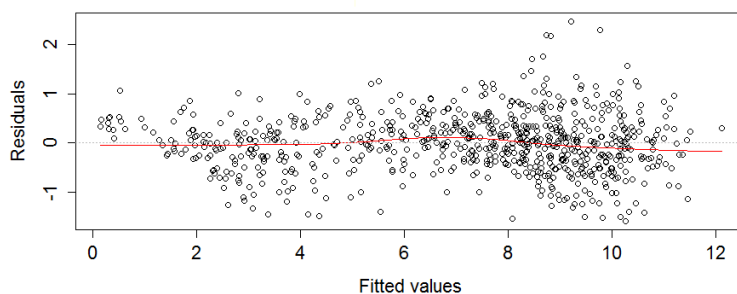
Figura 6.14: Capacidade máxima da célula B.

Pela Figura 6.14, verifica-se que o modelo consegue prever o débito da célula medido com precisão, e que também valida o modelo RLM a partir das cinco *features* seleccionadas. Os dois *thresholds* também se apresentam na Figura 6.14, de modo a perceber se a célula tem margem de capacidade.

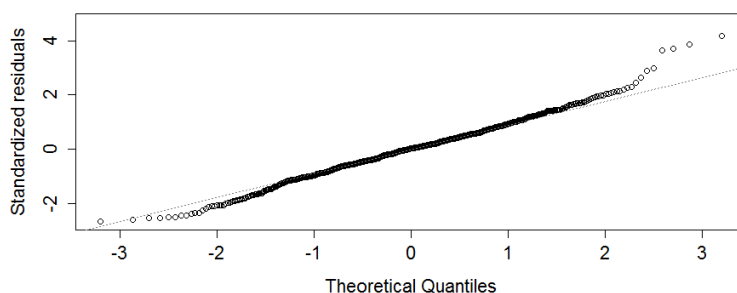
Tendo por base o primeiro *threshold*, definido pelo valor médio, verifica-se que a célula apresenta problemas de capacidade, uma vez que existem picos de débito da célula que ultrapassam o *threshold*, em algumas períodos. Relativamente ao maior pico, o *headroom* é de cerca de -33,3%, sendo negativo, pelo facto do débito da célula medido ultrapassar o débito máximo calculado a partir da média de todas as amostras. Contudo, para o débito máximo da célula, calculado para as melhores condições rádio, existe margem de capacidade, onde o *headroom* é de 2,5% para o maior valor do débito da célula medido. É necessário ter em conta que a célula tem margem de capacidade porque na maioria do tempo, o débito da célula medido é inferior ao primeiro *threshold*. Contudo, é necessário perceber se os picos representam valores esporádicos e casos isolados ou se existe uma tendência crescente para o aumento de tráfego nessa célula.

Célula G

Para a célula G e com as *features* seleccionadas obteve-se um R^2 ajustado de 95,61%, um MAPE de 8,72%, um RMSE de 0,591 Mbps e um coeficiente de correlação de 96,36%. Novamente, apresentam-se os gráficos dos resíduos face aos valores estimados (Figura 6.15a) e o normal QQ-Plot (Figura 6.15b).



(a) Resíduos vs Valores Estimados.



(b) Normal QQ-Plot.

Figura 6.15: Gráficos para validação do modelo RLM.

Relativamente aos gráficos da Figura 6.15, as conclusões são idênticas às realizadas para a célula B, embora os resultados sejam ligeiramente piores que os da célula B, pois o traçado vermelho é praticamente linear, embora menos que o da célula B, mas não é significativo para considerar um padrão não linear. Já o gráfico do normal QQ-Plot mostra que a distribuição dos resíduos segue aproximadamente uma distribuição normal, embora não tão evidente como no caso da célula B.

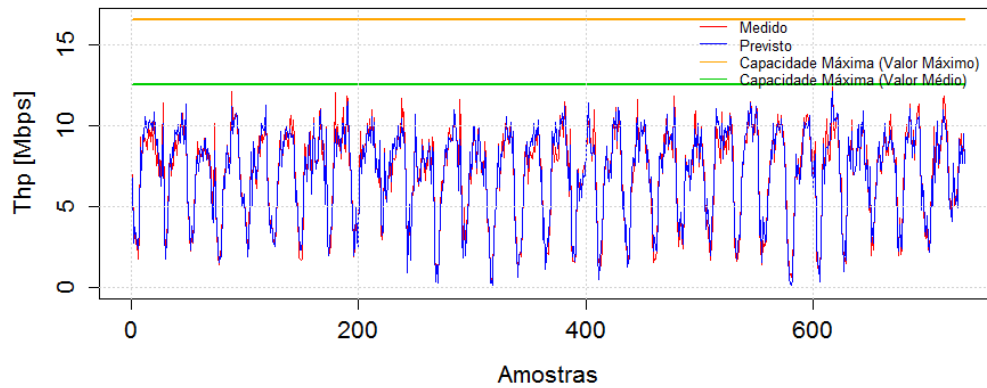


Figura 6.16: Capacidade máxima da célula G.

Pela Figura 6.16, verifica-se igualmente que o modelo consegue prever o débito da célula medido, com precisão, com apenas as cinco *features* selecionadas.

Relativamente aos *thresholds*, esta célula apresenta melhores condições rádio que a célula B, como já tinha sido referido. Percebe-se pelo facto do débito máximo da célula, considerando as melhores condições rádio, ser superior ao da célula B. Nesta célula, os valores medidos do débito da célula são sempre inferiores ao primeiro *threshold*, onde, para o maior pico, o valor de *headroom* é de 1,2%, passando para 25,2% para o segundo *threshold*. Embora a célula tenha margem de capacidade, é necessário ter em conta que o débito máximo calculado com as melhores condições, nem sempre se consegue verificar na célula, sendo o valor médio o mais próximo da realidade, o que significa que a célula também está próxima do limite de capacidade.

Fez-se o cálculo do débito máximo da célula para todas as células detetadas com problemas de capacidade, que se apresenta na Tabela 6.14.

Tabela 6.14: Resultados para as células com problemas no *Downlink*.

Célula	ThrpMax [Mbps]	Capacidade Máxima [Mbps]		Headroom [%]	
		Médio	Máximo	Médio	Máximo
A	8,801	7,895	10,254	-11,5	14,2
B	11,349	8,514	11,642	-33,3	2,5
C	16,043	10,606	14,737	-51,3	-8,9
D	16,014	9,259	11,983	-73	-33,6
E	9,777	8,459	11,535	-15,6	15,2
F	8,302	6,953	8,468	-19,4	2
G	12,410	12,558	16,595	1,2	25,2
H	35,778	21,419	29,707	-67	-20,4
I	10,204	9,800	13,162	-4,1	22,5

7

Conclusões

7.1	Síntese	92
7.2	Trabalho Futuro	93

7.1 Síntese

Esta dissertação fornece, inicialmente, uma visão geral da evolução do número de subscritores nas redes móveis, por tecnologia e o conseqüente aumento do tráfego gerado quer a nível de voz, com tendência à estagnação, quer a nível de dados que aumenta consideravelmente com o avançar do tempo.

Na elaboração do trabalho foi feita uma caracterização das redes móveis 3G e 4G, ao nível dos equipamentos que as constituem, bem como da própria configuração, arquitetura e interface rádio. Como ponto de partida, analisaram-se os padrões de tráfego (voz e dados) dos utilizadores, tanto diário como semanal, para as diferentes tecnologias configuradas nas estações base em estudo.

Verificou-se uma grande dependência entre o tráfego gerado nas estações base nas diversas tecnologias, e o respetivo consumo energético, pelo que o tráfego é o principal fator considerado nos modelos desenvolvidos.

No âmbito desta dissertação foram desenvolvidos dois modelos de capacidade, 3G e 4G, baseados em modelos de RLM, com intuito de obter um modelo unificado multi-tecnologia. Embora os modelos sejam ambos baseados em modelos de RLM, a abordagem em cada um foi diferente, até porque os dados disponibilizados para o modelo 4G não permitiam a distinção entre vários serviços, já que mais de 99% do tráfego, de todas as células, correspondia a um único serviço, não havendo tráfego suficiente, nos restantes serviços, para poderem ser considerados.

O modelo de capacidade 3G foi baseado no modelo Multidimensional de Erlang B, de forma a construir curvas de admissão, que marcam a capacidade limite da célula para uma dada potência, dependendo do número de utilizadores em cada serviço e de forma a garantir os níveis de QoS, definidos como parâmetros de entrada. Sendo usados, para os serviços de voz e PS R99, modelos de RLM para discriminar e determinar a denominada característica da célula (*EnergyPerbit*), uma vez que estes dois serviços partilham o mesmo canal de transporte de dados (DCH). Para o serviço HSDPA, foi usada uma abordagem mais teórica para determinar a característica da célula correspondente ($\bar{P}_{DSC\text{-}TX}$). Considerou-se parâmetros como o CQI, BLER, a *activity factor* e uma taxa de transmissão de dados, por utilizador, especificada como QoS (R_{target}). Estas características da célula permitem estimar o número máximo de utilizadores em cada serviço, para o modelo Multidimensional de Erlang B, para realizar a curva ou região de admissão, consoante o número de serviços considerado. Pela análise dos dados estatísticos, conclui-se que o serviço PS R99 é um serviço cada vez menos usado, muito devido ao aparecimento do serviço HSDPA e, conseqüentemente, em algumas células, este serviço é ignorado por não haver dados estatísticos suficientes para ser relevante.

Os resultados da validação mostram que o modelo Multidimensional de Erlang B é uma boa abordagem para estimar a capacidade de uma célula da rede 3G, tendo em conta que usa sistemas CS e PS. Sendo as características da célula determinadas com parâmetros que definem as condições rádio a que a célula está sujeita, acrescentam realismo na estimativa da capacidade. O algoritmo de *headroom* permite definir a potência mínima, numa dada célula, de forma a garantir capacidade suficiente para absorver o tráfego gerado, em *busy hour*, sem que esteja a usar a potência máxima. A potência varia consoante o nível de QoS exigido pelos parâmetros de entrada do modelo, ou seja,

probabilidades de bloqueio, R_{target} e reserva de *slots* para *handovers*.

O modelo de capacidade 4G é realizado essencialmente com modelos de RLM e monitorização dos recursos rádio, onde se determinam as células com problemas de capacidade, tendo em conta algumas restrições e limites, reais, definidos pelos fornecedores de equipamento e que podem ser parametrizados pelo operador. A partir dos dados, também se estima o débito máximo que a célula consegue suportar, pela análise das estatísticas que definem as condições de propagação rádio, a que as células estão sujeitas, e a partir da análise da taxa de utilização de PRBs. Concluiu-se que é possível estimar a capacidade da célula com base na utilização de recursos, condições de canal e atrasos associados, com um erro acessível, inferior a 10%.

O modelo de capacidade 4G determinou problemas de capacidade em 9 células, em DL, num universo de 89 células para análise. Par essas células, determinou-se a capacidade máxima, a nível de taxa de transmissão, para verificar se as células ainda tinham margem de capacidade. Definiram-se dois *thresholds*, onde num se tem em conta os valores médios das condições de canal da célula e no outro consideraram-se as melhores condições a que a célula esteve sujeita. Novamente recorreu-se ao *headroom*, que consiste em comparar os valores de *threshold* com a hora de maior tráfego na célula, de forma a perceber se a célula está numa situação de limite de capacidade.

Os modelos resultaram numa boa previsão da capacidade da célula, nas diferentes vertentes usadas.

7.2 Trabalho Futuro

Esta dissertação não representa um fim de projeto, mas sim um início de trabalho na área da capacidade. Neste ponto são realizadas algumas sugestões de trabalho futuro a desenvolver que visam complementar o trabalho realizado e abrir novos tópicos de investigação.

Foram propostas duas formas de determinar a capacidade de células 3G e 4G. No entanto, os modelos desenvolvidos podem sofrer melhorias, nas suas estimativas, minimizando o erro de predição, com a realização de mais teste com novos dados, nomeadamente, dados de células com limitações reais de capacidade, de forma a verificar se os modelos acusam essa limitação de uma forma precisa. Para o modelo 4G, seria interessante realizar um estudo mais aprofundado do primeiro método adotado para o desenvolvimento do modelo. Contudo, os resultados a esse primeiro método (Anexo C) foram de alguma forma satisfatórios, pois o modelo comporta-se como expectável tendo em consideração as variações testadas. Desta forma, seria possível realizar um modelo de capacidade 4G baseado em curvas de admissão, idêntico ao modelo 3G.

Atualmente, a rede móvel é uma estrutura dinâmica, com várias camadas (macro / micro / pico células) que, a fim de lidar com o aumento em número e utilização dos utilizadores e implementação de novos serviços, necessita ser dimensionada de modo a que os requisitos de QoS e de QoE fornecidos sejam cumpridos. A evolução tecnológica intensa pelo lado do consumidor, o equipamento móvel com cada vez mais recursos avançados e uma tendência social que está a ligar as pessoas como nunca antes foi visto, precisa de uma estrutura de rede fortemente acessível e com recursos abundantes. Hoje em dia, a maioria das redes em todo o mundo opera, simultaneamente, em três tipos de tecnologias diferentes: 2G, 3G e 4G. Pelo que, a necessidade de maior capacidade, ou seja, mais chamadas de

voz/vídeo e maiores ritmos de transmissão para oferecer aos utilizadores, leva os operadores a planear a rede com cada vez mais células, aumentando o investimento e, conseqüentemente, a fatura energética. Seria, por isso, interessante aliar aos modelos de capacidade, modelos de *forecast* (previsão) de forma a conciliar os dois e proporcionar a estimativa de limite de capacidade de células a longo prazo. Desta forma, seria possível proporcionar um investimento mais direto para os reais problemas de uma rede móvel e evitar situações em que é necessário investimentos de última hora para manter a qualidade da rede. Desta forma, se possível estimar, antecipadamente, as células que ficariam com limitações de capacidade e aproximadamente em que instante temporal atingiriam ao seu limite.

Referências

- [1] Ericsson. “Ericsson Mobility Report”, 2018. [Online; acessado a 20 de setembro-2018] <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2018/ericsson-mobility-report-june-2018.pdf>.
- [2] Ericsson. “Ericsson Mobility Report - Q2 2018 Update”, 2018. [Online; acessado a 20 de setembro-2018] <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2018/emr-q2-update-2018.pdf>.
- [3] M. Toril J.J. Sanchez-Sanchez J.A Fernandez-Segovia, S. Luna-Ramirez. Estimating cell capacity from network measurements in a multi-service lte system. *IEEE Communications Letters*, (431-434).
- [4] K. Chang and R.P. Wicaksono. Estimation of network load and downlink throughput using rf scanner data for lte networks. *International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication System (SPECTS)*, (1-8).
- [5] Xi Li. *Radio Access Network Dimensioning for 3G UMTS*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [6] [Online; acessado 3-Julho-2017]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/tsg_sa/tsgs_08/docs/pdf/sp-000257.pdf.
- [7] Harri Holma and Antti Toskala. *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2007.
- [8] Johan Skold Erik Dahlman, Stefan Parkvall and Per Beming. *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Elsevier, 2007.
- [9] 3rd Generation Partnership Project. *ETSI TS 125 211 V14.0.0*. ETSI, 2017. [Online; acessado 07-09-2018] https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125200_125299/125211/14.00.00_60/ts_125211v140000p.pdf.
- [10] J. Wannstrom. “CDMA Overview: Access Schemes”. [Online; acessado 02-09-2018] <http://www.umtsworld.com/technology/cdmabasics.htm>.
- [11] D. S. Saini, S. V. Bhooshan, and T. Chakravarty. “OVSF code groups and reduction in call blocking for WCDMA systems”. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, pages 143–147, 2008.

- [12] 3rd Generation Partnership Project. *ETSI TS 125 308 V14.0.0*. ETSI, 2017. [Online; acedido 07-09-2018] https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125200_125299/125213/15.00.00_60/ts_125213v150000p.pdf.
- [13] 3rd Generation Partnership Project. *ETSI TS 125 306 V15.2.0*. ETSI, 2018. [Online; acedido 10-09-2018] https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125300_125399/125306/15.02.00_60/ts_125306v150200p.pdf.
- [14] J. Wannstrom. “HSPA”. [Online; acedido 07-09-2018] <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>.
- [15] A. Masmoudi, D. Zeglache e S. Tabbane. “Resource and scheduling optimization in HSDPA based UMTS networks”. *Proceedings of World Wireless Congress (WWC)*, 2005.
- [16] M. Jurvansuu, J. Prokkola, M. Hanski, and P. Perala. “HSDPA Performance in Live Networks”. *2007 IEEE International Conference on Communications*, pages 467–471, 2007.
- [17] Stefania Sesia, Issam Toufik, e Matthew Baker. *LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley Publishing, 2009.
- [18] Christopher Cox. *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
- [19] Antti Toskala e Harri Holma. *LTE for UMTS: OFDMA and SC-FDM Based Radio Access*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
- [20] Antti Toskala e Harri Holmar. *LTE for UMTS Evolution to LTE-Advanced*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- [21] Ericsson. *Control Channel Dimensioning*. Wiley Publishing, 2009.
- [22] Antti Toskala e Harri Holmar. *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VolTE and 4G Mobile Communications*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., 2014.
- [23] 3rd Generation Partnership Project. *ETSI TS 123 203 V14.6.0*. ETSI, 2018. [Online; acedido 02-09-2018] https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123203/14.06.00_60/ts_123203v140600p.pdf.
- [24] Motorola. Realistic LTE Performance From Peak Rate to Subscriber Experience, 2009.
- [25] Ayman Elnashar, Mohamed A. El-saidny, e Mahmoud R. Sherif. *Coverage and Capacity Planning of 4G Networks*. John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [26] 3rd Generation Partnership Project. *ETSI TS 136 213 V14.6.0*. ETSI, 2018. [Online; acedido 02-09-2018] https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125300_125399/125308/14.00.00_60/ts_125308v140000p.pdf.
- [27] *3GPP Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+) - Key Performance Indicators (KPI) for UMTS and GSM*, 2010.

- [28] E. Alpaydin. *Introduction to Machine Learning*. 2nd ed. The MIT Press, 2010.
- [29] D. C. Montgomery e G. C. Runger. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley and Sons, 2003.
- [30] S. Rodrigues. *Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações*. Universidade da Beira Interior, 2012.
- [31] Christian Kleiber e Achim Zeileis. *Applied Econometrics with R*. Springer, 2008.
- [32] T. S. Breusch e A. R. Pagan. *A Simple Test for Heteroskedasticity and Random Coefficient Variation*. *Econometrica*, 1979.
- [33] P.J. Brockwell e R.A. Davis. *Introduction to Time Series and Forecasting*. Number vol. 1 in *Introduction to Time Series and Forecasting*. Springer, 2002.
- [34] Wlodzimierz Bryc. *The Normal Distribution: Characterizations with Applications*. Springer-Verlag, 1995.
- [35] R. J. Hyndman e G. Athanasopoulos. *Forecasting principles and practice*, 2017. [Online; acedido 27-Junho-2017] <https://www.otexts.org/fpp/>.
- [36] John O. Rawlings, Sastry G. Pantula e David A. Dickey. *Applied Regression Analysis: A Research Tool*. 2nd ed. Springer-Verlag, 1998.
- [37] K. Krishnamoorthy. *Handbook of Statistical Distributions with Applications*. 2nd ed., Chapman and Hall/CRC, 2015.
- [38] Marta O. Verissimo. “Managing Capacity for a Real Multi-Service UMTS/HSPA Radio Access Network”. Master Thesis.
- [39] Toni Janevski. *Traffic analysis and design of wireless IP networks*. Artech House, Inc., 2003.
- [40] Bruce S. Nothcote e Nick A. Tompson. “Dimensioning Telstras WCDMA (3G) Network”. *2010 15th IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling, Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2010.
- [41] Huawei. “RAN 14.0; KPI Reference”. [Online; acedido 23-07-2018] http://www.academia.edu/7862646/RAN14_0_KPI_Reference_02_PDF_-EN.
- [42] 3rd Generation Partnership Project. *ETSI TS 125 214 V15.0.0*. ETSI, 2018. [Online; acedido 02-08-2018] https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125200_125299/125214/15.00.00_60/ts_125214v150000p.pdf.
- [43] S. Pathak I. D. o. E. Indian Institute of Technology (Kharagpur T. Lamba, P. Biswas and E. C. Engineering). *Proceedings of the Eleventh National Conference on Communications: NCC-2005, 28-30 January, 2005*. Allied Publishers, 2005.

- [44] Harri Holma and Antti Toskala. *HSDPA/HSDUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications*. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [45] A. A. Alonso B. C. Martinez J. M. Aguiar Perez e A. S. Esguevillas P. A. Garcia, A. A. Gonzalez. Automatic umts system resource dimensioning based on service traffic analysis. *EURASIP Journal*, (323), 2012.
- [46] Huawei. *eRAN Capacity Monitoring Guide*. HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD., 2016.
- [47] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); physical layer procedures. *TS 36.213, V14.2.0 Release 14*, pages 431–434, 2017.

A

Tabelas 3GPP para cálculo do débito máximo da célula

Apresentam-se as tabelas de mapeamento dos índices de MCS com os índices de TBS e dos índices de TBS com o número de PRBs (apenas desde 41 até 50 PRBs). Onde se retira o valor de TBS para um dado índice de MCS para o cálculo do débito máximo da célula, em LTE, adaptadas de [26].

Tabela A.1: Mapeamento entre índices de MCS e TBS.

Índice MCS	Antes <i>Rel.12</i>		<i>Rel.12</i> e após	
	Modulação	Índice TBS	Modulação	Índice TBS
0	QPSK	0	QPSK	0
1	QPSK	1	QPSK	2
2	QPSK	2	QPSK	4
3	QPSK	3	QPSK	6
4	QPSK	4	16-QAM	8
5	QPSK	5	16-QAM	10
6	QPSK	6	16-QAM	11
7	QPSK	7	16-QAM	12
8	QPSK	8	16-QAM	13
9	QPSK	9	16-QAM	14
10	16-QAM	9	16-QAM	15
11	16-QAM	10	64-QAM	16
12	16-QAM	11	64-QAM	17
13	16-QAM	12	64-QAM	18
14	16-QAM	13	64-QAM	19
15	16-QAM	14	64-QAM	20
16	16-QAM	15	64-QAM	21
17	64-QAM	15	64-QAM	22
18	64-QAM	16	64-QAM	23

Índice MCS	<i>Antes Rel.12</i>		<i>Rel.12 e após</i>	
	Modulação	Índice TBS	Modulação	Índice TBS
19	64-QAM	17	64-QAM	24
20	64-QAM	18	256-QAM	25
21	64-QAM	19	256-QAM	27
22	64-QAM	20	256-QAM	28
23	64-QAM	21	256-QAM	29
24	64-QAM	22	256-QAM	30
25	64-QAM	23	256-QAM	31
26	64-QAM	24	256-QAM	32
27	64-QAM	25	256-QAM	33/33A/33B
28	64-QAM	26/26A	QPSK	Reservado
29	QPSK	Reservado	16-QAM	Reservado
30	16-QAM	Reservado	64-QAM	Reservado
31	64-QAM	Reservado	256-QAM	Reservado

I_{TBS}	N_{PRB}									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
0	1128	1160	1192	1224	1256	1256	1288	1320	1352	1384
1	1480	1544	1544	1608	1608	1672	1736	1736	1800	1800
2	1800	1864	1928	1992	2024	2088	2088	2152	2216	2216
3	2408	2472	2536	2536	2600	2664	2728	2792	2856	2856
4	2984	2984	3112	3112	3240	3240	3368	3496	3496	3624
5	3624	3752	3752	3880	4008	4008	4136	4264	4392	4392
6	4264	4392	4584	4584	4776	4776	4968	4968	5160	5160
7	4968	5160	5352	5352	5544	5736	5736	5992	5992	6200
8	5736	5992	5992	6200	6200	6456	6456	6712	6968	6968
9	6456	6712	6712	6968	6968	7224	7480	7480	7736	7992
10	7224	7480	7480	7736	7992	7992	8248	8504	8504	8760
11	8248	8504	8760	8760	9144	9144	9528	9528	9912	9912
12	9528	9528	9912	9912	10296	10680	10680	11064	11064	11448
13	10680	10680	11064	11448	11448	11832	12216	12216	12576	12960
14	11832	12216	12216	12576	12960	12960	13536	13536	14112	14112
15	12576	12960	12960	13536	13536	14112	14688	14688	15264	15264
16	13536	13536	14112	14112	14688	14688	15264	15840	15840	16416
17	14688	15264	15264	15840	16416	16416	16992	17568	17568	18336
18	16416	16416	16992	17568	17568	18336	18336	19080	19080	19848
19	17568	18336	18336	19080	19080	19848	20616	20616	21384	21384
20	19080	19848	19848	20616	20616	21384	22152	22152	22920	22920
21	20616	21384	21384	22152	22920	22920	23688	24496	24496	25456
22	22152	22920	22920	23688	24496	24496	25456	25456	26416	27376
23	23688	24496	24496	25456	25456	26416	27376	27376	28336	28336
24	25456	25456	26416	26416	27376	28336	28336	29296	29296	30576
25	26416	26416	27376	28336	28336	29296	29296	30576	31704	31704
26	30576	30576	31704	32856	32856	34008	35160	35160	36696	36696
26A	26416	27376	27376	29296	29296	29296	30576	30576	31704	32856

Figura A.1: Valor do TBS mapeado dos Índices de TBS (até 26A) com o N° PRBs.

I_{TBS}	N_{PRB}									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
27	27376	27376	28336	29296	29296	30576	31704	31704	32856	32856
28	29296	29296	30576	30576	31704	32856	32856	34008	34008	35160
29	30576	31704	31704	32856	34008	34008	35160	35160	36696	36696
30	31704	32856	34008	34008	35160	36696	36696	37888	37888	39232
31	34008	35160	35160	36696	36696	37888	39232	39232	40576	40576
32	35160	35160	36696	37888	37888	39232	40576	40576	42368	42368
32A	37888	39232	40576	40576	42368	42368	43816	43816	45352	46888
33	40576	40576	42368	43816	43816	45352	46888	46888	48936	48936
33A	35160	36696	36696	37888	39232	40576	40576	40576	42368	43816
33B	40576	40576	42368	43816	43816	45352	46888	46888	48936	48936
34	42368	43816	45352	46888	46888	48936	48936	51024	51024	52752

Figura A.2: Valor do TBS mapeado dos Índices de TBS (restantes) com o N° PRBs.

B

Descrição dos KPIs

Neste anexo, descrevem-se os KPIs usados no âmbito desta dissertação. Para os KPIs que são específicos do fornecedor é necessário ter em conta esse facto quando são estudados e/ou aplicados, uma vez que o mesmo operador pode ter vários *sites* com equipamentos de fornecedores diferentes, por exemplo. Nesta dissertação, os KPIs usados para desenvolver e testar o modelo de capacidade 3G são da Huawei, medidos em intervalos de meia hora e fornecidos pela CELFINET.

- **VS.RB.AMR.DL.I**

Indica o número médio de utilizadores AMR com um débito binário de $I = [4.75, 5.15, 5.9, 6.7, 7.4, 7.95, 10.2, 12.2]$ kbps. Ou seja, é o número médio de utilizadores do serviço de voz na célula, durante meia hora.

- **VS.RB.CS.Conv.DL.64**

Indica o número médio de utilizadores CS, com codificação *Pulse Code Modulation* (PCM), com um débito binário de 64 kbps.

- **VS.PS.Bkg.Kbps.DLI**

Indica o tráfego médio (em kbps) usado com débitos de $I = [8, 16, 32, 64, 128, 144, 256, 384]$ kbps para serviços de *Background*.

- **VS.PS.Int.Kbps.DLI**

Indica o tráfego médio (em kbps) usado com débitos de $I = [8, 16, 32, 64, 128, 144, 256, 384]$ kbps para serviços de Interativos.

- **VS.PS.Str.Kbps.DLI**

Indica o tráfego médio (em kbps) usado com débitos de $I = [8, 16, 32, 64, 128, 144, 256, 384]$ kbps para serviços de *Streaming*.

- **VS.HSDPA.UE.Mean.CAT13.14**

Indica o número médio de UEs que se encontram a usar categorias entre a 13 e 14. Existem KPIs para categorias desde 1 até 32, agrupadas.

- **VS.MeanTCP**

Indica a potência de transmissão média utilizada, em DL, para todos os serviços, voz, PS R99 e HSDPA, durante meia hora.
- **VS.MaxTCP**

Indica a potência de transmissão máxima utilizada, em DL, para todos os serviços, voz, PS R99 e HSDPA, durante meia hora.
- **VS.MeanTCP.NonHS**

Indica a potência de transmissão média utilizada, em DL, para os canais dedicados (DCH) e de controlo (CCH), não incluindo a potência usada para o HSDPA.
- **VS.CQII**

Número de *reports*, realizados pelos UE, com CQII, onde *I* variar de 1 a 30.
- **VS.UsedCQII**

Número de vezes que uma *Node B* transmite dados com CQII, onde *I* variar de 1 a 30, havendo um último que contém os restantes valores de CQI, "31to39". Este KPI representa maior precisão no cálculo dos débitos.
- **VS.HSDPA.MeanChThroughput**

Indica o débito médio do serviço HSDPA por utilizador.
- **VS.HSDPA.UE.Mean.Cell**

Indica a média de utilizadores HSDPA, sem taxa de dados específica. Neste caso, a média é feita com amostras de 5 em 5 segundos, são contados o número de utilizadores servidos a cada 5 segundos e feita uma média de todos os 5 segundos de uma meia hora.
- **VS.NackTotal**

Indica o número total de *reports* negativos de pacotes recebidos (não foi recebida informação), num período de tempo (30 min).
- **VS.AckTotal**

Indica o número total de *reports* positivos de pacotes recebidos (foi recebida informação), num período de tempo (30 min).
- **VS.DtxTotal**

Conta número de TTIs em que a célula não consegue interpretar os ACK dos utilizadores
- **VS.HSDPA.All.ScheduledNum**

Indica o número total de vezes que todos os utilizadores são escalonados para receber/enviar dados.

- **VS.HSDPA.DataTtiNum.User**

Indica o número total de TTIs em que existem dados, em espera, para serem transmitidos para os utilizadores HSDPA.

Os restante KPIs usados no âmbito dos modelos RLM, não são descritos por não interferirem diretamente no modelo.

C

Resultados do primeiro método do modelo de capacidade 4G

Os resultados dos testes realizados ao primeiro método descrito para o modelo de capacidade 4G apresentam-se neste anexo, para a primeira e segunda abordagens. Foram realizados testes a cerca de vinte e quatro células mas os resultados com mais pormenor são referentes apenas quatro células, sendo apresentado um resumo dos resultados, às células todas, no final de cada secção.

C.1 Primeira abordagem

Selecionaram-se quatro células para mostrar os resultados mais pormenorizados do modelo RLM. Na Figura C.1 pode-se visualizar a utilização dos PRBs medido e estimado pelo modelo, para as quatro células.

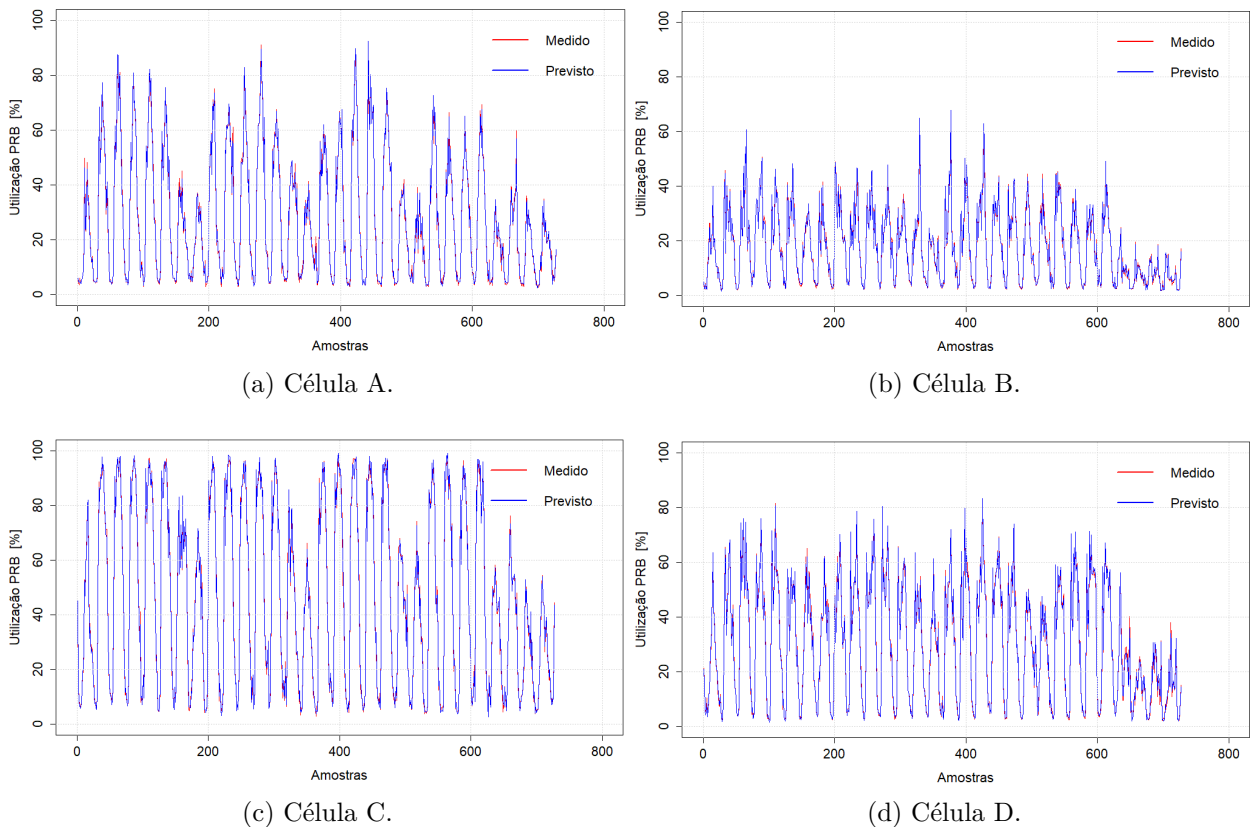


Figura C.1: Valores Medidos vs Previstos da Utilização de PRBs.

Pode-se verificar que o modelo consegue acompanhar, com elevada precisão, a variável dependente. Quer isto dizer que se obtiveram bons resultados estatísticos relativamente aos modelos RLM aplicados às várias células, como se pode verificar na Tabela C.1, quer pelos altos valores do coeficiente de correlação e R^2 , quer pelos baixos valores de MAPE e RMSE obtidos. De notar que, inicialmente, se tinham 199 *features* e se reduziu, em cerca de 91%, o número de *features* para aplicar no modelo.

Tabela C.1: Resultados estatísticos do modelo RLM.

Célula	Correlação [%]	MAPE [%]	RMSE [%]	R^2 [%]	R^2 Ajustado [%]	Nº <i>Features</i>
A	99,85	0,05	1,21	99,7	99,7	18
B	99,81	0,05	0,81	99,81	99,61	17
C	99,91	0,04	1,37	99,82	99,81	17
D	99,86	0,05	1,12	99,72	99,71	19

Para analisar, em mais pormenor, os modelos RLM das várias células, recorreu-se ao gráfico dos resíduos com os valores estimados (Figura C.2) e ao gráfico normal QQ-Plot (Figura C.3).

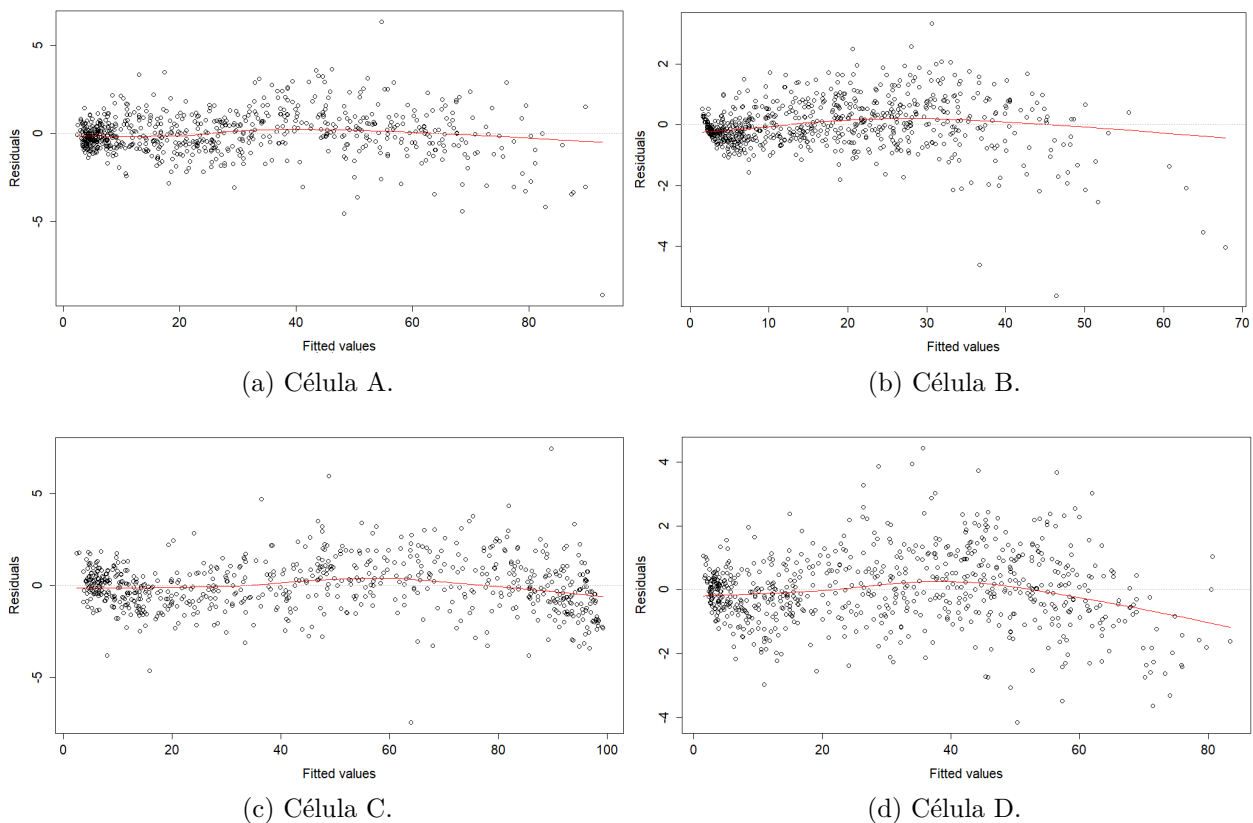


Figura C.2: Resíduos vs Valores Estimados.

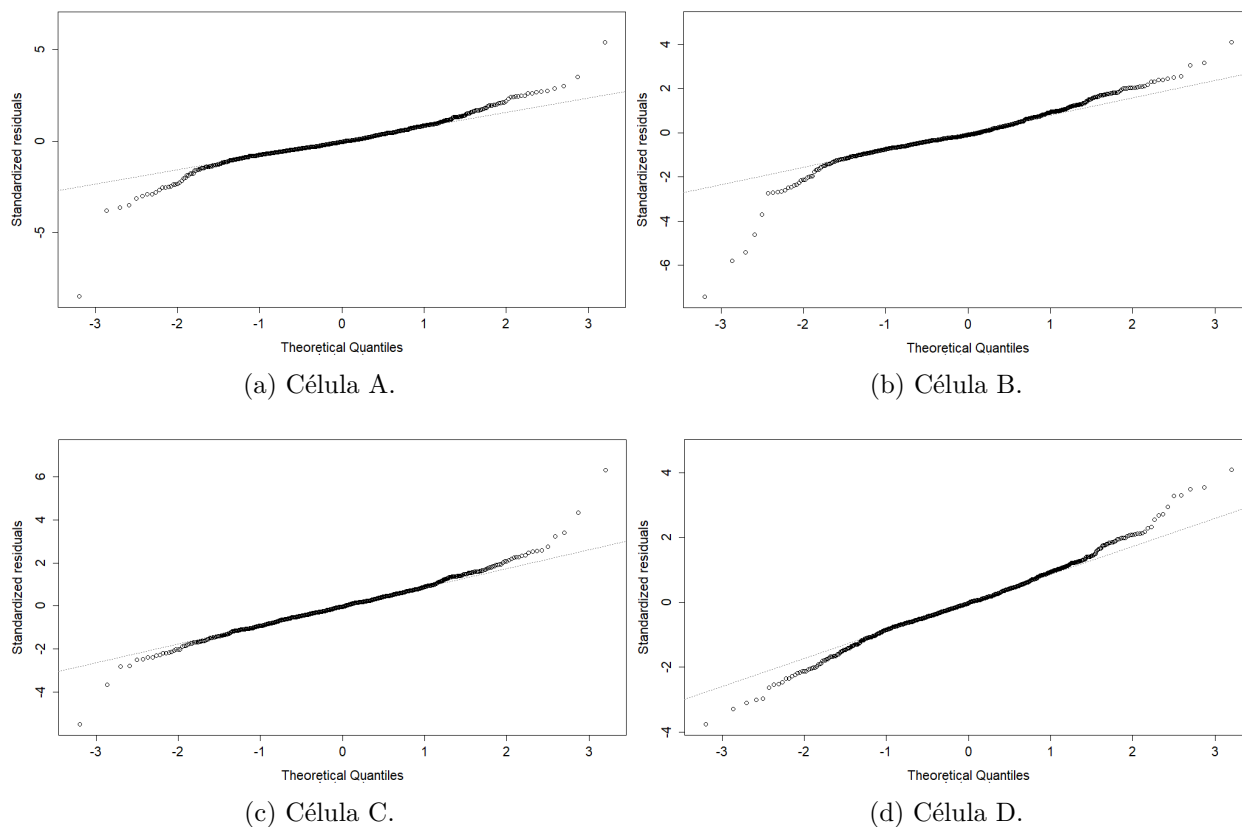


Figura C.3: Normal QQ-Plot.

Considerando o explicado na Secção 3.3, pode-se verificar, pelos gráficos da Figura C.2, onde se tem no eixo das abcissas (horizontal) os valores estimados pelo modelo e no eixo das ordenadas (vertical) a precisão de cada valor estimado. Significa que quanto mais distante o valor estimado estiver da linha horizontal em zero, maior o erro do valor estimado pelo modelo. Uma vez que este gráfico mostra se existe algum padrão não linear nos resíduos, quanto menos linear for o traçado a vermelho, pode-se verificar que as células A, B e C apresentam o traçado praticamente linear, o que representa um bom modelo. A célula D apresenta um traçado menos linear, contudo, não é um caso claro de padrão não linear. Notam-se alguns valores fora do comum, nas últimas amostras, que se podem verificar na Figura C.1d, onde a utilização de PRBs reduziu consideravelmente, fugindo ao valor verificado nas amostras anteriores. Quer isto dizer, que os resultados para a célula D podem não ser os mais precisos, comparativamente com as restantes células.

O gráfico normal QQ-Plot, que compara duas distribuições de probabilidades, neste caso, a distribuição dos resíduos normalizados com a distribuição normal com média zero e desvio padrão de um. Pela Figura C.3, verifica-se que, todas as células, apresentam resíduos que seguem uma distribuição normal porque seguem, aproximadamente, a linha diagonal, exceto em algumas amostras no extremos. O que representa a presença de *outliers* mas, tendo em conta que são poucas amostras, o tratamento desses *outliers* não altera o modelo de forma significativa.

Para as quatro células seleccionadas, os resultados da estimativa do número máximo de utilizadores foram os seguintes:

Tabela C.2: Resultados da estimativa do número máximo de utilizadores.

Célula	Nº Utilizadores			ActiveUE [Médio]	ActiveUE [Máximo]
	Max	Média	Mediana		
A	17	11	13	7	36
B	28	23	24	3	34
C	150	80	84	36	78
D	28	19	19	5	24

Após a determinação do número máximo de utilizadores por amostra, ao forçar $PRB_{[Utilization]}(\%) = 100$. Usou-se três formas de estimar o número máximo, a partir do valor máximo de todas as amostras, a média e a mediana. Verifica-se que o valor máximo, para algumas células toma valores muito elevados, como no caso da célula C, tendo em conta que se estimam o número máximo de utilizadores ativos num dado TTI.

Tabela C.3: Resultados da estimativa do número máximo de utilizadores, para as restantes células.

Célula	Nº Utilizadores			ActiveUE [Médio]	ActiveUE [Máximo]
	Max	Média	Mediana		
E	62	59	59	1.1	10
F	10	9	10	0.7	5
G	21	21	21	0.6	6
H	4	4	4	0.3	24
I	40	38	39	0.8	8
J	63	63	63	0.1	3
K	69	68	69	0.5	5
L	35	33	33	0.5	9
M	30	28	29	0.6	8
N	44	43	43	0.3	6
O	54	45	46	2.1	17
P	12	12	12	0.2	4
Q	58	58	58	0.2	5
R	28	28	28	0.1	3
S	20	20	20	0.2	4
T	102	99	99	0.7	7
U	26	25	25	0.6	8
V	93	87	88	0.8	11
X	105	104	104	0.3	6

Mais uma vez, a mediana, por não ser influenciada por *outliers*, revela ser o caso mais interessante a nível de resultados, embora, para algumas células o valor fique a baixo do número de utilizadores máximos medidos, pela estação base. Os resultados para as restantes células apresentam-se na Tabela C.3.

C.2 Segunda abordagem

Tal como na primeira abordagem, começa-se por apresentar o resultado do gráfico dos valores medidos da variável dependente face aos valores estimados pelo modelo, como ilustrado na Figura C.4.

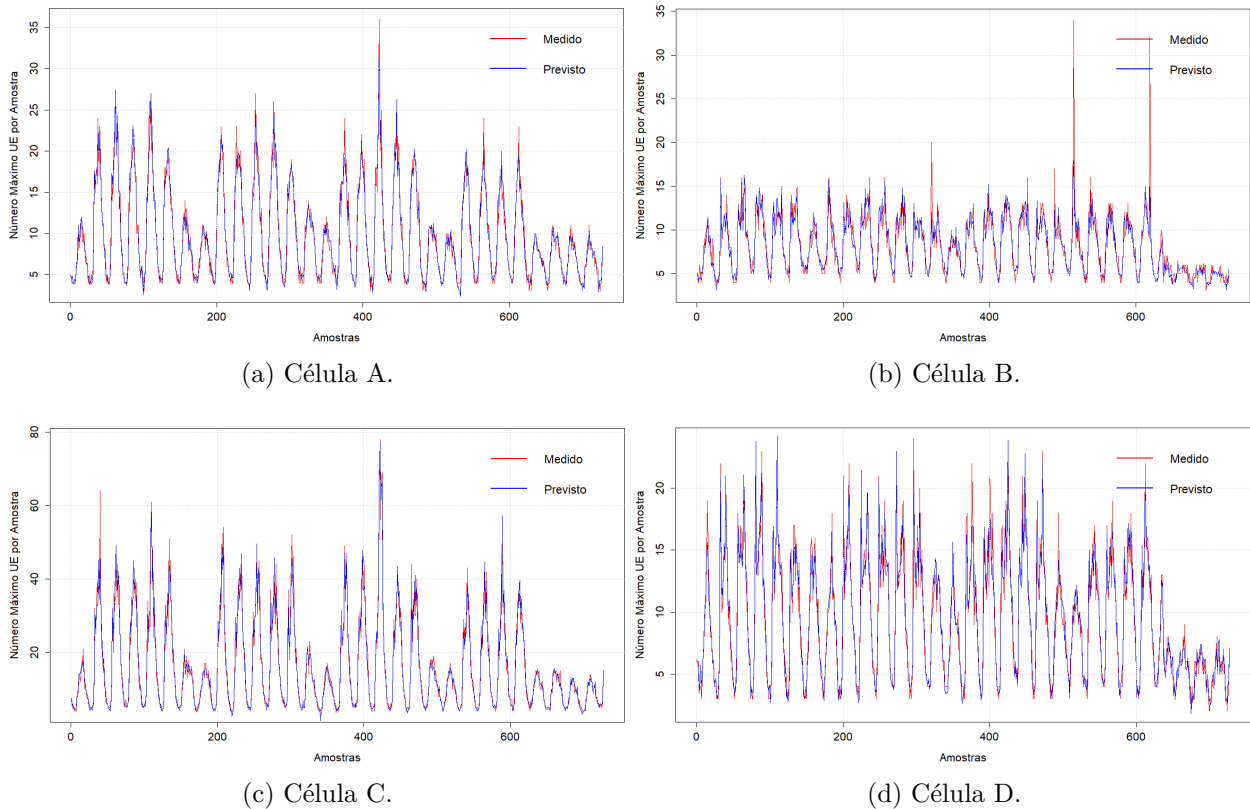


Figura C.4: Valores Medidos vs Previstos dos valores máximos de utilizadores ativos.

Nesta segunda abordagem, pode-se verificar, na Figura C.4, que o modelo consegue estimar a variável dependente ($ActiveUE_{Max}$), com alguma precisão, embora esta tenha variações mais abruptas que a variável dependente usada na primeira abordagem ($PRB_{[Utilization]}(\%)$). Por esse facto, os resultados estatísticos do modelo são inferiores aos da primeira abordagem, ainda assim obtiveram-se resultados consistentes, como se pode observar na Tabela C.4.

Tabela C.4: Resultados estatísticos do modelo RLM.

Célula	Correlação [%]	MAPE [%]	RMSE [Active UE]	R^2 [%]	R^2 Ajustado [%]	Nº <i>Features</i>
A	98,41	0,08	0,99	96,85	96,78	16
B	91,47	0,09	1,34	83,67	83,37	13
C	98,48	0,09	2,19	96,98	96,91	18
D	97,4	0,09	1,1	94,87	94,76	16

O coeficiente de correlação continua a ser alto, em todas as células, o MAPE também apresenta bons resultados. O RMSE também é acessível tendo em conta os valores praticados na variável dependente e os R^2 também são satisfatórios, sendo o valor mais baixo de 83,37% para a célula B, também devido aos três picos que se verificam, na Figura C.4b, e que fogem aos valores medidos nas restantes amostras. Para além disso, é a célula que apresenta menos *features*.

Nas Figuras C.5 e C.6 apresentam-se os gráficos dos resíduos face aos valores estimados pelo modelo e normal QQ-Plot, respetivamente, para analisar o modelo obtido.

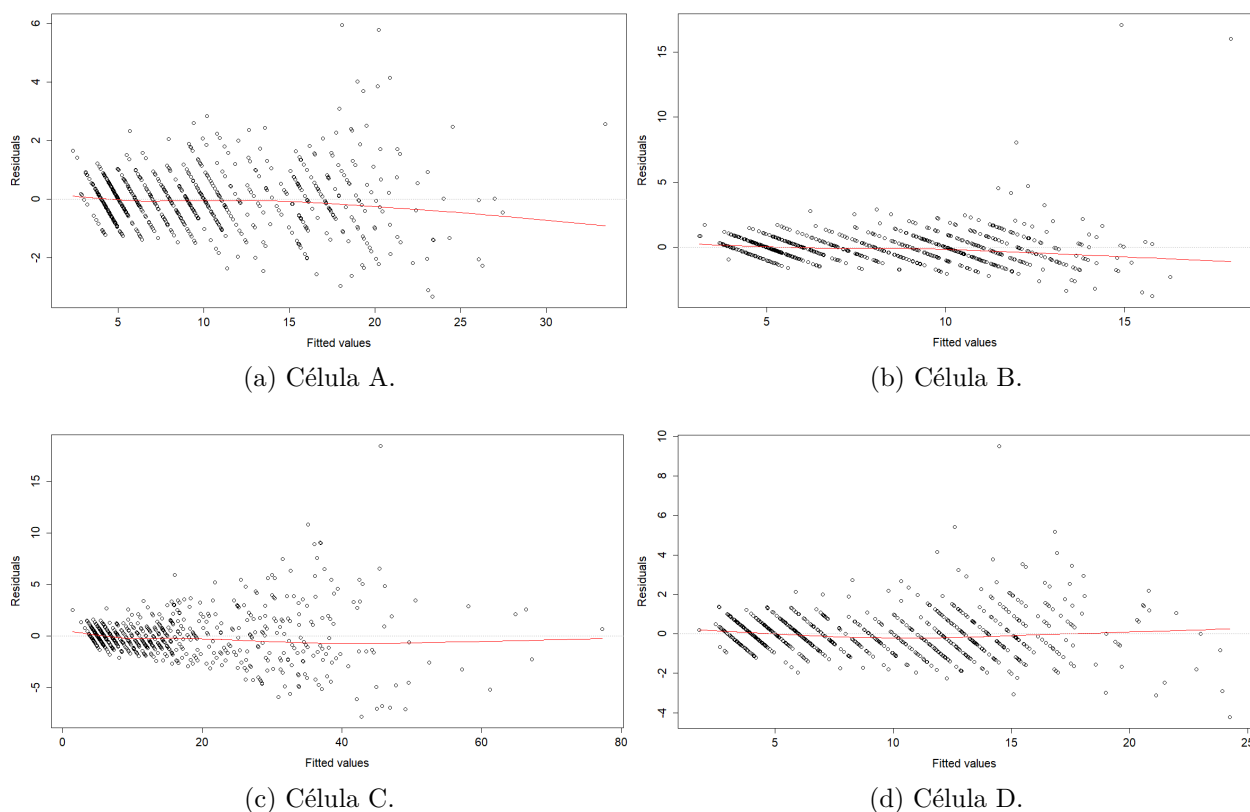


Figura C.5: Resíduos vs Valores Estimados.

Pela Figura C.5 verifica-se que, para todas as células, o traçado a vermelho é praticamente linear, sendo os menos lineares da célula A e B que se devem aos picos que a variável dependente apresenta (Figuras C.4a e C.4b), sendo mais difícil para o modelo conseguir descrever essas fortes variações. Contudo, não representam um padrão de não linearidade. Relativamente ao gráfico normal QQ-Plot, Figura C.6, mais uma vez conseguem-se verificar *outliers* mas em número insuficiente para afetarem o modelo em caso de tratamento dos mesmos. Neste caso, as células A e C são as que mais fogem a uma distribuição normal (Figuras C.6a e C.6c), principalmente a partir do segundo quantil. No entanto,

pode-se concluir que os modelos apresentam resultados estatísticos válidos.

Para testar o modelo, utilizaram-se quatro valores diferentes para o R_{target} , onde se pretendia observar um decréscimo do número de utilizadores estimado com o aumento do R_{target} , uma vez que ao aumentar-se o débito por utilizador, menos utilizadores a célula consegue servir. Os resultados, paras as quatro células, apresentam-se na Tabela C.5.

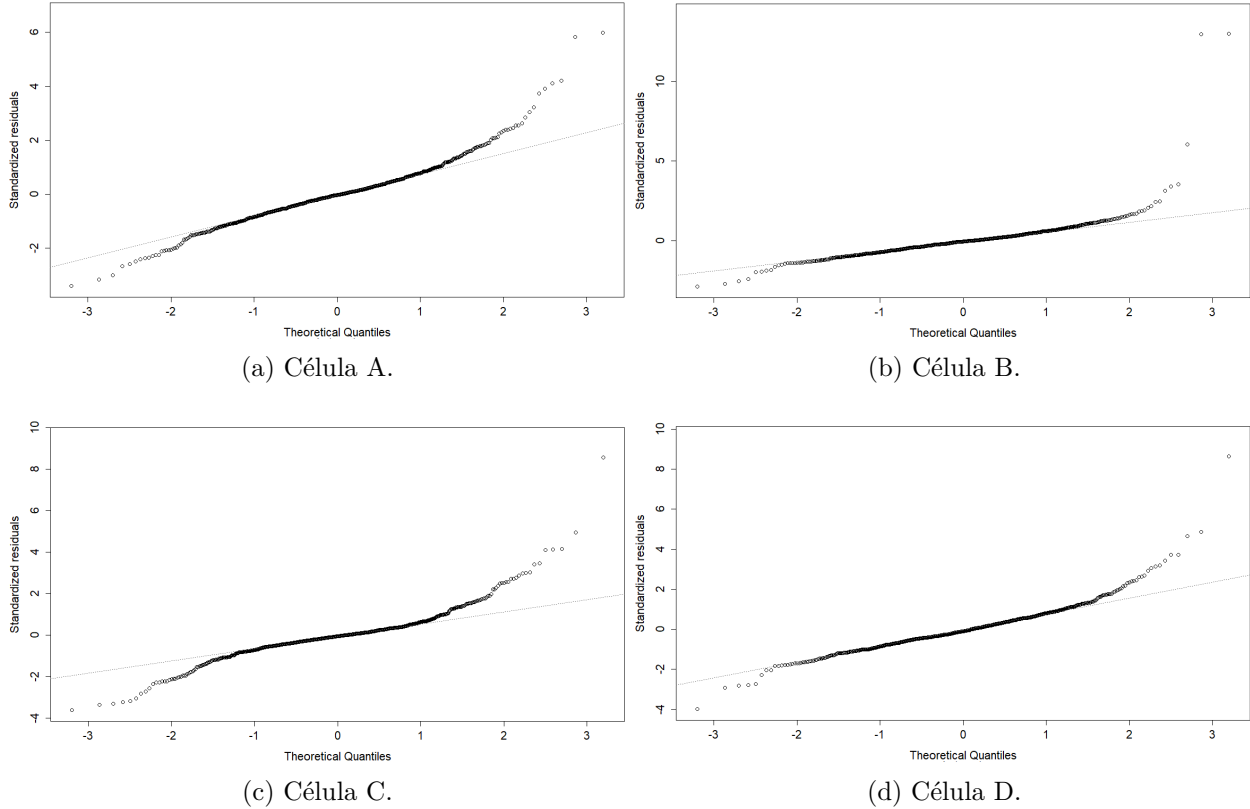


Figura C.6: Normal QQ-Plot.

Tabela C.5: Resultados da estimativa do número máximo de utilizadores.

Célula	Nº Utilizadores				ActiveUE [Médio] Máximo	ActiveUE [Máximo] Máximo	Thrp UE [Mbps] Active UE [Máximo]	Utilização PRB [%] Active UE [Máximo]
	R_{target} [Mbps]							
	0,15	5	20	50				
A	37	35	27	11	6,6	36	0,385	86,7
B	27	24	17	10	2,3	34	0,362	30,9
C	78	74	62	38	35,1	78	0,143	97,2
D	31	28	18	15	4,7	24	0,460	39,6

Pelos resultados do modelo, verifica-se que efetivamente existe um decréscimo do número de utilizadores estimado com o aumento do R_{target} , o que representa bons indícios do modelo. Além disso, consegue-se verificar que para um $R_{target} = 0,15$ Mbps, o modelo estima tantos utilizadores quanto o número de utilizadores máximo medido pela estação base, na célula C, onde o débito medido para esse número de utilizadores, igualmente medido, foi de 0,143 Mbps. Isto porque a utilização de PRBs para esse mesmo número de utilizadores medido foi de 97,2%, sendo pouca a diferença para os 100% forçado no modelo para a utilização de PRBs. Para as células A e D também se verifica uma boa estimativa

do número de utilizadores para um $R_{target} = 0,15$ Mbps, tendo em conta o número de utilizadores máximo medido e o seu débito e utilização de PRBs associado. A célula B apresenta resultados menos satisfatórios, contudo, é necessário ter em conta que foi também a célula que apresentou piores resultados estatísticos do modelo, pelo que era expectável que apresentasse piores resultados. No entanto, não fogem muito aos valores medidos.

É possível notar que com o aumento considerável do R_{target} , o número de utilizadores estimado não é reduzido em igual proporção, como se pode verificar na passagem de um $R_{target} = 0,15$ Mbps para um $R_{target} = 5$ Mbps, que são valores de débitos bastante diferentes e a redução do número de utilizadores não é tão acentuada. O que significa que o modelo precisa de alguns ajustes para estimar melhor o número de utilizadores. Mas como os dados disponíveis para esta dissertação não eram suficientes para seguir uma abordagem multiserviço para o modelo de capacidade 4G, não se realizaram melhorias ao modelo. Contudo, os resultados obtidos foram interessantes e suficientes para uma futura iteração ao modelo que sai do âmbito desta dissertação.

