



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Sistemas Rádio Ponto-Multiponto como Optimização de Transmissão para a Rede de Acesso 2G/3G

Pedro Miguel Nunes Silva

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri

Presidente: António Luís Campos da Silva Topa

Orientador: João José de Oliveira Pires

Co-orientador: Paulino Aníbal Pereira Serra de Magalhães Corrêa

Vogal: Américo Manuel Carapeto Correia

Mai de 2008

“Technology made large populations possible; large populations now make technology indispensable.”

- Joseph Wood Krutch

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador o Professor João Pires por toda a ajuda, todo o material científico que disponibilizou e todas as ideias e sugestões que proporcionou para a realização desta tese.

Em segundo lugar gostaria de expressar a minha gratidão à Vodafone Portugal por ter proposto a realização deste trabalho, em particular ao Eng. Paulino Corrêa pela sua constante orientação e ao Eng. Vítor Vieira pelo material fornecido, pela ajuda e sugestões fornecidas.

Em terceiro lugar, a todos os meus amigos e colegas do IST com quem passei bons momentos e que me ajudaram em alguns momentos mais difíceis do curso. Nomeadamente aos amigos Carlos Oliveira, Jorge Machado, Filipe Ribeiro, Hugo Carneiro, João Mendonça, Jorge Oliveira, José Canelas, Marta Rebello, Nuno Nogueira, Paulo Louro, Pedro Dias e Pedro Duarte que com eles tanto aprendi e cresci como pessoa. Em especial, pretendo agradecer ao meu grande amigo Benjamim Vieira, que ao longo de todo o curso me apoiou e ajudou, e foi como que um mentor para mim, sem a sua ajuda não teria certamente completado o curso.

Por fim agradeço à minha família pelo total apoio e compreensão que me deu ao longo não só da realização deste trabalho, mas também ao longo do curso que esteve sempre presente não só nos bons como também nos momentos mais difíceis.

A todos, muito obrigado.

Resumo

Num cenário em que os serviços de dados são os que mais pesam na rede de transporte e que menor receita por bit transportado geram, os operadores móveis da actualidade buscam constantemente novas soluções tecnológicas que permitam reduzir os custos de transmissão alugada minimizando investimentos em rede própria. O transporte na rede de acesso é tipicamente assegurado por circuitos alugados E1 que implicam elevados custos operacionais, e constituem uma das componentes mais dispendiosas para o operador móvel. De encontro a esta preocupação, neste trabalho estuda-se a viabilidade da implementação de sistemas rádio Ponto-Multiponto na UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*). Foi desenvolvido um simulador de tráfego somente para o *downlink* (por este ser o sentido em que é transmitido um maior volume de tráfego), onde foram implementados diferentes modelos de tráfego empregando várias distribuições estatísticas, para as quais foram efectuados testes de forma a verificar a validade das sequências geradas pelo gerador de números pseudo-aleatório *rand* do Matlab. Através do simulador foi possível avaliar o débito binário para cada terminal remoto servido por um terminal hub, e encontrar o dimensionamento óptimo do número de terminais remotos possíveis de servir num determinado sector. Por fim, o estudo de vários cenários permitiu concluir que o sistema rádio Ponto-Multiponto seria capaz de suportar no máximo cinco terminais remotos para 2G/3G, e face aos circuitos alugados e aos sistemas rádio Ponto-a-Ponto teria uma vantagem económica significativa, já que em apenas um ano se obteria o retorno do investimento.

Palavras-chave

Sistemas rádio Ponto-Multiponto, *backhaul*, UTRAN, modelação de serviços, interface *lub*.

Abstract

In a scenario where data services are the heaviest ones in transport network and those who generate less income for transported bit, mobile operators continuously seek out for new technological solutions in a way to reduce leased transmission while minimizing investments in building own networks. The access network transport is typically assured by E1 leased lines which implicate high operational costs, and constitute one of the most expensive section for mobile operators. To solve this concern, in this work is studied the feasibility to implement Point-Multipoint radio systems in UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN). It was developed a traffic simulator only for downlink (because this is the direction where a higher traffic volume is transmitted), where were implemented different traffic models employing several statistical distributions, to which were made some tests in order to validate the sequences generated by Matlab *rand* pseudo-random generator. With the simulator it was possible to evaluate the data rate to each remote terminal served by a hub terminal, and find the optimized dimensioning of the remote terminals number supplied by the hub terminal within a sector. Through simulation of some scenarios it was possible to conclude that Point-Multipoint radio system support up to five remote terminals for 2G/3G, and contrasting to leased lines and Point-to-Point radio systems would have a significant economic advantage, since in only one year will get the payback return of the investment.

Keywords

Point-Multipoint radio system, backhaul, UTRAN, traffic modeling, *Iub* interface.

Conteúdos

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Conteúdos.....	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Acrónimos.....	xix
1 Introdução	1
1.1 Evolução das redes móveis.....	2
1.2 Motivação	5
1.3 Estado da arte	5
1.4 Objectivo e estrutura do trabalho	6
1.5 Contribuições do trabalho.....	6
2 Arquitectura da rede UMTS.....	9
2.1 Evolução da rede UMTS	10
2.2 Arquitectura UMTS	10
2.3 UMTS <i>Terrestrial Radio Access Network</i> (UTRAN).....	12
2.3.1 <i>Radio Network Controller</i> (RNC).....	13
2.3.2 Nó B	14
2.3.3 Interface <i>Iub</i>	14
2.4 Rede de transporte da rede acesso móvel actual	15
2.5 Conclusões.....	18

3	Sistemas rádio Ponto-Multiponto.....	19
3.1	Sistema rádio Ponto-Multiponto para 2G/3G.....	20
3.2	Tecnologias de suporte	22
3.2.1	Técnicas de Acesso múltiplo.....	22
3.2.2	Alocação dinâmica de banda (DBA).....	24
3.2.3	Modulações utilizadas nos sistemas rádio Ponto-Multiponto	24
3.3	Comparação entre as abordagens Ponto-a-Ponto e Ponto-Multiponto para o <i>backhaul</i>	26
3.4	Sistema Ponto-Multiponto como tecnologia futura	28
3.5	Conclusão	29
4	Modelação de serviços para a rede móvel	31
4.1	Introdução	32
4.2	Distribuições estatísticas	34
4.2.1	Distribuição exponencial negativa	34
4.2.2	Distribuição de Poisson.....	35
4.2.3	Distribuição de Pareto.....	36
4.2.4	Distribuição geométrica.....	37
4.3	Serviços em tempo real.....	37
4.3.1	Serviço de voz com codec AMR (<i>Adaptive Multi-Rate</i>)	37
4.3.2	Serviço de vídeo-telefonía.....	39
4.4	Modelo de tráfego de pacotes (<i>non real time</i>)	39
4.4.1	Serviço de <i>web browsing</i>	41
4.4.2	Serviço FTP.....	45
4.4.3	Serviço de e-mail	47
4.5	Serviços 2G.....	47
4.6	Conclusões.....	48
5	Simulações de tráfego da rede móvel	49
5.1	Funcionamento do Simulador.....	50

5.2	Dimensionamento de cenários para a rede móvel	51
5.3	Análise do sistema Ponto-Multiponto num cenário real.....	54
5.4	Simulações de tráfego realizadas para a rede móvel.....	57
5.4.1	Simulação de tráfego 3G para um sistema Ponto-Multiponto	57
5.4.2	Simulação de tráfego 2G/3G para um sistema Ponto-Multiponto	65
5.5	Conclusões.....	68
6	Custos de implementação dos sistemas rádio Ponto-a-Ponto e Ponto-Multiponto.....	71
6.1	Introdução	72
6.2	Custo dos circuitos alugados.....	72
6.3	Sistemas rádio Ponto-a-Ponto vs circuitos alugados.....	72
6.4	Sistema rádio Ponto-Multiponto vs circuitos alugados	75
6.5	Conclusão	76
7	Conclusões	77
7.1	Principais conclusões do trabalho	78
7.2	Sugestões para trabalho futuro	79
	Anexos.....	81
	Anexo A. Classes de Serviço UMTS.....	82
	Anexo B. Exemplos de Aplicação do PMP	83
	Anexo C. Categorias de Serviço ATM.....	84
	Anexo D. Simulação e geração de números aleatórios	86
	D.1. Geradores de números pseudo-aleatórios	86
	D.2. Testes de ajustamento.....	86
	D.2.1. Teste de ajustamento do qui-quadrado	86
	D.2.2. Teste do qui-quadrado aplicado a geradores de números aleatórios	88
	D.2.3. Teste de Kolmogorov-Smirnov.....	89
	Anexo E. Geração de variáveis pseudo-aleatórias	91

E.1.	Método de transformação inversa	91
E.2.	Método de transformação por composição.....	92
E.3.	Distribuições.....	93
E.3.1.	<i>Distribuição exponencial negativa</i>	93
E.3.2.	<i>Distribuição de Poisson</i>	96
E.3.3.	<i>Distribuição de Pareto</i>	98
E.3.4.	<i>Distribuição geométrica</i>	101
Anexo F.	Intervalo de confiança	104
Anexo G.	Cabeçalhos dos tipos de serviços	105
G.1.	Serviço de Voz com <i>codec</i> AMR (<i>Adaptive Multi-Rate</i>)	105
G.2.	Cabeçalhos dos serviços de dados	106
Anexo H.	Equipamentos de Acesso 3.5G	109
Anexo I.	Interface gráfica do Simulador de tráfego.....	110
Referências.....		115

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Evolução do número de assinantes e taxas de crescimento (Fonte: ICP-ANACOM).....	2
Figura 2.1 – Evolução das tecnologias 2G/3G.....	10
Figura 2.2 – Arquitectura da rede UMTS e GSM.	11
Figura 2.3 – Arquitectura UTRAN.	13
Figura 2.4 – Arquitectura do plano de utilizador.	14
Figura 2.5 – Esquema da rede de transporte da rede de acesso móvel actual.	16
Figura 2.6 – Topologia de rede de acesso móvel actual.	17
Figura 2.7 – Exemplo de topologia de rede de transporte da rede de acesso futura.	18
Figura 3.1 – Arquitectura do sistema rádio Ponto-Multiponto.	20
Figura 3.2 – O PMP suporta simultaneamente o <i>backhaul</i> do tráfego 2G e 3G.....	21
Figura 3.3 – Partilha de frequência, tempo e códigos utilizando FDMA, TDMA e CDMA.	22
Figura 3.4 – Princípios de funcionamento dos métodos FDD e TDD.	24
Figura 3.5 – Exemplo de utilização de um sistema PMP com modulações QPSK e 16-QAM.....	25
Figura 3.6 – Intervalos de Frequências para 26 GHz e 28 GHz ([ETSI02]).	26
Figura 3.7 – Topologias em estrela (A) e Ponto-Multiponto (B) com sector (90°) para a rede de acesso móvel.	26
Figura 3.8 – Topologias em anel e estrela Ponto-a-Ponto (A) e topologia Ponto-Multiponto (B).....	27
Figura 3.9 – Tecnologias suportadas pelo sistema rádio Ponto-Multiponto.	28
Figura 4.1 – Função densidade de probabilidade para a distribuição exponencial negativa.	35
Figura 4.2 – Função densidade de probabilidade para $\lambda=4$ e $\lambda=8$	36
Figura 4.3 – Função densidade de probabilidade da distribuição de Pareto para vários valores de α e de β	36
Figura 4.4 – Função densidade de probabilidade da distribuição geométrica para $p=0.25$ e $p=0.5$	37
Figura 4.5 – Simulação de tráfego de uma chamada de voz com codec AMR.	38
Figura 4.6 – Simulação de tráfego de uma sessão de vídeo-telefonía.	39
Figura 4.7 – Características típicas de uma sessão de pacotes [ETSI98].	40
Figura 4.8 – Características típicas de uma sessão de <i>web browsing</i> descrita em [ETSI98].	42
Figura 4.9 – Fluxograma de funcionamento do modelo <i>web browsing</i> implementado.....	43
Figura 4.10 – Simulação de tráfego de uma sessão de <i>web browsing</i>	44
Figura 4.11 – Tráfego real de uma sessão de <i>web browsing</i> [WIREw].	44
Figura 4.12 – Uma sessão de FTP descrita em [IEEE03].	45
Figura 4.13 – Simulação de tráfego de uma sessão FTP utilizando uma placa 3G de 7.2 Mbps.	46
Figura 4.14 – Tráfego real de uma sessão FTP [WIREw].	46
Figura 4.15 – Simulação de uma sessão de tráfego de e-mail.....	47
Figura 5.1 – Fluxograma do funcionamento do simulador.....	50
Figura 5.2 – Fluxograma da definição de parâmetros para os cenários.....	51
Figura 5.3 – Cidades portuguesas com densidade populacional superior a 500 hab/km ² (Fonte: INE).	52

Figura 5.4 – Penetração de serviços por cenário (em percentagem).....	53
Figura 5.5 – Localização dos terminais remotos para o PMP localizado em V.N. Gaia.....	54
Figura 5.6 – Tráfego real dos vários RTs para o sistema PMP de V.N. Gaia (Fonte: Vodafone).	54
Figura 5.7 – Tráfego de <i>downlink</i> no terminal hub do sistema PMP de V.N. Gaia.....	55
Figura 5.8 – Tráfego de <i>downlink</i> 3.5G real. (A) para um HT, (B) para um RT.....	55
Figura 5.9 – Simulação de tráfego de <i>downlink</i> para um sistema PMP com 5xRTs.....	56
Figura 5.10 – Simulação de tráfego de um RT (pormenor).	56
Figura 5.11 – Esquemático da análise para as simulações.....	57
Figura 5.12 – Tráfego de <i>downlink</i> de um sector do PMP para 10xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.....	59
Figura 5.13 – Número de utilizadores por instante de tempo para 10xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.	59
Figura 5.14 – Simulação realizada no sentido de <i>downlink</i> para uma zona de Negócios com 10xRTs e para uma penetração de mercado de 2010.....	60
Figura 5.15 – Tráfego de <i>downlink</i> para um sector do PMP para 15xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.	60
Figura 5.16 – Número instantâneo de utilizadores na BH para 15xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.....	61
Figura 5.17 – Simulação realizada no sentido de <i>downlink</i> para uma zona de Negócios com 15xRTs e para uma penetração de mercado de 2010.....	61
Figura 5.18 – Tráfego de <i>downlink</i> para um sector do PMP para 20xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.	62
Figura 5.19 – Número instantâneo de utilizadores na BH para 20xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.....	62
Figura 5.20 – Excesso de tráfego no <i>downlink</i> para um sector do PMP para a penetração de mercado de 2010.	63
Figura 5.21 – Simulação realizada no sentido de <i>downlink</i> para uma zona de Negócios com 20xRTs e para uma penetração de mercado de 2010.....	63
Figura 5.22 – Tráfego de <i>downlink</i> para um sector do PMP para uma zona Mista com 15xRTs, modulações 16-QAM e QPSK, e penetrações de mercado de 2007 e 2010.....	64
Figura 5.23 – Excesso de tráfego no <i>downlink</i> para um sector do PMP para um cenário misto com 15xRTs, modulações 16-QAM e QPSK, e penetrações de mercado de 2007 e 2010.....	65
Figura 5.24 – Simulação realizada no sentido de <i>downlink</i> para uma zona Mista com 15xRTs com modulações 16-QAM e QPSK e para uma penetração de mercado de 2010.	65
Figura 5.25 – Tráfego de <i>downlink</i> para um sector do PMP para 5xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.	66
Figura 5.26 – Tráfego de <i>downlink</i> para um sector do PMP para 4xRTs com modulação 16-QAM e 1xRT com modulação QPSK para penetrações de mercado de 2007 e 2010.	67
Figura 5.27 – Tráfego de <i>downlink</i> para um sector do PMP para 3xRTs com modulação 16-QAM e 2xRT com modulação QPSK para penetrações de mercado de 2007 e 2010.	67
Figura 5.28 – Excesso de banda de <i>downlink</i> para um sector do sistema PMP na BH para tráfego 2G/3G.	68
Figura 6.1 – Exemplo de convergência de circuitos alugados para utilização de sistemas PTP (A) e PMP (B) para uma zona de Lisboa.....	73
Figura 6.2 – Custos cumulativos de investimento para as diferentes soluções.	76
Figura B.1 – Configurações de aplicação do <i>backhaul</i> Ponto-Multiponto.	83
Figura D.1 – Representação da distância vertical entre a distribuição cumulativa empírica e hipotética.....	90
Figura E.1 – Representação da aplicação do método da transformação inversa.	91

Figura E.2 – a) Função densidade de probabilidade.	b) Função cumulativa de probabilidade.	94
Figura E.3 – Comparação entre funções cumulativas de probabilidade teórica e empírica para 10000 amostras média=1 e IC=95%.		95
Figura E.4 – Intervalos de idêntica probabilidade para a) 2^{15} e b) 2^{19} amostras, média=1 e 128 intervalos.		95
Figura E.5 – Função densidade de probabilidade para $\lambda=4$ e $\lambda=8$.		96
Figura E.6 – Função distribuição cumulativa de probabilidade para vários valores da média (λ).		97
Figura E.7 – Comparação entre as funções cumulativas de probabilidade Empírica e Teórica para $\lambda=5$.		98
Figura E.8 – Função densidade de probabilidade da distribuição de Pareto para vários valores de α e de β .		99
Figura E.9 – Função cumulativa de probabilidade da distribuição de Pareto para vários valores de α e de β .		99
Figura E.10 – Comparação entre funções cumulativas de probabilidade teórica e empírica para 100000 amostras, $\alpha = 3, \beta = 4$.		100
Figura E.11 – Intervalos de idêntica probabilidade para a) 2^{15} e b) 2^{20} amostras, $\alpha = 3, \beta = 4$ e 128 intervalos.		101
Figura E.12 – Função densidade de probabilidade da distribuição geométrica para $p=0.25$ e $p=0.5$.		102
Figura E.13 – Função distribuição cumulativa de probabilidade da distribuição geométrica para vários valores de probabilidade p .		102
Figura E.14 – Comparação entre as funções cumulativas de probabilidade Empírica e Teórica para a distribuição geométrica para $p=1/4$.		103
Figura G.1 – Arquitectura do plano de utilizador.		107
Figura G.2 – Multiplexagem das células ATM.		108
Figura G.3 – Cabeçalhos a adicionar para transmitir através da interface <i>Iub</i> .		108
Figura H.1 – Equipamento de Acesso de Banda larga móvel (Vodafone).		109
Figura I.1 – Janela principal da interface gráfica do simulador criado em Matlab.		110
Figura I.2 – Modulação do sistema PMP.		111
Figura I.3 – Número de Simulações.		111
Figura I.4 – Outras opções.		111
Figura I.5 – Terminais remotos.		112
Figura I.6 – Cenários e penetração do mercado 3G.		112
Figura I.7 – Botões do simulador.		113
Figura I.8 – Resultado de uma simulação para 3 RTs numa área residencial.		113

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Distâncias de cobertura do sistema PMP para 99.99% de disponibilidade [HUGH05b].	25
Tabela 4.1 – Serviços implementados e algumas das suas características [FeVe05] (Anexo A).	33
Tabela 4.2 – Tempo médio entre pacotes para diferentes valores de débito binário [3GPP99].	42
Tabela 4.3 – Parâmetros para o modelo <i>web browsing</i> implementado.	42
Tabela 4.4 – Parâmetros para o modelo FTP [IEEE03].	45
Tabela 5.1 – Percentagem de potenciais utilizadores de serviços 3.5G para cada cenário numa célula.	52
Tabela 5.2 – Penetração da banda larga móvel no mercado nacional (valores estimados).	52
Tabela 5.3 – Potenciais utilizadores numa célula na <i>busy hour</i> .	53
Tabela 5.4 – Características da simulação do PMP de V.N. Gaia.	56
Tabela 5.5 – Número de RTs e de utilizadores por zona geográfica (para um total de 10xRTs).	58
Tabela 5.6 – Número de RTs e de utilizadores por zona geográfica (para um total de 15xRTs).	58
Tabela 5.7 – Número de RTs e de utilizadores por zona geográfica (para um total de 20xRTs).	58
Tabela 5.8 – Número de RTs a funcionar com 16-QAM e QPSK por zonas geográficas (15xRTs).	64
Tabela 6.1 – Custo dos circuitos alugados E1 para 13 estações base por ano.	72
Tabela 6.2 – Custos de implementação de um sistema Ponto-a-Ponto para 10 ligações.	73
Tabela 6.3 – <i>Cash-flow</i> para implementação de ligações Ponto-a-Ponto versus circuitos alugados.	74
Tabela 6.4 – Custos de implementação de um sistema Ponto-Multiponto para 13 estações base.	75
Tabela 6.5 – <i>Cash-flow</i> para implementação do sistema Ponto-Multiponto versus circuitos alugados.	76
Tabela A.1 – Classes de serviços QoS UMTS (extraído de [3GPP22.105]).	82
Tabela C.1 – Parâmetros de tráfego para cada categoria de serviço ATM.	85
Tabela C.2 – Comparação das categorias de serviço ATM Forum [ATMF99] com ITU-T [ITUTI.371].	85
Tabela D.1 – Várias situações de decisão numa estatística de teste.	88
Tabela E.1 – Teste <i>Kolmogorov-Smirnov</i> para a distribuição exponencial negativa com média 1, com IC=95%.	94
Tabela E.2 – Valores obtidos para o teste do qui-quadrado.	95
Tabela E.3 – Valores do teste do qui-quadrado para a distribuição de Poisson com $\lambda=5$, IC=95% e $k=7$.	97
Tabela E.4 – Valores do teste do qui-quadrado para a distribuição de Pareto com $\alpha = 3, \beta = 5$.	100
Tabela E.5 – Valores do teste <i>Kolmogorov-Smirnov</i> com distribuição de Pareto e $\alpha = 3, \beta = 4$ IC=95%.	100
Tabela E.6 – Valores do teste do qui-quadrado para a distribuição geométrica para vários valores de p , IC=95% e $k=7$.	102

Lista de Acrónimos

16-QAM	<i>16 State Quadrature Amplitude Modulation</i>
1G	<i>1ª geração móvel</i>
2G	<i>2ª geração móvel</i>
3G	<i>3ª geração móvel</i>
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
AAL2	<i>ATM Adaptation Layer Type 2</i>
ADM	<i>Add-Drop Multiplexer</i>
AMR	<i>Adaptive Multi-Rate</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
AuC	<i>Authentication Center</i>
BH	<i>Busy Hour</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BTS	<i>Base Transceiver System</i>
CapEx	<i>Capital Expenditure</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CCH	<i>Common transport Channels</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CPS	<i>Common Part Sublayer</i>
CS	<i>Circuit Switching</i>
DBA	<i>Dynamic Bandwidth Allocation</i>
DCH	<i>Dedicated transport Channels</i>
EIR	<i>Equipment Identity Register</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FP	<i>Frame Protocol</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
FWA	<i>Fixed Wireless Access</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications / Group Spéciale Mobile</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
HS-DSCH FP	<i>High Speed - Downlink Shared Channel Frame Protocol</i>

HSUPA	<i>High-Speed Uplink Packet Access</i>
HT	<i>Hub Terminal</i>
IMA	<i>Inverse Multiplexing for ATM</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystems</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union – Telecommunications</i>
K-S	<i>Kolmogorov-Smirnov</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
ME	<i>Mobile Equipment</i>
MSC	<i>Mobile Services Switching Center</i>
OpEx	<i>Operational Expenditure</i>
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i>
PMP	<i>Ponto-Multiponto</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
PS	<i>Packet Switching</i>
PTP	<i>Ponto-a-Ponto</i>
PVC	<i>Permanent Virtual Circuit</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RNS	<i>Radio Network Subsystems</i>
RT	<i>Remote Terminal</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SHDSL	<i>Symmetric High-speed Digital Subscriber Line</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UBR	<i>Unspecified Bit Rate</i>
UE	<i>User equipment</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
USIM	<i>UMTS Subscriber Identity Module</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
VAL	<i>Valor Actual Líquido</i>
VBR	<i>Variable Bit Rate</i>
VLR	<i>Visitor Location Register</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo começa-se por efectuar uma breve introdução sobre a evolução das redes móveis e expõe-se a motivação para a realização deste trabalho. De seguida enunciam-se os objectivos e descreve-se a estrutura do trabalho, e no final do capítulo apresentam-se as contribuições com a realização deste trabalho.

1.1 Evolução das redes móveis

Ao longo dos últimos anos o número de acessos móveis aos serviços de telecomunicações tem verificado um crescimento assustador. No final do 4.º trimestre de 2007 existiam 13,45 milhões de assinantes do serviço telefónico móvel em Portugal, representando um aumento de 4% do total de assinantes face ao trimestre anterior e de 10% face ao ano anterior (Figura 1.1), e aumentando a taxa de penetração do serviço móvel para 126,9% em Portugal. Neste mesmo trimestre o número de utilizadores com acesso aos serviços UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) bateu recordes, ultrapassando pela primeira vez os 3 milhões de utilizadores (cerca de 23% do total de assinantes do serviço móvel), materializando desde Janeiro de 2007 um crescimento anual de assinantes em 92,2%. [Anac08].

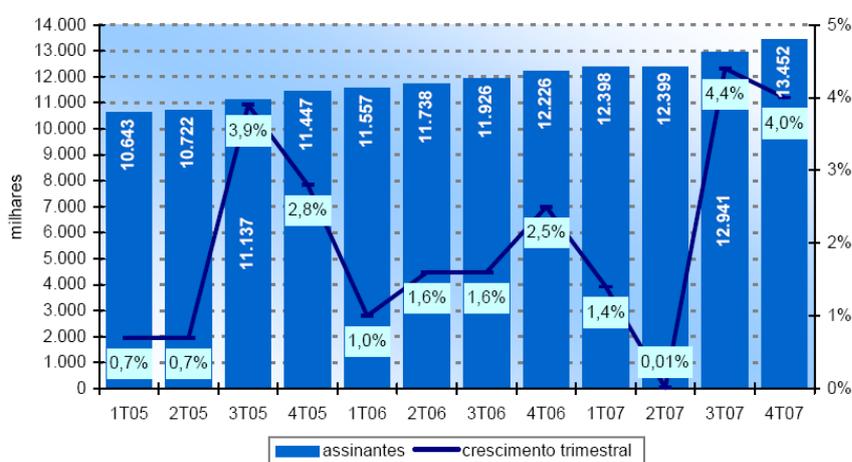


Figura 1.1 – Evolução do número de assinantes e taxas de crescimento (Fonte: ICP-ANACOM).

Embora o número de assinantes do serviço de voz continue a aumentar, o seu peso relativo nas redes móveis tem vindo a diminuir face ao enorme aumento da utilização dos serviços de dados, que são cada vez mais o motor de crescimento dos assinantes. Os utilizadores do século XXI não só exigem o acesso móvel permanente a serviços de voz e fax, como também começam cada vez mais a exigir serviços de dados: e-mail, áudio e vídeo em tempo real, imagens e multimédia, acessíveis com qualidade em qualquer momento de qualquer parte do mundo. Paralelamente os operadores da actualidade deparam-se com dificuldades em servir adequadamente estes clientes sem incorrer em custos economicamente pouco viáveis. As infra-estruturas típicas de um operador móvel não estão preparadas para sustentar a baixo custo o crescimento da componente de dados.

No início da década de 1980 surge a primeira geração (1G) das comunicações móveis lançada no Japão a nível comercial, que era totalmente analógica. Com o passar dos anos sente-se a necessidade de um maior desenvolvimento das comunicações móveis, é então criado em 1982 o *Group Spéciale Mobile* (GSM) para desenvolver normas para um sistema móvel para operar na Europa. A responsabilidade do GSM foi transferida em 1989 para o *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) que alterou o nome do GSM para *Global System for Mobile*

communications e que publicou as primeiras normas em 1990, mas só em 1991 foi lançada na Finlândia a primeira rede GSM que foi definida como um sistema móvel de segunda geração (2G) em que a sua rede deixara de ser analógica e passara agora a ser digital, proporcionando serviços de dados tais como SMS, MMS, e-mail e *web browsing*. No caso do GSM é aplicada na interface ar uma combinação do acesso múltiplo TDMA (*Time Division Multiple Access*) e FDMA (*Frequency Division Multiple Access*).

Em 1998 a 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP) define as primeiras normas da terceira geração (3G), a rede UMTS, utilizando a tecnologia de acesso múltiplo WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) na interface ar. Apenas três anos mais tarde, em finais de 2001, é lançada na Noruega a primeira rede comercial UMTS proporcionando um débito partilhado em pico por célula de 2 Mbps. Finalmente, em 2007 surge a denominada de geração 3.5 (3.5G), que utilizando os protocolos HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*) e HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*) possibilita débitos até 14.4 Mbps no sentido de *downlink* e de 5.76 Mbps no *uplink*. O protocolo HSDPA encontra-se actualmente em fase comercial nas maiores cidades portuguesas permitindo débitos de 1.8, 3.6 e 7.2 Mbps, mas o serviço a 14.4 Mbps ainda não tem data prevista de lançamento.

À medida que os serviços móveis aparecem como uma alternativa viável aos serviços de banda larga fixo ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), permitindo mobilidade, o número de assinantes da banda larga móvel cresce a um ritmo exponencial o que rapidamente irá sobrecarregar a rede de transporte existente. Neste cenário, os operadores móveis vêm-se obrigados a expandir a rede de transporte ou a procurar novas soluções tecnológicas que sejam capazes de satisfazer as exigências de tráfego presentes e adaptáveis a exigências futuras.

Com a introdução da 3G, os operadores móveis começaram a dispor de soluções de engenharia de rede mais complexas, mas também mais eficazes de transporte/transmissão de dados na rede de acesso móvel. Existe a possibilidade de utilizar tecnologias/arquitecturas alternativas aos circuitos alugados na interface *Iub* (interface que interliga o Nó B ao RNC (*Radio Network Controller*)) o que poderá reduzir os custos operacionais (OpEx¹) de um operador móvel até 25% [DoPa06].

Dentro das soluções disponíveis comercialmente os operadores móveis podem adoptar pela tradicional utilização de circuitos alugados, a construção de infra-estrutura própria [Cisc05] [Cisc07], e a utilização de sistemas Ponto-a-Ponto ou Ponto-Multiponto. Os circuitos alugados (tipicamente E1s²) são atractivos durante a fase inicial de estabelecimento de uma rede pois requerem apenas um pequeno investimento inicial, mas no entanto, implicam um elevado custo mensal (OpEx) não sendo rentável a longo prazo, e deixam o operador móvel dependente do provedor dos circuitos alugados – que muitas vezes é um competidor directo. Adicionalmente podem não existir circuitos alugados para determinadas estações base, sendo necessário ponderar novas opções.

¹ OpEx é uma sigla derivada da expressão *Operational Expenditure*, que significa despesas operacionais (i.e., despesas recorrentes – geralmente anuais – incorridas na normal operação de uma empresa)

² E1 – Primeira hierarquia plesiócrona (PDH) europeia definida pela ITU-T, com débito 2,048 Mbit/s.

A construção de infra-estrutura própria de fibra óptica é a alternativa mais comum e tradicional ao uso de circuitos alugados, e consiste vulgarmente na instalação de fibra óptica entre agregadores de várias estações base até ao RNC/BSC. Com esta solução um operador tem vantagens económicas em cenários de elevado volume de tráfego, e competitivas por não depender de serviços de outras empresas (possivelmente competidores). No entanto esta opção é raramente adaptada devido aos custos elevados para “enterrar” a fibra óptica.

Os sistemas rádio Ponto-a-Ponto (PTP) para ligações por feixes hertzianos têm sido a tecnologia de referência para o *backhaul* das estações base. Grande parte das ligações utilizadas actualmente podem transportar cerca de 8xE1s, mas existe uma imensa variedade de produtos e capacidades de um elevado número de fornecedores de sistemas PTP. Esta tecnologia apresenta algumas limitações, a instalação de ligações PTP pode ser demorada, com planeamento rádio a ter que ser efectuado para cada uma das ligações, e a necessitar de grande precisão na instalação e alinhamento das antenas. Adicionalmente, qualquer alteração na estação base que incida sobre a frequência da ligação rádio, largura de banda ou orientação requerem novo licenciamento da ligação. Finalmente, adicionar capacidade ou mover as estações base pode levar semanas ou até meses, até que a aprovação do regulador seja fornecida. Com a natureza dinâmica do mercado móvel, isto pode significar a perda de receitas e aumento dos custos.

O sistema rádio Ponto-Multiponto (PMP) para ligações por feixes hertzianos é um dos sistemas *Fixed Wireless Access* (FWA). Numa arquitectura PMP, um terminal hub liga-se a múltiplos terminais remotos, partilhando a largura de banda disponível no sector que o terminal hub serve. Na interface ar pela qual se interligam os terminais remotos e o terminal hub, é utilizado o método de acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA), o qual permite o acesso dos vários terminais remotos à mesma interface ar partilhada. Nessa mesma interface é aplicado o método de duplexagem com divisão na frequência (FDD) que consiste em utilizar frequências diferentes para o *uplink* e *downlink*.

Estas topologias, como vantagens, permitem uma rápida e simples expansão da rede, e facilitam a optimização através da alocação dinâmica de banda para os diferentes terminais remotos. Também não necessitam da obtenção de licenças para cada ligação individual, apenas sendo necessário obter uma licença a nível nacional (a Vodafone Portugal detém uma dessas licenças, logo não necessita de novo investimento em licenças para a instalação de um novo sistema PMP), o planeamento rádio é efectuado apenas uma vez, e não é necessário planeamento rádio adicional aquando a adição de novas estações base; desde que exista capacidade de *backhaul* reservada para crescimento. Por fim, a adição de um novo terminal remoto e o alinhamento da antena é uma tarefa simples, que pode ser realizada rapidamente e apenas por um técnico. Como limitações, os sistemas PMP têm necessidade de ter linha-de-vista para com os terminais remotos, e o alcance é relativamente curto, daí que apenas se utilizem os sistemas rádio PMP para zonas urbanas.

Em termos económicos e competitivos e comparativamente com os circuitos alugados, uma solução PMP não envolve o pagamento de custos mensais de aluguer. Concede ao operador móvel

independência do seu competidor (o fornecedor dos circuitos alugados) proporcionando a instalação de novos terminais remotos sem burocracias e atrasos. Os sistemas PMP são muito menos dispendiosos que a instalação de infra-estruturas de fibra óptica própria, que requer escavar e colocar a fibra óptica, podendo possibilitar uma redução de 50% dos custos de equipamento, quando comparado com os sistemas PTP [Alva01], e também necessitando de menor OpEx, pois existem menos unidades para gerir, e os terminais remotos são geridos a partir do terminal hub.

Em suma, por estas razões os operadores móveis procuram cada vez mais dar ênfase ao estudo dos sistemas Ponto-Multiponto para a concentração do elevado tráfego previsto nas zonas urbanas, permitindo uma optimização no planeamento da rede de acesso de redes móveis.

1.2 Motivação

Os operadores móveis procuram constantemente novas soluções eficazes ao nível de custos para a rede de acesso, que geralmente, na sua vertente de transporte, é uma das componentes mais dispendiosas para o operador móvel, onde a utilização dos circuitos alugados representa cerca de 25% de OpEx dos operadores móveis. É também aí que mais opções a nível tecnológico e de engenharia de rede se tornam viáveis.

Actualmente, o operador móvel incorre em OpEx elevado (devido ao transporte alugado) quando não detém, por razões de estratégia ou de *business case*, infra-estruturas próprias de transporte numa determinada zona da rede de acesso. Por outro lado, nas zonas que são cobertas por infra-estruturas de rede própria de transporte, reduzem-se significativamente os custos operacionais, mas geralmente estão em jogo investimentos importantes.

Como possível solução futura estuda-se neste trabalho a aquisição de sistemas rádio Ponto-Multiponto e instalação de infra-estrutura própria e analisa-se a sua viabilidade económica versus a utilização do transporte alugado.

1.3 Estado da arte

Actualmente, existem vários *business cases* de várias alternativas de optimização para a rede de transporte 2G/3G das operadoras móveis disponíveis na literatura, no entanto estas são geralmente realizadas pelos fornecedores de equipamento de redes de dados (Cisco, Hughes, Ericsson, etc.) de modo a promoverem os seus equipamentos e não tendo uma perspectiva global e virada para o estado da arte do *hardware* e *software* de cada tecnologia (por exemplo multiplexadores ou sistemas rádio).

Existem alguns trabalhos em que é apresentada a caracterização do tráfego UMTS, tal como em [FeVe05] onde se apresenta um conjunto de parâmetros (débito, atraso e duração da sessão) para vários tipos de serviços da rede UMTS e onde são definidos alguns cenários para a rede móvel; também em [KLLM01] é efectuada uma caracterização de tráfego e são apresentados alguns modelos de tráfego.

Foram desenvolvidos simuladores para permitir analisar o desempenho das redes UMTS. Em

[GVAC] criou-se um simulador para avaliar o desempenho de diferentes topologias de rede e características de tráfego na interface *Iub* ([3GPP25.430]) para auxiliar no dimensionamento da rede de acesso UMTS (*UMTS Terrestrial Radio Access Network* - UTRAN). Em [GABV02] foi criado um simulador com o objectivo de dimensionar as ligações ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) e de avaliar o desempenho das várias classes de serviço. Também foi desenvolvido e utilizado um simulador comercial ([WLTG06]) para o dimensionamento eficiente de redes de acesso 2G/3G.

Existem ainda dois trabalhos que se destacam em que cada um apresenta uma abordagem para a optimização da topologia de rede da UTRAN. Em [GKRZ04] foca-se essencialmente a introdução de sistemas rádio Ponto-Multiponto como forma de otimizar o planeamento de topologias de rede da UTRAN, considera-se não só a estrutura lógica da rede mas também aspectos da rede de transporte. Em [SGHC02] são apresentados dois algoritmos heurísticos para resolver o problema de se considerar uma topologia em árvore para a rede UTRAN, permitindo desta forma planear as topologias de rede de modo a evitar perdas de tráfego em caso de falhas criando uma rede com elevada fiabilidade.

1.4 Objectivo e estrutura do trabalho

Num cenário em que os serviços de dados são os que progressivamente mais pesam na rede de transporte e dos quais a receita gerada por bit transportado é cada vez menor, torna-se necessário encontrar uma solução que possibilite ao operador móvel reduzir os custos de transporte alugado e minimizar investimentos em rede própria. De encontro a esta necessidade, este trabalho propõe a utilização do sistema rádio Ponto-Multiponto como uma alternativa aos circuitos alugados do ponto vista técnico e económico.

O presente relatório encontra-se dividido em 7 capítulos. No capítulo 1 é efectuada uma introdução à evolução das redes móveis, e são apresentados os objectivos, a motivação e as contribuições do trabalho. No Capítulo 2 são descritos os elementos constituintes da rede UMTS, mais especificamente da rede UTRAN e da sua interface *Iub*. No Capítulo 3 é apresentada uma descrição das funcionalidades e capacidades de um sistema rádio Ponto-Multiponto para as redes de comunicações móveis, onde são explicadas as vantagens e desvantagens com a sua utilização. No Capítulo 4 são descritos os vários modelos de tráfego dos diferentes serviços implementados no simulador criado. No Capítulo 5 explica-se o funcionamento do simulador, bem como são definidos vários cenários para a realização das várias simulações apresentadas nesse mesmo capítulo. No Capítulo 6 é efectuado um estudo de viabilidade para a implementação dos sistemas Ponto-a-Ponto e Ponto-Multiponto como solução aos actuais circuitos alugados. Finalmente no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho bem como sugestões para trabalho futuro.

1.5 Contribuições do trabalho

Este trabalho permitiu identificar o número de terminais remotos suportados por um terminal hub de um sistema rádio Ponto-Multiponto para as redes móveis e analisar a implementação desse sistema

no *backhaul* da rede de acesso 2G/3G.

Para este trabalho foi desenvolvido um simulador de tráfego (apenas para o *downlink*) para simular o tráfego transportado do terminal hub destinado a um determinado número de terminais remotos. Esse tráfego é aleatório e foram modelados alguns serviços de dados da rede móvel com a ferramenta Matlab®, utilizando como base uma diversidade de modelos estatísticos disponíveis na literatura sobre caracterização de tráfego. De modo a testar a aleatoriedade dos modelos da caracterização de tráfego foram realizados vários testes sobre as várias distribuições utilizadas nos modelos implementados.

É também apresentada uma análise de investimento que expõe em termos económicos a implementação de um sistema rádio Ponto-Multiponto em comparação com a instalação de sistemas rádio Ponto-a-Ponto ou à continuidade de utilização dos actuais circuitos alugados, de onde se conclui que esta é uma solução extremamente vantajosa para os operadores móveis em que se obtém apenas um ano para o retorno do investimento.

Capítulo 2

Arquitectura da rede UMTS

Neste capítulo é efectuada uma descrição da arquitectura de rede UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) incluindo uma introdução aos elementos lógicos de rede e às interfaces que os interligam. Mais especificamente analisa-se a rede UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) e os seus elementos de rede e interface *Iub*.

2.1 Evolução da rede UMTS

A *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) é um sistema de comunicações móveis de terceira geração (3G) que proporciona uma variedade de serviços de banda larga no mundo das comunicações sem fios. A UMTS proporciona comunicações móveis com débitos binários até 2 Mbps para o *downstream*. Mantém as capacidades da rede GSM/GPRS [HaRM03] de segunda geração (2G) e fornece ainda novos serviços de dados e maiores débitos binários. A UMTS foi desenvolvida para proporcionar serviços de imagens, vídeo, entre outros serviços multimédia, bem como voz e dados, aos assinantes móveis.

A UMTS é uma tecnologia de 3ª geração (3G) que utiliza WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) que suporta até 14 Mbps para o *downstream* utilizando HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*) definida na Release 5 da 3GPP [3GPP25.308].

As especificações foram criadas pela 3GPP (*the 3rd Generation Partnership Project*) [3GPPw], um projecto de normas criado em conjunto por várias entidades da Europa, Japão, Estados Unidos da América e da China.

A UMTS tem planeado uma migração faseada (Figura 2.1) em direcção a uma rede completamente em IP, alargando as redes 2G GSM/GPRS e utilizando a tecnologia WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) [HoTo04] na interface rádio. Com o passar dos anos vão sendo definidas novas normas para promover a evolução da WCDMA, de modo a obter ainda uma melhor performance. Inicialmente, a 3GPP definiu, em Março do ano 2000 a *Release 99* (R99) [3GPP22.100], de onde se realça a definição das normas UMTS, a interoperabilidade entre UMTS e GSM (em que é suportada a capacidade de *handover* [3GPP25.401] entre GSM e UMTS) a definição da nova interface rádio WCDMA e a definição de UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*). Em Março de 2002 foi definida a Release 5, onde se realça a introdução de novas capacidades WCDMA tal como o HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*) que proporciona o débito máximo teórico no sentido descendente de 14.4 Mbps, o HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*) que proporciona débitos binários teóricos no sentido ascendente até 5.76 Mbps, e serviços multimédia baseados em IP (IMS) que possibilitam o transporte IP na rede de núcleo na UTRAN.

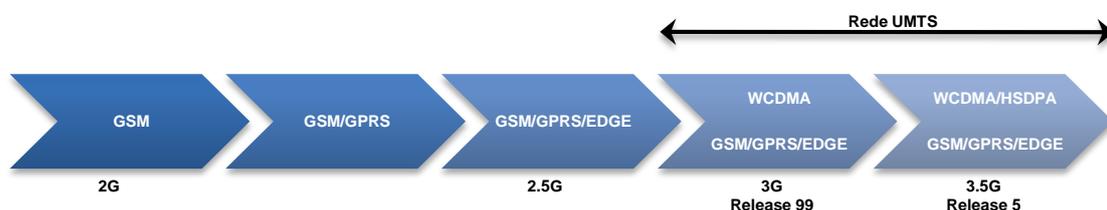


Figura 2.1 – Evolução das tecnologias 2G/3G.

2.2 Arquitectura UMTS

A PLMN (*Public Land Mobile Network*) descrita no UMTS Rel. '99 [3GPP22.100] incorpora três categorias de maior importância de elementos de rede (Figura 2.2):

- Elementos de rede Núcleo para comutação de circuitos — *Mobile services switching center* (MSC), *visitor location register* (VLR), *home location register* (HLR), *authentication center* (AuC), e *equipment identity register* (EIR).
- Elementos de rede Núcleo para comutação de pacotes — *Serving GPRS support Node* (SGSN) e *gateway GPRS support Node* (GGSN).
- Elementos de rede UMTS — *User equipment* (UE) e *UMTS terrestrial radio access network* (UTRAN).

A rede de Núcleo UMTS é baseada na topologia de rede GSM/GPRS. Possibilita a comutação, o transporte e funções de bases de dados para o tráfego dos utilizadores. A rede de Núcleo contém elementos de comutação de circuitos (CS) tais como o MSC e o *Gateway MSC* (GMSC). Também contém os elementos de comutação de pacotes (PS) SGSN e GGSN. Os elementos EIR e AuC suportam ambos os tipos de dados por CS e PS. Encontra-se informação detalhada dos elementos de rede nas especificações da 3GPP [3GPP23.002].

O método de transmissão de dados utilizado na rede de acesso UMTS é o *Asynchronous Transfer Mode* (ATM), em que as interfaces *Iu*, *Iub* e *Iur* são baseadas nos princípios de transmissão ATM. O *ATM Adaptation Layer Type 2* (AAL2) [KNRR02] é utilizado para as conexões de comutação de circuitos (CS) e também para a comutação de pacotes (PS).

A arquitectura UMTS encontra-se representada na Figura 2.2, onde no canto inferior esquerdo se encontra ilustrada a rede de acesso UTRAN (explicada na secção 2.3 e onde são apresentadas as interfaces bem como os elementos constituintes).

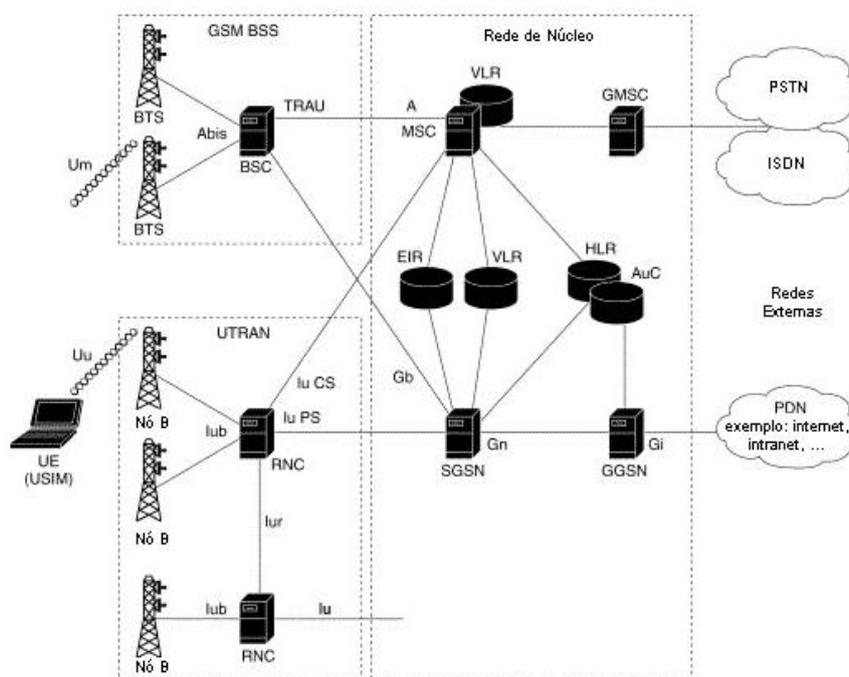


Figura 2.2 – Arquitectura da rede UMTS e GSM.

2.3 UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)

A maior diferença entre as redes GSM/GPRS e as redes UMTS é a interface de transmissão rádio. Nas redes GSM/GPRS são utilizados dois diferentes tipos de acesso múltiplo, TDMA (*Time Division Multiple Access*) e FDMA (*Frequency Division Multiple Access*). A interface rádio das redes UMTS usa como tecnologia de acesso múltiplo o WCDMA (*Wideband Code-Division Multiple Access*), onde coexistem duas tecnologias de duplexagem: FDD (*Frequency Division Duplex*) e TDD (*Time Division Duplex*) [HoTo04]. O método FDD requer a separação de bandas de frequência para ambos os sentidos (*downlink/uplink*), no entanto o método TDD utiliza a mesma banda de frequência mas alterna a direcção de transmissão (*downlink/uplink*) no domínio do tempo (subsecção 3.2.1). Esta nova interface rádio requer uma nova rede de acesso rádio (RAN – *Radio Access Network*) denominada de *UMTS Terrestrial RAN* (UTRAN) onde são introduzidos dois novos elementos na UTRAN: o RNC e o Nó B (explicados nas subsecções 2.3.1 e 2.3.2).

A UTRAN consiste em uma ou mais RNS (*Radio Network Subsystems*). Uma RNS é uma sub-rede da UTRAN e consiste num *Radio Network Controller* (RNC) e um ou mais Nós B. Os RNCs podem estar conectados entre si através da interface *Iur*. Os RNCs e os Nós B estão interligados através da interface *Iub*.

De seguida apresenta-se uma pequena descrição dos elementos apresentados na Figura 2.3 ([HoTo04]). O equipamento do utilizador (UE) consiste em duas partes:

- O *Mobile Equipment* (ME) que é o terminal rádio utilizado para comunicações rádio através da interface *Uu*.
- O *UMTS Subscriber Identity Module* (USIM) que é um *smart card* que tem armazenada a identidade do assinante, que gere a autenticação, chaves de codificação e informação necessária relativa à subscrição no terminal.

A UTRAN também é constituída por dois elementos:

- O Nó B que converte o fluxo de dados entre as interfaces *Iub* e *Uu*. Efectua gestão de recursos rádio e é também responsável pela transmissão/recepção na interface *Uu*, modulação/desmodulação, e gestão de erros.
- O *Radio Network Controller* (RNC) controla os recursos rádio no seu domínio (dos Nós B conectados a ele). O RNC é o ponto de acesso para todos os serviços que a UTRAN fornece à rede de Núcleo, por exemplo, a gestão das ligações ao UE.

Os principais elementos da rede de Núcleo são:

- *MSC/VLR* (*Mobile Services Switching Centre/Visitor Location Register*) é o switch (MSC) e a base de dados (VLR) que serve o UE na sua localização actual para serviços CS. A função do MSC é realizar comutação dos serviços CS, e o VLR contém uma cópia do perfil de serviço do utilizador visitante, tal como informação acerca da localização do UE na UTRAN. A

parte da rede que é acedida através do MSC/VLR é comum ser referida como sendo o domínio de CS.

- A função do SGSN é similar à função do MSC/VLR mas é utilizada para serviços PS. A parte da rede que é acedida através do SGSN é comum ser referida como sendo o domínio de PS.

Foram também definidas pela 3GPP [3GPPw] as interfaces entre os elementos lógicos da rede:

- Interface Cu , é a interface eléctrica entre o *smart card* USIM e o ME.
- Interface Uu , é a interface rádio WCDMA. A interface Uu é a interface através da qual o UE acede à parte fixa do sistema.
- Interface Iu , é a interface através da qual a UTRAN se conecta à rede de Núcleo. A interface Iu tem duas variantes, que são a $Iu-CS$ para conectar a UTRAN à rede de Núcleo de CS, e a $Iu-PS$ para conectar a UTRAN à rede de Núcleo de PS.
- Interface Iur , é a interface que permite *soft handover* [3GPP25.401], [3GPP25.331] entre RNCs dos diferentes fabricantes.
- Interface Iub , é a interface que conecta o Nó B ao RNC. Esta é a interface em foco neste trabalho.

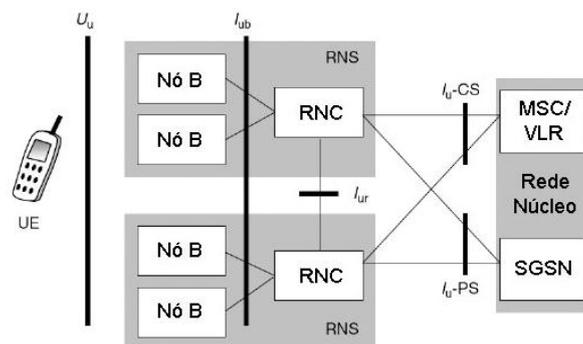


Figura 2.3 – Arquitectura UTRAN.

2.3.1 Radio Network Controller (RNC)

O RNC nas redes UMTS oferece funcionalidades equivalentes às disponibilizadas pela BSC (*Base Station Controller*) nas redes GSM/GPRS. Possibilita controlo centralizado dos Nós B a si conectados, gere as trocas de informação entre os Nós B e a rede de Núcleo, e administra o processo de *handover* entre Nós B através das interfaces Iu , Iur e Iub . A informação CS e PS das interfaces $Iu-CS$ e $Iu-PS$ é multiplexada em ATM e transmitida através das interfaces Iur e Iub .

O RNC utiliza a interface Iur para se interligar a outros RNCs. Nas redes GSM/GPRS a gestão dos recursos rádio é efectuada na rede de Núcleo. Nas redes UMTS, esta função é realizada pelo RNC, deixando mais recursos disponíveis para a rede de Núcleo. Um RNC gere as funções de controlo tais como as ligações para o UE, o controlo de congestão, e os procedimentos de *handover*. As funções do RNC incluem: gestão de recursos rádio, controlo de admissão, configurações de controlo de potência, *handover*, e controlo automático de potência.

2.3.2 Nó B

O Nó B é a unidade de recepção/transmissão para a comunicação com o equipamento do utilizador (UE). Pode estar fisicamente localizado numa BTS GSM existente de forma a reduzir custos de implementação UMTS e liga-se ao UE através da interface rádio *Uu* utilizando WCDMA. A interface *Iub* proporciona a ligação entre o Nó B e o RNC utilizando ATM. O Nó B é o ponto de terminação ATM.

A função principal do Nó B é a conversão de dados na interface rádio *Uu*, incluindo também funções de correcção de erros e adaptação de débitos. O Nó B monitoriza a qualidade e potência da ligação, enviando essa informação ao RNC para processar. Outras funções do Nó B incluem: transmissão e recepção na interface *Uu*; modulação e desmodulação; codificação do canal físico; micro diversidade; gestão de erros e controlo automático de potência.

O Nó B também tem a função de informar o UE a ajustar a potência utilizando uma técnica denominada de controlo de potência para transmissão no sentido descendente (*downlink transmission power control*).

2.3.3 Interface *Iub*

Na UMTS, a interface *Iub* que interliga o Nó B com o RNC, pode também ser denominada de *backhaul*, que é o meio que permite ligar várias estações base à rede de núcleo de um operador. Transporta tráfego de voz e dados UMTS, e sinalização UMTS através de um ou múltiplos circuitos E1 utilizando IMA (*Inverse Multiplexing for ATM*). A técnica IMA permite a utilização de um conjunto de circuitos E1 como se estes fossem apenas uma interface ATM. Esta interface ATM "fictícia" tem a capacidade da soma de todas as capacidades das interfaces E1.

Os Nós B podem estar ligados ao RNC através de circuitos alugados, ligações de fibra óptica ou feixes hertzianos Ponto-a-Ponto ou Ponto-Multiponto.

Na Figura 2.4 encontra-se representada a camada de protocolos na interface *Iub* para transferir dados entre o equipamento móvel e o RNC (no Anexo G encontra-se uma descrição de cada um dos diferentes protocolos).

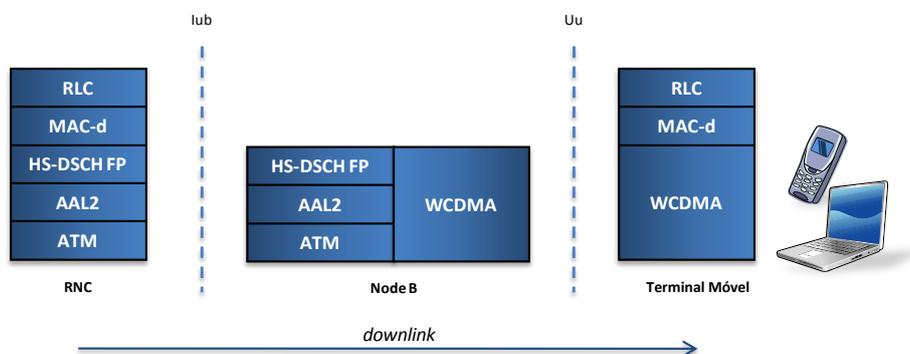


Figura 2.4 – Arquitectura do plano de utilizador.

A interface *Iub* transporta células ATM e utiliza *Permanent Virtual Circuits* (PVCs). Podem ser utilizados vários PVCs por cada Nó B. Mas, tipicamente, pode-se considerar que são utilizados dois PVCs – um para voz e um outro para dados. O PVC de voz utiliza AAL2 com nível de qualidade de serviço (QoS) de *Variable Bit Rate – real-time* (VBR-rt). O PVC de dados utiliza AAL2 com um nível de QoS de *Variable Bit Rate – non real-time* (VBR-nrt). A utilização de PVCs com parâmetros de QoS VBR permite subscrição em excesso e assim multiplexagem estatística, resultando numa melhor utilização da capacidade.

Como normalmente na mesma localização física se encontram antenas 2G (BTS) e 3G (Nó B), é necessário encontrar uma forma otimizada de transportar a informação através da interface *Iub*. Então surge a necessidade por parte dos operadores móveis de encontrar formas de reduzir o número de circuitos alugados E1s, ou de procurar alternativas aos circuitos alugados E1 que transportam o tráfego através da interface *Iub*, de modo a satisfazer as necessidades de tráfego gerado pelos utilizadores utilizando HSDPA e HSUPA. Por exemplo, para garantir que um utilizador consiga tirar partido do serviço HSDPA 3.8 Mbps, são necessários pelo menos 2xE1s para o Nó B que serve esse utilizador, e para garantir um serviço de 14.4 Mbps (o máximo teórico proporcionado pelo HSDPA) seriam necessários 8xE1s. No caso de ser considerada uma zona em que existam 10 Nós B, e se se quiser garantir o serviço HSDPA a 14.4 Mbps, seriam necessários 80xE1s. É importante mencionar que ao usar nxE1s para um Nó B, em cerca de mais de 90% do tempo (informação cedida pela Vodafone) a capacidade disponível não se encontra totalmente ocupada. Apenas em situações de pico (e essa situação geralmente difere de Nó B para Nó B) é que a banda é totalmente ocupada.

Como em grande parte do tempo a largura de banda total para um dado Nó B não se encontra completamente ocupada é possível efectuar uma optimização ao número de circuitos E1s utilizados, efectuando agregação estatística de vários Nós B, e deste modo reduzindo os custos associados aos circuitos alugados e a banda necessária através da interface *Iub*.

2.4 Rede de transporte da rede acesso móvel actual

Actualmente, a vertente de transporte na rede de acesso é uma das mais dispendiosas para o operador móvel. Portanto, procuram-se continuamente novos métodos, tecnologias e topologias de modo a reduzir os custos operacionais (OpEx) e de infra-estruturas (CapEx).

O esquema da componente de transporte da rede de acesso actual encontra-se representado na Figura 2.5. Para cada estação base (BTS ou Nó B) são necessários circuitos alugados E1 (geralmente utilizam-se 4xE1s para um Nó B de modo a garantir o serviço HSDPA a 7.2 Mbps, mas futuramente serão necessários pelo menos 8xE1s para garantir um serviço de 14.4 Mbps, e 1xE1 para a BTS, mas estes valores variam consoante as necessidades de tráfego para uma determinada estação base) no caso de não existir rede própria por parte do operador, e isto implica um avultado investimento em circuitos alugados na rede de acesso (ver exemplo apresentado na secção 6.2).

A rede de circuitos alugados é uma rede de transporte (de um operador fixo que aluga os circuitos, por exemplo a *Portugal Telecom* no caso de Portugal) que consiste em vários anéis SDH

(*Synchronous Digital Hierarchy*) STM-1, STM-4 ou até STM-16 dependendo do número de circuitos alugados a transportar. Esses circuitos alugados geralmente vão encapsulados em pares de fios, até uma dezena de km, através da tecnologia SHDSL (*Symmetric High-speed Digital Subscriber Line*) até alcançar os anéis SDH que efectuaram o transporte alugado dos dados até às instalações da rede de acesso do operador móvel.

Da rede de circuitos alugados entra na rede do operador móvel um sinal STM-1 *channelized* (STM-1ch). O STM-1ch é simplesmente um STM-1 normal onde se encontram acessíveis todos os contentores virtuais (VC12) dos E1s no interior. Alguns podem ser ATM (no fundo *streams* ATM sobre E1s TDM) e outros TDM (puros). Quando se quer partilhar o mesmo STM-1 com *streams* ATM e TDM puras e usar ADM³ SDH (de menor custo) para transporte e separação de tráfego só se pode utilizar estes STM-1ch. Nesse STM-1 *channelized* alguns dos VC12 são ATM e alguns são TDM. O tráfego TDM (RAN - *Radio Access Network* 2G) segue directamente para a BSC. O tráfego ATM (UTRAN 3G), que é entregue em alguns dos contentores VC12 que vêm no mesmo STM-1 *channelized* que transporta também o tráfego 2G, é entregue a um *switch* ATM. Este *switch* agrega vários VC12 desse STM-1ch e de outros STM-1s *channelized* para entregar por exemplo um único STM-1 *clear channel* (não *channelized*) ao RNC. O STM-1 *clear channel* (ou STM-1 "VC4" ATM) é um STM-1 inteiramente ocupado por tráfego ATM (usa-se o contentor virtual de maior capacidade, VC4, o que é mais eficiente que um STM-1ch com 63x canais ATM, por exemplo). O único dispositivo capaz de agregar *n* canais VC12 com ATM para um único canal VC4 ATM é um *switch* ATM (porque tem que comutar células e tem ganho estatístico). Para o tráfego BTS-BSC não se utiliza um *switch* ATM porque o *switch* ATM é muito mais dispendioso que a utilização de SDH, e também porque o tráfego proveniente da RAN 2G é TDM e não ATM como é o da UTRAN 3G.

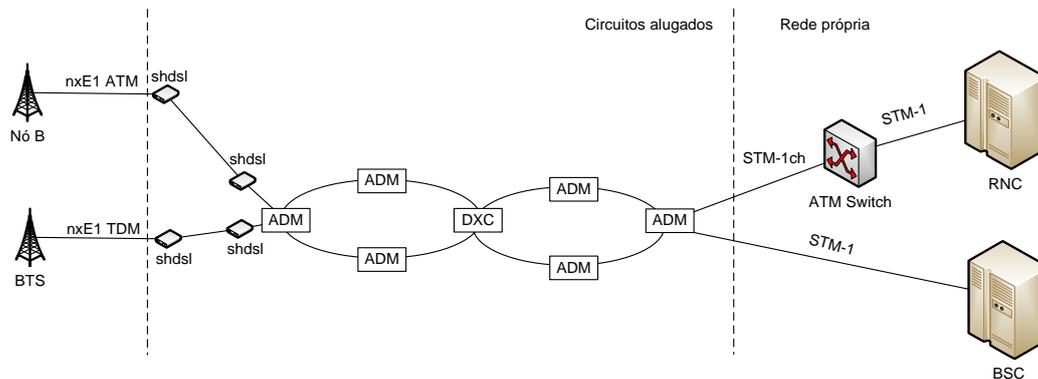


Figura 2.5 – Esquema da rede de transporte da rede de acesso móvel actual.

Na Figura 2.6 encontra-se a topologia em estrela da rede de acesso móvel actual. Cada uma das ligações entre uma estação base e o RNC/BSC representa os circuitos alugados E1 reservados para essa estação base (na Figura 2.5 apresenta-se a rede de transporte dos circuitos alugados).

³ Acrónimo de origem anglo-saxónica de *Add-Drop Multiplexer*.

Os circuitos alugados encontram-se permanentemente reservados, quer transportem ou não tráfego, o que é extremamente ineficiente. Através de informação da Vodafone, apenas em cerca de 10% do tempo é utilizada cerca de 90% da capacidade desses circuitos alugados, o que faz com que nos restantes 90% do tempo se encontrem reservados recursos e não estejam a ser utilizados. Deste modo será necessário e importante considerar tecnologias que ofereçam agregação estatística, de modo a otimizar os custos de transmissão.

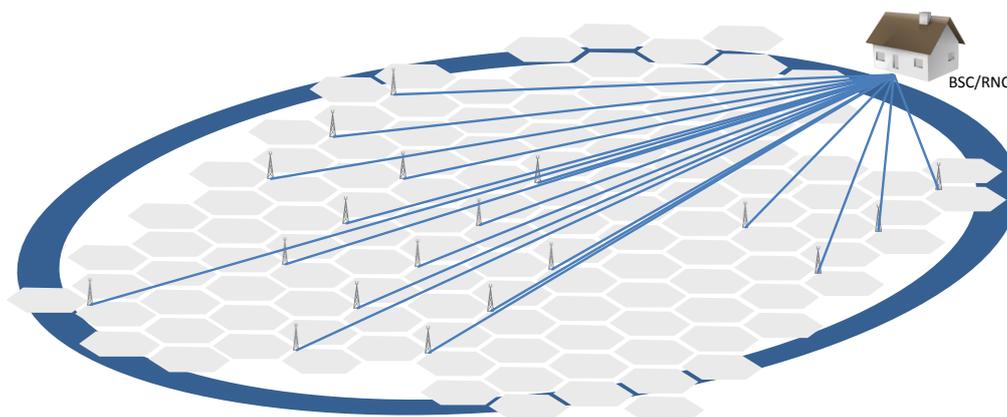


Figura 2.6 – Topologia de rede de acesso móvel actual.

Com o aumento de tráfego devido às novas capacidades proporcionadas pelo HSDPA/HSUPA⁴, serão necessárias alterações na rede de acesso, nomeadamente a aquisição de infra-estruturas próprias criando uma rede de transporte própria ou a aquisição de novos circuitos alugados (depende da filosofia de cada operador). De notar, que, para tirar partido de todas as capacidades destas tecnologias, é necessário que o terminal móvel se encontre relativamente perto da estação base, o que irá obrigar a diminuir o raio das células, implicando um maior número de estações base para cobrir a mesma área. Como se viu anteriormente, é também necessário aumentar a capacidade das ligações existentes, de modo a satisfazer as novas exigências, utilizando pelo menos 8xE1s por cada Nó B.

Uma das soluções possíveis para essa expansão consiste na utilização de sistemas Ponto-Multiponto (PMP), especialmente em áreas urbanas, porque o sistema PMP tem um alcance relativamente curto como se verá na subsecção 3.2.3. Sendo o objectivo deste trabalho, analisar as capacidades do sistema PMP a nível de tráfego de *downlink*, o número de estações base suportadas e a sua viabilidade económica.

Na Figura 2.7 é apresentado um misto de possíveis topologias (anel, estrela e ponto-multiponto) para a componente de transporte da rede de acesso de modo a satisfazer as necessidades de tráfego futuras. A verde encontram-se representadas novas ligações de circuitos alugados E1 com um aumento de capacidade (passando dos 2 a 4 E1s anteriores para 8xE1s) ou o operador pode

⁴ HSUPA – *High Speed Uplink Packet Access*.

optar por instalar infra-estrutura própria, que depois se unem através dos hubs (mais especificamente ADMs) a ligações com uma capacidade superior (azul), que possivelmente serão anéis SDH STM-1 de modo a suportar algumas dezenas de estações base. Estas ligações são introduzidas através de ADMs num anel SDH de mais elevada capacidade (STM-4 ou até STM-16) (laranja) que transporta o tráfego de uma ou duas centenas de estações base. Este anel, por sua vez ir-se-á ligar ao *switch* ATM que se liga posteriormente ao RNC para o tráfego UTRAN 3G, enquanto para o tráfego RAN 2G segue directamente para a BSC (como representado na Figura 2.5). O sistema PMP (capítulo 3) representado pelo terminal hub (HT) e pela sua área de cobertura (vermelho) apresenta-se como uma possível solução para economizar os custos de circuitos alugados, e permitindo a fácil expansão da rede (secção 3.4).

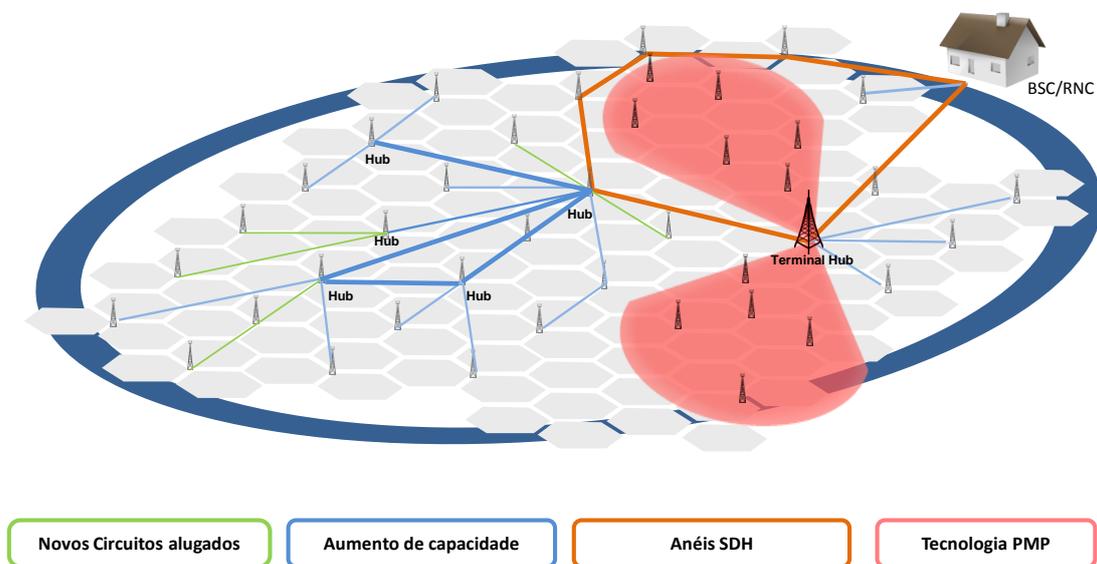


Figura 2.7 – Exemplo de topologia de rede de transporte da rede de acesso futura.

2.5 Conclusões

Neste capítulo começa-se por apresentar uma breve introdução acerca da evolução da rede UMTS (secção 2.1). De seguida é apresentada a arquitectura da rede UMTS (secção 2.2) onde se definem os elementos constituintes da rede. Na secção 2.3 é representada a arquitectura da UTRAN, e são explicados todos os elementos de rede e interfaces da UTRAN, e mais especificamente o RNC, o Nó B e a interface *Iub*. Na secção 2.4 é representada a componente de transporte da rede de acesso actual, e é apresentado um exemplo de uma possível evolução da rede de acesso utilizando o sistema Ponto-Multiponto.

Capítulo 3

Sistemas rádio Ponto-Multiponto

Neste capítulo será apresentada uma descrição e o modo de aplicação dos sistemas rádio Ponto-Multiponto para *backhaul* (infra-estrutura da rede de serviços de telecomunicações) do tráfego 2G e, particularmente, das redes móveis 3G. Será discutido como o sistema Ponto-Multiponto oferece algumas capacidades que o tornam uma tecnologia a considerar como substituição aos sistemas rádio Ponto-a-Ponto ou circuitos alugados actualmente utilizados.

3.1 Sistema rádio Ponto-Multiponto para 2G/3G

Uma das variantes do acesso à banda larga sem fios é o *Fixed Wireless Access* (FWA). Neste sistema uma ligação rádio é utilizada em vez da fibra óptica para a transmissão de voz e dados. O sistema Ponto-Multiponto (PMP), que se encontra representado na Figura 3.1, é um dos tipos de FWA. Um sistema PMP é constituído por um terminal hub (HT) que serve vários terminais remotos (RT) que se encontrem na sua área de cobertura, e estes RTs podem estar ligados a um Nó B, a uma BTS ou a ambos (Anexo B).

Os sistemas PMP são uma das soluções possíveis para o *backhauling* do tráfego 2G e 3G [Hugh03]. Designa-se por *backhaul*, a infra-estrutura da rede de serviços de telecomunicações que permite a transmissão de tráfego, que no âmbito deste trabalho é o sistema rádio Ponto-Multiponto.

O sistema PMP detém as seguintes características que a tornam uma opção para operar juntamente com a rede 3G:

- Interfaces 3G para *backhaul* com ATM;
- Atribuição dinâmica da largura de banda (DBA - *Dynamic Bandwidth Allocation*) para um transporte mais eficiente dos dados em forma de pacotes;
- Gestão do *backhaul* 2G e 3G simultaneamente através do PMP numa única rede (Figura 3.1);

Apesar de ter sido comum a utilização dos sistemas de feixes hertzianos PTP para o *backhaul* móvel, estes não conseguem oferecer as características anteriores porque cada ligação age como sendo um único circuito e a largura de banda de transmissão é fixa para cada ligação. Na secção 3.3 encontra-se uma comparação entre sistemas de feixes hertzianos PTP e PMP para o *backhaul* da rede móvel.

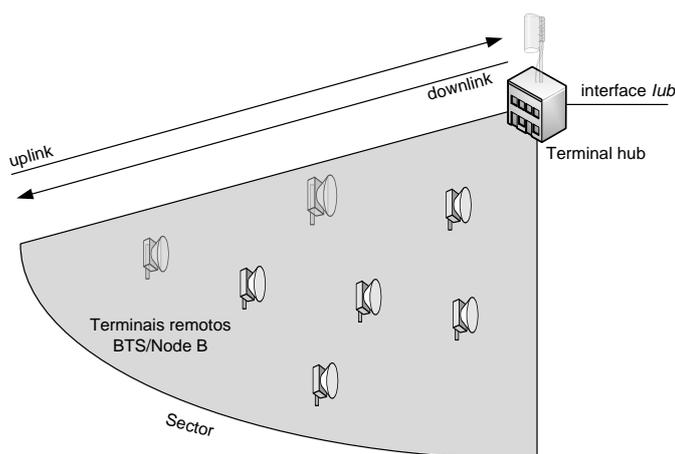


Figura 3.1 – Arquitectura do sistema rádio Ponto-Multiponto.

Neste trabalho serão utilizados alguns termos vulgarmente utilizados nos sistemas FWA. Esses termos encontram-se representados na Figura 3.1, e as suas definições são:

- Terminal hub (HT): É o elemento principal do sistema PMP, e é o ponto central numa dada área de cobertura. Todo o tráfego do sistema PMP flui através do terminal hub que se encontra ligado à interface *lub* e que por sua vez se liga ao RNC e à BSC. Por exemplo, se o utilizador pretender efectuar um serviço de dados no *uplink*, o utilizador troca informação com uma estação base, que por sua vez se encontra ligada a um terminal remoto, que em seguida transmite a informação para o HT que envia a informação para a interface *lub*.
- Terminais remotos (RT): Os terminais remotos encontram-se co-localizados com as estações base (BTS e/ou Nó B) e são utilizados para efectuar a comunicação entre as estações base e o terminal hub.
- *Downlink* e *uplink*: As comunicações do HT para o RT ocorrem no sentido de *downlink*, enquanto o *uplink* é o sentido inverso.
- Sector: De modo a concentrar a potência e aumentar o alcance, a cobertura de 360° do terminal hub encontra-se dividida em sectores. Os sectores do sistema PMP tipicamente variam entre 22.5° e 90° [Hugh03].

Na Figura 3.2 encontra-se representada uma possível configuração para um sistema PMP onde um terminal hub serve um terminal remoto que lhe transmite a informação fornecida pelas estações base (Nó B e BTS) co-aloçadas com esse RT. A informação proveniente do RT é transmitida pelo HT para a interface *lub* que seguidamente transporta o tráfego 3G até ao RNC e o tráfego 2G à BSC. No caso da utilização do sistema PMP o tráfego das estações base não segue directamente para a interface *lub* (como no caso dos circuitos alugados) mas é enviado para os terminais remotos, que se encarregam de enviar a informação através da interface *ar* para o terminal hub (o método de acesso dos múltiplos RTs para o HT encontra-se descrito na subsecção 3.2.1) e só então o tráfego dos RTs é agregado pelo terminal hub e de seguida é inserido na interface *lub* em direcção ao RNC e à BSC. Na Figura 2.5 da secção 2.4 é apresentado o caso em que se utilizam circuitos alugados para o transporte de tráfego do HT até ao RNC/BSC, mas devido a questões estratégicas ou de *business case* o operador pode adquirir infra-estruturas de fibra óptica próprias para o transporte do tráfego.

O HT comunica com o número de RTs que se encontrem na sua área de cobertura, agrega o tráfego dos seus sectores e transporta-o pela interface *lub* através de STM-1 e frequentemente a interface *lub* envolve anéis SDH STM-1, STM-4 ou STM-16 [Kara97] (como apresentado na Figura 2.7 da secção 2.4).

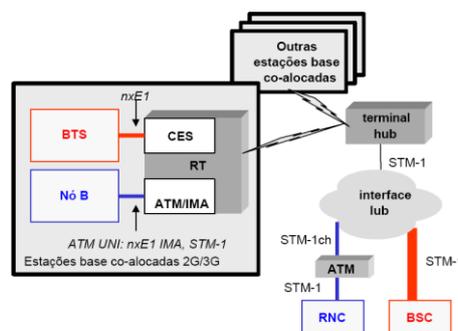


Figura 3.2 – O PMP suporta simultaneamente o *backhaul* do tráfego 2G e 3G.

No Anexo B encontram-se representados vários exemplos de configurações possíveis de aplicação do PMP.

Os sistemas PMP são caracterizados pela capacidade de apenas um terminal hub suportar ligações com múltiplos terminais remotos, como se pode observar na Figura 3.1. Esta capacidade de suportar n ligações rádio com apenas $(n+1)$ antenas é a vantagem fundamental do sistema PMP sobre o PTP que tem necessidade de usar $2n$ antenas para suportar as mesmas n ligações.

Na interface ar pela qual se interligam os terminais remotos e o terminal hub, é utilizado o método de acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA), o qual permite o acesso dos vários RTs à mesma interface partilhada. Nessa mesma interface é aplicado o método de duplexagem com divisão na frequência (FDD) que consiste em utilizar frequências diferentes para o *uplink* e *downlink*. Na secção 3.2.1 encontram-se descritas as diferentes técnicas de acesso múltiplo bem como os métodos de duplexagem. O método TDMA é utilizado nos sistemas PMP porque têm a capacidade de alocar recursos dinamicamente de acordo com a necessidade através do algoritmo DBA (subsecção 3.2.2).

Os sistemas Ponto-Multiponto têm perante os sistemas Ponto-a-Ponto a vantagem da facilidade em adicionar novos terminais remotos (secção 3.3). Para tal, apenas é necessário o alinhamento dos feixes hertzianos do novo terminal remoto com o terminal hub, e as configurações podem ser efectuadas remotamente e alteradas instantaneamente consoante a necessidade (como por exemplo as alterações de frequências). Como desvantagem, os sistemas PMP necessitam de ter linha-de-vista para com os terminais remotos, e o alcance é relativamente curto (Tabela 3.1), daí que só se utilizem os sistemas rádio PMP para o *backhaul* em zonas urbanas.

3.2 Tecnologias de suporte

3.2.1 Técnicas de Acesso múltiplo

Existe uma variedade de técnicas que podem ser aplicadas de modo a permitir o acesso de múltiplos utilizadores aos canais de comunicação disponíveis. Estas técnicas, que são denominadas de técnicas de acesso múltiplo, são utilizadas para permitir a partilha de uma quantidade finita de espectro rádio nas comunicações móveis. As três principais técnicas de acesso múltiplo utilizadas para partilhar a largura de banda disponível são Acesso Múltiplo por Divisão de frequência (FDMA – *Frequency Division Multiple Access*), Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA – *Time Division Multiple Access*) e Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA - *Code Division Multiple Access*) (ilustradas na Figura 3.3).

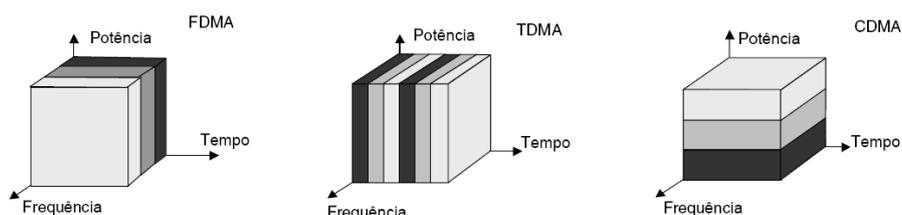


Figura 3.3 – Partilha de frequência, tempo e códigos utilizando FDMA, TDMA e CDMA.

Para a técnica FDMA, a largura de banda disponível é subdividida em vários canais de banda mais estreita. Para cada utilizador é alocada uma única banda de frequência em que pode transmitir e receber. Durante a chamada, nenhum outro utilizador pode usar a mesma banda de frequência. A cada utilizador é alocado um *forward link channel* (da estação base para o terminal móvel) e um *reverse channel* (do terminal móvel para a estação base), sendo cada ligação de apenas um sentido. O sinal transmitido em cada canal é contínuo permitindo transmissões analógicas (utilizado na 1G). A técnica FDMA é utilizada como a primeira subdivisão de grandes bandas de frequência alocadas.

A técnica TDMA divide o tempo disponível em múltiplos *slots*, atribuindo a cada terminal remoto um ou mais *timeslots* nos quais eles podem transmitir ou receber informação. Os sistemas TDMA transmitem dados utilizando um *buffer* e um método em rajada (*burst*), assim a transmissão de cada canal não é contínua. Como é necessário um *buffer* não é possível transmitir sinais analógicos directamente, deste modo é apenas utilizado para a transmissão de informação digital. A técnica TDMA é normalmente utilizada em conjunto com a técnica FDMA para subdividir a largura de banda total em vários canais. Isto é realizado para reduzir o número de terminais remotos por canal permitindo a utilização de um débito binário menor e isto ajuda a reduzir o efeito do atraso na transmissão. A utilização de uma técnica híbrida FDMA/TDMA permite que cada canal seja baseado em FDMA e de seguida seja subdividido utilizando TDMA, para que vários terminais remotos possam transmitir no mesmo canal. Este tipo de técnica híbrida de transmissão é utilizado na maior parte dos sistemas móveis 2G. A técnica TDMA tem a vantagem de transportar uma maior capacidade que FDMA, mas tem várias desvantagens, por exemplo a sincronização entre terminais móveis e a estação base nos sistemas móveis, ou entre estações terrestres e satélites, é necessária para garantir que cada *timeslot* se encontra devidamente separado.

A verdadeira vantagem do modo TDMA é a habilidade de alocar recursos dinamicamente de acordo com a necessidade, uma característica muitas vezes denominada de *Dynamic Bandwidth Allocation* (DBA), explicada na subsecção 3.2.2.

Através da técnica CDMA todos os utilizadores numa dada célula transmitem na mesma banda de frequências e simultaneamente utilizando um método denominado de espalhamento espectral (*spread spectrum*) [HoTo04]. Ao invés de se fazer a separação de utilizadores na frequência ou no tempo, a cada utilizador é designado um código, de modo a que a sua transmissão possa ser identificada. Os códigos usados têm baixa correlação cruzada (idealmente zero), ou seja, são ortogonais, fazendo com que as informações contidas nas várias transmissões não se confundam.

Ao contrário das técnicas TDMA e FDMA, cada canal CDMA utiliza a totalidade da largura de banda da ligação durante todo o tempo. Devido a este factor, a CDMA é muito mais eficiente em utilização do espectro de largura de banda que a FDMA ou TDMA. A técnica CDMA é utilizada em muitos sistemas de comunicação e navegação, incluindo sistemas de posicionamento global (GPS).

Para cada uma destas técnicas de acesso, os canais para os utilizadores podem ser *half-duplex* ou *full-duplex*. Em *half-duplex*, os utilizadores partilham um mesmo canal, de tal modo que apenas um utilizador pode transmitir, enquanto todos os outros recebem. O meio utilizado para combinar dois canais para as duas direcções de transmissão é designado por modo duplexagem, que pode ser efectuado ou na frequência ou no tempo. Para tal existem dois tipos de métodos de duplexagem

utilizados em telecomunicações: *frequency division duplex* (FDD) e *time division duplex* (TDD). O método FDD requer a separação de bandas de frequência para ambos os sentidos, *downlink* e *uplink*. Por outro lado, o método TDD utiliza a mesma banda de frequência mas altera a direcção de transmissão (*downlink/uplink*) no tempo. Na Figura 3.4 encontram-se ilustrados os princípios de funcionamento dos métodos FDD e TDD.

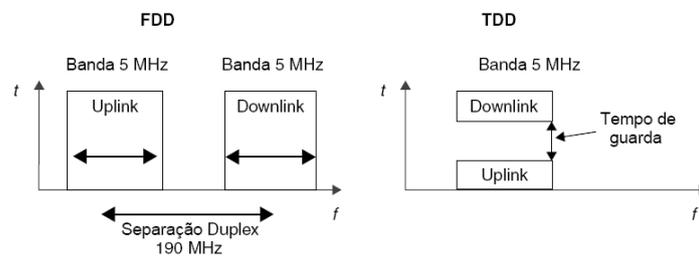


Figura 3.4 – Princípios de funcionamento dos métodos FDD e TDD.

3.2.2 Alocação dinâmica de banda (DBA)

O algoritmo de alocação dinâmica de banda (DBA – *Dynamic Bandwidth Allocation*) consiste na “realocação” de recursos do canal de transmissão para satisfazer os requisitos instantâneos de banda por parte dos terminais remotos, permitindo assim efectuar “*overbooking*” de tráfego, de forma a maximizar a utilização da banda disponível. Para o caso dos sistemas rádio PMP estes actuam sobre a característica da não simultaneidade dos vários serviços em cada um dos terminais remotos servidos pelo mesmo terminal hub (secção 3.1). O terminal hub controla o algoritmo DBA, atribuindo *timeslots* aos RTs consoante a necessidade de banda e prioridade definida pelos parâmetros QoS (UBR, VBR-rt e VBR-nrt) (Cap. 4). Na situação limite, um RT pode utilizar toda a largura de banda disponível, se nenhum dos outros necessitar de banda.

O DBA utilizado no sistema PMP considerado actua não só no *uplink* como a maior parte dos algoritmos DBA para redes PON (*Passive Optical Network*) mas também no *downlink*. Nas redes PON, no *downlink* é utilizado o método de *broadcast*, em que todos os terminais ópticos recebem a informação destinada a todos os outros terminais, mas filtram apenas a que lhe é respectiva, mas no sistema rádio PMP considerado, o DBA é particularmente utilizado no *downlink* (onde se conseguem atingir elevados débitos com HSDPA), partilhando a banda total, e optimizando a partilha de capacidade pelos vários terminais remotos. Como na interface ar do sistema PMP é utilizado o método de acesso múltiplo TDMA com FDD (subsecção 3.2.1) é possível utilizar o método DBA (porque se podem alocar os *timeslots* ao longo do tempo). No entanto, se fosse utilizado o método FDMA não seria possível partilhar a banda entre múltiplos terminais, porque quando se encontra uma frequência atribuída a um terminal, esta fica dedicada a esse mesmo terminal.

3.2.3 Modulações utilizadas nos sistemas rádio Ponto-Multiponto

Os sistemas Ponto-Multiponto analisados neste trabalho podem operar com modulação QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) ou 16-QAM (*16 State Quadrature Amplitude Modulation*). A

modulação que cada um dos terminais remotos usa na comunicação com o terminal hub é determinada dinamicamente, através de um sistema de controlo implementado no HT que analisa a potência com que o RT se encontra a transmitir. A modulação com que cada RT se encontra a funcionar depende da qualidade e da potência do sinal que o RT recebe do HT (que são especialmente afectados com as atenuações devidas à chuva). Em condições de céu limpo e se a distância ao HT for menor que a distância limite recomendada (Tabela 3.1), os RTs operam com a modulação de maior ordem disponível (16-QAM actualmente e futuramente 64-QAM). Tipicamente os RTs mais próximos do HT operam com modulação 16-QAM e os mais distantes com QPSK (Figura 3.5 e Tabela 3.1).

Como referido anteriormente, o factor mais limitativo da distância alcançável pelo PMP é a atenuação devida à chuva, e na Tabela 3.1, encontram-se as distâncias alcançáveis e as capacidades com transporte de informação útil relativas à utilização das modulações QPSK e 16-QAM para o sistema PMP. O funcionamento dos RTs para uma modulação QPSK pode ser atribuído pela atenuação devida à chuva ou por causa da distância a que se encontram do HT.

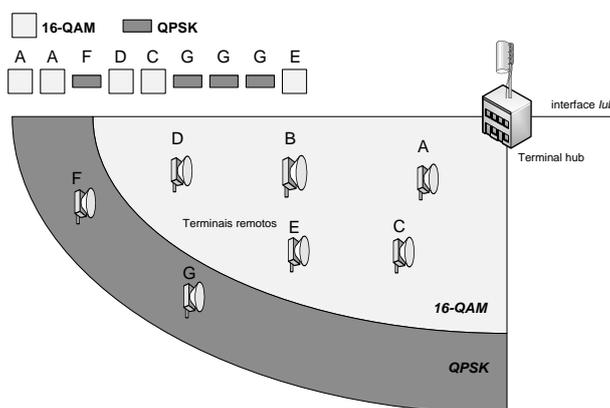


Figura 3.5 – Exemplo de utilização de um sistema PMP com modulações QPSK e 16-QAM.

Com a utilização da modulação QPSK é possível transmitir uma carga útil de ~15 Mbps num canal de 14 MHz, traduzindo-se numa eficiência espectral de 1.2 bps/Hz. Para 16-QAM é possível transmitir uma carga útil de ~30 Mbps e utilizando um canal de 14 MHz tem-se uma eficiência espectral de 2.4 bps/Hz.

Tabela 3.1 – Distâncias de cobertura do sistema PMP para 99.99% de disponibilidade [HUGH05b].

	16-QAM	QPSK
Capacidade de carga útil	29.184 Mbps	14.592 Mbps
26 GHz - Hub 90° - RT 60cm	3.9 km	5.7 km
26 GHz - Hub 180° - RT 30cm	2.9 km	4.5 km

Nota: Zona de Chuva K (42 mm/h), BER=10⁻⁸

A utilização da modulação QPSK para o sistema PMP tem como vantagem utilizar a máxima eficiência de potência (é possível utilizar pequenas potências), enquanto a modulação 16-QAM tem uma maior eficiência espectral, mas menor eficiência de potência.

O sistema PMP estudado funciona na banda de frequências normalizadas dos 26 GHz e dos 28 GHz com espaçamento de canais de 14 MHz [ETSI02]. Na Figura 3.6 encontram-se representados os intervalos de frequência para as bandas de frequência suportadas por esse equipamento.

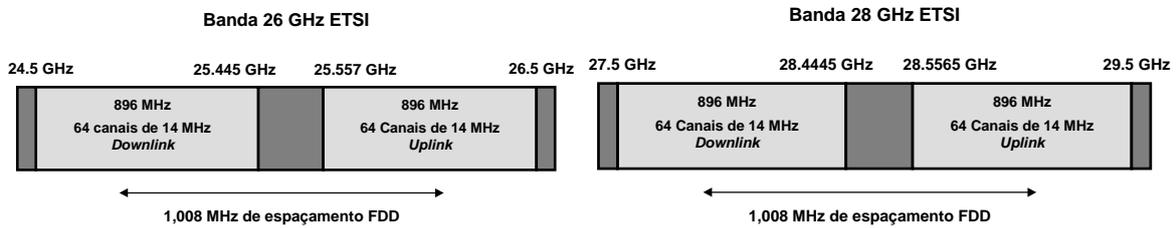


Figura 3.6 – Intervalos de Frequências para 26 GHz e 28 GHz ([ETSI02]).

3.3 Comparação entre as abordagens Ponto-a-Ponto e Ponto-Multiponto para o *backhaul*

As ligações de feixes hertzianos Ponto-a-Ponto utilizam uma tecnologia madura e bem estabelecida que tem sido aplicada frequentemente no *backhaul* do tráfego móvel. No entanto, os sistemas Ponto-Multiponto conseguem suportar as interfaces ATM 3G e o constante aumento dos serviços de dados fazem com que estes sistemas ofereçam grande eficiência (agregação estatística) e flexibilidade (facilidade em adicionar novos terminais remotos) da rede que os sistemas PTP.

As redes *backhaul* Ponto-a-Ponto são vulgarmente implementadas em topologias em estrela ou anel. Na parte A da Figura 3.7 encontra-se representado um exemplo de uma implementação da topologia em estrela. Na Figura 2.6 da secção 2.4 foi já apresentado um exemplo de uma topologia em estrela para a utilização de circuitos alugados, mas aqui apresenta-se uma topologia em estrela para sistemas PTP com rede própria, onde cada estação base (BTS ou Nó B) tem uma ligação de feixes hertzianos a um nó hub que agrega o tráfego de várias estações base e que transmite a informação pela interface *lub* até ao RNC/BSC. A componente de transporte da rede de acesso móvel encontra-se descrita na secção 2.4 e envolve anéis SDH.

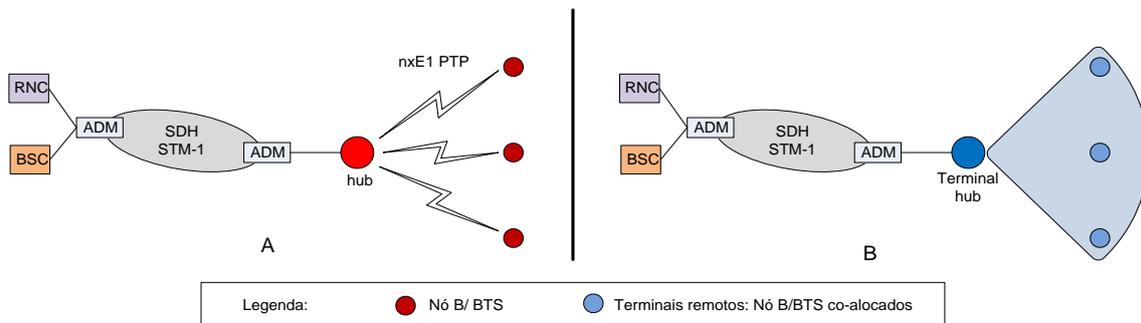


Figura 3.7 – Topologias em estrela (A) e Ponto-Multiponto (B) com sector (90°) para a rede de acesso móvel.

A parte B da Figura 3.7 representa a utilização de um sistema rádio Ponto-Multiponto com um sector de 90° que cobre as estações base representadas na parte A, e onde são instalados terminais remotos co-alocados com essas estações base (Nó B e/ou BTS) que comunicam com o terminal hub (secção 3.1). Este terminal hub não só transmite a informação dos terminais remotos, mas também agrega a informação para a enviar através da interface *lub* que pode ser constituída por vários anéis SDH ou apenas um STM-1 directamente entre o terminal hub e o RNC.

Na Figura 3.8 (A) encontra-se uma representação de uma possível rede de acesso móvel com infra-estrutura própria, utilizando apenas sistemas rádio Ponto-a-Ponto no *backhaul*. Neste exemplo, demonstra-se a topologia em anel no *backhaul* formada por várias ligações de feixes hertzianos Ponto-a-Ponto (que por motivos estratégicos e de investimento tenha que ser utilizada uma tecnologia de feixes hertzianos). As ligações às estações base (BTS/Nó B) são de $n \times E1$ s e consoante o número de estações base ligadas ao anel, esta topologia em anel PTP de feixes hertzianos pode ter uma capacidade PDH E3 ou até SDH STM-1 para suportar o tráfego dos Nós B/BTS ligados aos nós (multiplexadores que podem ser também estações base) que constituem o anel. Esse anel de feixes hertzianos encontra-se ligado à interface *lub* (mais propriamente um anel de fibra óptica SDH STM-4) que transporta a informação até ao RNC/BSC. As topologias em anel têm frequentemente ligações de feixes hertzianos de $n \times E1$ s em alguns dos nós de modo a alcançar algumas estações base adicionais. Na parte B da Figura 3.8 encontra-se representada a migração do sistema rádio PTP apresentado no exemplo anterior para um sistema rádio Ponto-Multiponto com quatro sectores de 90°. Esse sistema PMP consegue cobrir todas as estações base do exemplo anterior se estas se encontrarem afastadas de menos de 5 km do terminal hub central. Entre o terminal hub e o ADM que interliga o sistema PMP à rede de transporte (ligada ao RNC/BSC), pode ser utilizado um sistema de feixes hertzianos Ponto-a-Ponto com a capacidade de um STM-1 ou uma fibra óptica com a capacidade de um STM-1. Na Figura 3.8 (B) apresenta-se um sistema Ponto-Multiponto (explicado na secção 3.1) com quatro sectores de 90°. Cada sector tem a capacidade de cerca de 30 Mbps utilizando uma modulação 16-QAM (subsecção 3.2.3).

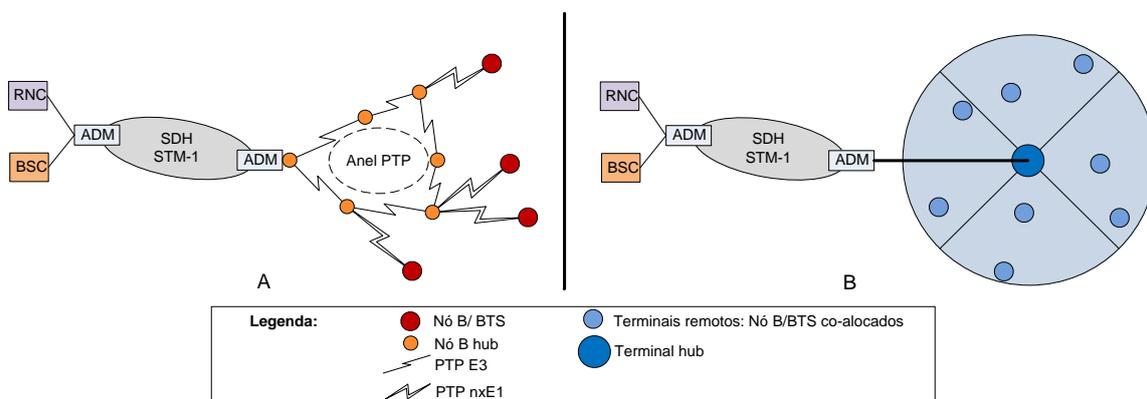


Figura 3.8 – Topologias em anel e estrela Ponto-a-Ponto (A) e topologia Ponto-Multiponto (B).

O sistema de feixes hertzianos Ponto-a-Ponto tem a desvantagem de quando se alcança a capacidade máxima (muitas vezes a capacidade de um sinal PDH E3) e se pretende adicionar uma

nova estação base, um aumento da capacidade para uma topologia de feixes hertzianos em anel é extremamente dispendiosa, tendo que se efectuar a substituição de todos os sistemas de feixes hertzianos para sistemas de maior capacidade no anel. Adicionalmente, os vários nós do anel têm que ser visitados e reconfigurados, e estas operações adicionais geram impacto directo nos custos operacionais (CapEx) da rede.

Em contraste, a topologia Ponto-Multiponto suporta a expansão da rede muito eficientemente e de uma forma linear. Cada terminal remoto é instalado incrementalmente desde que o terminal hub esteja previamente instalado. Para adicionar um novo terminal remoto, apenas é necessária uma visita ao local do novo terminal remoto para instalar o *hardware* e a configuração da ligação com o terminal hub pode ser efectuada remotamente. Uma vez que um sector alcance a sua capacidade, um segundo canal pode ser adicionado ao sector no terminal hub sem afectar os serviços existentes.

Embora o sistema Ponto-Multiponto tenha a desvantagem de ter um alcance máximo (com modulação QPSK) de cerca de 5 km (subsecção 3.2.3) contra as várias dezenas de quilómetros do alcance dos sistemas Ponto-Multiponto, a flexibilidade de expansão do sistema Ponto-Multiponto contrasta com a falta de escalabilidade dos sistemas rádio Ponto-a-Ponto. Sendo esta uma vantagem chave do sistema rádio Ponto-Multiponto que dá aos operadores móveis a flexibilidade que eles necessitam aquando necessário expandir a sua rede numa zona urbana.

3.4 Sistema Ponto-Multiponto como tecnologia futura

Actualmente, os operadores móveis oferecem mobilidade, e serviços de banda larga tal como o HSDPA. Para o operador garantir qualidade de serviço, será necessária uma nova infra-estrutura de rede flexível que permita adicionar novos serviços e tecnologias reduzindo o CapEx. A tecnologia PMP permite aos operadores oferecer uma variedade de serviços utilizando a mesma plataforma (Figura 3.9). Por exemplo, um operador pode actualmente utilizar o PMP para ligar terminais remotos com GSM e 3G, mas pode também instalar e oferecer serviço Wi-Fi (tecnologia de inter conexão entre dispositivos sem fios, que tem como objectivo aumentar a interoperabilidade das comunicações de redes locais sem fios baseadas na norma IEEE 802.11), e mais tarde, o operador pode decidir oferecer WiMax (permite proporcionar comunicações de dados sem fios através de longas distâncias baseado na norma IEEE 802.16).

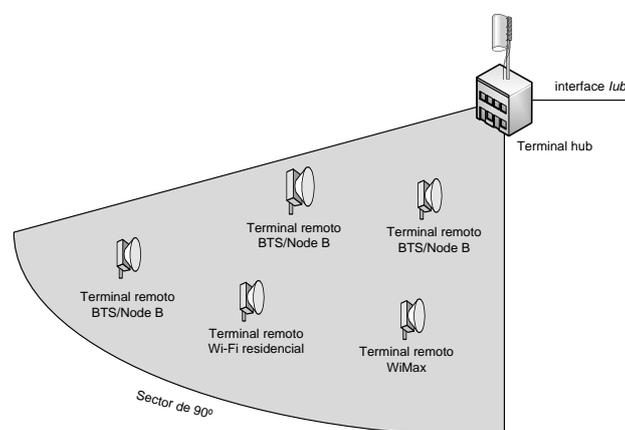


Figura 3.9 – Tecnologias suportadas pelo sistema rádio Ponto-Multiponto.

Um operador que instale o sistema rádio Ponto-Multiponto está a garantir que a rede seja expansível a novos serviços, tecnologias e aplicações, maximizando deste modo o capital investido. O PMP torna-se então uma fonte de rendimento para o operador, em vez de um elemento dispendioso da rede de acesso.

3.5 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o sistema rádio Ponto-Multiponto como solução para realizar o *backhaul* do tráfego 2G e 3G nas redes móveis bem como a explicação dos elementos constituintes desse sistema (secção 3.1).

Na secção 3.2 expõem-se várias tecnologias de suporte ao sistema rádio Ponto-Multiponto, tais como as diferentes técnicas de acesso múltiplo existentes, e em particular a técnica TDMA com o método de duplexagem FDD utilizada no sistema PMP. Na subsecção 3.2.2 mostra-se uma explicação da utilidade do algoritmo de alocação dinâmica de banda (DBA) nos sistemas PMP. Na subsecção 3.2.3 explica-se como é definida a modulação a que cada terminal remoto se encontra a operar para comunicar com o terminal hub.

Na secção 3.3 efectuou-se uma comparação entre os sistemas rádio Ponto-a-Ponto e os sistemas rádio Ponto-Multiponto.

Concluiu-se que o sistema PMP embora tenha a desvantagem de apenas ter um alcance menor que 5 km e que seja necessária linha-de-vista entre o terminal hub e os terminais remotos, este é um sistema flexível e de fácil expansão (secção 3.4) em comparação com o sistema PTP e soluções de circuitos alugados actualmente implementadas. Por esta razão é estudada a implementação do sistema rádio PMP no *backhaul* das redes 2G/3G.

Capítulo 4

Modelação de serviços para a rede móvel

Neste capítulo serão descritos os modelos de tráfego de vários serviços 3G implementados no simulador criado em Matlab[®] apenas para o sentido de *downlink* que como foi já referido é o que mais banda consome. Os serviços implementados são a voz com codec AMR (*Adaptive Multi-Rate*), a vídeo-telefonia, o e-mail, o FTP e *web browsing*. É também efectuada uma consideração da implementação dos serviços 2G.

4.1 Introdução

No sentido de analisar a ocupação da interface *Iub*, é necessário fazer-se uma caracterização dos diferentes tipos de serviço, de modo a obter-se uma aproximação do tráfego real transmitido pelos terminais remotos (BTS e Nó B) para o utilizador, que deve ser tão fiel quanto possível. O tráfego gerado pelo simulador é o tráfego que se encontra no terminal hub (secção 3.1) e que se destina aos diversos terminais remotos servidos por este (já incluindo cabeçalhos dos vários protocolos como mencionado no Anexo G).

Apesar de grande parte das aplicações ser considerada bidireccional, muitas aplicações são claramente assimétricas (por exemplo, o *web browsing*). Como o padrão de tráfego de grande parte das aplicações de dados é tipicamente assimétrico, decidiu-se modelar apenas o tráfego no sentido descendente (*downlink*), uma vez que é neste sentido em que se observa uma maior quantidade de tráfego transferida [GABV02] (actualmente existem meios assimétricos – como xDSL – que se consideram como tecnologias alternativas).

Neste trabalho não são consideradas características respectivas à parte rádio (como atenuação do sinal, potência do sinal, dimensionamentos rádio, etc.) das redes de telecomunicações 2G/3G. O tráfego é gerado utilizando o simulador descrito no capítulo 5, para posteriormente analisar a ocupação da interface *Iub*.

A modelação do tráfego para os diferentes tipos de serviços realizados pelos utilizadores é a primeira fase para a analisar o desempenho de um dado cenário da rede. Neste trabalho serão considerados cinco serviços: voz, vídeo-telefonía, e-mail, *web browsing* e FTP. Para cada serviço UMTS é necessário definir um modelo de tráfego que melhor descreve esse tipo de serviço.

Para os sistemas 2G, para cada BTS, é reservado o número de E1s necessário para servir os utilizadores dessa célula. Para analisar a ocupação de largura de banda na interface *Iub*, considera-se que quer exista ou não tráfego a ser transmitido, o mesmo número de E1s de uma respectiva BTS encontra-se permanentemente reservado na interface *Iub*. O simulador desenvolvido, apenas modela o tráfego 3G, considerando o tráfego 2G como sendo o número de E1s reservado.

Cada utilizador será responsável por um determinado tipo de serviço, o que originará uma variedade de serviços a ser transmitidos por cada estação base. Essa diversidade de serviços deve-se a vários factores, especialmente ao tipo de utilizadores (residenciais ou empresariais) e ao tipo de zona física (onde se inclui zona urbana ou rural, zona de escritórios ou residencial). Para se aplicarem então os modelos de tráfego de uma forma que se consiga obter uma representação da realidade é necessário definir alguns cenários de utilização. A percentagem de utilização de cada um dos serviços em relação ao número de serviços total de uma estação base é um dos aspectos mais importantes a determinar (secção 5.2).

Os padrões de tráfego a nível macroscópico são modelados segundo um processo ON/OFF. No período ON é transmitida informação pelo canal de transmissão, isto é, se o sentido em estudo for o *downlink*, flui informação da rede para o utilizador, mas se a análise for efectuada para o sentido ascendente (*uplink*), flui informação do utilizador para a rede de transporte. No período OFF não é transmitida informação útil, sendo apenas transmitida informação de controlo e sinalização

(informação essa que, ficando fora do âmbito deste trabalho, não é contabilizada). Por exemplo, para o serviço de voz, pode-se analisar os períodos ON/OFF como sendo o período em que o utilizador ouve (ON) e o período em que o utilizador fala (OFF). No serviço de dados, no período ON o utilizador recebe pacotes, enquanto no período OFF o utilizador pode, por exemplo estar a ler a informação requerida no caso de estar a efectuar *web browsing*, ou a enviar dados, como por exemplo no caso do e-mail.

Os diferentes grupos de aplicação utilizados nas simulações implementados em Matlab[®], são modelados por fontes de tráfego caracterizadas como [ATMF99]: *Constant Bit Rate* (CBR) ou *Variable Bit Rate – Real-Time* (VBR-rt) para modelar os serviços de voz e vídeo-telefonía (embora neste trabalho ambos os serviços sejam modelados como CBR), e *Unspecified Bit Rate* (UBR) para *e-mail*, *web browsing* e transferência de ficheiros (FTP) (Anexo C).

Tabela 4.1 – Serviços implementados e algumas das suas características [FeVe05] (Anexo A).

Classe de tráfego	Serviço	Classe de Serviço	RT / NRT	Débito Binário [kbps]
Conversacional	Voz com codec AMR	rt-VBR	RT	12.2 (máximo)
	Vídeo-Telefonia	rt-VBR	RT	64 (máximo)
Interactiva	Web browsing	UBR	NRT	1024 (médio)
	File Download (FTP)	UBR	NRT	Máximo possível pelo terminal
Background	E-mail	UBR	NRT	512 (médio)

De todos os diferentes tipos de serviços disponíveis, são escolhidos apenas os mais relevantes a nível de ocupação de tráfego no *downlink* para serem modelados (Tabela 4.1):

- Serviços *real time*: a voz com codec AMR e vídeo-telefonía;
- Serviços *non real time*: e-mail, *web browsing* e FTP.

Nos últimos anos, foram propostos diferentes modelos tanto para serviços de comutação de circuitos (CS) como para comutação de pacotes (PS) [TGSL01]. Um modelo de tráfego consiste muito resumidamente em duas partes: o processo de chegada de novos serviços por parte dos utilizadores e o processo representativo da actividade do serviço. A abordagem de modelação para o processo de chegada é comum aos diferentes tipos de serviços, e determina o instante em que o utilizador inicia a sua actividade. O modelo mais utilizado para simular o processo de chegada de novos utilizadores é a utilização de uma distribuição de Poisson. O processo representativo da actividade do serviço, depende do tipo de serviço, porque cada serviço tem diferentes características, e essas são descritas pelo seu modelo correspondente.

Para serviços *real-time*, tal como o serviço de voz, o modelo de tráfego utilizado deve ser um processo ON-OFF, com a duração dos períodos activos e inactivos a serem gerados aleatoriamente através de distribuições definidas por cada modelo de fonte de tráfego referente aos diferentes tipos de serviços. Para um serviço de dados CS *real-time*, tal como a vídeo-telefonía, o modelo de tráfego deve ser um processo com débito binário constante, em que está constantemente a ser enviada/recebida informação com um débito constante.

Para serviços *non real-time* é utilizado o modelo de tráfego de pacotes (descrito na secção 4.4) que é comum aos vários serviços de dados.

4.2 Distribuições estatísticas

São utilizadas várias distribuições probabilísticas de forma a determinar as características de cada serviço. Essas distribuições são: exponencial negativa, Pareto, Poisson e geométrica.

Para gerar aleatoriamente a duração das chamadas dos serviços de voz e vídeo-telefonia (secção 4.3) é utilizada uma distribuição exponencial negativa. Para determinar aleatoriamente o início de um novo serviço é utilizada a distribuição de Poisson. A distribuição de Pareto é utilizada para determinar o tamanho de um pacote para uma sessão de *web browsing*. Para determinar as etapas do modelo de pacotes (secção 4.4) é utilizada uma distribuição geométrica de modo a obter aleatoriamente o número de *packet calls*, o tempo de leitura entre *packet calls*, o número de pacotes num *packet call* e o intervalo de tempo entre dois pacotes consecutivos dentro de um *packet call*.

Para se obterem as distribuições anteriormente mencionadas, é necessário recorrer a uma distribuição uniforme [LaKe91]. Este processo requer que se obtenham números aleatórios uniformes no intervalo]0,1[. Uma vez que não é possível gerar números verdadeiramente aleatórios computacionalmente, podem-se utilizar modelos para gerar números pseudo-aleatórios. Existe na literatura, uma vasta variedade de programas geradores de números pseudo-aleatórios ([LaKe91], [ViCo05]).

No Anexo E são apresentadas as distribuições implementadas no simulador, e também apresentados alguns testes, nomeadamente, o teste do qui-quadrado e *Kolmogorov-Smirnov*, de forma a verificar se as sequências geradas pelo gerador são ou não válidas de se considerarem pseudo-aleatórias, ou seja, que as amostras sejam uniformes no intervalo]0,1[e independentes e identicamente distribuídas. Estes testes verificam o grau de proximidade da função distribuição de probabilidade, gerada recorrendo aos números pseudo-aleatórios, com a função distribuição de probabilidade exacta.

No trabalho final de curso [ViCo05] são apresentados testes a uma série de geradores, testando a uniformidade, correlação e independência, de forma a verificar o que foi anteriormente descrito. À semelhança desse trabalho efectuaram-se os mesmos testes mas apenas para o gerador de números pseudo-aleatórios, *rand*, incluído na ferramenta Matlab[®]. Os testes efectuados para as várias distribuições utilizando o gerador referido, foram efectuados utilizando o método da transformada inversa e o método de composição quando aplicável. O método de inversão apenas é aplicável a distribuições invertíveis (como a exponencial negativa a de Pareto e a geométrica) pelo que à distribuição de Poisson terá que se aplicar o método da composição.

4.2.1 Distribuição exponencial negativa

A função densidade de probabilidade da distribuição exponencial negativa é definida por:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & , x \geq 0, \\ 0 & , x < 0. \end{cases} \quad (4.1)$$

em que $\lambda > 0$ é denominado de parâmetro de escala. A média μ e a variância σ^2 são relacionadas com o parâmetro λ , através de:

$$\mu = \frac{1}{\lambda}, \quad \sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (4.2)$$

A distribuição exponencial negativa aplica-se por exemplo na determinação da duração de uma chamada de voz para um valor médio de μ segundos. Na Figura 4.1 pode-se observar a representação gráfica da função densidade de probabilidade da distribuição exponencial negativa onde se observa que se o parâmetro λ aumenta, a média diminui.

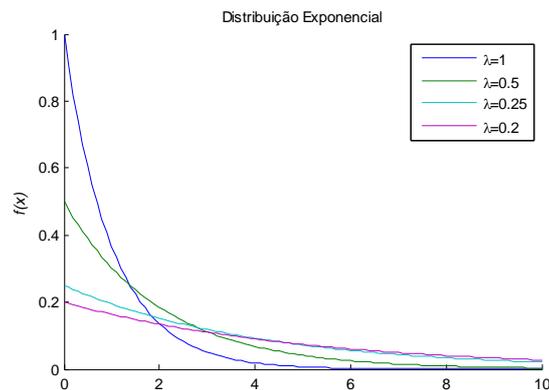


Figura 4.1 – Função densidade de probabilidade para a distribuição exponencial negativa.

O único parâmetro necessário para calcular um valor aleatório através da distribuição exponencial é a média, que se relaciona com o parâmetro λ como apresentado na equação (4.2).

4.2.2 Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson é uma distribuição de probabilidade discreta, que permite determinar, por exemplo a probabilidade de um certo número de eventos ocorrerem num dado período tempo, caso estes ocorram com uma taxa média conhecida (λ) e caso cada evento seja independente do tempo decorrido desde o último evento. Neste trabalho a distribuição de Poisson é utilizada para determinar o início de um novo serviço e tem a seguinte função densidade de probabilidade:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} & \text{se } x \in \{0, 1, \dots\} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.3)$$

onde a variável discreta x pode tomar valores de $x=0, 1, 2, \dots, n$. A probabilidade de se obterem exactamente x ocorrências de um evento é determinada por $f(x)$ e o parâmetro λ é o número esperado de acontecimentos que ocorrem num intervalo de tempo. A média μ e a variância σ são relacionadas com o parâmetro λ , e dadas por:

$$\mu = \lambda, \quad \sigma^2 = \lambda. \quad (4.4)$$

Pela Figura 4.2 pode-se observar a probabilidade de ocorrência para um dado número de acontecimentos em cada amostra para diferentes valores do parâmetro λ .

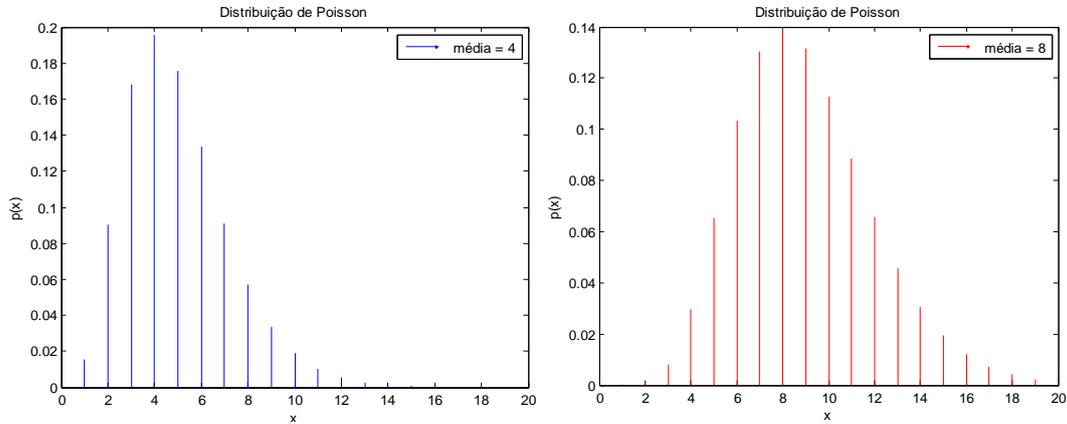


Figura 4.2 – Função densidade de probabilidade para $\lambda=4$ e $\lambda=8$.

4.2.3 Distribuição de Pareto

A distribuição de Pareto segue a seguinte função densidade de probabilidade:

$$f(x) = \frac{\alpha \cdot \beta^\alpha}{x^{\alpha+1}}, \quad x \in [\beta, +\infty[\quad (4.5)$$

Para a distribuição de Pareto tem-se que a média μ e a variância σ^2 são relacionadas com os parâmetros α e β , e são dadas por:

$$\mu = \frac{\beta\alpha}{\alpha-1}, \quad \alpha > 1, \quad \sigma^2 = \frac{\beta^2\alpha}{(\alpha-2)(\alpha-1)}, \quad \alpha > 2 \quad (4.6)$$

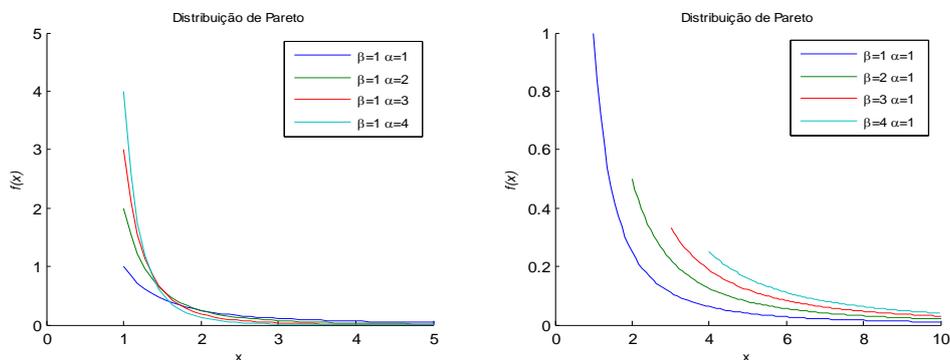


Figura 4.3 – Função densidade de probabilidade da distribuição de Pareto para vários valores de α e de β .

A partir da Figura 4.3 observa-se o efeito dos parâmetros α e β , em que o α é o parâmetro de

forma e o parâmetro β o parâmetro de localização. A distribuição de Pareto é utilizada para determinar o tamanho dos pacotes para o serviço de *web browsing* (subsecção 4.4.1).

4.2.4 Distribuição geométrica

A distribuição de geométrica (que é uma representação discreta da distribuição exponencial negativa) tem a seguinte função densidade de probabilidade [WeisMW]:

$$f(x) = \begin{cases} p(1-p)^x & \text{se } x \in \{0,1,\dots\} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.7)$$

onde x é o número de tentativas até ocorrer o 1º sucesso, e a probabilidade de sucesso é p e a de fracasso é $1-p$. Para a distribuição geométrica tem-se que a média μ e a variância σ^2 são relacionadas com p :

$$\mu = \frac{1-p}{p}, \quad \sigma^2 = \frac{1-p}{p^2}$$

De seguida encontra-se representada a função densidade de probabilidade da distribuição geométrica (Figura 4.4) onde se conclui que quanto maior o parâmetro p menos tentativas são necessárias até ocorrer o 1º sucesso e também se observa que tem a característica da função densidade de probabilidade de uma distribuição exponencial negativa (Figura 4.1).

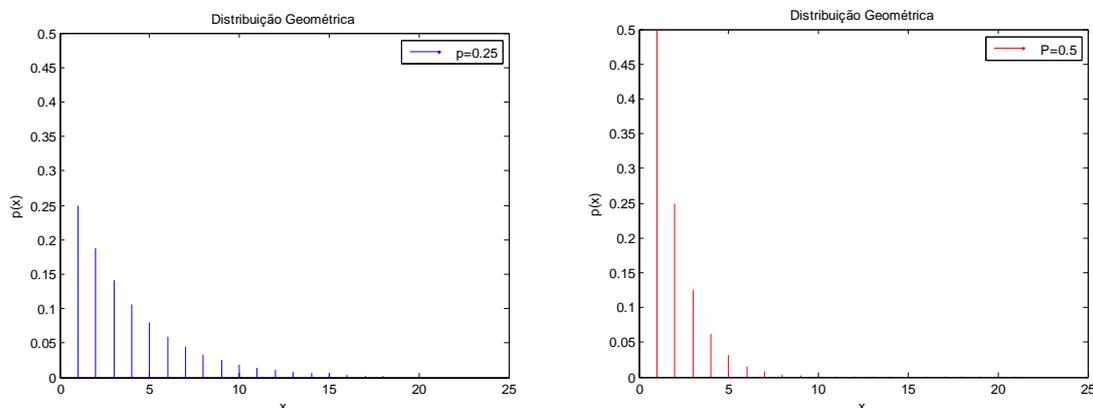


Figura 4.4 – Função densidade de probabilidade da distribuição geométrica para $p=0.25$ e $p=0.5$.

4.3 Serviços em tempo real

4.3.1 Serviço de voz com codec AMR (*Adaptive Multi-Rate*)

O serviço de voz continua a aumentar nas redes móveis, embora o seu peso relativo tenha vindo a diminuir face ao enorme crescimento dos serviços de dados.

Para modelar o serviço de voz com *codec AMR (Adaptive Multi-Rate)* ([3GPP26.090],

[3GPP26.071], [CKLM06]) que se utiliza em UMTS, foi utilizado o modelo que se encontra descrito em seguida, e foi apenas considerado o modo do codec AMR de 12.2 kbps.

Para modelar do serviço de voz é utilizado um processo ON/OFF, explicado no Anexo A.4 da referência [3GPP25.933] como o processo correcto para efectuar simulações de tráfego de voz. Para o *downlink*, o período ON representa actividade (do utilizador falante) e os períodos OFF caracterizam o silêncio (do falante), onde ambos os períodos são gerados através de uma distribuição exponencial negativa bem como a duração da chamada de voz. Da referência [ETSI98] define-se que o valor médio para os períodos activos e de silêncio é igual a 3 segundos e independentemente de ser no sentido de *downlink* ou *uplink*. Para o serviço de voz considera-se que cada utilizador fala metade do tempo da duração de uma chamada, isto é, tem-se um factor de actividade de 50%. Na Figura 4.5 encontra-se uma chamada de voz simulada.

Para caracterizar o serviço de voz com codec AMR e segundo as recomendações do Anexo A de [TR 25.933], são necessárias as seguintes distribuições:

- Uma distribuição de Poisson para definir a chegada de novas chamadas;
- Uma distribuição exponencial negativa para definir a duração de uma chamada, com média 120 segundos;
- Uma distribuição exponencial negativa para definir o estado ON, com média 3 segundos;
- Uma distribuição exponencial negativa para definir o estado OFF, com média 3 segundos.

De notar que o modelo apenas considera o modo do codec AMR de 12.2 kbps, sendo este o que mais largura de banda ocupa em relação aos outros de mais baixo débito [3GPP26.071].

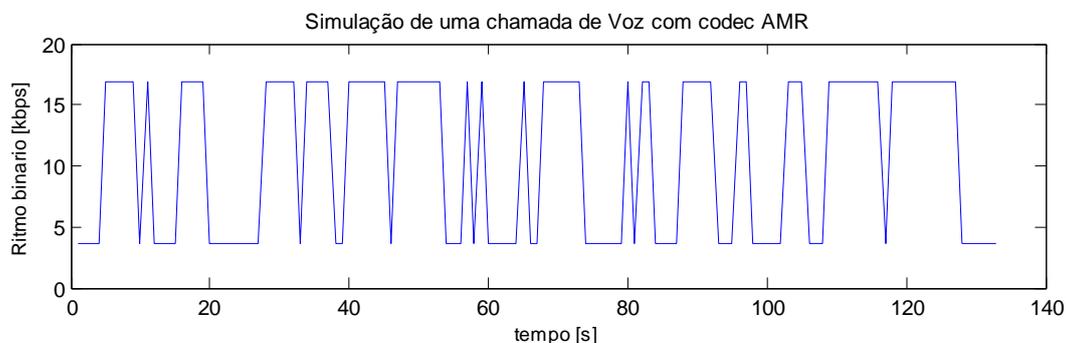


Figura 4.5 – Simulação de tráfego de uma chamada de voz com codec AMR.

Na Figura 4.5 apresenta-se o resultado da simulação de uma chamada de voz com codec AMR empregando o modelo descrito anteriormente. Na simulação são também contabilizados os respectivos cabeçalhos mencionados no Anexo G para a transmissão através da interface *Iub*, e por essa razão o débito binário é superior a 12.2 kbps.

Sabendo que o modelo define um factor de actividade de 50% para cada chamada de voz (com uma duração média de 120 segundos), e que cada período tem uma duração média de 3 segundos, observa-se que a Figura 4.5 é uma boa representação do modelo.

4.3.2 Serviço de vídeo-telefonia

O serviço de vídeo-telefonia, com o aparecimento dos novos terminais móveis, é um serviço com um acentuado crescimento nas redes móveis, e foi implementado no simulador de tráfego criado.

A vídeo-telefonia é um serviço de dados CS, e retirou-se da referência [ETSI98] que os serviços de dados CS são modelados com um modelo de tráfego de débito binário constante. Segundo informação cedida pela Vodafone, o serviço de vídeo-telefonia gera um débito binário constante de 64kbps no Nó B. Se se tiver presente que é necessário adicionar à sequência de dados os cabeçalhos de ATM e FP, e que estes contam com cerca de 38% para o débito final (Anexo G), o serviço em análise vai originar na interface *lub* um débito de 88,3 kbps (em permanência, i.e. independentemente da imagem). Assim no processo de simulação do serviço de vídeo-telefonia, apenas se gera aleatoriamente a duração de uma chamada através de uma distribuição exponencial negativa com média 120 segundos ([CoRo05]). O instante da chegada de uma nova chamada (à semelhança de uma chamada de voz) é dado através de uma distribuição de Poisson.

Na Figura 4.6 encontra-se uma simulação do serviço de vídeo-telefonia efectuada a partir do modelo descrito.

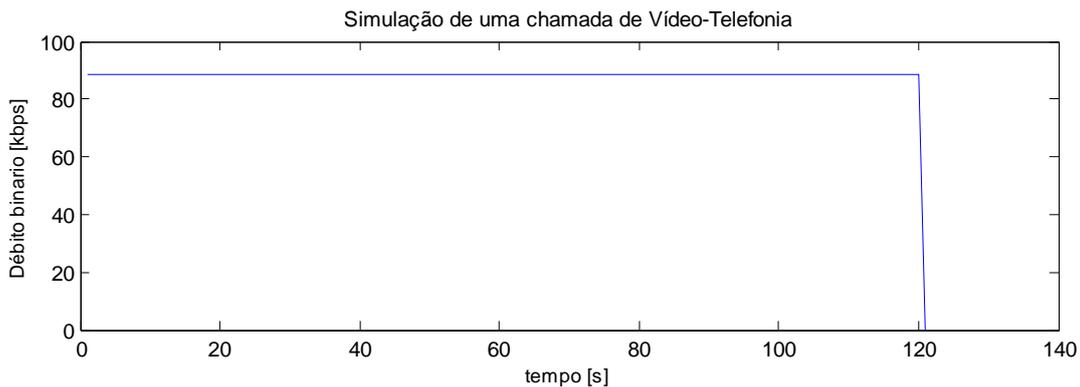


Figura 4.6 – Simulação de tráfego de uma sessão de vídeo-telefonia.

4.4 Modelo de tráfego de pacotes (*non real time*)

Na Figura 4.7 encontra-se representada uma sessão de pacotes típica à saída do Nó B (em direcção ao terminal móvel, no sentido de *downlink*), a qual consiste numa estrutura composta por três níveis: sessão, página ou "*packet calls*" e pacote. O utilizador recebe um *packet call* quando pede informação, por exemplo uma página de Internet ou um ficheiro. Durante um *packet call* são gerados vários pacotes, o que significa que um *packet call* é constituído por uma sequência em rajada de vários pacotes.

Uma sessão do serviço de pacotes contém um ou vários *packet calls* dependendo do serviço. Por exemplo numa sessão *web browsing* um *packet call* corresponde a descarregar um documento da Internet. Após a chegada do documento ao utilizador, o utilizador necessita de algum tempo para analisar a informação pedida, ao qual é denominado de tempo de leitura. É também possível que a

sessão contenha apenas um *packet call*, como é o caso de uma transferência de ficheiros (FTP). Então, para cada tipo de serviço de pacotes, é necessário adaptar as características de uma sessão de pacotes ao comportamento típico do serviço em análise.

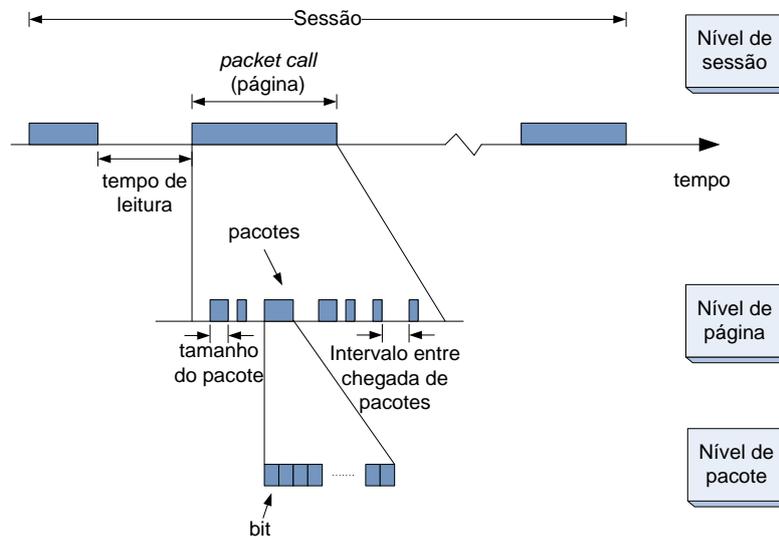


Figura 4.7 – Características típicas de uma sessão de pacotes [ETSI98].

O modelo para uma sessão de pacotes (Figura 4.7), retirou-se de [ETSI98] e consiste em definir:

- *Processo de início de nova sessão*
- *Número de packet calls por sessão, N_{pc}*
- *Tempo de leitura entre packet calls consecutivos, D_{pc}*
- *Número de pacotes num packet call, N_d*
- *Intervalo de tempo entre dois pacotes consecutivos dentro de um packet call, D_d*
- *Tamanho do pacote, S_d*

Notar que a duração da sessão é modelada implicitamente pelo número de eventos durante a sessão.

- **Processo de início de nova sessão** – Define a chegada de uma nova sessão à rede. A chegada de novas sessões é modelada através de um processo de Poisson. Para cada serviço existe um novo processo. É importante notar que este processo apenas gera o instante em que se inicia uma nova sessão e nada tem a ver com a terminação desta.

- **Número de packet calls por sessão, N_{pc}** – Este será uma variável aleatória com média $\mu_{N_{pc}}$ (pedidos de *packet calls*), i.e.,

$$N_{pc} \in Geom(\mu_{N_{pc}}).$$

- **Tempo de leitura entre packet calls consecutivos, D_{pc}** – Este é uma variável aleatória geometricamente distribuída com média $\mu_{D_{pc}}$, i.e.,

$$D_{pc} \in Geom(\mu_{D_{pc}}).$$

De notar que o tempo de leitura começa quando o último pacote do *packet call* é completamente recebido pelo utilizador. O tempo de leitura acaba quando o utilizador faz um pedido para o próximo *packet call*.

- **Número de pacotes num *packet call*, N_d** – Este será uma variável aleatória que segue uma distribuição geométrica com média μ_{N_d} (pacote), i.e.,

$$N_d \in \text{Geom}(\mu_{N_d})$$

Um caso extremo será quando um *packet call* tenha apenas um único pacote, como no serviço FTP.

- **Intervalo de tempo entre dois pacotes consecutivos dentro de um *packet call*, D_d** – Este é uma variável aleatória que segue uma distribuição geométrica com média μ_{D_d} , i.e.,

$$D_d \in \text{Geom}(\mu_{D_d})$$

Naturalmente, se existir apenas um pacote no *packet call* (como é o caso do FTP), este intervalo de tempo não será necessário.

- **Tamanho do pacote, S_d** – Para se calcular o tamanho do pacote, é utilizada a distribuição de Pareto. O tamanho do pacote define-se como sendo o mínimo entre o tamanho máximo do pacote e uma variável aleatória segundo a distribuição de Pareto (sub-secção 4.2.3):

$$\text{Tamanho do pacote} = \min(P(\alpha, \beta), m),$$

onde $P(\alpha, \beta)$ é uma variável aleatória com distribuição de Pareto definida pelos parâmetros $\alpha=1.1$ e $\beta=81.5$ bytes, e m é o tamanho máximo do pacote, $m = 66666$ bytes [ETSI98].

4.4.1 Serviço de *web browsing*

Um sistema de telecomunicações deve fornecer continuamente o acesso ao serviço de pacotes tal como a Internet. Existem muitas actividades que o utilizador pode efectuar durante uma sessão de Internet. O utilizador pode visualizar páginas web, efectuar downloads, ouvir rádio/músicas ou ver TV em *streaming*.

Como o serviço *web browsing* é uma parte importante do tráfego das telecomunicações nas redes de pacotes (*non real-time*), é importante ter um bom modelo que descreva a sua actividade.

A descrição padrão da acção de *web browsing* foi primeiramente descrita em [ETSI98]. Como descrito no modelo de pacotes definido anteriormente cada acção de *browsing* está dividida em *packet calls*. Cada *packet call* consiste em vários conjuntos de pacotes e o tamanho de cada pacote segue uma distribuição de Pareto.

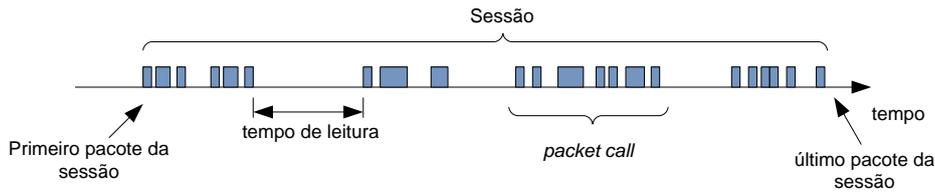


Figura 4.8 – Características típicas de uma sessão de *web browsing* descrita em [ETSI98].

Na Figura 4.8 encontra-se representada uma sessão típica de *web browsing* no terminal móvel. A sessão encontra-se dividida em períodos ON/OFF, sendo a recepção por parte do utilizador das páginas web correspondente ao período ON e os tempos de leitura correspondentes ao período OFF. Os *downloads* da página web são denominados de pedidos de pacotes (*packet call*). Estes períodos ON e OFF são o resultado da interacção humana, onde cada *packet call* representa um pedido de informação por parte do utilizador e o tempo de leitura representa o tempo necessário para analisar a informação requerida.

Para descrever as características típicas de uma sessão de *web browsing*, representada na Figura 4.8, foram propostas em [ETSI98] as seguintes distribuições e os respectivos valores que as caracterizam, e encontram-se resumidos na Tabela 4.3:

- Uma distribuição geométrica para o número de *packet calls* numa sessão, com uma média de 5 *packet calls*.
- Uma distribuição geométrica para o número de pacotes num *packet call*, com uma média de 25 pacotes.
- Uma distribuição geométrica do tempo entre chegadas de pacotes, com valores médios (Tabela 4.2) retirados da referência [3GPP99].

Tabela 4.2 – Tempo médio entre pacotes para diferentes valores de débito binário [3GPP99].

Débito binário [kbps]	8	32	64	144	284	2048
Tempo médio entre dois pacotes	0.5	0.125	0.0625	0.0277	0.0104	0.00195

- Uma distribuição geométrica do tempo de leitura médio entre pedidos de pacotes, com média 60s (valor escolhido de forma a melhor descrever a utilização do serviço de *browsing* actual).
- Uma distribuição de Pareto com valor máximo definido (tamanho máximo do pacote) para o tamanho de um pacote, com valores típicos $\beta = 81.5 \text{ bytes}$, $\alpha = 1.1$ e o tamanho máximo do pacote $m = 66666 \text{ bytes}$.

Tabela 4.3 – Parâmetros para o modelo *web browsing* implementado.

Parâmetros do modelo	Distribuição	Distribuição completamente especificada por	Valores típicos
N_{pc}	geométrica	Média, $\mu_{N_{pc}}$	5 <i>packet calls</i>
D_{pc}	geométrica	Média, $\mu_{D_{pc}}$	60 segundos
N_d	geométrica	Média, $\mu_{D_{pc}}$	25 pacotes
D_d	geométrica	Média, μ_{D_d}	Dependente do débito binário
S_d	Pareto	$S_d = \min(P(\alpha, \beta), m)$	$\alpha=1.1$; $\beta=81.5 \text{ bytes}$; $m=66666 \text{ bytes}$

O modelo implementado no simulador criado em Matlab[®] foi descrito acima, e tem como funcionamento o fluxograma da Figura 4.9.

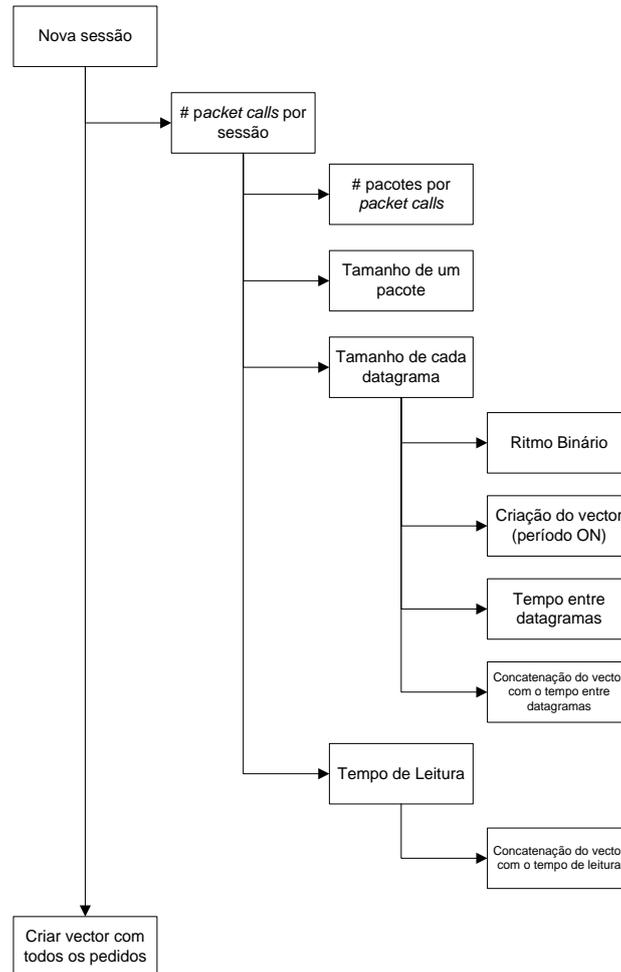


Figura 4.9 – Fluxograma de funcionamento do modelo *web browsing* implementado.

De acordo com esse fluxograma começa-se por obter através da distribuição de Poisson o início de uma nova sessão. O passo seguinte será a geração aleatória do número de pacotes constituintes dessa sessão através da distribuição geométrica. De seguida, para cada *packet call*, é necessário calcular o número de pacotes por *packet call*, usando de novo a distribuição geométrica. O tamanho de cada *packet call* é obtido pela distribuição de Pareto (subsecção 4.2.3). De seguida, é necessário determinar o débito binário a que cada pacote que constitui um *packet call* é transmitido, e a partir de dados obtidos através de uma ligação ADSL à Internet (Figura 4.11) observa-se que embora os vários pacotes sejam provenientes do mesmo servidor, existem flutuações no débito binário de transmissão. No simulador criado, e utilizando como base várias análises efectuadas com a ligação ADSL de onde se retirou que o débito médio do tráfego de *downlink* era cerca de 1024 kbps, foi implementada uma distribuição geométrica com média 1024 kbps, de modo a tornar com que o débito binário seja aleatório. Após as fases anteriores é gerado um vector correspondente ao período em que o utilizador recebe a informação pedida com o débito binário gerado aleatoriamente e considerando também a adição de 30% desse débito relativo aos cabeçalhos dos diferentes

protocolos para a transmissão na interface *lub* (Anexo G). A fase seguinte será calcular o tempo entre pacotes (Tabela 4.2), que depende do débito binário, e esse tempo é adicionado ao vector previamente criado. A próxima fase consiste no cálculo do tempo de leitura/análise do documento pedido, e adiciona-se esse tempo de leitura ao vector. Finalmente os vectores criados (relativos a cada uma das sessões) são adicionados a um vector total que conterà todos os pedidos.

Em seguida encontram-se duas figuras que representam uma sessão de *web browsing*. Na Figura 4.10 encontra-se representado o resultado de uma simulação realizada em Matlab® com o modelo implementado para uma sessão *web browsing*. Na Figura 4.11 encontra-se o resultado de uma sessão de *web browsing* efectuada, obtido através do programa Wireshark [WIREw]. Note-se que este programa usa um *software* que permite analisar os pacotes transmitidos pela rede; captura os pacotes transmitidos na rede e apresenta a informação desses pacotes o mais detalhadamente possível. A captura de pacotes fornece informação acerca de pacotes de dados da rede, tais como o tempo de transmissão, fonte, destino, tipo de protocolo (TCP, UDP, HTTP, FTP, etc.), cabeçalhos de dados tal como sequência e *acknowledgements* entre muitos outros. Comparando os gráficos obtidos através do modelo implementado no simulador e do Wireshark, observa-se que na simulação apresentada (Figura 4.10) existe um pico de tráfego em 4 Mbps, que o valor médio de tráfego é cerca de 1 Mbps, e que foram simuladas 5 *packet calls*.

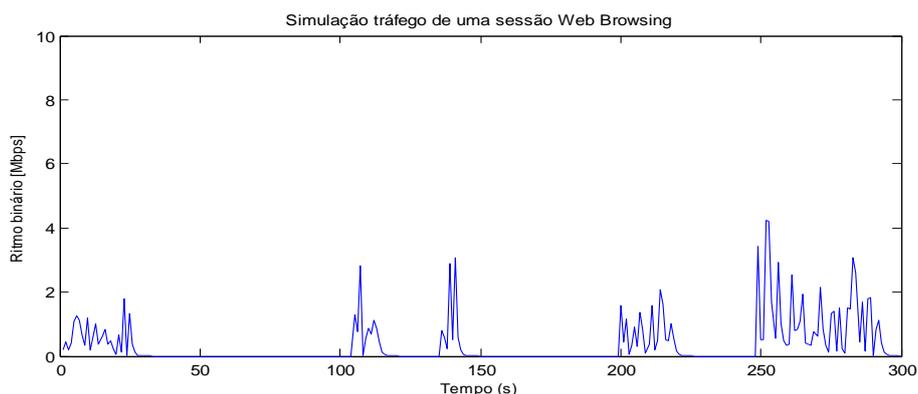


Figura 4.10 – Simulação de tráfego de uma sessão de *web browsing*.

No gráfico relativo à sessão de *browsing* real (Figura 4.11) observa-se que existe um pico em cerca de 5 Mbps, que o valor médio de débito é cerca de 1Mbps e que foram efectuadas 6 *packet calls*.

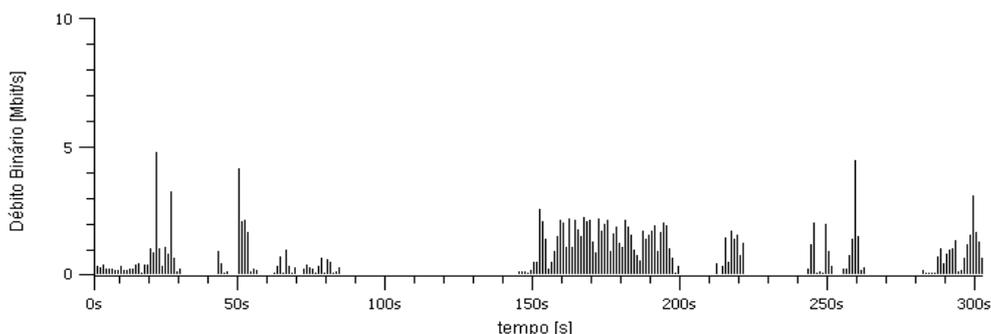


Figura 4.11 – Tráfego real de uma sessão de *web browsing* [WIREw].

Pela comparação entre os gráficos obtidos através do modelo implementado no simulador e do Wireshark, pode-se concluir que se consegue obter uma boa representação do tráfego real através do modelo implementado no simulador. As diferenças existentes devem-se ao número de *packet calls* da sessão simulada ser aleatório e ao seu tamanho e débito serem também aleatórios. Portanto, utiliza-se o modelo definido e implementado para simular o tráfego das sessões *web browsing* na interface *Iub*.

4.4.2 Serviço FTP

O serviço para transferência de ficheiros FTP (*File Transfer Protocol*) é o serviço mais exigente a nível de requisitos de banda entre os vários serviços utilizados em UMTS. O débito binário do serviço FTP pode atingir vários Mbit/s, o que vai limitar muito a utilização da rede. Este serviço é utilizado pelos operadores móveis para determinar os valores máximos suportados pela rede, já que este serviço utiliza sempre a máxima largura de banda disponível para transferir os dados. No simulador desenvolvido foi considerado que o débito de *downlink* não se encontra limitado pelo emissor, mas sim pela capacidade disponível do canal de transmissão.

Nas aplicações FTP, uma sessão consiste numa sequência de transferências de ficheiros separados por tempos de leitura. Os parâmetros mais importantes para modelar uma sessão FTP [IEEE03] são os seguintes:

- **Tamanho do ficheiro a ser transferido – S ;**
- **Tempo de Leitura - D_{pc}** – este é o intervalo de tempo entre a recepção de um ficheiro e o pedido de um novo ficheiro.
- **Número de pedidos de ficheiros por sessão, N_{pc} .**

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros que caracterizam o modelo FTP bem como as respectivas distribuições e os valores típicos.

Tabela 4.4 – Parâmetros para o modelo FTP [IEEE03].

Parâmetros do modelo	Distribuição	Distribuição completamente especificada por:	Valores típicos
S	geométrica	Média, μ_S	25 Mbytes
D_{pc}	geométrica	Média, $\mu_{D_{pc}}$	600 segundos
N_{pc}	geométrica	Média, $\mu_{N_{pc}}$	3 ficheiros

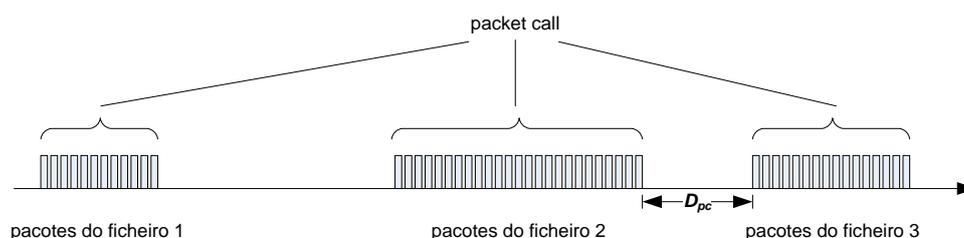


Figura 4.12 – Uma sessão de FTP descrita em [IEEE03].

Como já referido anteriormente na descrição do modelo de pacotes (secção 4.4), o modelo FTP usa a mesma base teórica que o modelo de pacotes, mas cada *packet call* é apenas um ficheiro, e não vários como no serviço *web browsing* (página web, imagens, etc.).

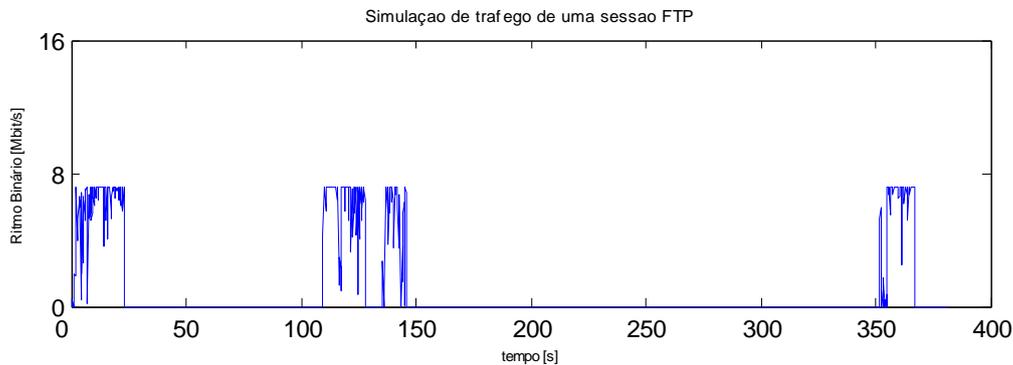


Figura 4.13 – Simulação de tráfego de uma sessão FTP utilizando uma placa 3G de 7.2 Mbps.

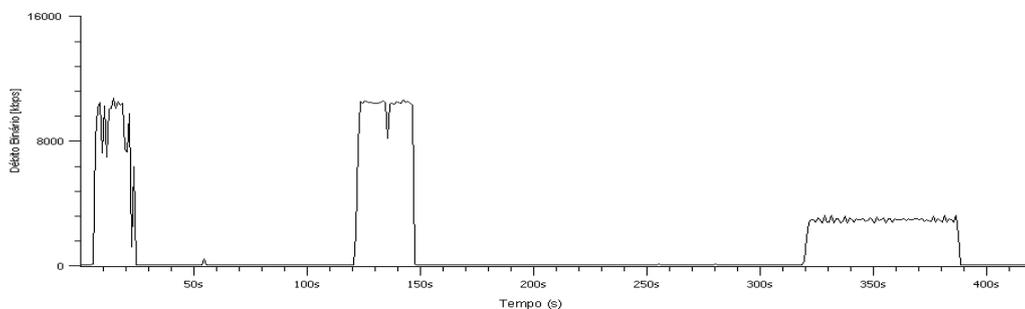


Figura 4.14 – Tráfego real de uma sessão FTP [WIREw].

Na Figura 4.13 e Figura 4.14 encontram-se o resultado do tráfego gerado, respectivamente, para uma sessão de FTP simulada e real. Os resultados obtidos na Figura 4.13 foram obtidos usando o simulador desenvolvido no âmbito deste trabalho, tendo como referência a utilização de uma placa 3.5G de 7.2 Mbps. Neste exemplo simulou-se o *download* de quatro ficheiros, e em alguns instantes atingiu-se o débito máximo teórico considerado (7.2 Mbps), apenas possível se existirem 7.2 Mbps disponíveis no canal de transmissão. Neste trabalho considera-se que o débito máximo se encontra limitado primeiramente pelo canal e depois pelo limite alcançável pela placa 3.5G em uso, e não pelo emissor. Na Figura 4.14 encontra-se uma representação gráfica da banda consumida para a transferência de três ficheiros durante uma sessão FTP através de uma ligação ADSL. Os dois primeiros ficheiros foram transferidos de um mesmo servidor FTP e o terceiro de outro diferente servidor. Pelo que se pode observar, o primeiro servidor proporciona uma velocidade de *download* de cerca de 10 Mbps enquanto o segundo servidor tem cerca de 4 Mbps. Com o simulador, obtém-se uma boa estimação do tráfego FTP real. As diferenças devem-se ao facto de na simulação o tamanho do ficheiro ser aleatório e existirem outros tipos de serviços a ser realizados, ocupando o canal de transmissão e não disponibilizando os 7.2 Mbps necessários para se efectuar o *download* com o débito máximo possível.

Pode-se concluir, que o serviço FTP utiliza imensos recursos a nível de largura de banda, sendo

o serviço mais exigente a nível de banda, sendo por isso utilizado para realizar testes de capacidade pelas operadoras móveis. O modelo FTP foi implementado para consumir toda a banda disponível, sendo considerada a limitação pela capacidade disponível proporcionada pela placa 3.5G (384 kbps, 1.8 Mbps, 3.6 e 7.2 Mbps) e não pelo servidor onde está alojado o ficheiro.

4.4.3 Serviço de e-mail

O serviço de e-mail é um serviço utilizado por quase todos os utilizadores de Internet, que detêm pelo menos uma conta de correio electrónico. Embora o tráfego gerado devido aos e-mails seja muito inferior em comparação com por exemplo o serviço *web browsing* ou FTP, não se pode deixar de considerar porque é um dos serviços mais utilizados na rede móvel. A 3.5G permite ao utilizador estar permanentemente conectado à Internet, tal como acontece com a ADSL, e portanto o utilizador recebe instantaneamente os e-mails no seu terminal móvel aquando a recepção de um novo e-mail.

O modelo utilizado para gerar o tráfego de e-mail, foi o modelo de pacotes (secção 4.4), mas considera-se que cada sessão consiste na recepção de vários e-mails e o tempo de leitura passa agora a ser o tempo de espera de um próximo e-mail, que tem uma média de 30 minutos. Considera-se que em média uma sessão de e-mail contém cerca de 3 novos e-mails com tamanho médio de 1500 bytes (com anexos). Foi considerada uma distribuição geométrica com média de 1 Mbps para simular o débito binário para a transferência de um e-mail.

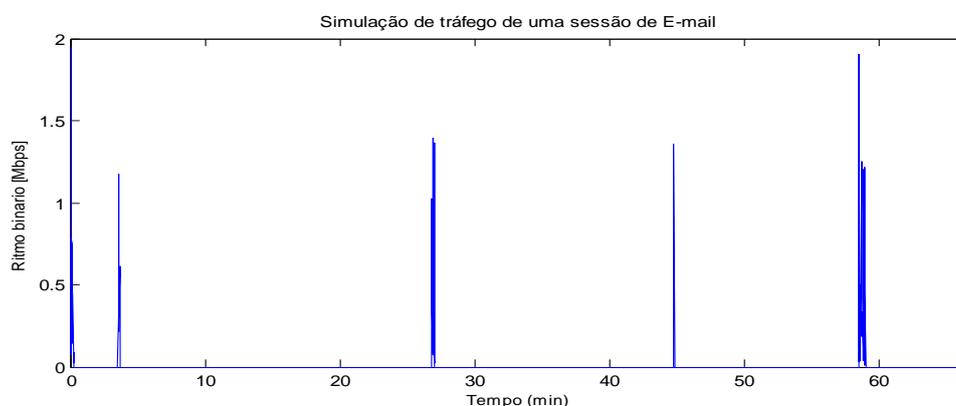


Figura 4.15 – Simulação de uma sessão de tráfego de e-mail.

Na Figura 4.15 é apresentado o resultado de uma simulação para uma sessão do tráfego de e-mail de um utilizador. Nesta simulação apresenta-se que o utilizador recebeu 5 e-mails. Considerou-se que o e-mail é transferido na totalidade para o terminal móvel aquando da sua recepção. Daí que em situações de pico o e-mail é transferido com o débito de 2 Mbps, e que o tamanho seja variável.

4.5 Serviços 2G

Os vários serviços 2G, não foram modelados e implementados no simulador. Mas foi considerado o

caso de um terminal remoto do sistema Ponto-Multiponto transmitir informação de uma BTS. Neste caso, considerou-se uma constante igual ao número de circuitos E1 reservados para a respectiva BTS, deste modo englobando todos os serviços 2G. Normalmente reserva-se 1xE1 por BTS em permanência para o tráfego 2G quer se realizem serviços quer não.

4.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os modelos de tráfego para os diferentes tipos de serviços considerados no simulador de tráfego desenvolvido.

Começou-se por apresentar algumas distribuições estatísticas (secção 4.2) utilizadas na geração aleatória do tráfego. Na secção 4.3 foram apresentados os modelos de tráfego para os serviços em tempo real, como a voz e a vídeo-telefonia, e concluiu-se que os modelos implementados são boas aproximações da realidade. Na secção 4.4 explicou-se o modelo geral para o tráfego de pacotes, e os vários modelos que descrevem os serviços de tráfego de pacotes considerados (*web browsing*, FTP e e-mail). Concluiu-se também que os modelos considerados para o tráfego de dados conseguem descrever as sessões de um utilizador real e que as distribuições utilizadas nos vários modelos de tráfego implementados no simulador são válidas.

Capítulo 5

Simulações de tráfego da rede móvel

Neste capítulo pretende-se analisar o tráfego relativo aos dados transmitidos entre o terminal hub de um sistema Ponto-Multiponto e um terminal remoto que serve os utilizadores de uma dada célula, que pode cobrir escritórios, habitações, centros comerciais, locais públicos, etc. Consoante a zona de cobertura de uma dada célula, é necessário definir parâmetros que melhor descrevam a zona em questão.

De modo a realizar a análise de utilização de capacidade, foi criado um simulador, que será explicado na secção 5.1, bem como os cenários (secção 5.2) e resultados das simulações realizadas.

5.1 Funcionamento do Simulador

De modo a obter uma estimacão do tráfego gerado para os terminais remotos (RTs) para uma dada área de cobertura pelo sistema Ponto-Multiponto (PMP), descrito no Cap. 3, foi criado um simulador de tráfego para os vários servios analisados no capítulo 4. Este simulador foi criado utilizando a ferramenta Matlab[®], e de modo a facilitar a utilizao foi criada uma interface gráfica (Anexo I). Essa interface gráfica recebe vários *inputs* a dimensionar, e na seco 5.2 determinam-se alguns cenários e definem-se alguns desses *inputs* para as análises seguintes. O funcionamento do simulador encontra-se sintetizado no fluxograma da Figura 5.1.

Ao executar a aplicao do simulador criado  apresentada a interface gráfica descrita no Anexo I, e cuja janela principal se apresenta na Figura I.1.  necessária a introduo de diversos parâmetros para a definio da simulao a realizar. É fundamental definir o número de RTs (Nós B e/ou BTS, como explicado na seco 3.1) que se encontrem na área de cobertura do sector do PMP, e quais os parâmetros que definem cada RT. Os RTs são caracterizados pela modulao (subseco 3.2.3), pelo número de E1s reservados para o Nó B e para a BTS, e pelo número de utilizadores por RT. É também necessário definir vários cenários para zonas urbanas (seco 5.2) de utilizao dos diferentes servios bem como a penetrao das placas 3G (Anexo H) no mercado (as quais definem a velocidade máxima de transmissão por utilizador), e considera-se que cada utilizador efectua apenas um servio em simultâneo.



Figura 5.1 – Fluxograma do funcionamento do simulador.

O segundo passo consiste em simular os diferentes servios utilizando os modelos de tráfego apresentados no capítulo anterior. Comea-se por simular o comportamento dos servios de voz com codec AMR e vídeo-telefonia por serem aqueles que têm uma maior prioridade de QoS; de seguida simulam-se os servios de *web browsing* e de e-mail; finalmente simula-se o servio de FTP que utiliza a restante banda disponível.

No fim da simulao é apresentado um gráfico com os resultados obtidos, sendo possível, através da interface gráfica observar os gráficos das simulao para cada um dos RTs definidos (Figura I.8).

O simulador encontra-se preparado para simular tráfego apenas na hora mais carregada (*busy hour*) e que se considera como sendo a hora em que existe mais tráfego. Portanto, os parâmetros que se introduzem no simulador correspondem ao pior caso, isto é,  *busy hour* (BH). De forma a obter o resultado das simulao num estado estacionário, executa-se a simulao a partir de um dado período de tempo para desprezar o comportamento instável inicial. Não sabendo qual o período

suficiente, e após a realização de várias simulações, escolheu-se a duração de 1000 segundos.

Note-se que o simulador criado tem muitos parâmetros de *input* que podem ser alterados, então é necessário ter em conta que as conclusões são apenas dependentes dos *inputs*.

Para todas as situações apresentadas na secção 5.4 foram realizadas 100 simulações para se obter um valor médio de modo a garantir um intervalo de confiança de 95% (Anexo F).

5.2 Dimensionamento de cenários para a rede móvel

Nesta secção é efectuado o dimensionamento para vários cenários de forma a efectuar o planeamento de capacidade, cobertura e optimização de rede utilizando o sistema rádio PMP.

Na fase de dimensionamento é essencial ter em conta a área geográfica de cobertura e informações do tipo de área (escritórios, habitações, centros comerciais, locais públicos, etc.). Em relação às condições de propagação admite-se, neste trabalho, que o utilizador se encontra relativamente próximo da estação base que o serve obtendo as melhores condições rádio que não impõem limites na interface rádio, podendo deste modo o utilizador atingir os débitos máximos possíveis pelos diferentes tipos de serviços descritos no capítulo 4. Também se assume que o utilizador se encontra com uma mobilidade reduzida (até 3km/h), para ser possível atingir os elevados débitos proporcionados pelo HSDPA. É também importante ter em conta aspectos tais como o crescimento previsto para o número de subscritores, e informações sobre a densidade de tráfego.

O principal objectivo em definir uma boa aproximação dos parâmetros dos vários cenários distintos é encontrar uma forma de prever (o mais próximo da realidade) a capacidade de informação que será necessária transferir pela rede para satisfazer essas zonas, e deste modo dimensionar a rede de transporte.

Para definir os parâmetros, como já foi referido anteriormente, é necessário conhecer a área geográfica em estudo. Também foi referido que o sistema rádio Ponto-Multiponto é utilizado especialmente em zonas urbanas. Para efeitos deste trabalho, considera-se uma zona urbana.

Na Figura 5.2 apresentam-se os passos a seguir de forma a obter alguns parâmetros para os cenários escolhidos. Inicialmente é necessário obter a densidade populacional da cidade em estudo, para seguidamente se calcular o número de habitantes que se encontram na área de cobertura de uma dada estação base. Com os valores da penetração do operador em estudo no mercado das redes móveis e com o número de habitantes por célula, obtém-se o número de potenciais utilizadores numa célula para o operador em análise.



Figura 5.2 – Fluxograma da definição de parâmetros para os cenários.

Na Figura 5.3 encontram-se os dados relativos ao número de habitantes/km² das cidades portuguesas com uma densidade populacional superior a 500 hab/km² [INEw].

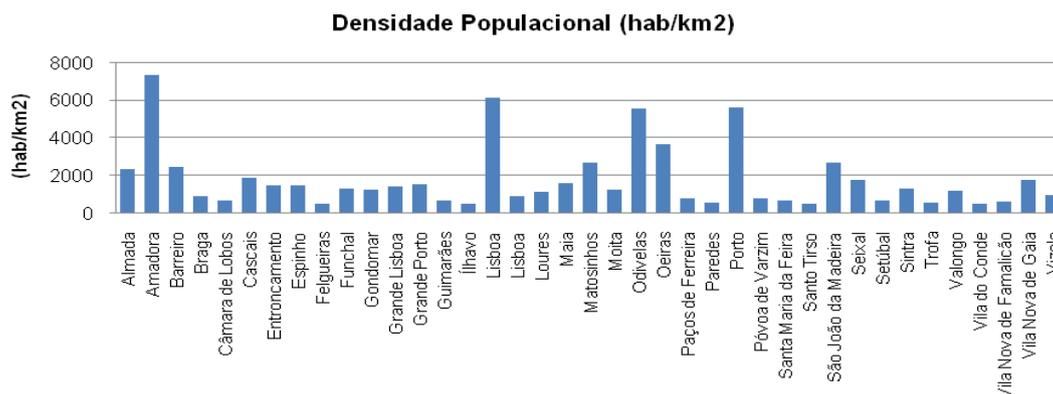


Figura 5.3 – Cidades portuguesas com densidade populacional superior a 500 hab/km² (Fonte: INE).

Curiosamente, a média de hab/km² das cidades representadas na Figura 5.3 é idêntica à densidade populacional de V.N. de Gaia (estudada como exemplo na secção 5.3), ou seja igual a 1804 hab/km². Usando este valor e tendo presente que cada célula é hexagonal, e tem um raio de 400 metros ([JoFu05]), ao qual corresponde uma área de célula de $(3\sqrt{3}/2) \cdot r^2 = 0.416 \text{ km}^2$, conclui-se que uma célula cobre cerca de 750 habitantes.

Na Tabela 5.1 encontra-se representada uma estimativa da percentagem de potenciais utilizadores dos serviços 3.5G na *busy hour* para 2007 e para 2010 do total de utilizadores do Nó B. Prevê-se um grande aumento do número de assinantes do mercado móvel 3.5G nos próximos anos. Devido à cada vez maior necessidade de mobilidade por parte dos utilizadores, e devido ao aumento das velocidades de transmissão, os serviços 3.5G vão-se tornando um concorrente directo do serviço de acesso à banda larga fixo, mas com a garantia de mobilidade, daí que se preveja um aumento do número de utilizadores para 2010.

Tabela 5.1 – Percentagem de potenciais utilizadores de serviços 3.5G para cada cenário numa célula.

		Residencial	Comercial	Business
Potenciais utilizadores 3.5G	2007	12%	7%	17%
	2010	20%	11%	25%

Por outro lado, também se prevê um aumento a nível da aquisição dos terminais móveis. O serviço de alta velocidade móvel implica a aquisição de novos terminais e estima-se que com o passar dos anos, se adquiram as tecnologias mais recentes disponíveis no mercado. A penetração dos terminais 3.5G encontra-se representada na Tabela 5.2 (os valores de 2007 foram estimados a partir dos dados de um cenário real apresentados na secção 5.3).

Tabela 5.2 – Penetração da banda larga móvel no mercado nacional (valores estimados).

Serviço	2007	2010
Banda Larga 384 kbps	35%	10%
Banda Larga 1.8 Mbps	60%	15%
Banda Larga 3.6 Mbps	5%	45%
Banda Larga 7.2 Mbps	0%	30%

No final do segundo trimestre de 2007, a taxa de penetração do serviço móvel em Portugal é de 126.9% [Anac08]. Para o dimensionamento, assume-se que a operadora em estudo detém uma cota de mercado de cerca de 30% (assumindo que existem apenas três operadoras móveis) no ano de 2007, e com as campanhas de banda larga e alargamento da cobertura, assume-se para efeitos de simulação, que em 2010 essa cota passe para os 35%.

Como foi já referido, vai ser simulada a utilização do sistema Ponto-Multiponto numa zona urbana com o valor médio da densidade populacional. Como já referido também, uma célula serve em média 750 habitantes, mas considerando a cota de mercado de 30% e a percentagem de potenciais utilizadores definida na Tabela 5.1, obtêm-se um possível número de utilizadores por célula por operador (Tabela 5.3). Estes valores para o número de utilizadores são considerados para a *busy hour*.

Tabela 5.3 – Potenciais utilizadores numa célula na *busy hour*.

		Residencial	Comercial	Business
Potenciais utilizadores	2007	25	15	39
	2010	45	24	56

De [FeVe04] retirou-se que a utilização de cada aplicação, isto é, a percentagem de utilização de um serviço em relação ao número de serviços total é um dos aspectos mais importantes a ser determinado para se efectuarem simulações com alguma precisão. Como não existem estudos realizados no âmbito da utilização de cada serviço da rede móvel, terão que ser realizadas algumas considerações e estimativas. De notar que para ser possível obter débitos elevados (HSDPA), a questão da mobilidade é restrita. Logo não são considerados os cenários onde existe elevada mobilidade, tais como, estradas e comboios. Então, fica-se limitado a três áreas principais:

- Residencial: Meios Urbanos e residenciais.
- Comercial: Zonas comerciais, e espaços públicos.
- Business: Meio empresarial e de escritórios.

A próxima fase do dimensionamento é então definir para cada um dos cenários, a percentagem de utilização de cada um dos diferentes serviços (Figura 5.4) que foi escolhida após análise do trabalho realizado em função do projecto IST-SEACORN [FeVe04].

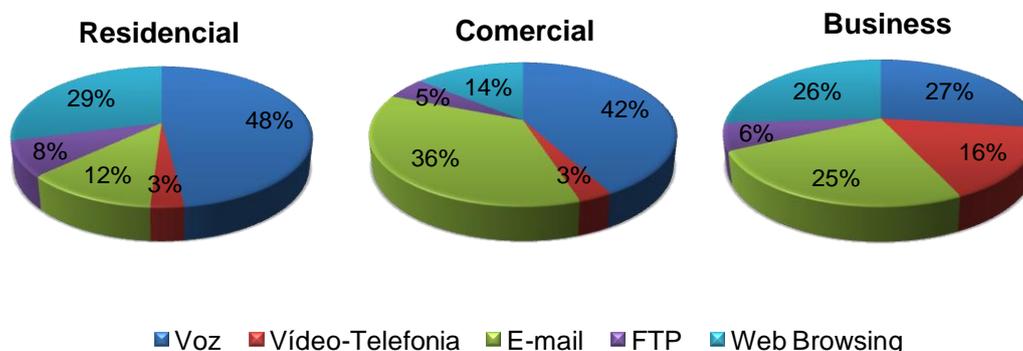


Figura 5.4 – Penetração de serviços por cenário (em percentagem).

5.3 Análise do sistema Ponto-Multiponto num cenário real

Nesta secção são apresentados valores reais obtidos no início do mês de Setembro de 2007 para um sistema rádio PMP localizado em Vila Nova de Gaia. Este PMP agrega o tráfego de cinco RTs (Serra do Pilar, Hospital de Gaia, El Corte Inglés, Gervide e Santo Ovídio) representados na Figura 5.5. Pode-se observar que a distância que engloba os vários RTs se encontra dentro da distância alcançável pelo HT, e que o raio da célula de cada estação base é cerca de 400 m.

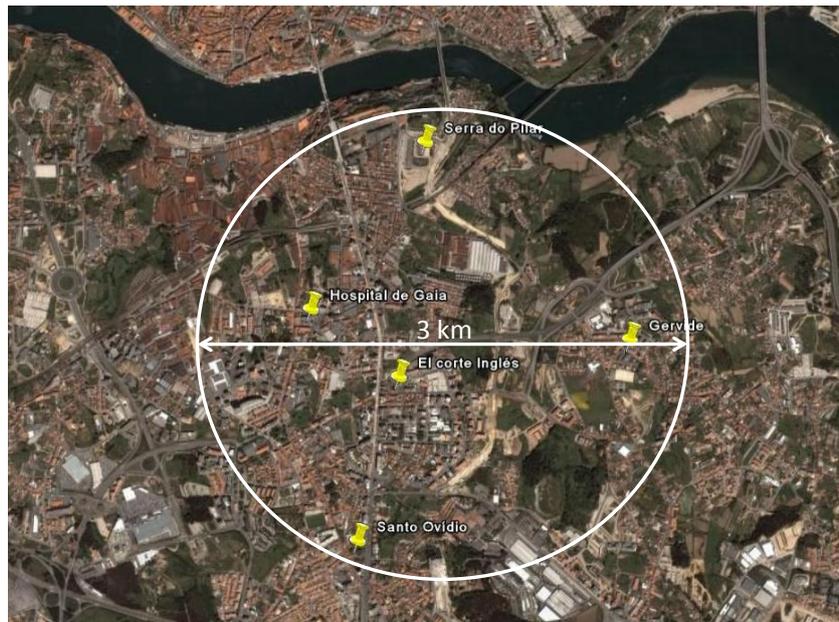


Figura 5.5 – Localização dos terminais remotos para o PMP localizado em V.N. Gaia.

O tráfego 3G de *downlink* transmitido por cada um desses RTs encontra-se representado na Figura 5.6, podendo-se concluir que devido às diferentes necessidades dos utilizadores a hora de ponta nos diferentes RTs é sempre diferente e o ritmo binário máximo é de cerca de 3.8 Mbps (possivelmente existe algum utilizador a usar uma placa 3.5G de 3.6 Mbps e ainda alguns utilizadores a realizar outros serviços).

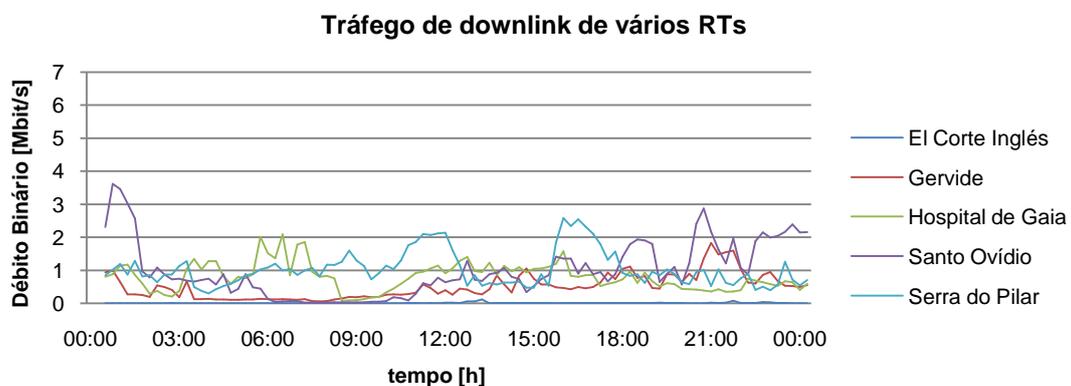


Figura 5.6 – Tráfego real dos vários RTs para o sistema PMP de V.N. Gaia (Fonte: Vodafone).

Na Figura 5.7 encontra-se o tráfego agregado de *downlink* dos vários RTs, cujo tráfego está descrito na Figura 5.6. De notar que para estes cinco RTs existe um pico em 6.5 Mbps e o valor médio ronda os 3.1 Mbps.

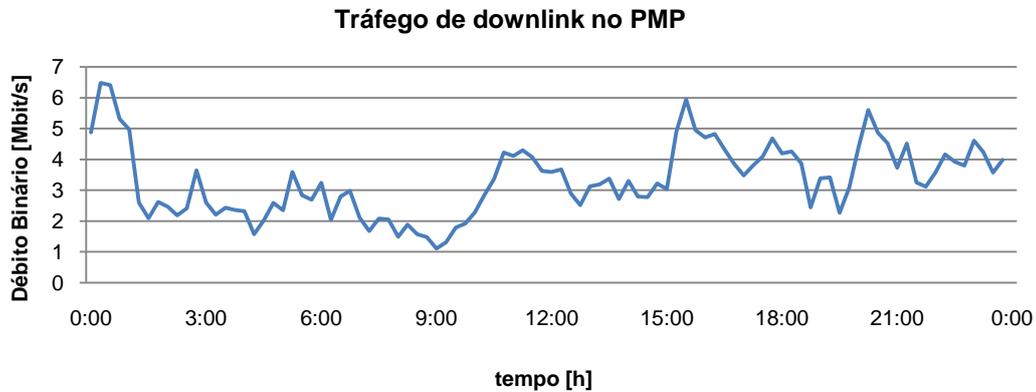


Figura 5.7 – Tráfego de *downlink* no terminal hub do sistema PMP de V.N. Gaia.

É importante referir que os gráficos de tráfego apresentados na Figura 5.6 e Figura 5.7 têm uma escala temporal de um dia. O simulador criado encontra-se apenas preparado para simular uma hora, que se define como sendo a *busy hour* e que se considera simultânea em todos os RTs de modo a obter o caso mais exigente de débito binário.

Como o sistema PMP real não tem a capacidade de fornecer dados instantaneamente durante uma hora (só de 15 em 15 minutos, ou de 20 minutos ininterruptos), apenas se podem utilizar os valores de pico, e os valores médios para poder ajustar o simulador. Foram também utilizados gráficos mais detalhados, apresentados a seguir, referentes a tráfego agregado de vários RTs (Figura 5.8 - A) e ao tráfego de apenas um RT (Figura 5.8 - B) localizados em Lisboa.

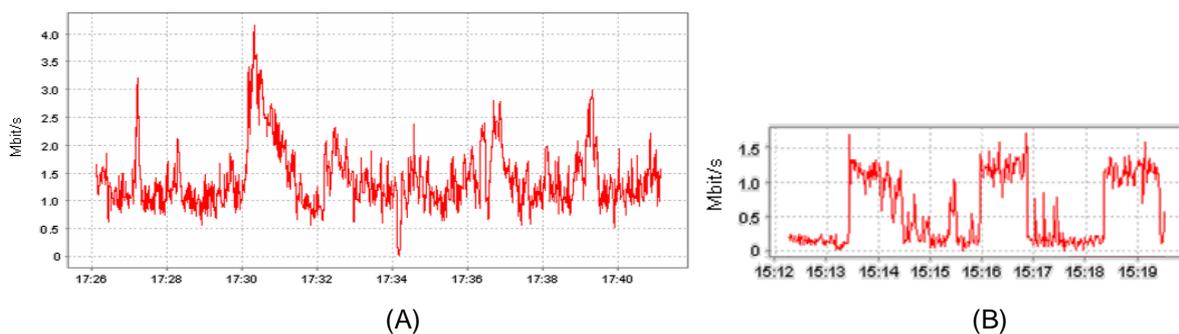


Figura 5.8 – Tráfego de *downlink* 3.5G real. (A) para um HT, (B) para um RT.

De modo a comparar os resultados do simulador desenvolvido com os valores reais, e como a densidade populacional de V.N. de Gaia é igual à média, usam-se os dados definidos na Tabela 5.3 para 2007.

Foram utilizados como *inputs* os valores da Tabela 5.4 para tentar simular o tráfego do PMP de V.N. Gaia, e obteve-se um valor de pico médio de 7.596 Mbps com um erro de 88 kbps e um valor

médio de 1.507 Mbps com um erro de 320 kbps, ambos para o *downlink*.

Tabela 5.4 – Características da simulação do PMP de V.N. Gaia.

	RT #1	RT #2	RT #3	RT #4	RT #5
Cenário	Residencial	Residencial	Comercial	Comercial	Business
Modulação	16-QAM	16-QAM	16-QAM	16-QAM	16-QAM
# 3G Users	25	25	15	15	39

Em seguida encontram-se a título de exemplo, dois gráficos com o resultado de uma simulação realizada com cinco terminais remotos de modo a simular o tráfego para V. N. Gaia. Na Figura 5.9 encontra-se o resultado do tráfego total de *downlink* transportado através do sistema PMP e na Figura 5.10 encontra-se um pormenor do tráfego a transmitir para um dos RTs.

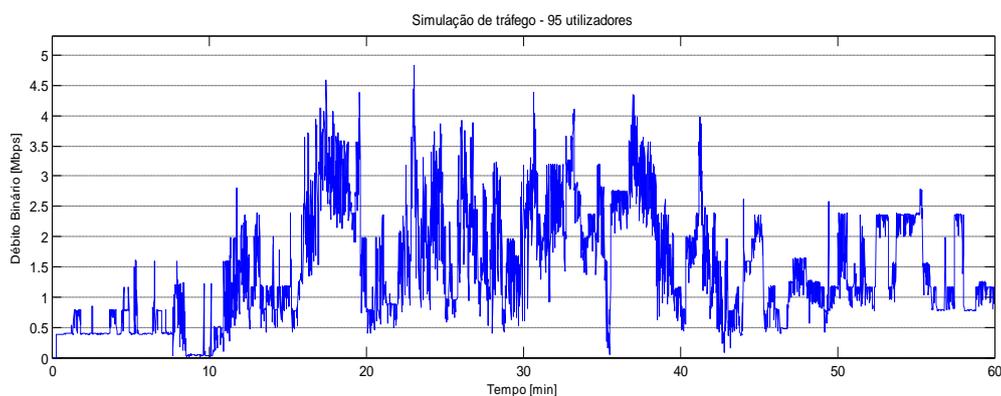


Figura 5.9 – Simulação de tráfego de *downlink* para um sistema PMP com 5xRTs.

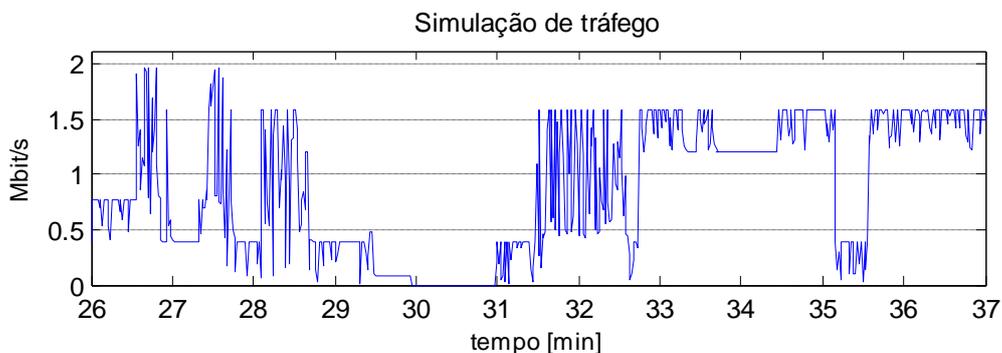


Figura 5.10 – Simulação de tráfego de um RT (pormenor).

Na Figura 5.7, Figura 5.8 (A) e Figura 5.9 podem-se observar gráficos relativos ao tráfego de *downlink* de um sistema rádio PMP. Embora os dados reais sejam pouco detalhados, para a Figura 5.7 e Figura 5.9 conclui-se que a diferença entre picos de tráfego é de aproximadamente 1 Mbps enquanto para a Figura 5.9 o tráfego médio ao longo da *busy hour* é de aproximadamente 1.5 Mbps e o tráfego médio para todo o dia apresentado na Figura 5.7 é cerca de 3.2 Mbps. Estas diferenças devem-se à falta de dados relativos ao número de utilizadores e ao tipo de serviços realizados da análise real para ser possível obter uma melhor aproximação.

A partir da Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10 constata-se que o pico de tráfego e a média são muito aproximados e pode-se afirmar que os *inputs* se encontram devidamente apropriados para as análises actuais. Conclui-se que os valores simulados podem-se considerar bastante realistas, à semelhança das figuras apresentadas de tráfego real. Deste modo serão utilizados nas próximas simulações o número de utilizadores definido para cada cenário na Tabela 5.3.

5.4 Simulações de tráfego realizadas para a rede móvel

O objectivo das simulações, como foi anteriormente mencionado, é definir o número de terminais remotos (RTs) que o terminal hub (HT) (secção 3.1) consegue suportar, de modo a satisfazer todos os assinantes na sua área de cobertura.

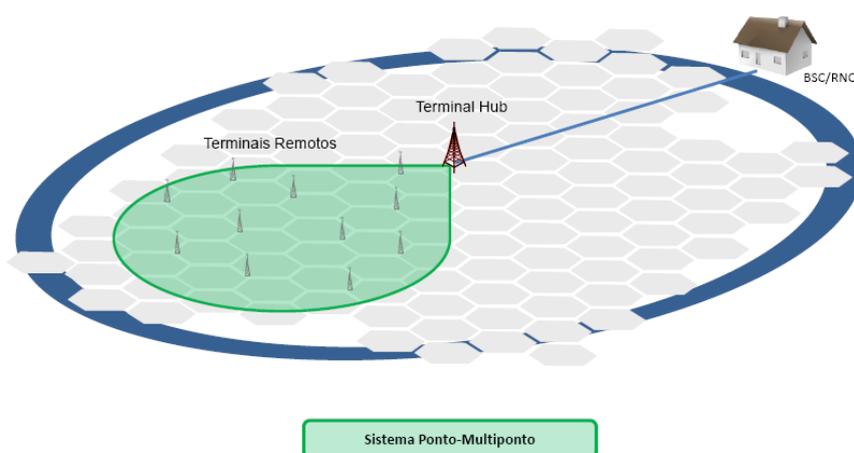


Figura 5.11 – Esquemático da análise para as simulações.

Como já referido na secção 3.1 o HT encontra-se usualmente dividido em quatro sectores de 90° cada. O simulador foi criado com o objectivo de simular apenas um sector, tendo presente que nesse sector pode ser transmitido um débito binário de ~30 Mbps (subsecção 3.2.3). Entre o terminal hub e o RNC é tipicamente utilizado um STM-1 ATM que transporta o tráfego 3G agregado estatisticamente dos quatro sectores através de um multiplexador ATM (secção 3.3). Apenas será simulado o tráfego de *downlink* (sentido terminal hub para os terminais remotos).

Foram definidos vários cenários na secção 5.2 e consoante a zona geográfica em questão, são distribuídos pela área de cobertura do PMP.

5.4.1 Simulação de tráfego 3G para um sistema Ponto-Multiponto

Nesta subsecção serão efectuadas unicamente simulações para a situação de se encontrarem apenas Nós B ligados aos terminais remotos (secção 3.1 e Anexo B).

Como o sistema PMP efectua multiplexagem estatística dos pacotes ATM, torna possível com os 30 Mbps disponíveis para a sua área de cobertura, transportar o tráfego para um elevado número de RTs. Este número depende do número de utilizadores, do tipo de tráfego, e do débito binário a que é

transmitido esse tráfego. O tráfego simulado é o tráfego 3G destinado aos vários utilizadores consoante o cenário definido, e a caracterização desse tráfego encontra-se explicada detalhadamente no Cap. 4.

Nesta subsecção apresentam-se simulações realizadas apenas para tráfego 3G (Nós B), considerando a utilização de 10, 15 e 20 RTs no mesmo sector, servidos pelo mesmo HT. Cada Nó B tem uma ligação de 8xE1s ao RT. Em circuitos alugados essas ligações aos RTs traduziam-se em 80xE1s (163.840 Mbps), 120xE1s (245.76 Mbps) e 160xE1s (327.68 Mbps) respectivamente. Como o sistema Ponto-Multiponto partilha até 30 Mbps para *downlink* e *uplink* (subsecção 3.2.3) num sector e efectua multiplexagem estatística, torna possível economizar várias ligações E1, porque no caso dos circuitos alugados não é aplicada a multiplexagem estatística.

Foram definidos anteriormente os vários cenários para essa BH. Na realidade a BH acontece em muitos dos casos em horas diferentes para os diferentes RTs. Nas simulações realizadas considera-se o pior caso, que é o caso de a BH coincidir nos diferentes RTs. Nesta subsecção, encontram-se os resultados de simulações realizadas para um variado número de RTs de modo a poder definir um valor para o qual é possível implementar na prática um sistema Ponto-Multiponto.

As simulações encontram-se distribuídas por zonas. Define-se a zona Habitacional, Industrial e de Negócios, que abrangem, respectivamente, cenários Residenciais, Comerciais e de Business. Existe também uma zona denominada de Mista que cobre vários cenários diferentes. Estas zonas encontram-se definidas na Tabela 5.5 para vários RTs. O número de utilizadores para cada um dos cenários encontra-se definido na Tabela 5.3.

Tabela 5.5 – Número de RTs e de utilizadores por zona geográfica (para um total de 10xRTs).

Cenário/Zona	Habitacional	Industrial	Negócios	Misto 10xRTs	
Residencial	10	-	-	5	
Comercial	-	10	-	3	
Business	-	-	10	2	
# utilizadores BH	2007	250	150	390	248
	2010	450	240	560	409

Tabela 5.6 – Número de RTs e de utilizadores por zona geográfica (para um total de 15xRTs).

Cenário/Zona	Habitacional	Industrial	Negócios	Misto 15xRTs	
Residencial	15	-	-	8	
Comercial	-	15	-	4	
Business	-	-	15	3	
# utilizadores BH	2007	375	225	585	377
	2010	675	360	840	624

Tabela 5.7 – Número de RTs e de utilizadores por zona geográfica (para um total de 20xRTs).

Cenário/Zona	Habitacional	Industrial	Negócios	Misto 20xRTs	
Residencial	20	-	-	12	
Comercial	-	20	-	5	
Business	-	-	20	3	
# utilizadores BH	2007	500	300	780	492
	2010	900	480	1120	828

Simulações para terminais remotos a operarem com modulação 16-QAM

Nesta subsecção, considera-se que todos os RTs se encontram a funcionar com uma modulação 16-QAM, proporcionando um débito binário máximo partilhado de 29.184 Mbps (subsecção 3.2.3).

Nas figuras abaixo encontram-se os gráficos resultantes das simulações para 10xRTs (Figura 5.12 e Figura 5.13), 15xRTs (Figura 5.15 e Figura 5.16) e 20xRTs (Figura 5.18 e Figura 5.19). Cada um destes gráficos apresenta o valor médio e máximo do débito binário transmitido do HT para os RTs, bem como o número de utilizadores médio e máximo por instante de tempo na BH para as diferentes zonas definidas na Tabela 5.5. Estas simulações foram realizadas para penetrações de mercado para 2007 e 2010 (definidas na Tabela 5.2).

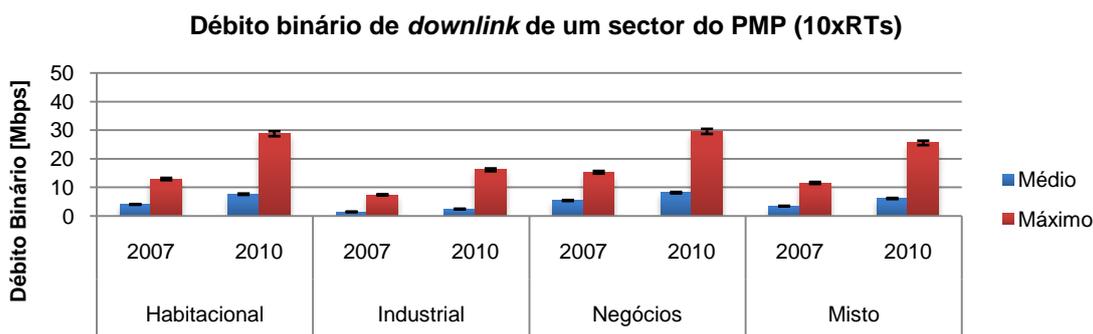


Figura 5.12 – Tráfego de *downlink* de um sector do PMP para 10xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.

Por observação da Figura 5.12 é possível concluir que para o caso de HT servir 10xRTs, o tráfego para esses RTs tanto para uma penetração de mercado de 2007 como para 2010, não excede o limite de débito binário suportado pelo sistema PMP a funcionar com a modulação 16-QAM (29.184 Mbps), nem para os casos de picos de débito. O pior caso é o da zona de Negócios para 2010 em que se encontram cerca de 560 utilizadores (Tabela 5.5) simultaneamente activos na mesma BH, mas mesmo assim não excede os ~30 Mbps. Encontra-se também representado o limite do erro das estimações calculadas a partir dos resultados de uma série de simulações para um intervalo de confiança de 95% (Anexo F), que é de 2.5% do débito binário para os casos simulados. Conclui-se então que para 10xRTs com uma modulação de 16-QAM se satisfazem todos os utilizadores de serviços de dados 3G (no sentido de *downlink*) cobertos por um sector do sistema PMP num qualquer cenário em análise.

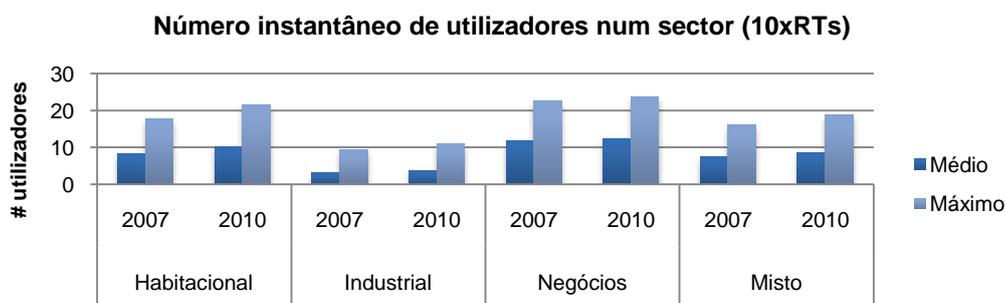


Figura 5.13 – Número de utilizadores por instante de tempo para 10xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.

O número de utilizadores médio e máximo por instante de tempo da BH para 10xRTs com modulação 16-QAM encontra-se representado na Figura 5.13. Consegue-se observar que o valor médio de utilizadores a pedir dados da rede no mesmo instante de tempo na zona de Negócios é cerca de 12 utilizadores para 2007 e 13 para 2010. Este número de utilizadores em certos instantes chega a alcançar os 22 utilizadores por instante de tempo.

Na Figura 5.14 é representado a título de exemplo o resultado de uma simulação do pior caso dos resultados apresentadas na Figura 5.12, isto é, utilizando 10xRTs numa zona de Negócios para uma penetração de mercado das placas 3.5G correspondente ao cenário de 2010. Pode-se observar que existe um pico de tráfego em 26 Mbps, o qual é inferior ao valor do débito limite (representado a vermelho), e que a média de tráfego é 8 Mbps.

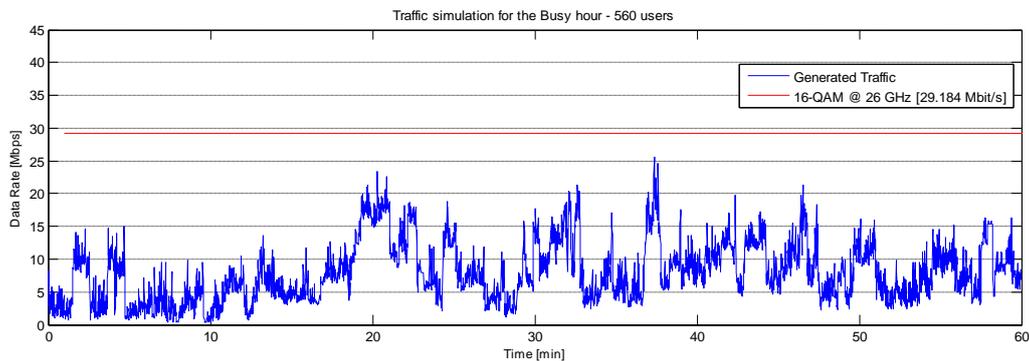


Figura 5.14 – Simulação realizada no sentido de *downlink* para uma zona de Negócios com 10xRTs e para uma penetração de mercado de 2010.

Para o caso de HT servir 15xRTs (Figura 5.15), observa-se que em algumas das situações para 2010 o débito binário limite é excedido, mas apenas numa pequena percentagem de tempo (Figura 5.20). Na Figura 5.15 representa-se também o erro para um intervalo de confiança de 95%, o qual é de 2.3% do débito binário para as simulações realizadas.

Débito binário de *downlink* para um sector do PMP (15xRTs)

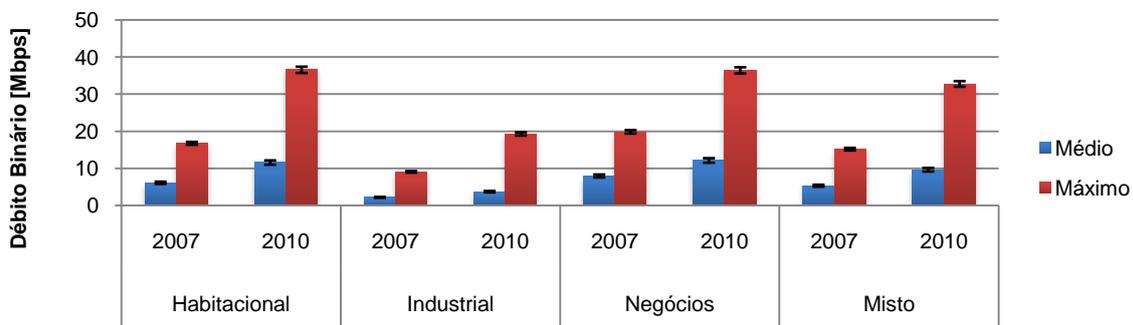


Figura 5.15 – Tráfego de *downlink* para um sector do PMP para 15xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.

Considera-se como excesso do débito disponível a um máximo de 5% do tempo em que pode

ser excedido o limite de tráfego (29.184 Mbps) na BH. Porque os serviços de voz e vídeo-telefonia são serviços com elevada QoS, têm prioridade perante os serviços de dados, portanto são sempre servidos. Como os serviços de dados são transmitidos por pacotes estes podem sofrer atrasos, e poderão exceder o limite. Os 5% de tempo representam 3 minutos da *busy hour*, e o tráfego que excede os 29.184 Mbps é perdido, mas dependendo dos protocolos que estejam a ser utilizados pela camada de transporte a informação será retransmitida para o utilizador (esta funcionalidade não foi implementada no simulador criado).

Como o máximo do débito binário limite excedido para 15xRTs é de 1% e a média de débito binário para as várias simulações se encontra em cerca de metade do limite suportado, conclui-se que para estas simulações com modulação 16-QAM e para 2007 e 2010, o tráfego de *downlink* é suportado pelo sistema PMP.

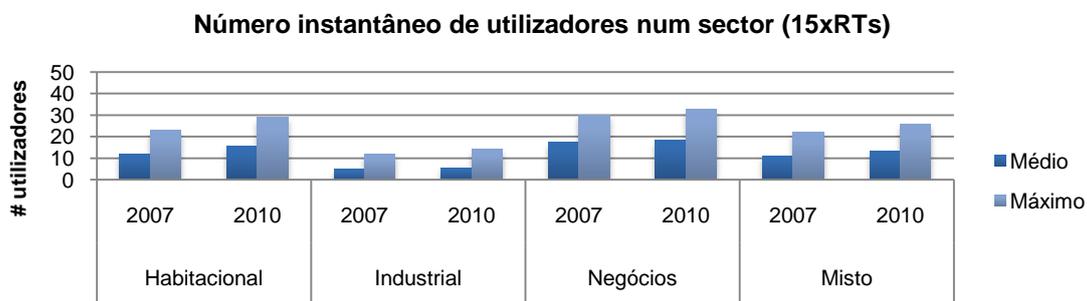


Figura 5.16 – Número instantâneo de utilizadores na BH para 15xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.

O número de utilizadores médio por instante de tempo simultaneamente activos no sentido *downlink* para os 15 terminais remotos é apresentado na Figura 5.16. Dessa figura conclui-se que para uma zona de Negócios em 2007 encontram-se em média 18 utilizadores em simultâneo a ocupar o sentido de *downlink*, e que para 2010 esse número cresce para 19 utilizadores. O número máximo de utilizadores por instante de tempo para esta situação em 2007 é de 30 utilizadores, e para 2010 é de 33 utilizadores.

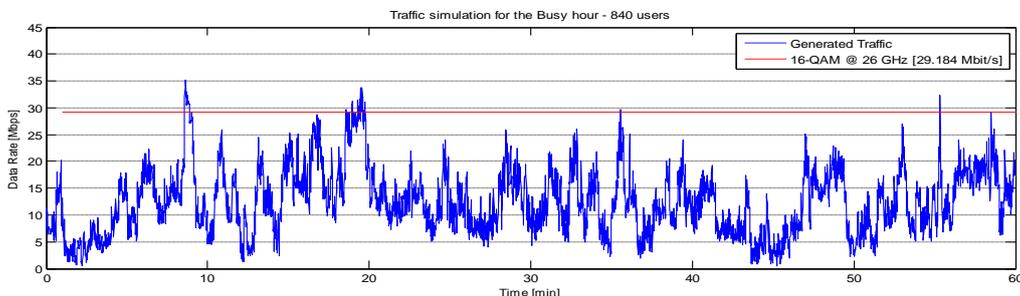


Figura 5.17 – Simulação realizada no sentido de *downlink* para uma zona de Negócios com 15xRTs e para uma penetração de mercado de 2010.

Na Figura 5.17 encontra-se representada uma simulação do pior caso das simulações realizadas

para 15xRTs e apresentadas na Figura 5.15. Esta simulação foi realizada para uma zona de Negócios para uma penetração de mercado das placas 3.5G de 2010, o que totaliza 840 utilizadores a utilizar a rede na *busy hour*. Pode-se observar que o valor de pico do débito é 35 Mbps, o valor médio do débito é 12 Mbps e que o limite do débito binário é excedido cerca de 1% da *busy hour* que equivale a pouco mais de 30 segundos.

No caso de serem servidos 20xRTs pelo terminal hub (Figura 5.18) observa-se que em situações de pico de tráfego para a zona Habitacional, de Negócios e Mista é ultrapassado o limite de 30 Mbps chegando até aos 44 Mbps para a zona de Negócios com uma penetração de mercado de 2010. Mas o valor médio do tráfego de *downlink* mantém-se abaixo dos 30 Mbps.

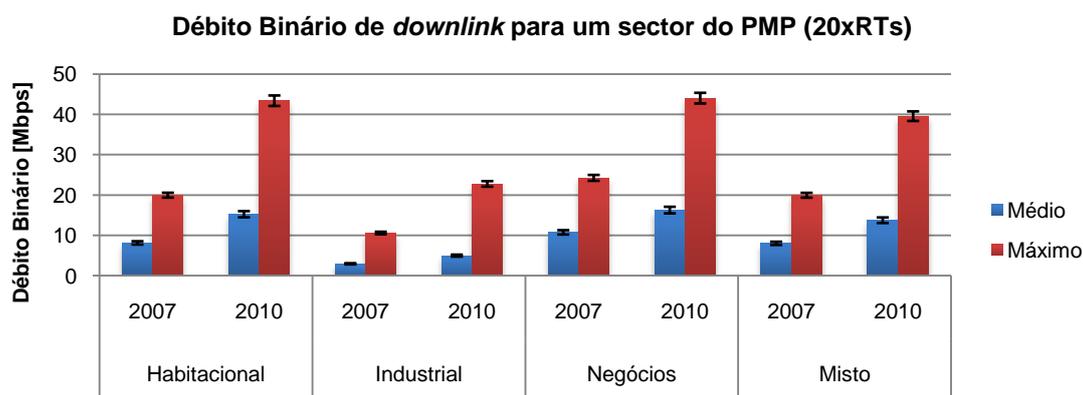


Figura 5.18 – Tráfego de *downlink* para um sector do PMP para 20xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.

Na Figura 5.19 é apresentado o número médio e número máximo de utilizadores por instante de tempo ao longo da *busy hour* para os diferentes cenários simulados. Para o caso de ser uma zona de Negócios para 2010, observa-se um pico de 41 utilizadores no mesmo instante a realizar serviços 3.5G.



Figura 5.19 – Número instantâneo de utilizadores na BH para 20xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.

Na Figura 5.20 é apresentado o resultado do excesso do débito binário máximo disponível para um sector do sistema Ponto-Multiponto no sentido de *downlink* apenas para 2010, já que utilizando a penetração de mercado de 2007 não existe excesso do débito partilhado. Note-se que o tráfego não excede o limite de débito em 3 minutos da BH para 2010. Pela Figura 5.18 pode-se observar que para uma zona de Negócios (o pior caso), é necessário em média um débito disponível de 16 Mbps para satisfazer os utilizadores dessa mesma zona. Portanto, pode-se considerar que ainda é possível um HT servir 20xRTs a funcionar com modulação 16-QAM, embora com perda de alguma informação nos casos da existência de picos de débito.

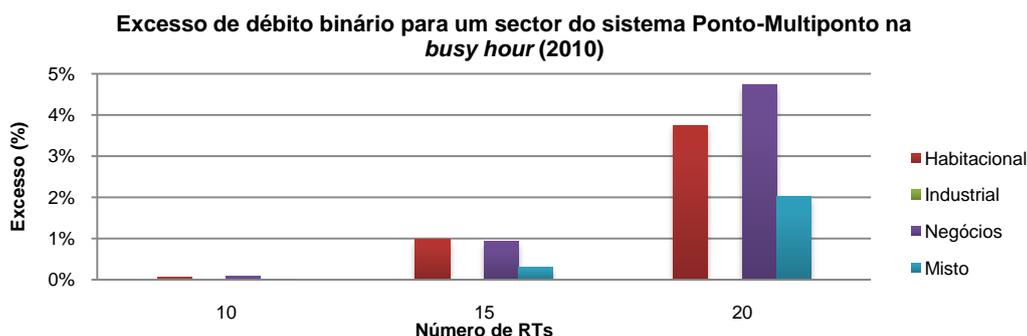


Figura 5.20 – Excesso de tráfego no *downlink* para um sector do PMP para a penetração de mercado de 2010.

Observando a Figura 5.21 conclui-se que a simulação apresentada representa a situação mais exigente de tráfego em comparação com a Figura 5.14 e a Figura 5.17, e que tem um pico de débito de 44 Mbps e um débito médio de 16 Mbps. A percentagem de débito que excede o limite é de 3% da BH para a simulação apresentada, situando-se abaixo dos 4.7% apresentados na Figura 5.20.

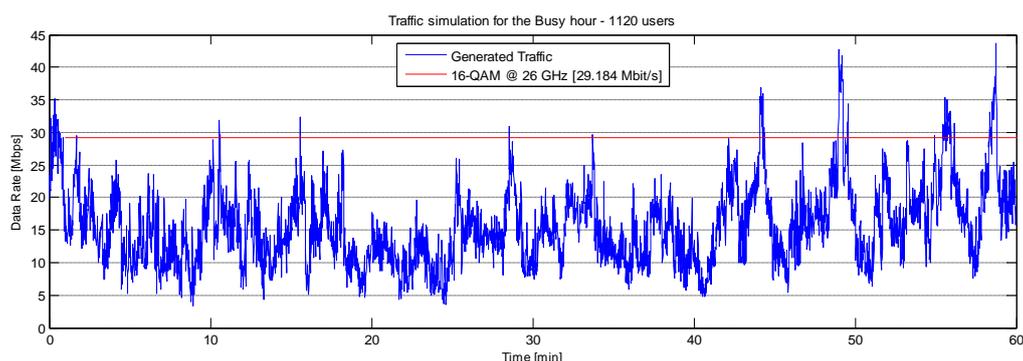


Figura 5.21 – Simulação realizada no sentido de *downlink* para uma zona de Negócios com 20xRTs e para uma penetração de mercado de 2010.

Simulações para terminais remotos a operarem com modulações QPSK e 16-QAM

Nesta subsecção para além da utilização de modulação 16-QAM, irá também ser considerada a modulação QPSK no canal de comunicação *downlink*. Com a utilização da modulação QPSK obtém-

se uma eficiência espectral que é metade da eficiência espectral da modulação 16-QAM (subsecção 3.2.3), por essa razão, se todos os terminais remotos se encontrarem a operar com QPSK, a informação total a transportar pelo sistema Ponto-Multiponto não pode exceder os 14.592 Mbps.

Como se pretende simular o caso de utilização das modulações referidas em simultâneo, o número de terminais remotos terá que ser menor que o apresentado anteriormente para a situação de apenas existirem RTs a funcionar com modulação 16-QAM. Dependendo do número de RTs a funcionar com modulação QPSK, o débito binário disponível diminui linearmente de 30 Mbps para 15 Mbps no caso limite de todos os RTs utilizarem QPSK.

Deste modo foram efectuadas simulações para o caso em que o terminal hub serve 15xRTs, sendo o número de RTs correspondentes às diferentes modulações apresentado na Tabela 5.8 para as diferentes zonas em análise.

Tabela 5.8 – Número de RTs a funcionar com 16-QAM e QPSK por zonas geográficas (15xRTs).

Cenário \ Modulação	16-QAM	QPSK
Residencial	7	2
Comercial	1	1
Business	2	2

Os resultados da zona Mista definida na Tabela 5.8 encontram-se representados na Figura 5.22 que apresenta a ocupação do tráfego de *downlink* destinado aos vários RTs, e na Figura 5.23 é apresentado o excesso de débito binário que ultrapassa o limite de transporte do HT.

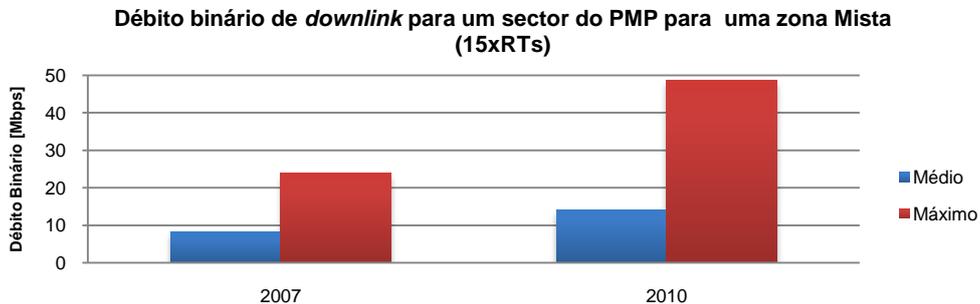


Figura 5.22 – Tráfego de *downlink* para um sector do PMP para uma zona Mista com 15xRTs, modulações 16-QAM e QPSK, e penetrações de mercado de 2007 e 2010.

Pode-se observar a partir da Figura 5.22 que o débito binário médio não excede o limite de tráfego do sistema PMP, mas que em situações de picos do débito binário em 2010 é ultrapassado o limite em cerca de 19 Mbps. Pela Figura 5.23 observa-se que para a zona apresentada na Tabela 5.8 o débito binário transmitido aos 15xRTs excede durante 5% do tempo da BH o limite para uma penetração de mercado de 2010.

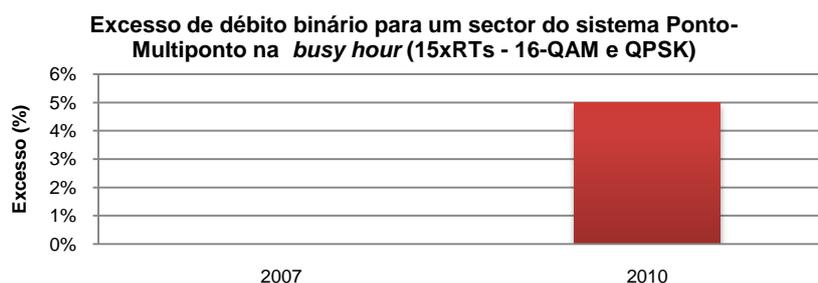


Figura 5.23 – Excesso de tráfego no *downlink* para um sector do PMP para um cenário misto com 15xRTs, modulações 16-QAM e QPSK, e penetrações de mercado de 2007 e 2010.

Na Figura 5.24 apresenta-se o resultado de uma simulação realizada para um terminal hub que serve os RTs apresentados na Tabela 5.8 a operar com as modulações 16-QAM e QPSK numa zona mista. Deste gráfico retira-se que no sentido de *downlink* existe um pico do débito binário em 44.1 Mbps, que a média do débito durante a BH é de 14.9 Mbps e que existe um excesso de débito binário de 4.4%.

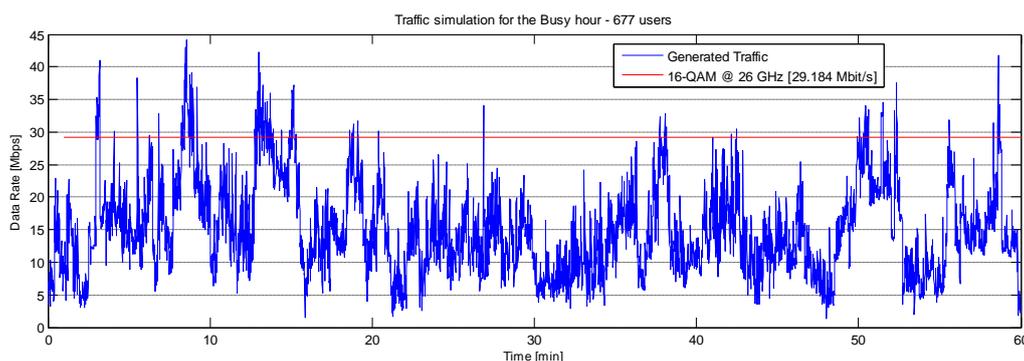


Figura 5.24 – Simulação realizada no sentido de *downlink* para uma zona Mista com 15xRTs com modulações 16-QAM e QPSK e para uma penetração de mercado de 2010.

Nesta subsecção simulou-se o tráfego para terminais remotos apenas conectados a Nós B e concluiu-se que para o tráfego apenas no sentido de *downlink* um terminal hub consegue suportar até 20 terminais remotos a operar com modulação 16-QAM, mas se alguns dos RTs se encontrarem a operar com QPSK, conclui-se que apenas é possível num sector de um sistema PMP servir 15 terminais remotos, com 10xRTs a operar com 16-QAM e os restantes a operar com QPSK.

5.4.2 Simulação de tráfego 2G/3G para um sistema Ponto-Multiponto

Nesta subsecção são apresentados os resultados relativos a simulações para um sistema rádio Ponto-Multiponto em que cada um dos terminais remotos serve uma BTS e um Nó B como se descreve na Figura 3.2.

Como existe tráfego 2G e 3G em simultâneo, o número de terminais remotos na área de cobertura do terminal hub do sistema PMP será muito menor que o analisado na subsecção 5.4.1 porque o tráfego 2G ocupa permanentemente o número de E1's que lhe estejam associados. Nas simulações realizadas considerou-se que a cada RT se encontra ligado 1xE1 para serviços 2G onde se consomem em permanência 2.048 Mbps do débito total partilhado do sistema Ponto-Multiponto devido ao tráfego 2G ser TDM (como explicado na secção 2.4). Nesta subsecção, apenas serão considerados cinco RTs, devido a co-existirem Nós B e BTS ligados aos terminais remotos e também por se analisarem as situações de funcionamento com QPSK e 16-QAM em simultâneo. Os cenários utilizados e as penetrações de mercado de 2007 e 2010 foram definidos na secção 5.2.

Simulação para 5xRTs com modulação 16-QAM

Para as simulações realizadas considera-se que todos os terminais remotos se encontram a operar apenas com a modulação 16-QAM. Estes terminais remotos como previamente mencionado no início desta subsecção servem um Nó B e uma BTS em simultâneo.

Na Figura 5.25, encontram-se representados os resultados obtidos para o tráfego de *downlink* de um sistema PMP que serve os cinco terminais remotos mencionados. Pode-se observar que o débito binário limite para o sistema PMP em situações de picos de débito pode ser atingido, para as zonas de Negócios e Habitacional para uma penetração de mercado de 2010. Observa-se também que o débito binário médio para a *busy hour* é mais elevado para a zona de Negócios para uma penetração de mercado de 2010, e é cerca de 14.1 Mbps. Encontra-se também representado o erro que permite calcular o intervalo de confiança de 95% e esse erro é em média 2,1% do débito binário para as diferentes simulações.

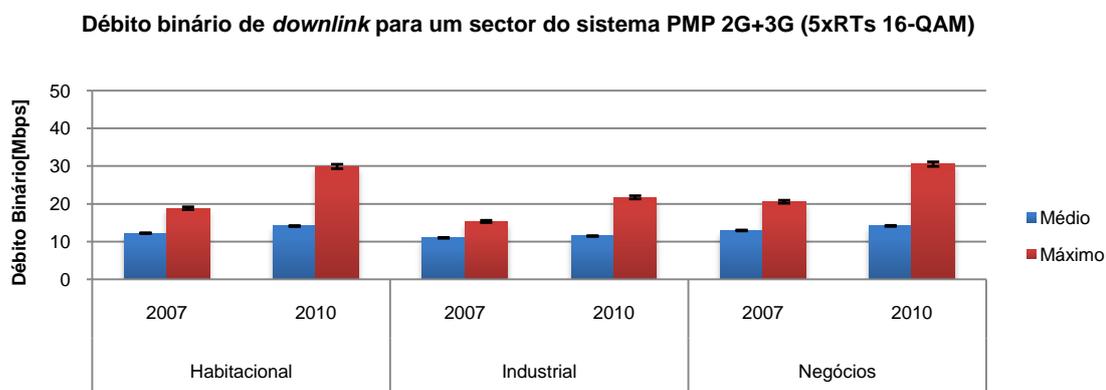


Figura 5.25 – Tráfego de *downlink* para um sector do PMP para 5xRTs com modulação 16-QAM e para penetrações de mercado de 2007 e 2010.

Simulação para 4xRTs com modulação 16-QAM e 1xRT com modulação QPSK

Com a utilização de um dos RTs a operar com modulação QPSK pode-se constatar pela Figura 5.26 que os valores de débito aumentam, especialmente o débito binário máximo para os vários cenários analisados, em que a zona de Negócios é a mais exigente, e que necessita em média de 17.1 Mbps e em situações de pico de débito chega a alcançar os 38.6 Mbps. O erro relativo ao intervalo de

confiança de 95% é em média 2.3% do débito total para as diversas zonas.

A percentagem de tempo da *busy hour* em que é excedido o limite de débito do sector do sistema PMP em análise encontra-se na Figura 5.28.

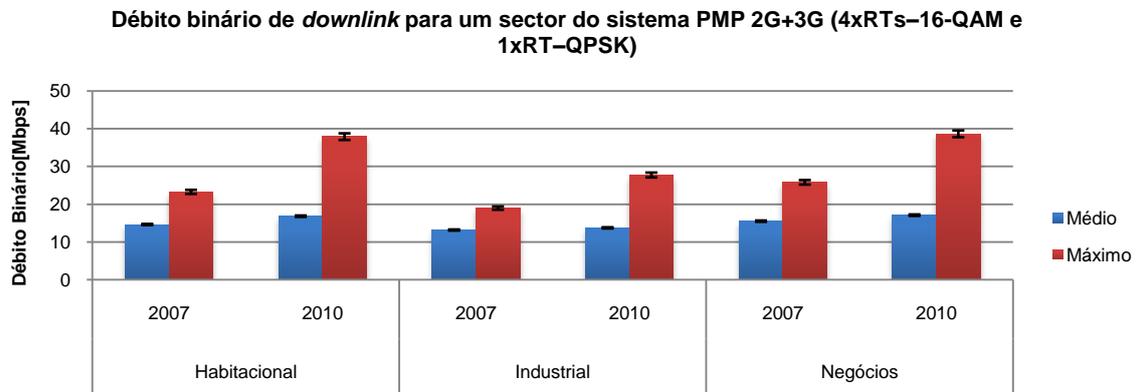


Figura 5.26 – Tráfego de *downlink* para um sector do PMP para 4xRTs com modulação 16-QAM e 1xRT com modulação QPSK para penetrações de mercado de 2007 e 2010.

Simulação para 3xRTs com modulação 16-QAM e 2xRTs com modulação QPSK

O pior caso simulado encontra-se representado na Figura 5.27e representa a situação de um terminal hub de um sistema PMP servir três RTs com modulação 16-QAM e dois com modulação QPSK. Todos os cinco RTs se encontram ligados a um Nó B e a uma BTS, em que cada BTS tem reservado 1xE1 para o tráfego 2G. Pode-se observar que na situação de picos de débito, ultrapassa em cerca de 15 Mbps o limite de débito possível pelo sistema PMP para a zona de Negócios, e a percentagem de tempo da *busy hour* em que o limite é excedido encontra-se representado na Figura 5.28. Os valores médios do débito encontram-se cerca de 10 Mbps abaixo do limite. O erro para garantir um intervalo de confiança de 95% é de 2.2% do débito binário.

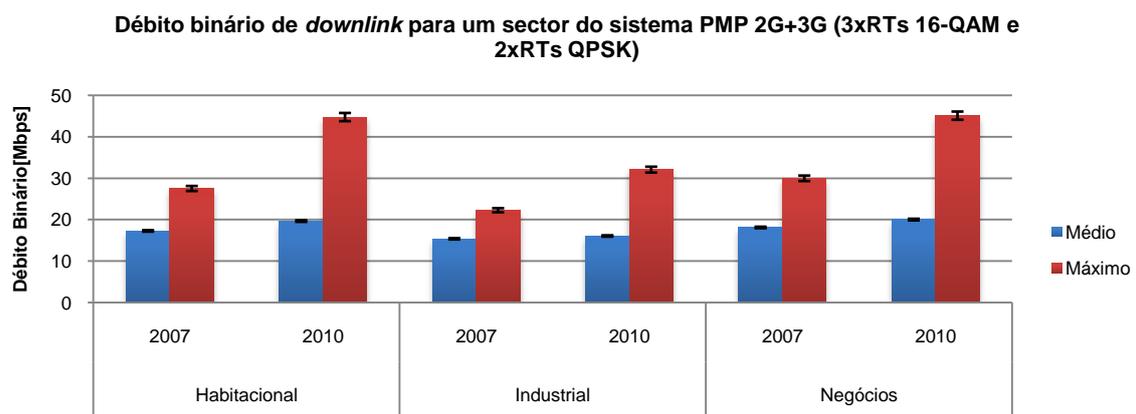


Figura 5.27 – Tráfego de *downlink* para um sector do PMP para 3xRTs com modulação 16-QAM e 2xRT com modulação QPSK para penetrações de mercado de 2007 e 2010.

Na Figura 5.28 representa-se a percentagem de tempo apenas do sentido de *downlink* em que o

limite de capacidade (*downlink* e *uplink*) do sistema PMP em análise é excedido. Como mencionado na subsecção 5.4.1 consideram-se 5% de excesso do limite do débito binário como um valor razoável. Pode-se então observar que das simulações realizadas para 2G e 3G em simultâneo, a utilização de cinco RTs a comunicar com o HT, em que 3xRTs operam em 16-QAM e 2xRTs operam em QPSK excede o limite de débito considerado como aceitável. Os restantes casos analisados não excedem os 5% e portanto consideram-se válidos para implementação.

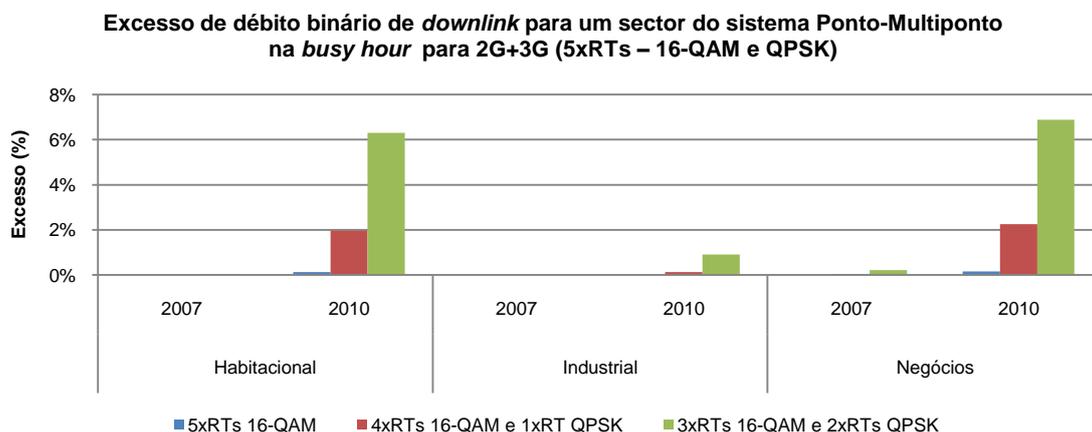


Figura 5.28 – Excesso de banda de *downlink* para um sector do sistema PMP na BH para tráfego 2G/3G.

5.5 Conclusões

Neste capítulo começou-se por explicar o funcionamento do simulador criado em Matlab, de seguida efectuou-se um dimensionamento de vários cenários em que foram apresentados e utilizados vários dados reais fornecidos pela *Vodafone Portugal* de forma a ser possível ajustar o simulador para que as simulações sejam o mais fiável possível. Nas simulações realizadas apenas se considerou o tráfego de *downlink*, sendo este o que mais débito binário ocupa no meio partilhado do sistema PMP.

Na subsecção 5.4.1 apenas se simulou o tráfego 3G e concluiu-se que se existisse apenas tráfego no *downlink* é possível utilizar no máximo 20xRTs num sector se estes se encontrarem apenas a operar com modulação 16-QAM. Como na realidade existe *downlink* e *uplink*, é necessário reparar que o sistema Ponto-Multiponto necessita ainda de capacidade disponível para transmitir no *uplink*. Tendo em conta a ocupação do *uplink*, o limite teórico de terminais remotos suportados num sector teria que ser inferior aos considerados apenas para o *downlink*, e então passariam a ser 15 os RTs se estes operarem com 16-QAM. Para este caso, o débito binário partilhado máximo que são 29.184 Mbps para *downlink/uplink* é excedido em cerca de 1% da *busy hour* e como o valor considerado razoável para o débito exceder o limite é cerca de 5% da *busy hour* (subsecção 5.4.1), ainda sobram 4% da BH como tolerância. Na eventualidade de alguns dos 15xRTs se encontrarem a operar com modulação QPSK, obtém-se um excesso de banda de 5%. Logo, conclui-se que se for

utilizado um sistema PMP para transmitir e multiplexar apenas tráfego 3G, devem-se utilizar no máximo 10xRTs por sector, para que não seja excedido o débito binário limite considerando o *uplink* e o *downlink*.

Como o principal objectivo deste trabalho é de encontrar soluções de modo a minimizar os custos de transmissão através da interface *lub*, existe todo o interesse de deixar de se utilizar circuitos alugados. Na subsecção 5.4.2 considerou-se que o sistema PMP transmite e agrega o tráfego 2G e 3G em simultâneo. Foram realizadas simulações para três situações com diferentes modulações para um total de 5xRTs num sector. Simulou-se o caso de todos os RTs operarem com 16-QAM; o caso de 4xRTs a funcionarem com 16-QAM e 1xRT com QPSK e também o caso de 3xRTs operarem com 16-QAM e 2xRTs com QPSK. Das simulações realizadas, a mais exigente foi aquela onde operavam 2xRTs com QPSK, em que o débito binário limite era excedido cerca de 6% da BH (ultrapassando o limite de excesso de débito definido de 5%). Conclui-se portanto que essa solução não é aceitável, e que a solução é utilizar ou todos os 5xRTs a funcionar com 16-QAM ou com um deles a operar em QPSK, em que neste caso o débito de *downlink* apenas excede o limite em cerca de 2% da BH.

Capítulo 6

Custos de implementação dos sistemas rádio Ponto-a-Ponto e Ponto-Multiponto

Neste capítulo é estudada a viabilidade económica da implementação de sistemas rádio Ponto-a-Ponto ou Ponto-Multiponto como solução tecnológica alternativa aos actuais circuitos alugados E1.

6.1 Introdução

Nesta secção apresenta-se uma análise de custos relativa à implementação das diferentes tecnologias utilizadas na rede de acesso móvel mencionadas na secção 3.3, circuitos alugados, sistemas Ponto-a-Ponto e Ponto-Multiponto para o *backhaul*.

Como explicado no capítulo 1, existem elevados custos na interface *lub*, e com o desenvolvimento dos serviços de dados, que oferecem novos serviços e exigem maior capacidade, os operadores móveis procuram novas tecnologias de modo a satisfazer o fluxo de informação por parte dos assinantes enquanto se preparam para desenvolvimentos de rede futuros. Na secção 2.4 foi apresentada uma solução utilizando um sistema Ponto-Multiponto face aos circuitos alugados utilizados actualmente.

O cenário estudado a título de exemplo neste capítulo é uma zona urbana com um raio de 3 km, com 13 localizações com uma BTS e um Nó B co-localizados tal como apresentado na Figura 6.1, mas considera-se que inicialmente existem vários circuitos alugados E1 ligados entre cada estação base e o RNC/BSC.

Os dados utilizados na análise de custos foram fornecidos pela Vodafone Portugal e são apenas valores de referência.

6.2 Custo dos circuitos alugados

Os circuitos alugados são um serviço prestado por uma operadora (possível concorrente) que aluga circuitos E1. Para o cenário em análise, considera-se que actualmente são alugados (entre cada estação base e o RNC/BSC representado na Figura 6.1) 1xE1 para cada BTS e 5xE1s para cada Nó B nos anos 0 e 1, mas a partir do ano 2 são alugados mais 2xE1s (devido ao aumento de utilizadores e de capacidade oferecida) como se observa na Tabela 6.1. Cada circuito E1 é alugado a um custo mensal de 600€ (OpEx), mas não existem despesas em infra-estruturas (CapEx). Na Figura 6.2 encontra-se uma comparação de custos cumulativos entre as várias soluções.

Tabela 6.1 – Custo dos circuitos alugados E1 para 13 estações base por ano.

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3
E1/BTS	1	1	1	1
E1/Nó B	5	5	7	7
Total de E1s	78	78	104	104
Custo Total	561.600 €	561.600 €	748.800 €	748.800 €

6.3 Sistemas rádio Ponto-a-Ponto vs circuitos alugados

Para cada ligação de feixes hertzianos Ponto-a-Ponto (PTP) são necessárias duas antenas, uma nas instalações da estação base, e uma num ponto estratégico da rede, onde se encontra um concentrador das múltiplas estações base. Não se pode considerar apenas as instalações de uma estação base para concentrar as ligações de todas as outras porque não é aceitável ter um mastro

com doze antenas, mas é razoável ter um mastro com três a quatro antenas, daí se terem considerado três estações concentradoras (como se pode observar na Figura 6.1 (A)).

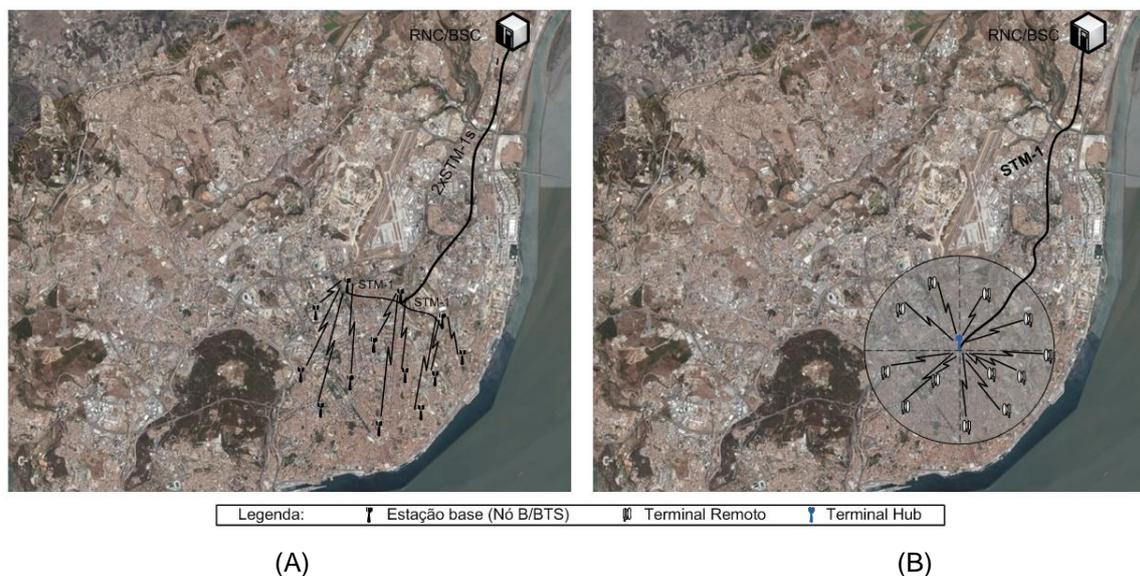


Figura 6.1 – Exemplo de convergência de circuitos alugados para utilização de sistemas PTP (A) e PMP (B) para uma zona de Lisboa.

Os concentradores têm como função transformar os E1s provenientes das diversas estações base em STM-1s para transmitir através da fibra óptica mas não realizam multiplexagem estatística. Considera-se que duas das estações base concentradoras se ligam a uma outra que centraliza esse tráfego (através de um outro concentrador) e o transporta através de dois STM-1s ao longo de 10 km até ao RNC/BSC. As estações concentradoras distam de 1.5 km entre si, perfazendo um total de 13 km de fibra a instalar, onde os custos relativos a “enterrar” a fibra são de 50€/metro.

Para a implementação de um sistema PTP de feixes hertzianos, é necessária uma licença de aluguer do espectro para a frequência de transmissão, bem como a aquisição do equipamento e instalação no terreno, e também “enterrar” fibra óptica para criar uma rede própria (também se pode optar por adquirir circuitos alugados para o transporte). Na Tabela 6.2 encontram-se os custos para o caso de se substituírem todos os circuitos alugados das 13 estações base em estudo por 10 sistemas Ponto-a-Ponto com capacidade de 8xE1s.

Tabela 6.2 – Custos de implementação de um sistema Ponto-a-Ponto para 10 ligações.

		Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3
CAPEX	Ligação PTP de feixes hertzianos (8xE1s)				
	- Custo do hardware PTP (x10)	174.420 €	- €	- €	- €
	- Instalação e comissões de serviços (x10)	64.670 €	- €	- €	- €
	- Concentrador (x4)	120.000 €	- €	- €	- €
	- Infra-estruturas de fibra óptica (50 €/metro)	650.000 €	- €	- €	- €
OPEX	- Licenças do espectro (para 8km) (x10)	8.790 €	8.790 €	8.790 €	8.790 €
	- Visitas aos sites - Manutenção (hardware e software)	40.364 €	40.364 €	40.364 €	40.364 €
Custo Total		1.058.244 €	49.154 €	49.154 €	49.154 €

Como as antenas do sistema PTP se irão encontrar co-localizadas com as instalações das BTS/Nós B, os custos de condomínios, electricidade, entre outros estão já contabilizados nas instalações prévias. A manutenção do *hardware* e *software* é cerca de 4% do CapEx inicial ao ano.

Na Tabela 6.3 é apresentado o cálculo do *cash-flow* (que é utilizado para calcular a rentabilidade de um investimento, e que é o fluxo líquido gerado pelo projecto) para a substituição das ligações de circuitos alugados por ligações PTP e por infra-estrutura de rede própria até ao RNC/BSC. Para o cálculo do *cash-flow* considerou-se uma taxa de IRC de 31.5%, um período de depreciação do hardware de 8 anos e para o cálculo do VAL (Valor Actual Líquido) considerou-se uma taxa de actualização de 10%.

Em seguida apresentam-se as equações para o cálculo dos valores da Tabela 6.3:

- *Depreciação total do investimento = CapEx de hardware / Período de depreciação do hardware (em anos);*
- *Resultados antes de impostos = Poupança dos circuitos alugados – OpEx total do investimento – Depreciação total do investimento;*
- *Impacto dos impostos = Resultados antes de impostos x taxa IRC;*
- *Lucro após impostos = Resultado antes de impostos – Impacto dos impostos;*
- *Cash-flow operacional = Lucro após impostos – Depreciação total do investimento;*
- *Cash-flow disponível = Cash-flow operacional – CapEx total do investimento.*

Tabela 6.3 – *Cash-flow* para implementação de ligações Ponto-a-Ponto versus circuitos alugados.

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3
Poupança dos circuitos alugados	561.600 €	561.600 €	748.800 €	748.800 €
OpEx total do investimento	49.154 €	49.154 €	49.154 €	49.154 €
Depreciação total do investimento	126.136 €	126.136 €	126.136 €	126.136 €
CapEx do hardware	1.009.090 €	- €	- €	- €
Resultados antes de impostos	386.310 €	386.310 €	573.510 €	573.510 €
Impacto dos impostos	121.688 €	121.688 €	180.656 €	180.656 €
Lucro após impostos	264.622 €	264.622 €	392.854 €	392.854 €
Depreciação total do investimento	126.136 €	126.136 €	126.136 €	126.136 €
CASH FLOW operacional	390.759 €	390.759 €	518.991 €	518.991 €
CapEx total do investimento	1.009.090 €	- €	- €	- €
CASH FLOW disponível	-618.331 €	390.759 €	518.991 €	518.991 €

É necessário calcular também o VAL, que tem como objectivo avaliar a viabilidade de um investimento através do cálculo do valor actual de todos os *cash-flows*. O VAL representa a quantia que resulta de um investimento. Se o valor do VAL for positivo então aceita-se o investimento, se for negativo rejeita-se, e se for igual a zero conclui-se que o investimento nem gera nem perde valor.

$$VAL = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} = CF_0 + \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} \quad (6.1)$$

O VAL calcula-se segundo a equação (6.1), em que *i* é o ano do *cash-flow*, *n* é a duração do investimento, *r* é a taxa de actualização e o *CF_i* é o *cash-flow* actual para o ano *i*.

Para os *cash-flows* apresentados na Tabela 6.3 obtém-se um VAL = 555.747€.

É interessante calcular também o período de recuperação de um investimento (*payback period*) que é o número de anos necessários para recuperação do investimento inicial, e é calculado pela soma dos *cash-flows* anuais até o seu total ser maior que zero.

No caso de se pretender implementar sistemas de feixes hertzianos Ponto-a-Ponto para substituir os circuitos alugados E1 obtém-se um período de recuperação do investimento em 2 anos.

6.4 Sistema rádio Ponto-Multiponto vs circuitos alugados

Para a implementação de um sistema de feixes hertzianos Ponto-Multiponto (secção 3.1) é necessário instalar uma estação central que é composta por um agregador e por quatro terminais hub (cada um com 90°), em que cada terminal hub suporta até cinco terminais remotos que se encontram ligados a uma BTS e um Nó B em simultâneo (subsecção 5.4.2). No exemplo em estudo (Figura 6.1 (B)) o terminal hub é instalado nas infra-estruturas da estação base mais central (se esta tiver condições de linha de vista para todos os RTs, se isso não acontecer é necessário considerar um condomínio extra para instalação do terminal hub), onde são considerados dois sectores com dois RTs, um sector com três RTs, e um quarto sector com cinco RTs. As estações base do sistema PMP já incluem um agregador que entrega à interface *hub* um STM-1 ATM. Esse STM-1 é directamente inserido na fibra (dispensando um multiplexador SDH local).

Na Tabela 6.4 encontram-se os custos para a situação de se substituírem todos os circuitos alugados actuais das 13 estações base em estudo por um sistema Ponto-Multiponto. Encontram-se apresentados os custos de *hardware*; de instalação de infra-estrutura própria e também os custos relativos à manutenção de *hardware* e *software*, que como referido no sistema PTP é 4% do CapEx. Não existem custos de licenças de espectro, porque para os sistemas PMP apenas é necessária uma licença a nível nacional para todos os sistemas PMP, e o preço por sistema é muito reduzido, não sendo por essa razão considerado o seu custo para a instalação de um novo sistema PMP.

Tabela 6.4 – Custos de implementação de um sistema Ponto-Multiponto para 13 estações base.

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3
CAPEX				
Terminal hub				
- Custo do hardware por sector (HT*+ODU**+antena) (x4)	35.800 €	- €	- €	- €
- Custo do agregador de sectores (HT ACU***+ODU+antena)	13.950 €	- €	- €	- €
- Infra-estruturas da estação central (armários, energia, fibra óptica, etc)	25.000 €	- €	- €	- €
Terminal remoto				
- Custo de Hardware para o terminal remoto (RT+ODU+antenas) (x12)	49.800 €	- €	- €	- €
- Infra-estruturas do terminal remoto (x12)	24.000 €	- €	- €	- €
- Infra-estruturas de fibra óptica (50€/metro)	500.000 €	- €	- €	- €
OPEX				
- Visitas aos sites - Manutenção (hardware e software)	25.942 €	25.942 €	25.942 €	25.942 €
Custo Total	674.492 €	25.942 €	25.942 €	25.942 €

* HT – Hub terminal; ** ODU – Outdoor Unit; *** ACU – Antenna Control Unit

Utilizando as equações para o cálculo do *cash-flow* definidas na análise para o sistema PTP, obtém-se a Tabela 6.5 que apresenta o *cash-flow* para o investimento num sistema Ponto-Multiponto ao invés dos circuitos alugados E1s actuais.

Tabela 6.5 – *Cash-flow* para implementação do sistema Ponto-Multiponto versus circuitos alugados.

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3
Poupança dos circuitos alugados	561.600 €	561.600 €	748.800 €	748.800 €
OpEx total do investimento	25.942 €	25.942 €	25.942 €	25.942 €
Depreciação total do investimento	81.069 €	81.069 €	81.069 €	81.069 €
CapEx do hardware	648.550 €	- €	- €	- €
Resultados antes de impostos	454.589 €	454.589 €	641.789 €	641.789 €
Impacto dos impostos	143.196 €	143.196 €	202.164 €	202.164 €
Lucro após impostos	311.394 €	311.394 €	439.626 €	439.626 €
Depreciação total do investimento	81.069 €	81.069 €	81.069 €	81.069 €
CASH FLOW operacional	392.462 €	392.462 €	520.694 €	520.694 €
CapEx total do investimento	648.550 €	- €	- €	- €
CASH FLOW disponível	- 256.088 €	392.462 €	520.694 €	520.694 €

Para o sistema PMP o valor do VAL obtém-se através da equação (6.1), para os *cash-flows* da Tabela 6.5 o seu valor é VAL = 922.228€.

No caso de se pretender implementar sistemas de feixes hertzianos Ponto-Multiponto de modo a substituir os circuitos alugados E1 obtém-se um período de recuperação do investimento em 1 ano.



Figura 6.2 – Custos cumulativos de investimento para as diferentes soluções.

Na Figura 6.2 encontram-se representados os custos cumulativos correspondentes aos investimentos realizados para as diferentes soluções analisadas (circuitos alugados, sistemas rádio Ponto-a-Ponto e sistema rádio Ponto-Multiponto).

6.5 Conclusão

Com os resultados da análise efectuada conclui-se que enquanto os circuitos alugados exigem uma elevada quantia mensal de aluguer por circuito E1, tanto o sistema PTP como o PMP têm um investimento inicial em hardware e infra-estruturas elevado e os custos de OpEx para estes sistemas são muito reduzidos, face aos dos circuitos alugados.

Perante a necessidade de adicionar mais capacidade numa estação base constituída por um Nó B e BTS co-alocados (acima de 8xE1s), o sistema PMP tem a vantagem de apenas ser necessário instalar um novo RT, e para os sistemas PTP seria necessária uma nova ligação com instalação de duas antenas, o que teria um custo de 5 vezes o custo de um RT. Portanto, concluiu-se que o sistema Ponto-Multiponto permite ao operador móvel reduzir drasticamente os custos que detém com a utilização dos circuitos alugados, e que em 1 ano obtém o retorno do investimento.

Capítulo 7

Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as conclusões retiradas após a realização deste trabalho. São também apresentadas sugestões para trabalho futuro em continuação ao trabalho realizado.

7.1 Principais conclusões do trabalho

Na introdução deste trabalho é apresentado um dos problemas com que se deparam actualmente os operadores móveis, e que são os elevados custos na rede de acesso UTRAN. O objectivo deste trabalho foi estudar o sistema rádio Ponto-Multiponto como solução para os circuitos alugados utilizados actualmente. Começou-se por estudar a rede UMTS e os seus elementos, mais especificamente a rede UTRAN, e especialmente a interface *Iub*. Foi também analisada a componente de transporte da rede de acesso actual, e apresentada uma possível evolução dessa rede, que inclui o sistema PMP.

Algumas das vantagens que fazem com que o sistema PMP seja uma tecnologia a considerar perante os sistemas Ponto-a-Ponto são o facto de as configurações do sistema poderem ser efectuadas remotamente e alteradas instantaneamente consoante a necessidade (adição de novos terminais remotos, alterações de frequências, etc.); a utilização do algoritmo de alocação dinâmica de banda para os diferentes terminais remotos, permitindo assim efectuar “*overbooking*” de tráfego, de forma a maximizar a utilização da banda disponível; a realização de multiplexagem estatística dos diferentes sectores e a capacidade agregar o tráfego de várias tecnologias como o Wi-Fi ou o WiMax.

Os sistemas Ponto-Multiponto têm como desvantagem a necessidade de ter linha-de-vista para com os terminais remotos, e o alcance é relativamente curto (<5 km) daí que se utilizem os sistemas rádio PMP apenas para o *backhaul* em zonas urbanas.

De modo a testar a capacidade de tráfego suportada pelo terminal hub para um sector, foi criado um simulador de tráfego para o qual foram modelados os serviços de voz, vídeo-telefonía, e-mail, *web browsing* e FTP por serem os mais relevantes na rede móvel. No simulador de tráfego desenvolvido implementaram-se os modelos de tráfego criados com base numa diversidade de literatura e empregando várias distribuições estatísticas. Foram efectuados alguns testes, nomeadamente, o teste do qui-quadrado e *Kolmogorov-Smirnov*, de forma a verificar a validade das sequências geradas pelo gerador de números pseudo-aleatórios *rand* (incluído na ferramenta Matlab®) aplicadas às distribuições em análise. Com os testes realizados foi possível concluir que o gerador de números pseudo-aleatórios bem como as distribuições analisadas foram considerados válidos.

Foram definidos vários cenários urbanos considerando uma dimensão temporal de 2007-2010, e com esses cenários foram efectuadas diversas simulações para diferentes situações. É importante referir que as conclusões a que se chegaram baseiam-se no conjunto de serviços estudado e em informações actuais, mas se surgirem novos padrões de tráfego, o simulador pode ser utilizado mas os *inputs* têm necessariamente de ser actualizados.

Com as simulações realizadas considerando apenas tráfego 3G, concluiu-se que se o objectivo for transmitir e agregar tráfego 3G numa determinada zona urbana, um terminal hub suporta apenas dez terminais remotos no mesmo sector.

Como o cenário de considerar unicamente tráfego 3G numa rede móvel não é muito realista, foi necessário considerar a existência de tráfego 2G e 3G em simultâneo. Após algumas simulações realizadas, concluiu-se que um sector do sistema rádio Ponto-Multiponto apenas consegue servir até

cinco terminais remotos (ligados a uma BTS e um Nó B) em simultâneo que se encontrem todos a funcionar com uma modulação 16-QAM ou em que quatro desses terminais operem em 16-QAM e um dos terminais em QPSK. O terminal hub não suporta mais que cinco terminais porque esta é já a situação mais exigente de débito.

Foi realizado um estudo de viabilidade económica de modo a investigar a validade de implementação do sistema rádio Ponto-Multiponto ou dos sistemas rádio Ponto-a-Ponto como alternativa aos circuitos alugados utilizados actualmente na componente de transporte. Com base nos estudos efectuados conclui-se que ambas as soluções analisadas conduzem a melhores resultados do que aqueles que são conseguidos com a utilização dos circuitos alugados E1. Também se concluiu que a proposta de utilização de sistemas Ponto-Multiponto será mais vantajosa que os sistemas PTP porque o VAL para o sistema rádio PMP é superior ao calculado para o sistema PTP e também porque a instalação dos sistemas PMP têm um período de recuperação do investimento em 1 ano contra os 2 anos com a implementação de sistemas PTP.

Em suma, numa zona urbana onde existam até cerca de vinte BTS e Nós B co-localizados, numa área com um raio menor que 5 km num sector de 90°, e com linha-de-vista, é altamente vantajoso para um operador móvel optar por adquirir um sistema rádio Ponto-Multiponto para substituir os circuitos alugados utilizados.

7.2 Sugestões para trabalho futuro

Na sequência da realização deste trabalho foram surgindo uma série de tópicos que podem ser estudados e analisados no futuro. As sugestões apresentadas são indicadas como forma de expandir o trabalho apresentado nesta dissertação permitindo obter um simulador mais preciso e realista.

De modo a obter uma melhor estimativa da ocupação do sistema Ponto-Multiponto a nível de tráfego, sugerem-se:

- Aplicação de novos serviços de dados, como por exemplo a video-vigilância e serviços de *streaming* áudio/vídeo, para abranger as novas tendências de tráfego do mercado móvel.
- Considerar não só do *downlink*, mas também do *uplink* que futuramente, e devido ao HSUPA, começará a ocupar um papel importante na ocupação da banda de transmissão.
- Implementação de um algoritmo de alocação dinâmica de banda (DBA) para alocar dinamicamente a banda disponível aos terminais remotos do sistema Ponto-Multiponto.
- Obtenção de estudos de mercado acerca da utilização dos variados tipos de serviços, e acerca das penetrações de mercado das placas 3.5G.

Anexos

Anexo A. Classes de Serviço UMTS

Com a *Release 99* e alguns anos depois com a *Release 5*, o UMTS, caracteriza-se por proporcionar débitos binários mais elevados que o GSM/GPRS, tornando assim possível uma maior variedade de aplicações e serviços com diferentes qualidades de serviço (QoS⁵). Os serviços podem ser classificados em diferentes categorias, de acordo com os parâmetros que os caracterizam. As diferentes classes de serviço encontram-se descritas nas recomendações da 3GPP, [3GPP22.105] e [3GPP23.107], e são elas:

- Classe Conversacional
- Classe *Streaming*
- Classe Interactiva
- Classe *Background*

O principal factor que distingue as quatro classes de serviço é o atraso, isto é, a classe Conversacional deve possuir o tráfego com menor atraso na rede, enquanto a classe Background pode ter o maior atraso na rede. As classes Conversacional e *Streaming* devem ser utilizadas para tráfego em tempo-real, como o serviço de voz e *streaming*, enquanto as classes Interactiva e *Background* que são utilizadas para aplicações Internet como *web browsing*, e-mail, FTP, entre outros, utilizam o método *best-effort*.

Tabela A.1 – Classes de serviços QoS UMTS (extraído de [3GPP22.105]).

	Classes de Serviço QoS			
	Conversacional	Streaming	Interactiva	Background
<i>Tempo-Real</i>	✓	✓	x	x
<i>Best-Effort</i>	x	x	✓	✓
<i>Simétrico</i>	✓	x	x	x
<i>Comutação</i>	CS	CS / PS	PS	PS
<i>Ritmo garantido</i>	✓	✓	x	x
<i>Atraso</i>	<<1 seg.	≅1 seg.	<10 seg.	> 10 seg.
<i>Exemplo</i>	Voz, Vídeo telefonia	<i>Streaming</i> áudio e vídeo	<i>web browsing</i> , FTP	E-mail

⁵ Acrónimo de origem anglo-saxónica de Quality of Service.

Anexo B. Exemplos de Aplicação do PMP

Como explicado no capítulo 3, o sistema Ponto-Multiponto é composto por um terminal remoto e um terminal hub que serve vários terminais remotos, e estes por sua vez encontram-se fisicamente ligados ou a uma BTS, ou a um Nó B, ou ambos. A Figura B.1 representa as configurações possíveis entre os terminais remotos e as estações base.

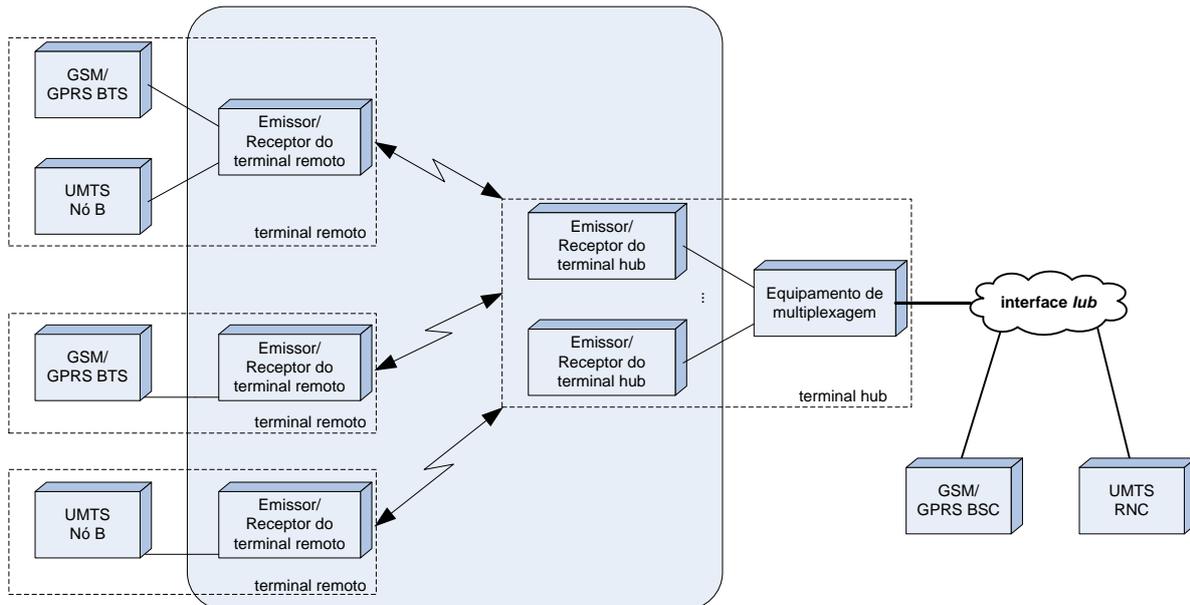


Figura B.1 – Configurações de aplicação do *backhaul* Ponto-Multiponto.

Anexo C. Categorias de Serviço ATM

As categorias ATM são definidas pelo *ATM Forum* [ATMFw], e distinguem-se como sendo em tempo real (*real-time*) ou sem ser em tempo real (*non-real-time*). Para o tráfego *real-time*, existem duas categorias, CBR (*Constant Bit Rate*) e rt-VBR (*Real-Time Variable Bit Rate*), para o tráfego *non-real-time* existem três categorias: nrt-VBR (*Non-Real-Time Variable Bit Rate*), ABR (*Available Bit Rate*) e UBR (*Unspecified Bit Rate*).

Estas categorias permitem aumentar os benefícios da rede ATM, através da negociação, para cada conexão, do comportamento esperado do nível ATM, em termos de tráfego e desempenho, permitindo aos utilizadores a optimização dos requisitos da aplicação e a correspondente optimização das capacidades e recursos da rede para satisfazer esses requisitos.

Os operadores procuram atingir a máxima utilização dos recursos da rede, evitando o congestionamento enquanto partilham os recursos da rede por um número elevado de utilizadores e para tal utilizam as categorias de serviço.

Parâmetros de tráfego (Recomendação I.371 do ITU-T [ITUTI.371]):

– *Peak Cell Rate* (PCR) – O PCR é um parâmetro do descritor de tráfego da fonte que especifica o limite superior do ritmo que pode ser submetido numa conexão ATM, ou por outras palavras, é o débito binário máximo instantâneo a que a fonte pode transmitir. (O PCR de uma conexão ATM pode ser definido como o inverso do mínimo intervalo de tempo entre a chegada de duas células consecutivas)

– *Sustainable Cell Rate* (SCR) – O SCR é um parâmetro do descritor de tráfego da fonte que especifica o ritmo médio de transmissão de células durante a duração da conexão

– *Maximum Burst Size* (MBS) – O MBS é o número máximo de células que a fonte pode transmitir ao débito de pico.

– *Minimum Cell Rate* (MCR) – O MCR define o ritmo a que a fonte é sempre autorizada a transmitir pela rede. Este parâmetro é utilizado na categoria de serviço ABR.

As classes de serviço ATM definidas pelo *ATM Forum* são:

Constant Bit Rate (CBR) – O débito binário é constante durante a ligação. Este serviço é caracterizado pelo valor do PCR (*Peak Cell Rate*), o qual está continuamente disponível na rede. Esta classe adapta-se a serviços de voz digital e tráfego de vídeo. É várias vezes referida como emulação de circuitos.

Real Time – Variable Bit Rate (rt-VBR) – O débito binário varia entre zero e um valor de pico. Utilizada para aplicações sensíveis ao tempo – com requisitos sensíveis ao atraso e a variações de atraso, como é o caso das aplicações de voz e vídeo. As fontes transmitem (em princípio) a ritmo variável ao longo do tempo. Os parâmetros de tráfego utilizados são o PCR, SCR (*Sustainable Cell Rate*) e MBS (*Maximum Burst Size*). Os serviços rt-VBR suportam multiplexagem estatística de fontes *real-time*.

Non Real Time – Variable Bit Rate (nrt-VBR) – Utilizada para aplicações que tenham características de tráfego de dados do tipo *bursty* e não tenham características sensíveis a atraso e

variações de atraso. De modo análogo ao rt-VBR, os parâmetros de tráfego utilizados são o PCR, SCR e MBS. Os serviços nrt-VBR podem suportar multiplexagem estatística de conexões.

Available Bit Rate (ABR) – Utilizada para fontes que tenham a capacidade para reduzir ou aumentar o seu ritmo de informação consoante a rede o requerer. Permite explorar as mudanças nas características de transferências da camada ATM, nomeadamente a disponibilidade de banda, ao longo do tempo, possibilitando uma transmissão fiável para aplicações de ritmo não constante. Há muitas aplicações que não têm um valor médio de ritmo bem definido, tal como no VBR, sendo apenas possível definir um valor mínimo e um valor máximo do ritmo expectável. No estabelecimento da conexão ABR o terminal deverá especificar os valores do ritmo mínimo e máximo a usar, designados respectivamente por PCR e MCR (*Minimum Cell Rate*). O valor de MCR pode ser zero.

Unspecified Bit Rate (UBR) – Serviço de *best-effort*. Usada em aplicações não críticas que não requerem valores sensíveis de atraso e variações de atraso nem especificam uma determinada QoS. Este serviço apenas é caracterizado pelo valor do PCR. Espera-se que as fontes UBR transmitam *bursts* não contínuos de células, suportando o serviço UBR um alto grau de multiplexagem estatística entre as fontes. (Utilização típica de aplicações *non-real-time*, tais como FTP e e-mail).

A "Categoria de Serviço ATM" do ATM Forum [ATMF99] é designada pelo ITU-T [ITUTI.371] de "Capacidade de Transferência da camada ATM" (ATC - *ATM Transfer Capability*), pode-se observar uma comparação entre ambas as recomendações na Tabela C.2.

As duas designações representam uma classe de conexões ATM com características homogéneas em termos de padrões de tráfego, requisitos de QoS e possível uso de mecanismos de controlo. Uma categoria de serviço ATM relaciona os requisitos de qualidade e as características de tráfego com o comportamento da rede (procedimentos e parâmetros).

Tabela C.1 – Parâmetros de tráfego para cada categoria de serviço ATM.

Categoria de Serviço	Parâmetros de tráfego
CBR	PCR
rt-VBR	PCR, SCR, MBS
nrt-VBR	PCR, SCR, MBS
ABR	PCR, MCR
UBR	PCR

Tabela C.2 – Comparação das categorias de serviço ATM Forum [ATMF99] com ITU-T [ITUTI.371].

ATM Forum TM 4.0 "ATM Service Category"	ITU-T I.371 "ATM Transfer Capability"	Uso típico
Constant Bit Rate (CBR)	Deterministic Bit Rate (DBR)	Tempo real, Garantias de QoS
Real-Time Variable Bit Rate (rt-VBR)	(em estudo)	Tempo real, multiplexagem estatística
Non-Real-Time Variable Bit Rate (nrt-VBR)	Statistical Bit Rate (SBR)	Multiplexagem estatística
Available Bit Rate (ABR)	Available Bit Rate (ABR)	Exploração de recursos, Controlo de realimentação
Unspecified Bit Rate (UBR)	(sem equivalente)	<i>Best-effort</i> , sem garantias

Anexo D. Simulação e geração de números aleatórios

A simulação consiste essencialmente na representação ou imitação de um processo através da utilização de outro. Um bom gerador de números aleatórios deve ter os seguintes aspectos: Boa base teórica, período longo, testes estatísticos, eficiência, repetibilidade e portabilidade [ViCo05].

D.1. Geradores de números pseudo-aleatórios

Os números realmente aleatórios não são possíveis de calcular computacionalmente, devido a que o gerador é sempre executado de uma forma determinística pelo computador. Então, não se geram números aleatórios, mas sim números que estatisticamente aparentam ser aleatórios. Daí a designação de números pseudo-aleatórios.

Neste trabalho efectua-se os testes de ajustamento, nomeadamente o teste do qui-quadrado e o teste de *Kolmogorov-Smirnov*, para testar a validade do gerador de números pseudo-aleatórios *rand* do Matlab[®], implementado no simulador criado para este trabalho.

D.2. Testes de ajustamento

Os testes de ajustamento [LaKe91] explicados de seguida foram aplicados para demonstrar que o gerador de números aleatórios utilizado, neste caso o *rand* do Matlab[®], gera números pseudo-aleatórios no intervalo]0,1[, com um dado intervalo de confiança.

Os testes de ajustamento servem para testar a hipótese de que uma determinada amostra aleatória tenha sido extraída de uma população com distribuição especificada. Seja X_1, X_2, \dots, X_n uma amostra aleatória retirada de uma população X conhecida com função cumulativa de probabilidade $F_X(x)$, e $F_0(x)$ a função cumulativa de probabilidade completamente especificada. O objectivo consiste em testar a hipótese nula ($H_0: F_X(x)=F_0(x)$) contra a alternativa ($H_1: F_X(x)\neq F_0(x)$).

D.2.1. Teste de ajustamento do qui-quadrado

O mais antigo dos testes de ajustamento é o teste do qui-quadrado. Este teste efectua uma comparação mais formal entre o histograma de uma amostra com a função densidade de probabilidade da distribuição a ajustar.

O teste do qui-quadrado (D.1) é definido por:

- H_0 : Os dados seguem uma distribuição especificada.
- H_1 : Os dados não seguem uma distribuição especificada.
- *Estatística de teste*: Para o teste de ajustamento do qui-quadrado, os dados são divididos em j intervalos e a estatística de teste traduz-se numa medida da diferença entre o valor esperado, e o valor obtido para cada intervalo:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{j=1}^k (N_j - np_j)^2}{np_j} \quad (D.1)$$

onde np_j é o valor esperado das n amostras de X_i que se encontram no j -ésimo intervalo. Caso a distribuição a ajustar seja próxima da distribuição hipotética H_0 , pode-se esperar que χ^2 seja pequeno ou no limite nulo. Consequentemente, rejeita-se H_0 se χ^2 for demasiado grande. O teste consiste portanto em saber a partir de que limiar se deve rejeitar a hipótese H_0 .

O teste do qui-quadrado de ajustamento requer que os dados inicialmente se encontrem agrupados em intervalos, portanto, divide-se todo o domínio da distribuição em k intervalos adjacentes $[a_0, a_1), [a_1, a_2), \dots, [a_{k-1}, a_k)$, onde $a_0 = -\infty$, em que no primeiro intervalo é $(-\infty, a_1)$, ou $a_k = +\infty$, ou ambos. Define-se N_j (D.1) como sendo o número de amostras X_i no j -ésimo intervalo $[a_{j-1}, a_j)$. O número de intervalos e como esses intervalos são definidos vai afectar a robustez do teste (isto é, quão sensível é para detectar desvios da hipótese nula). A robustez não só será afectada pelo número de intervalos, e como estes são definidos, mas também pelo tamanho da amostra.

O teste de ajustamento do qui-quadrado pode ser aplicado a distribuições contínuas, mas também a distribuições discretas como a de Poisson ou geométrica. Para o caso contínuo, e para cada intervalo $j=1, 2, \dots, k$ calcula-se a proporção esperada p_j de amostras X_i , que se encontram no j -ésimo intervalo da distribuição a ajustar $F_X(x)$:

$$p_j = \int_{a_{j-1}}^{a_j} f_X(x) dx \quad (D.2)$$

em que $f_X(x)$ é a função densidade de probabilidade correspondente à distribuição a ajustar.

Para o caso em que a distribuição a ajustar é discreta, define-se:

$$p_j = \sum_{a_{j-1} \leq x_i < a_j} p_X(x_i) \quad (D.3)$$

onde $p_X(x)$ é a probabilidade do acontecimento x da função a ajustar.

Se todos os parâmetros da distribuição $F_X(x)$ forem conhecidos e se a hipótese H_0 for verdadeira, χ^2 converge assintoticamente para uma distribuição qui-quadrado com $k-1$ graus de liberdade à medida que $n \rightarrow \infty$. Então para n grande, um teste de nível de significância α é obtido através de rejeitar H_0 ao nível de significância α , se $\chi^2 > \chi_{k-1, 1-\alpha}^2$, onde $\chi_{k-1, 1-\alpha}^2$ é o ponto crítico $(1-\alpha)$ para uma distribuição qui-quadrado com $k-1$ graus de liberdade. Se o valor do teste estatístico cair na região α rejeita-se H_0 , se o valor cair na região de aceitação $(1-\alpha)$, aceita-se H_0 . Directamente relacionado com o valor de α está a noção de intervalo de confiança: $IC=(1-\alpha) \times 100\%$, que representa a percentagem de intervalos que contêm o valor real a estimar.

Para efectuar um teste de hipóteses, deve-se começar por definir o nível de significância a utilizar, os valores típicos de α são 0.10 e 0.05. O valor escolhido para o α depende da sensibilidade

pretendida para o teste, tendo sempre em atenção que valores de α pequenos levam ao aumento proporcional do valor de β , ou seja maior probabilidade de erros de Tipo II.

Ao realizar testes de hipóteses existe sempre uma probabilidade de se decidir erradamente. Ao tomar uma decisão a favor ou contra uma hipótese existem dois tipos de erros que se podem cometer. Pode-se rejeitar a hipótese nula quando de facto ela é verdadeira (erro tipo I) ou pode-se errar ao rejeitar H_0 quando de facto ela é falsa (erro tipo II). Existe um balanço entre os dois tipos de erros, no sentido de que ao tentar-se minimizar a possibilidade de um tipo, aumenta-se a probabilidade do outro. Frequentemente denotamos as probabilidades destes dois erros como α e β respectivamente. Na Tabela D.1 representam-se essas situações em erros de Tipo I ou de Tipo II, onde α é o nível de significância escolhido, e β é inversamente proporcional a α .

Tabela D.1 – Várias situações de decisão numa estatística de teste

	Decisão	
	Aceitar H_0	Rejeitar H_0
H_0 verdadeiro	Correcta ($1-\alpha$)	Erro Tipo I (α)
H_0 falso	Erro Tipo II (β)	Correcta ($1-\beta$)

Como vantagem, o teste de ajustamento do qui-quadrado pode ser aplicado a qualquer distribuição hipotética. O número e tamanho dos intervalos, não se encontra determinado, e não existe nenhum processo que o permita determinar. Por vezes, para a mesma distribuição, podem-se chegar a resultados diferentes, consoante o número de intervalos utilizado. Para algumas distribuições, a robustez do teste (rejeitar H_0 quando H_0 é falso) aumenta com o número de intervalos k e para outras diminui. Para intervalos equiprováveis, as condições do teste são satisfeitas se $k > 3$ e $np \geq 5$.

D.2.2. Teste do qui-quadrado aplicado a geradores de números aleatórios

Considerando uma sequência U de n valores gerados pelo gerador de números aleatórios do Matlab e para aplicação do teste do qui-quadrado, começa-se por testar a uniformidade dessa sequência U . Para este teste a hipótese nula é definida como:

- H_0 : A sequência U_i tem distribuição uniforme no intervalo (0,1).

Este teste consiste em dividir o intervalo (0,1) em k sub-intervalos de igual comprimento, e contar o número de números aleatórios da sequência U que correspondem a cada sub-intervalo. Seguidamente, quantifica-se o afastamento deste conjunto de números obtido, ao número de ocorrências que deveria ser obtido numa distribuição uniforme. Finalmente interessa saber até que ponto o afastamento é razoável ou não.

Adaptando a equação do teste do qui-quadrado que mede o afastamento entre o valor esperado e o valor obtido (D.1) para cada intervalo ao problema em questão, este afastamento passa a ser:

$$\chi^2 = \frac{k}{n} \sum_{j=1}^k \left(N_j - \frac{n}{k} \right)^2 \quad (\text{D.4})$$

como cada intervalo tem o mesmo tamanho, tem-se que $p_j = \frac{1}{k}$ para cada $j=0, \dots, k$.

Para o teste do qui-quadrado de ajustamento com todos os parâmetros conhecidos é possível garantir ou não a uniformidade para a sequência em análise com um certo nível de incerteza α . Pode-se dizer sob a hipótese nula, que à medida que n aumenta, este afastamento aproxima assintoticamente uma distribuição qui-quadrado com $k-1$ graus de liberdade. Sendo assim o teste resume-se a: rejeitar H_0 ao nível de significância α , se $\chi^2 > \chi_{k-1,1-\alpha}^2$ em que para valores de $k > 40$, o limite do qui-quadrado $\chi_{k-1,1-\alpha}^2$ é facilmente calculado através da seguinte fórmula [Step74]:

$$\chi_{k-1,1-\alpha}^2 \approx (k-1) \left[1 - \frac{2}{9(k-1)} + z_{1-\alpha} \sqrt{\frac{2}{9(k-1)}} \right]^3 \quad (\text{D.5})$$

onde $z_{1-\alpha}$ é o valor crítico superior (tabela z da distribuição normal), de uma distribuição $N(0,1)$.

D.2.3. Teste de Kolmogorov-Smirnov

O teste de *Kolmogorov-Smirnov* (K-S) é utilizado para determinar se duas distribuições de probabilidade subjacentes diferem uma da outra ou se uma das distribuições de probabilidade subjacentes difere da distribuição em hipótese, em qualquer dos casos com base em amostras finitas. O teste K-S compara a função distribuição cumulativa de probabilidade empírica $F_n(x)$ com a função distribuição cumulativa $F(x)$ especificada pela hipótese nula.

A função distribuição cumulativa de probabilidade empírica $F_n(x)$ baseada na amostra X_1, X_2, \dots, X_n é dada por:

$$F_n(x) = \frac{\text{número de elementos na amostra} \leq x}{n} \quad (\text{D.6})$$

para todos os números reais x .

A função distribuição cumulativa teórica $F(x)$ descreve completamente a distribuição da probabilidade de uma variável aleatória de valor real X . Para cada número real x , a $F(x)$ é dada por:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (\text{D.7})$$

O teste K-S efectua uma comparação entre as distribuições de probabilidade empírica $F_n(x)$ com a teórica $F(x)$ para decidir o seu grau de semelhança.

Em concreto, o teste *K-S*, determina a maior distância vertical D_n entre ambas as distribuições, para todos os valores de x , formalmente essa medida D_n é:

$$D_n = \sup_x \left\{ \left| F_n(x) - \hat{F}(x) \right| \right\} \quad (D.8)$$

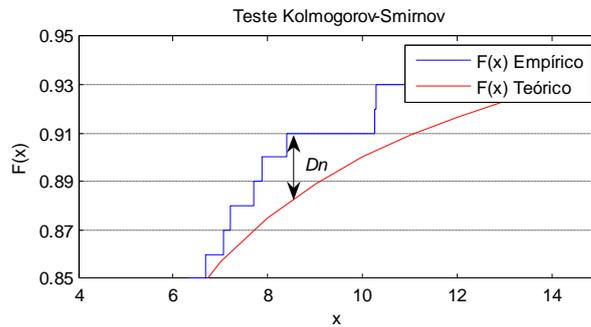


Figura D.1 – Representação da distância vertical entre a distribuição cumulativa empírica e hipotética.

O teste traduz-se em rejeitar H_0 no caso de $D_n > d_{n,1-\alpha}$, onde α é o nível de significância do teste (usualmente toma os valores de 0.05 ou 0.1), e $d_{n,1-\alpha}$ um valor crítico que depende da maneira como a distribuição teórica foi definida [Step74]. No caso de todos os parâmetros serem conhecidos, D_n não depende de $F(x)$, portanto, para todas as distribuições contínuas, apenas se necessita de um conjunto restrito de valores críticos. Em [Step74] é apresentada uma pequena simplificação:

$$\left(\sqrt{n} + 0.12 + \frac{0.11}{\sqrt{n}} \right) D_n > c_{1-\alpha} \quad (D.9)$$

em que $c_{1-\alpha} = 1.358$ [Step74] para IC=95%.

O teste K-S ao contrário do teste de ajustamento do qui-quadrado, não se aplica a distribuições discretas, no entanto, tem a vantagem de não estar dependente de classificações dos dados, que envolvem perdas de informação. De facto, no ajustamento de uma distribuição contínua a uma amostra usando o teste do qui-quadrado, temos de proceder à agregação dos dados em classes, sendo por isso mais adequado utilizar o teste K-S. Por outro lado, o teste K-S só pode ser aplicado quando a distribuição indicada na hipótese nula está completamente especificada (o que não sucede com o teste do qui-quadrado). Além disso, o teste do qui-quadrado está orientado essencialmente para grandes amostras, enquanto o teste K-S é aplicável a pequenas amostras.

Anexo E. Geração de variáveis pseudo-aleatórias

E.1. Método de transformação inversa

Se a função de distribuição de probabilidade for invertível analiticamente, então o método da transformação inversa é aplicável.

De seguida, estuda-se o caso em que a variável aleatória uniformemente distribuída no intervalo $(0,1)$ é contínua, e também o caso em que esta variável é discreta (Figura E.1).

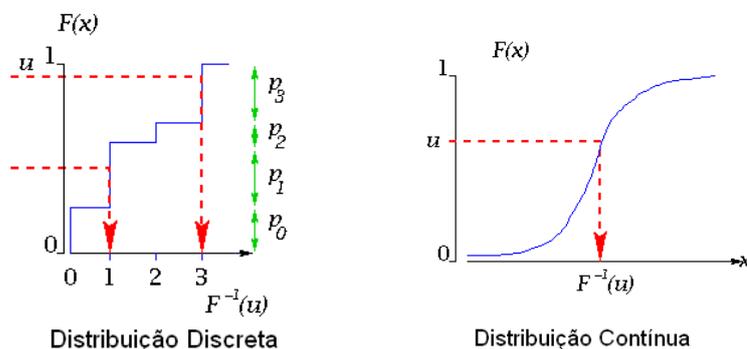


Figura E.1 – Representação da aplicação do método da transformação inversa.

Método da transformada inversa para simular variáveis aleatórias contínuas.

Seja X uma variável aleatória com função cumulativa de probabilidade $F_X(x)$. Desde que $F_X(x)$ seja uma função não decrescente, a função inversa $F_X^{-1}(y)$ (y pode ser definida para cada valor de y entre 0 e 1 como:

$$F_X^{-1}(y) = \inf\{x : F_X(x) \geq y, 0 \leq y \leq 1\} \quad (\text{E.1})$$

Vai-se demonstrar que se U é uniformemente distribuído no intervalo $(0,1)$, então $X = F_X^{-1}(U)$ tem função cumulativa de probabilidade $F_X(x)$:

$$P(X \leq x) = P(F_X^{-1}(U) \leq x) = P(U \leq F_X(x)) = F_X(x) \quad (\text{E.2})$$

Para obter um valor, por exemplo x de uma variável aleatória X , obter um valor, u , de uma variável aleatória U , calcular $F_X^{-1}(U)$, e igualar a x .

Demonstra-se então que a variável aleatória X tem a distribuição de probabilidade de $F(x)$, e que através de um conjunto de números aleatórios é possível gerar, através da aplicação da transformação inversa, um conjunto de números com uma distribuição de probabilidade $F(x)$.

Método da transformada inversa para simular variáveis aleatórias discretas.

O método da transformada inversa para simular variáveis contínuas no caso contínuo é análogo

para o caso discreto. Por exemplo, se o objectivo for simular uma variável aleatória X tendo a função distribuição de probabilidade.

$$\begin{aligned} P(X = x_j) &= P_j, & j = 0, 1, \dots, n \\ \sum_j P_j &= 1 \\ F(X_j) &= \sum_{i=0}^j P_i \end{aligned} \tag{E.3}$$

Para simular X para que $P(X=x_j)=P_j$, faça-se U uniformemente distribuída no intervalo $(0,1)$. Define-se:

$$X = \begin{pmatrix} x_0 & U < P_0 \\ x_1 & P_0 \leq U < P_0 + P_1 \\ \dots & \dots \\ x_j & \sum_{i=0}^{j-1} P_i \leq U < \sum_{i=0}^j P_i \end{pmatrix} \tag{E.4}$$

Como,

$$P(X = x_j) = P\left(\sum_{i=0}^{j-1} P_i \leq U \leq \sum_{i=0}^j P_i\right) = \int_{F(X_{j-1})}^{F(X_j)} dx = F(X_j) - F(X_{j-1}) = P_j \tag{E.5}$$

onde se observa que X é a distribuição desejada.

O método da função inversa pode ser resumido em [LaKe91]:

- Gerar uma variável aleatória U , uniforme no intervalo $(0,1)$;
- Fazer $X(U) = F^{-1}(U)$

E.2. Método de transformação por composição

O método da transformação por composição, é aplicável a uma função de distribuição $F(x)$ que se deseje inverter e que possa ser decomposta numa junção de outras funções de distribuição $F_1(x)$, $F_2(x)$, ..., $F_n(x)$. A utilização destas funções de distribuição tem a vantagem de serem mais simples de inverter. Assumindo que para todo o x , $F(x)$ pode ser escrito da seguinte forma:

$$F(x) = \sum_{j=1}^{\infty} p_j F_j(x) \tag{E.6}$$

onde $0 \leq p_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^{\infty} p_j = 1$, em que cada $F_j(x)$ é uma função de distribuição.

O algoritmo para o método de composição pode ser sintetizado em:

- Gerar um número aleatório J positivo e inteiro de modo que:

$$P(J = j) = p_j \text{ para } j = 1, 2, \dots$$

- Gerar Y_j de $F_j(x)$
- $X(U) = Y_j$

Avaliando $P(X \leq x)$ condicionado à variável J obtém-se:

$$P(X \leq x) = \sum_{j=1}^{\infty} P(X \leq x | J = j)P(K = j) = \sum_{j=1}^{\infty} F_j(x)p_j = F(x) \quad (\text{E.7})$$

Este método permite simplificar a inversão de uma dada distribuição mas é sempre usado em conjunto com outros. O método de transformação por composição é o utilizado para a distribuição de Poisson, já que esta pode ser definida como a composição de uma série de distribuições exponenciais.

E.3. Distribuições

Em seguida, encontram-se analisadas as várias distribuições em estudo, exponencial negativa, Poisson, Pareto e geométrica, sendo estas geradas utilizando o método de inversão descrito anteriormente, e utilizando o gerador de números pseudo-aleatórios *rand* do Matlab. Depois de geradas serão analisadas utilizando os testes de ajustamento anteriormente descritos (à semelhança do trabalho final de curso [CorVie05]).

E.3.1. Distribuição exponencial negativa

A função densidade de probabilidade da distribuição exponencial negativa é definida por:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & , x \geq 0, \\ 0 & , x < 0. \end{cases} \quad (\text{E.8})$$

em que $\lambda > 0$ é um parâmetro de escala, e a função distribuição cumulativa é dada por:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{E.9})$$

em que a média μ e a variância σ^2 são relacionadas com o parâmetro λ , e dadas por:

$$\mu = \frac{1}{\lambda},$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}.$$

Na Figura E.2 podem-se observar as representações gráficas da função densidade de probabilidade e da função cumulativa de probabilidade.

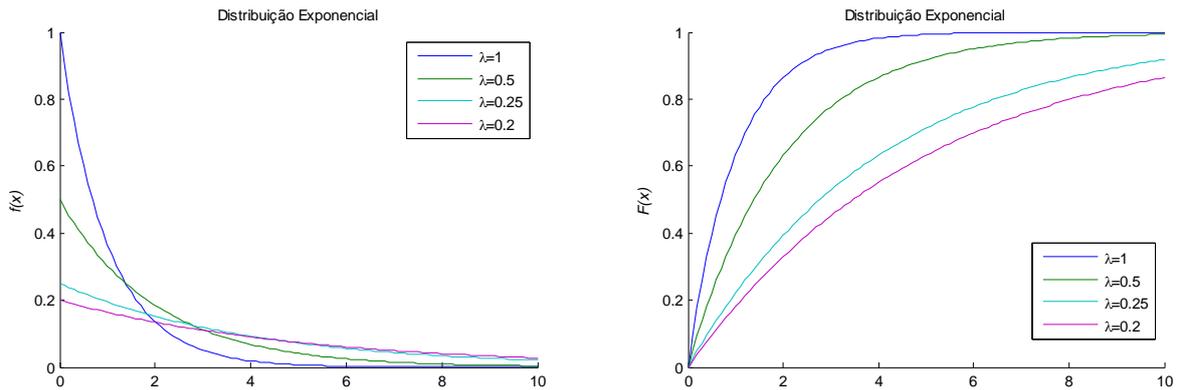


Figura E.2 – a) Função densidade de probabilidade. b) Função cumulativa de probabilidade.

Aplicando o método da transformação inversa descrito na secção E.1 e aplicando à função densidade de probabilidade da distribuição exponencial negativa obtém-se:

$$x = -\frac{\ln(1-F(x))}{\lambda} \quad (\text{E.10})$$

e utiliza-se o seguinte algoritmo para gerar a sequência de números com distribuição exponencial X :

- Seja $U \sim U(0,1)$
- $X = -\frac{\ln(U)}{\lambda}$

Para realizarmos os testes de ajustamento descritos anteriormente, é necessário, como discutido, obter intervalos equiprováveis. A sequência de intervalos com probabilidade igual a $1/k$ é obtido através de:

$$a_j = -\frac{1}{\lambda} \ln\left(1 - \frac{j}{k}\right) \quad (\text{E.11})$$

Os resultados, dos testes de ajustamento na Tabela E.1, permitem concluir, que os números gerados se aproximam efectivamente de uma distribuição exponencial negativa. Com o teste de *Kolmogorov-Smirnov*, acaba por se obter a Figura E.3, em que se verifica que a diferença entre a distribuição cumulativa hipotética e a utilizada é praticamente nula.

Tabela E.1 – Teste *Kolmogorov-Smirnov* para a distribuição exponencial negativa com média 1, com IC=95%.

# Amostras	Teste <i>Kolmogorov-Smirnov</i>	Limite <i>Kolmogorov-Smirnov</i>
$2^{15} = 32768$	0.0033 (OK)	0.0075
$2^{16} = 65536$	0.0032 (OK)	0.0053
$2^{17} = 131072$	0.0014 (OK)	0.0037
1000	0.0342 (OK)	0.0428
10000	0.0058 (OK)	0.0136
100000	0.0020 (OK)	0.0043
1000000	0.0009 (OK)	0.0014

Para obter o limite do qui-quadrado utiliza-se a equação para o cálculo do qui-quadrado para $k > 40$ e obtém-se da tabela da distribuição normal, o valor de $Z_{1-\alpha}$ para um IC=95% (Anexo F).

Tabela E.2 – Valores obtidos para o teste do qui-quadrado.

# Amostras	# Intervalos	Teste qui-quadrado (χ^2)	Limite qui-quadrado ($\chi^2_{k-1,1-\alpha}$)
$2^{15} = 32768$	$2^{12} = 4096$	4082 (OK)	4244,5
$2^{16} = 65536$	$2^{13} = 8192$	8338 (OK)	8402
$2^{17} = 131072$	$2^{14} = 16384$	16659 (OK)	16681

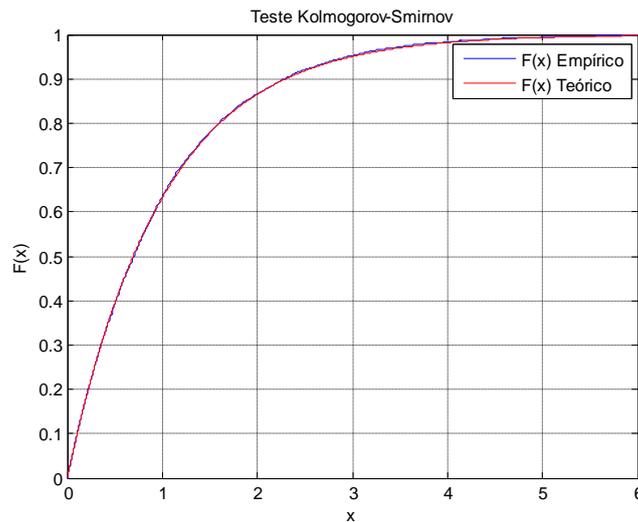


Figura E.3 – Comparação entre funções cumulativas de probabilidade teórica e empírica para 10000 amostras média=1 e IC=95%.

Finalmente, são comparados vários intervalos com probabilidade idêntica, de forma a averiguar a conformidade dos números gerados.

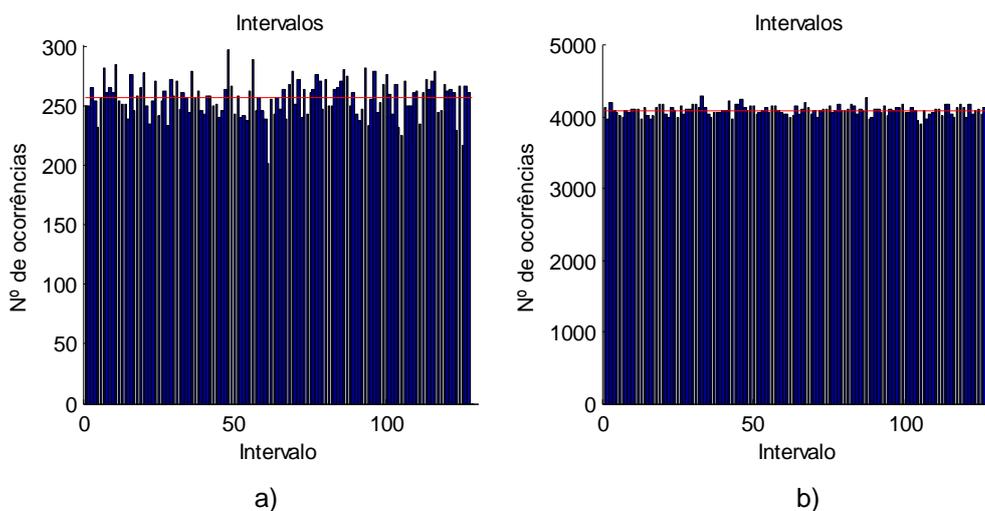


Figura E.4 – Intervalos de idêntica probabilidade para a) 2^{15} e b) 2^{19} amostras, média=1 e 128 intervalos.

Sendo intervalos de probabilidade idêntica, para todos estes intervalos, o valor máximo deveria coincidir com a linha a vermelho da Figura E.4. Como se pode observar na Figura E.4 a), para 2^{15} números existe alguma discrepância com o que era esperado no entanto para 2^{19} essa discrepância é muito menor.

E.3.2. Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson tem a seguinte função densidade de probabilidade:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} & \text{se } x \in \{0, 1, \dots\} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{E.12})$$

Onde x é o número de ocorrências de um evento, λ é o número esperado de ocorrências que ocorrem num intervalo de tempo.

Sendo a função distribuição cumulativa de probabilidade é dada por:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < 0 \\ e^{-\lambda} \sum_{i=0}^{\lfloor x \rfloor} \frac{\lambda^i}{i!} & \text{se } 0 \leq x \end{cases} \quad (\text{E.13})$$

Em que a média μ e a variância σ são relacionadas com o parâmetro λ , e dadas por:

$$\begin{aligned} \mu &= \lambda, \\ \sigma^2 &= \lambda. \end{aligned}$$

A distribuição de Poisson é uma distribuição de probabilidade discreta, que permite analisar, por exemplo, a probabilidade de um certo número de eventos ocorrerem num dado período tempo, caso estes ocorram com uma taxa média conhecida e caso cada evento seja independente do tempo decorrido desde o último evento.

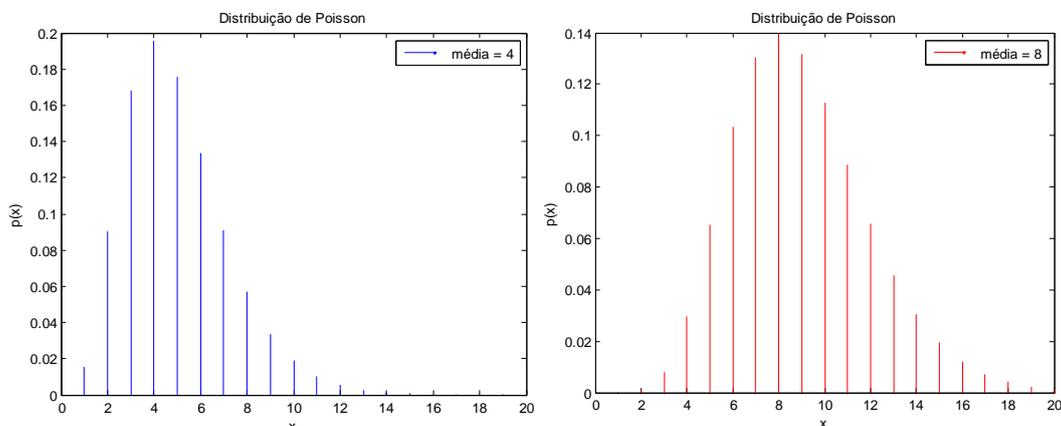


Figura E.5 – Função densidade de probabilidade para $\lambda=4$ e $\lambda=8$.

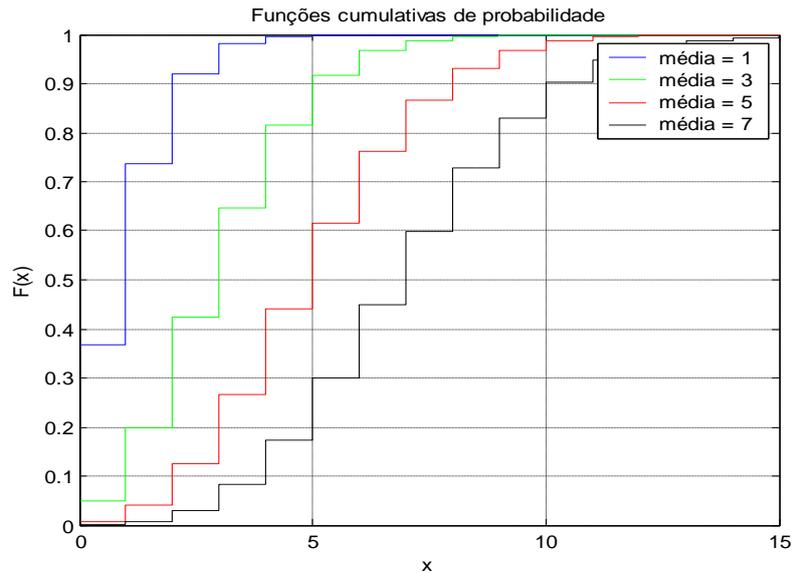


Figura E.6 – Função distribuição cumulativa de probabilidade para vários valores da média (λ).

A inversão efectua-se de acordo com método da transformação inversa. Nota-se também que o número de acontecimentos num processo de Poisson, para um tempo fixo T , tem uma distribuição de Poisson e que o tempo entre cada um destes acontecimentos tem uma distribuição exponencial. Sendo assim, para calcular o número de ocorrências em cada intervalo fixo T basta somar o número necessário de variáveis distribuídas exponencialmente (com a mesma média), para se obter T .

Em [Mol88] apresenta-se o seguinte algoritmo:

- Gerar $U \sim U(0,1)$.
- Seja $T_h = \exp(-\lambda)$.
- Encontrar o n mínimo tal que $U(i) \times \dots \times U(i+n) > T_h$

Tabela E.3 – Valores do teste do qui-quadrado para a distribuição de Poisson com $\lambda=5$, IC=95% e $k=7$.

# Amostras	Teste qui-quadrado	Limite qui-quadrado ($k=7$)
$2^{14} = 16384$	5.438 (OK)	14.067
$2^{15} = 32768$	8.819 (OK)	14.067
$2^{16} = 65536$	8.524 (OK)	14.067
$2^{17} = 131072$	7.793 (OK)	14.067

Note-se que para o caso discreto não se podem realizar testes de *Kolmogorov-Smirnov*, e como tal a análise para a distribuição de Poisson reduz-se ao teste do qui-quadrado de ajustamento e análise gráfica dos resultados obtidos. O teste qui-quadrado consistiu em agrupar os intervalos de maior probabilidade em apenas 7 intervalos, e a comparar estes com o valor que seria de esperar nos mesmos intervalos.

Pelos testes realizados e apresentados na Tabela E.3, o gerador de números com distribuição de Poisson, não ultrapassa os limites impostos, passando assim no teste do qui-quadrado.

Na Figura E.7 encontram-se representadas as funções cumulativas de probabilidade empírica e teórica, e pode-se observar que estas são muito idênticas, comprovando o resultado do teste do qui-quadrado de que os números gerados pelo gerador de números aleatórios, segue uma distribuição de Poisson.

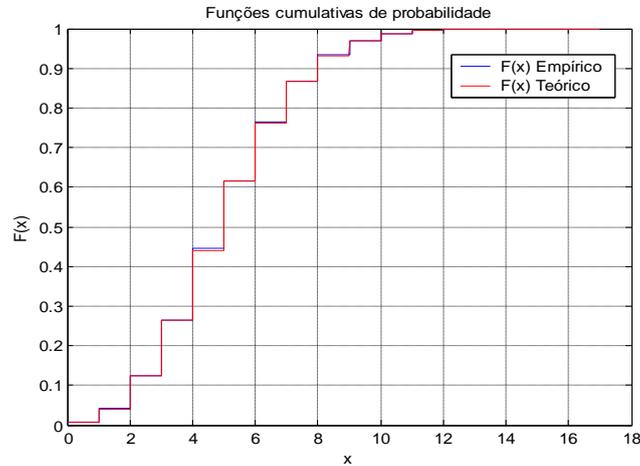


Figura E.7 – Comparação entre as funções cumulativas de probabilidade Empírica e Teórica para $\lambda=5$.

E.3.3. Distribuição de Pareto

A distribuição de Pareto segue a seguinte função densidade de probabilidade (Figura E.8) em que o α é o parâmetro de forma e o parâmetro β o parâmetro de localização:

$$f(x) = \frac{\alpha \cdot \beta^\alpha}{x^{\alpha+1}}, \quad x \in [\beta, +\infty[\quad (E.14)$$

e a função cumulativa de probabilidade (Figura E.9) é dada por:

$$F(x) = 1 - \left(\frac{\beta}{x}\right)^\alpha \quad (E.15)$$

Para a distribuição de Pareto tem-se que a média μ e a variância σ^2 são relacionadas com os parâmetros α e β , e são dadas por:

$$\mu = \frac{\beta\alpha}{\alpha - 1}, \quad \alpha > 1$$

$$\sigma^2 = \frac{\beta^2\alpha}{(\alpha - 2)(\alpha - 1)}, \quad \alpha > 2$$

A inversão efectua-se de acordo com o método da transformação inversa, que consiste na dedução

análítica da inversa de $F(x)$, o que neste caso resulta em:

$$x = \beta [1 - F(x)]^{-1/\alpha} \quad (\text{E.16})$$

e utiliza-se o seguinte algoritmo para gerar a sequência de números com distribuição exponencial X :

- Seja $U \sim U(0,1)$
- $X = \beta [1 - U]^{-1/\alpha}$

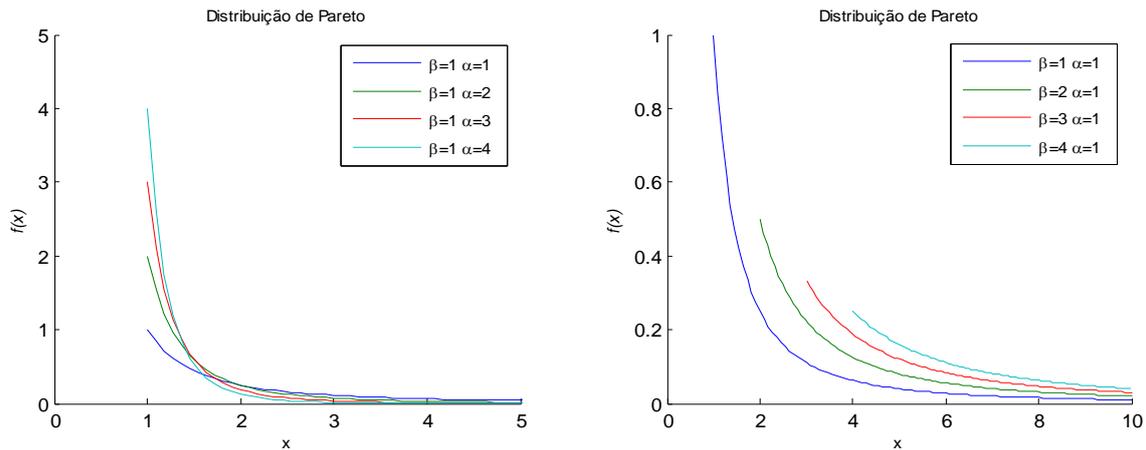


Figura E.8 – Função densidade de probabilidade da distribuição de Pareto para vários valores de α e de β .

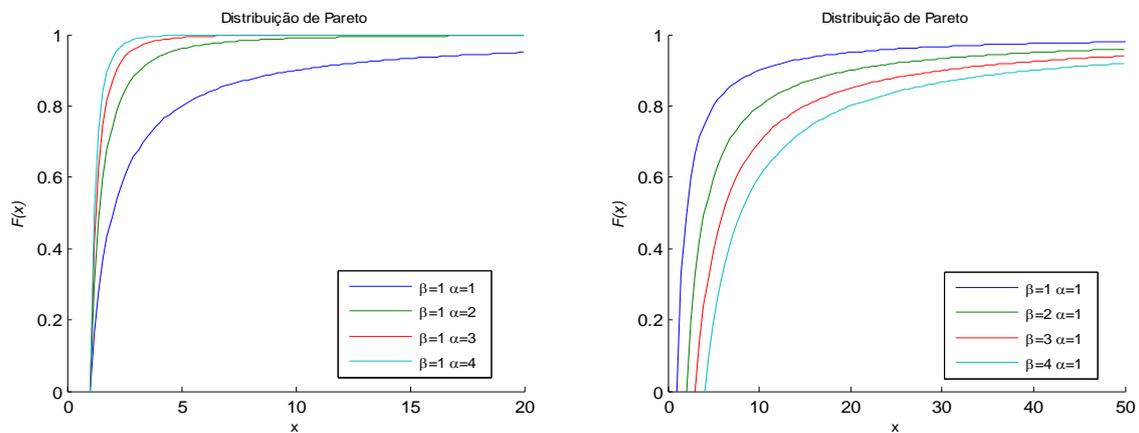


Figura E.9 – Função cumulativa de probabilidade da distribuição de Pareto para vários valores de α e de β .

Para realizarmos os testes de ajustamento, iremos necessitar, como discutido, de obter intervalos equiprováveis. A sequência de intervalos com probabilidade igual a $1/k$ é obtido através de:

$$a_j = \beta \left[1 - \frac{j}{k} \right]^{-1/\alpha} \quad (\text{E.17})$$

Tabela E.4 – Valores do teste do qui-quadrado para a distribuição de Pareto com $\alpha = 3, \beta = 5$.

# amostras	# intervalos (k)	Teste qui-quadrado (χ^2)	Limite qui-quadrado ($\chi_{k-1,1-\alpha}^2$)
$2^{15} = 32768$	$2^{12} = 4096$	4082 (OK)	4244,5
$2^{16} = 65536$	$2^{13} = 8192$	8338 (OK)	8402
$2^{17} = 131072$	$2^{14} = 16384$	16659 (OK)	16681

Tabela E.5 – Valores do teste *Kolmogorov-Smirnov* com distribuição de Pareto e $\alpha = 3, \beta = 4$ IC=95%.

# Amostras	Teste <i>Kolmogorov-Smirnov</i>	Limite <i>Kolmogorov-Smirnov</i>
$2^{15} = 32768$	0.0033 (OK)	0.0075
$2^{16} = 65536$	0.0032 (OK)	0.0053
$2^{17} = 131072$	0.0014 (OK)	0.0037
1000	0.0342 (OK)	0.0428
10000	0.0058 (OK)	0.0136
100000	0.0020 (OK)	0.0043
1000000	0.0009 (OK)	0.0014

Após a realização dos testes de ajustamento, é possível concluir, que os números gerados se aproximam de uma distribuição de Pareto. Os resultados obtidos para o teste de *Kolmogorov-Smirnov*, podem-se confirmar através do gráfico da Figura E.10, em que se pode observar que as diferenças entre a função cumulativa de probabilidade empírica e a teórica são muito reduzidas.

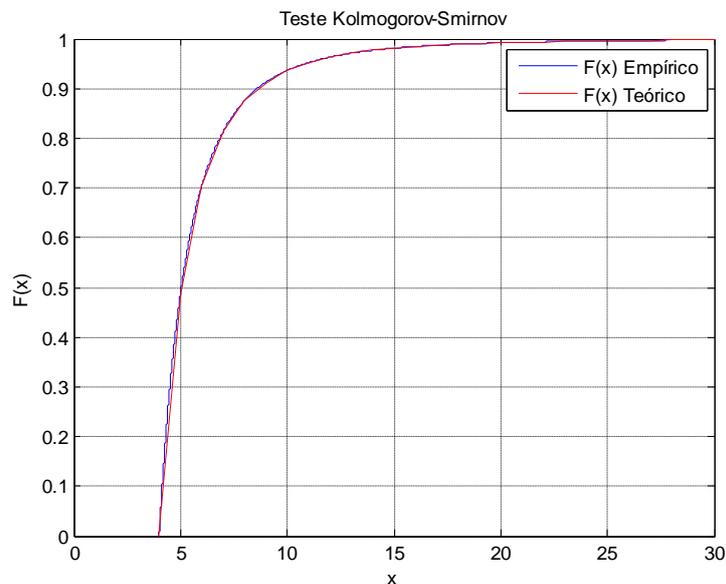


Figura E.10 – Comparação entre funções cumulativas de probabilidade teórica e empírica para 100000 amostras, $\alpha = 3, \beta = 4$.

Como foi anteriormente referido, e como se pode observar nas Figura E.11 a) e b), à medida que mais números são gerados, a aproximação a uma distribuição de Pareto é cada vez mais visível.

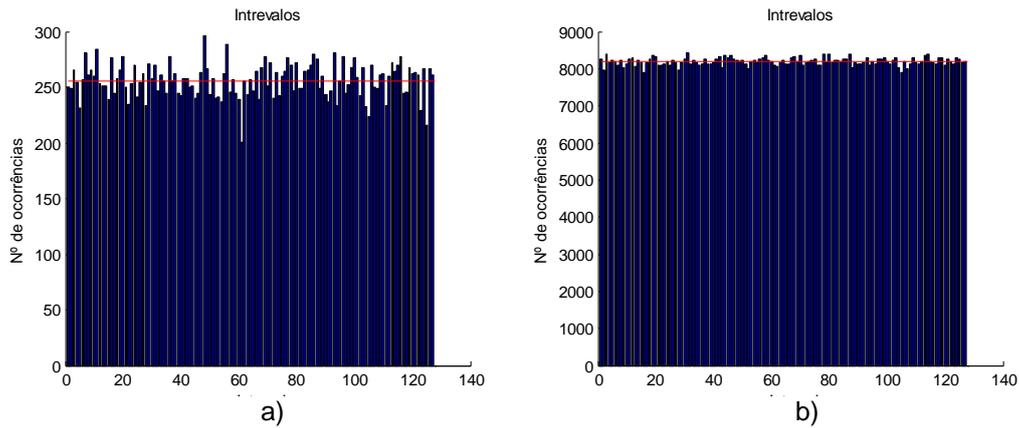


Figura E.11 – Intervalos de idêntica probabilidade para a) 2^{15} e b) 2^{20} amostras, $\alpha = 3, \beta = 4$ e 128 intervalos.

E.3.4. Distribuição geométrica

A distribuição de geométrica tem a seguinte função densidade de probabilidade [WeisMW]:

$$f(x) = \begin{cases} p(1-p)^x & \text{se } x \in \{0, 1, \dots\} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{E.18})$$

A distribuição geométrica pode ser utilizada para calcular o número de falhas antes do primeiro sucesso numa sequência independente de tentativas com probabilidade de sucesso p de cada tentativa, onde x é o número de ocorrências de um evento. A função distribuição cumulativa de probabilidade é dada por:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - (1-p)^{\lfloor x \rfloor + 1} & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (\text{E.19})$$

Para a distribuição geométrica tem-se que a média μ e a variância σ^2 são relacionadas com a probabilidade de sucesso p :

$$\mu = \frac{1-p}{p}$$

$$\sigma^2 = \frac{1-p}{p^2}$$

De seguida encontram-se representadas as funções densidade de probabilidade (Figura E.12) e cumulativa de probabilidade (Figura E.13):

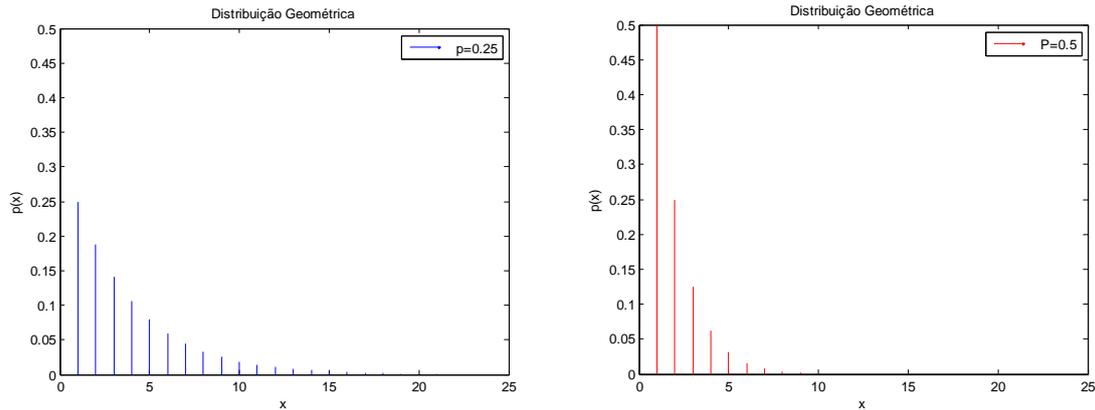


Figura E.12 – Função densidade de probabilidade da distribuição geométrica para $p=0.25$ e $p=0.5$.

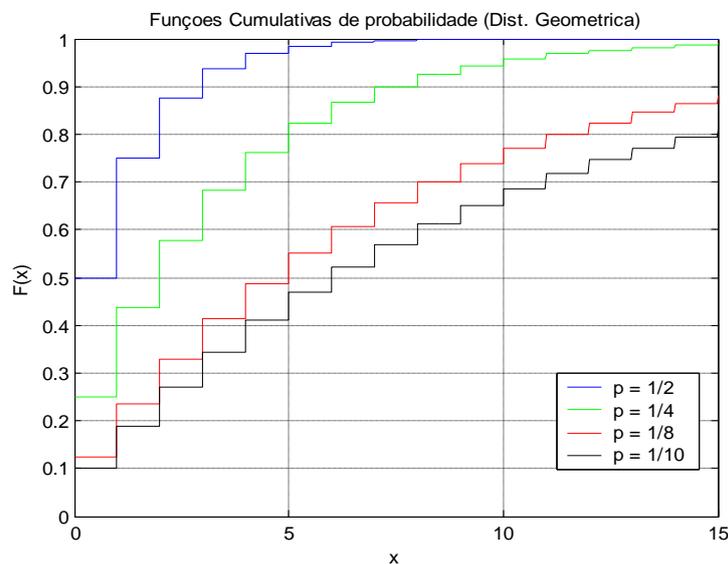


Figura E.13 – Função distribuição cumulativa de probabilidade da distribuição geométrica para vários valores de probabilidade p .

A inversão efectua-se de acordo com método da transformação inversa descrito anteriormente.

Em [LawKelton] apresenta-se o seguinte algoritmo:

- Gerar $U \sim U(0,1)$.
- Retornar $X = \left\lceil \frac{\ln(1-U)}{\ln(1-p)} \right\rceil$

Note-se que, tal como já foi referido nos testes efectuados para a distribuição de Poisson, para o caso discreto não se podem realizar testes de *Kolmogorov-Smirnov*, e como tal a análise reduz-se ao teste do qui-quadrado de ajustamento e análise gráfica dos resultados obtidos. O teste qui-quadrado consistiu em agrupar os intervalos de maior probabilidade em apenas 7 intervalos, e a comparar estes com o valor que seria de esperar nos mesmos intervalos.

Tabela E.6 – Valores do teste do qui-quadrado para a distribuição geométrica para vários valores de

p , $IC=95\%$ e $k=7$.

# Amostras	p	Teste qui-quadrado (χ^2)	Limite qui-quadrado ($\chi_{k-1,1-\alpha}^2$)($K=7$)
$2^{14} = 16384$	$\frac{1}{2}$	5.3525 (OK)	14.067
	$\frac{1}{4}$	6.7164 (OK)	
	$\frac{1}{8}$	9.4088 (OK)	
$2^{15} = 32768$	$\frac{1}{2}$	2.1765 (OK)	
	$\frac{1}{4}$	3.4831 (OK)	
	$\frac{1}{8}$	5.4627 (OK)	
$2^{16} = 65536$	$\frac{1}{2}$	5.5881 (OK)	
	$\frac{1}{4}$	9.0517 (OK)	
	$\frac{1}{8}$	5.4161 (OK)	
$2^{17} = 131072$	$\frac{1}{2}$	13.8462 (OK)	
	$\frac{1}{4}$	8.1797 (OK)	
	$\frac{1}{8}$	3.6913 (OK)	

Pelos testes realizados e apresentados na Tabela E.6, o gerador de números com distribuição geométrica, não ultrapassa os limites impostos (retirados de [LawKelton], na tabela T.2 página 739 para $K=7$ com um $IC=95\%$), passando assim no teste do qui-quadrado. Na Figura E.14 encontram-se representadas as funções cumulativas de probabilidade empírica e teórica, e pode-se observar que estas são muito idênticas, comprovando-se então dos resultados do teste do qui-quadrado, que os números gerados pelo gerador de números aleatórios, segue uma distribuição geométrica.

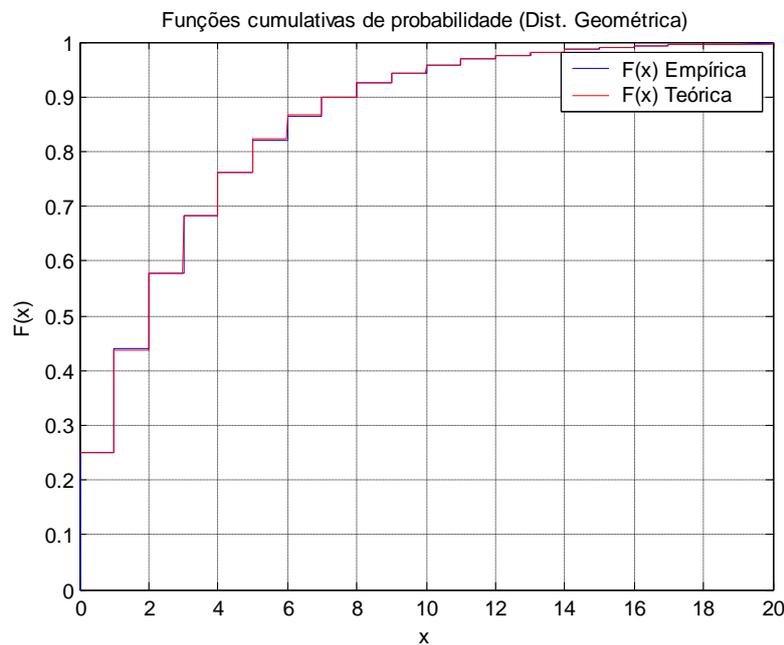


Figura E.14 – Comparação entre as funções cumulativas de probabilidade Empírica e Teórica para a distribuição geométrica para $p=1/4$.

Anexo F. Intervalo de confiança

De modo a determinar alguns limites para o erro nas estimações calculadas a partir dos resultados de uma série de simulações, é necessário saber algo sobre a relação entre simulações individuais. Se um conjunto n de resultados x_k são independentes e identicamente distribuídos com uma distribuição normal, então o intervalo (F.1), $\pm \varepsilon$, dentro do qual a média actual se situaria com probabilidade p é dado pela distribuição de t-student normalizada pela variância experimental, s .

$$\varepsilon = t_{n-1,p} \cdot \left(\frac{s^2}{n} \right)^{1/2} \quad (\text{F.1})$$

A média experimental é dada por:

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (\text{F.2})$$

A partir da qual se calcula a variância experimental:

$$s_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x}_n)^2 \quad (\text{F.3})$$

Mas quando o tamanho da amostra é $n > 30$ a distribuição de t-student aproxima-se da distribuição normal. E podem-se fazer as aproximações seguintes:

$$\begin{aligned} \mu &\cong \bar{x}_n \\ \sigma^2 &\cong s_n^2 \end{aligned} \quad (\text{F.4})$$

$$\varepsilon = z_{1-\alpha/2} \frac{s_n}{\sqrt{n}} \quad (\text{F.5})$$

em que para um intervalo de confiança de 95% se tem que $0.95 = 1 - \alpha \Leftrightarrow \alpha = 0.05$, e o valor de z (F.6) retira-se da tabela z da distribuição normal.

$$\Phi(z) = P(Z \leq z) = 1 - \frac{\alpha}{2} = 0.975, \quad z = \Phi^{-1}(\Phi(z)) = \Phi^{-1}(0.975) = 1.96 \quad (\text{F.6})$$

O intervalo de confiança para 95% é então:

$$IC_{95\%} = \left[\bar{x} - z_{1-\alpha/2} \frac{s_n}{\sqrt{n}}; \bar{x} + z_{1-\alpha/2} \frac{s_n}{\sqrt{n}} \right]. \quad (\text{F.7})$$

Anexo G. Cabeçalhos dos tipos de serviços

O tráfego dos utilizadores através da interface *lub* é transportado através de células ATM. Mas antes de a informação ser encapsulada em células ATM, é gerada uma trama denominada de *Frame Protocol* (FP) [3GPP25.435]. Na interface *lub* o FP é utilizado para a transferência de dados tanto para *uplink* como *downlink*. A cada 20ms são recebidas tramas FP pelo Nó B.

Para o tráfego de voz, o transporte de portadoras rádio sobre a interface rádio é efectuado através de canais de transporte dedicados (DCH) [3GPP25.427] tanto no sentido de *uplink* como de *downlink*.

O FP para canais dedicados torna possível ao RNC trocar tramas de dados com os terminais móveis servidos pelos seus Nós B. Para o tráfego de dados, no sentido de *downlink* (HSDPA) é utilizada a FP de alta velocidade no sentido de *downlink* para canal partilhado HS-DSCH FP (*High Speed - Downlink Shared Channel Frame Protocol*).

Para se considerar o fluxo de tráfego através da *lub*, é necessário considerar os cabeçalhos dos diferentes protocolos através da interface *lub*, de modo a obter o tráfego à saída do RNC para a *lub* implementado no simulador criado.

G.1. Serviço de Voz com *codec* AMR (*Adaptive Multi-Rate*)

Débito binário de *Backhaul* para períodos ON do serviço de voz com *codec* AMR

A trama *Frame Protocol* é constituída por 31 bytes de dados + 5 bytes de cabeçalhos ([SaCh04]). Para o caso de tráfego de baixo débito binário, típico do tráfego de voz, a ITU-T (*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*) recomenda a utilização de *ATM Adaptation Layer* tipo 2 (AAL2), de modo a que proporciona a multiplexagem de vários canais na mesma célula ATM. AAL2 consiste numa *Common Part Sublayer* (CPS) que permite que várias tramas possam ser agregadas numa única célula ATM (Figura G.2). Como uma trama FP tem 36 bytes no total, e uma célula ATM transporta 48 bytes de dados é necessária mais que uma trama FP para preencher por completo os dados da célula ATM. Quando o comprimento da segunda trama FP excede o espaço livre restante dos dados da célula ATM, a trama FP é dividida em duas partes, cada com um cabeçalho CPS de 3 bytes e inseridas separadamente em células ATM consecutivas. Assumindo que as células ATM são compostas no máximo por duas partes de tramas FP, isto é, não será considerado o caso em que uma única célula ATM é constituída por três tramas FP. No caso de existirem duas tramas FP, o cabeçalho de cada célula ATM no *backhaul* seria de 5 bytes para o cabeçalho ATM + 2*3 bytes da multiplexagem CPS para cada célula ATM. Isto resulta, em média, em cerca de $11/2 = 6$ bytes de cabeçalhos ATM/AAL2 adicionais por cada trama ATM [QUAL07].

Então, o débito binário resultante durante os períodos ON de uma chamada de voz AMR requer o envio de 31 bytes de dados FP + 5 bytes de cabeçalhos FP + 6 bytes de cabeçalhos ATM/AAL2 a cada 20ms que equivale a $42 \times 8 \times 1000 / 20 = 16.8$ kbps.

Sumário do débito binário para o período ON do serviço Voz AMR:

- i. Débito de codificação AMR = 12.2 kbps
- ii. Cabeçalhos ATM e FP (~38%) resultam num débito para o período ON = 16.8 kbps

Débito binário de *Backhaul* para períodos OFF do serviço de voz AMR

Neste caso, a *Frame Protocol* é constituída por aproximadamente zero bytes de dados + 5 bytes de cabeçalhos transmitidos a cada 20ms = $5 \times 8 \times 1000 / 20 = 2$ kbps. Para estimar os cabeçalhos de transporte ATM correspondentes ao tráfego nulo AMR, assume-se que o Nó B e a camada ATM suportam a multiplexagem até cinco tramas nulas. Neste caso, existiria um cabeçalho de *backhaul* ATM de 5 bytes de cabeçalhos ATM + 5×3 bytes de multiplexagem CPS para cada célula ATM. O que perfaz cerca de $20/5 = 4$ bytes de cabeçalhos ATM por tramas nulas AMR.

Então, o débito binário resultante durante os períodos OFF de uma chamada de voz AMR requer o envio de 5 bytes de cabeçalhos da FP + 4 bytes dos cabeçalhos ATM/AAL2 a cada 20ms que é equivalente a 3.6 kbps.

Sumário do débito binário para o período OFF do serviço Voz AMR:

- i. Débito AMR = 0
- ii. Cabeçalhos ATM e FP (~38%) resultam num débito para o período OFF = 3.6 kbps

G.2. Cabeçalhos dos serviços de dados

Na Figura G.1 encontra-se representada a camada de protocolos na interface *Iub* para transferir dados entre o equipamento móvel e o RNC. Os dados são transportados através dos canais de transporte, que podem ser comuns (*Common transport Channels - CCH*) [3GPP24.435] ou dedicados (*Dedicated transport Channels - DCH*) [3GPP25.427], para a interface rádio. O mecanismo de retransmissão do protocolo RLC (*Radio Link Control*) [3GPP25.322] garante uma transmissão fiável do tráfego sensível a perdas de pacotes pela interface rádio. O protocolo RLC é utilizado na rede UMTS para auxiliar à fiabilidade dos protocolos das camadas superiores (tal como TCP). Apenas é utilizado para serviços de PS e não se utiliza para serviços de CS.

O protocolo MAC (*Medium Access Control*) [3GPP25.321] cria conjuntos de blocos de transporte na interface rádio, e calendariza-os de forma a serem transmitidos segundo os requisitos temporais do WCDMA. Cada período calendarizado, chamado de *transmission time interval* (TTI), tem 10ms de duração.

Para a transmissão de dados na interface *Iub*, os conjuntos de blocos de transporte da camada MAC são encapsulados em tramas *Iub* de acordo com o protocolo do plano de utilizador (UP – *user plane*) para conjuntos de dados CCH ou DCH. Que no caso do HSDPA é o HS-DSCH FP (*High Speed - Downlink Shared Channel Frame Protocol*). Cada conjunto de dados do plano de utilizador necessita de uma ligação de rede de transporte separada, entre o RNC e o Nó B. A rede de transporte estabelece uma ligação AAL2 para cada conjunto de dados.

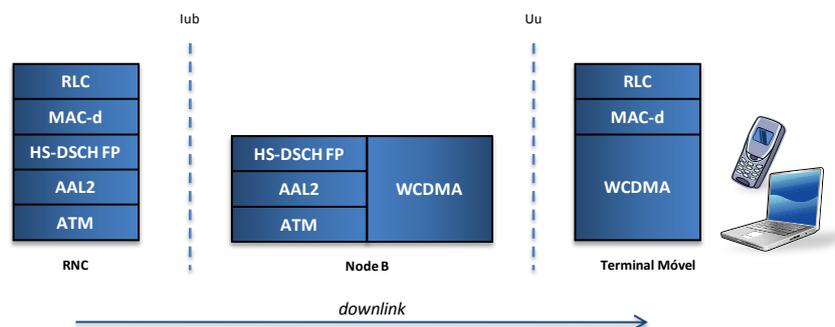


Figura G.1 – Arquitectura do plano de utilizador.

São apresentadas em seguida breves descrições dos protocolos representados na Figura G..

RLC – O protocolo RLC pertence à camada de ligação de dados para WCDMA. Efectua controlo de retransmissão de dados entre outras funções. O tamanho do cabeçalho da trama RLC é variável, e pode tomar os valores de 0, 1 ou 2 bytes (para obter informação detalhada consultar a bibliografia [3GPP25.322]). Neste trabalho considera-se que o tamanho do cabeçalho do protocolo RLC é 2 bytes.

MAC – A camada MAC fornece o transporte de dados em canais lógicos. Um conjunto de tipos de canais lógicos é definido para diferentes tipos de serviços de transferência de dados. Cada tipo de canal lógico é definido pelo tipo de informação a ser transferida.

O MAC-d é a entidade MAC que é responsável pela manipulação de canais dedicados lógicos e de canais de transporte dedicados (DCH) destinados ao equipamento do utilizador.

Os cabeçalhos da camada MAC são opcionais, e de tamanho variável. O conteúdo e o tamanho do cabeçalho da camada MAC dependem do tipo de canal lógico. Não é contabilizado o cabeçalho introduzido pela camada MAC, e a trama MAC-d tem 40 bytes de dimensão.

HS-DSCH FP – A trama HS-DSCH é o canal de transporte que transporta o tráfego HSDPA do utilizador. Na literatura [3GPP25.427] encontra-se esquematizada a trama DSCH. De [NORT05] e de [3GPP25.427] retira-se que o cabeçalho da trama HS-DSCH FP é de 5 bytes.

AAL2 e ATM – As tramas dos utilizadores são segmentadas e agrupadas em pacotes CPS (*common-part sub-layer*) AAL2, que são multiplexados em células ATM (Figura G.2). A carga útil da trama AAL2 pode variar em comprimento (até 45 bytes). O cabeçalho tem 3 bytes de comprimento. As células ATM têm 53 bytes de comprimento, incluindo um cabeçalho de 5 bytes. Devido à multiplexagem da camada AAL2, os pacotes AAL2 de várias ligações AAL2 podem ser transportadas numa conexão virtual (VCC) ATM. Cada célula ATM no VCC pode transportar pacotes de diferentes conexões AAL2 (a título de exemplo, na Figura G.2 encontram-se representadas quatro conexões). O campo do identificador de conexão (CDI) em cada cabeçalho de cada conexão AAL2 identifica a conexão AAL2 a que o pacote pertence, o mesmo acontece com os campos do identificador comum de caminho (VPI) e de canal (VCI) no cabeçalho da célula ATM que identificam a VCC ATM.

O octeto STF incluído na carga útil da célula ATM consiste dos seguintes sub-campos: 6 bits de Offset, usados para indicar (em octetos) o começo do próximo pacote CPS ou, na ausência deste, até o início do campo PAD (bits de “enchimento”); 1 bit para o número de sequência; e 1 bit para

paridade usado pelo receptor para detectar erros no STF.

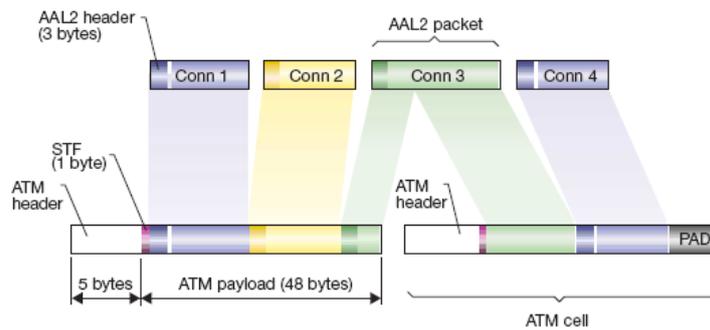


Figura G.2 – Multiplexagem das células ATM.

Na Figura G.3 encontra-se esquematizada a trama ATM a enviar através da interface *Iub*.

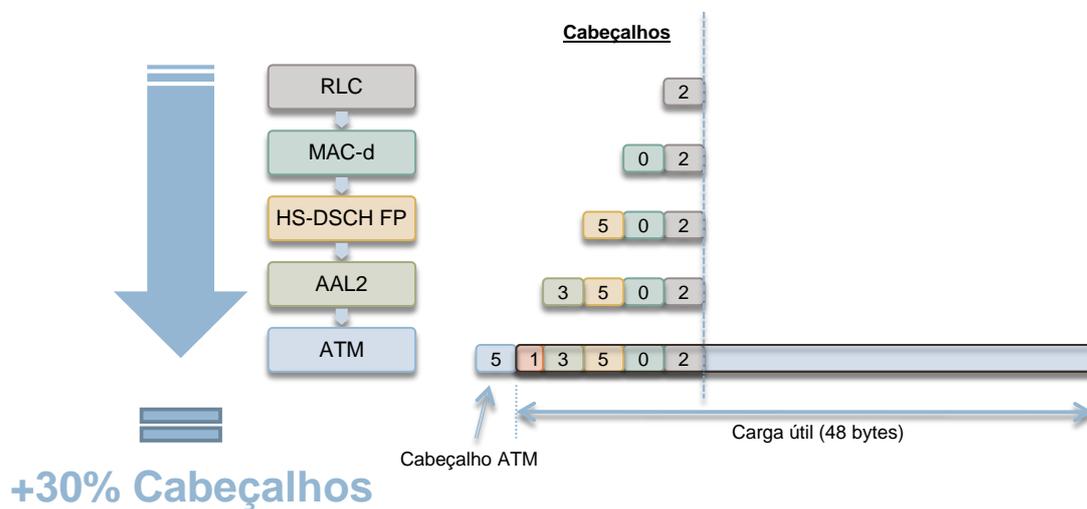


Figura G.3 – Cabeçalhos a adicionar para transmitir através da interface *Iub*.

Na Figura G.3 encontra-se representado o número de bytes associado a cada um dos cabeçalhos a adicionar às tramas ATM para cada um dos diferentes protocolos descritos anteriormente. Somando todos os cabeçalhos, obtém-se que são utilizados em média cerca de 16 bytes de cada trama ATM apenas para cabeçalhos. Sabe-se que cada trama ATM tem 53 bytes, logo por cada trama ATM são adicionados $16/53 = 30\%$ de cabeçalhos.

Para efeitos de simulação, e tendo em consideração o resultado anterior, apenas são adicionados 30% de cabeçalhos aos dados gerados aleatoriamente pelo simulador criado, e transmitidos do RNC para o utilizador no sentido de *downlink*.

Anexo H. Equipamentos de Acesso 3.5G

Na Figura H.1 são apresentados os equipamentos de acesso à banda larga móvel disponíveis pela Vodafone em 2007.

O Vodafone *Mobile Connect Card* (Figura H.1 - A) é uma placa de transmissão de dados que lhe permite aceder em banda larga ao e-mail e à Internet, com velocidades até 7,2 Mbps utilizando o tradicional formato *PC Card* ou o inovador *Express Card*. O Vodafone *Internet Connect Box* (Figura H.1 - B) é um módulo USB que lhe permite aceder em mobilidade à Internet e ao e-mail, com velocidades até 7,2 Mbps.



Figura H.1 – Equipamento de Acesso de Banda larga móvel (Vodafone).

Cobertura para Portugal em 2007

A rede 3G Banda Larga 1,8 Mbps da Vodafone encontra-se presente nas principais cidades de Portugal. A rede 3G Banda Larga 3,6 Mbps já pode ser acedida nas cidades de Lisboa e Porto e no Algarve. No entanto o alargamento da cobertura a 3,6 Mbps continua em plena expansão. Na utilização do serviço será sempre garantido o acesso à rede de maior velocidade que estiver disponível e que o equipamento e tarifário do assinante o permitam (Banda Larga 7.2 Mbps, 3.6 Mbps, 1.8 Mbps ou 384kbps por esta ordem), garantindo-se assim a possibilidade de aceder à Internet em todo o território nacional.

Anexo I. Interface gráfica do Simulador de tráfego

Como forma de simplificar a utilização do simulador, tornando-o mais *user-friendly*, foi criada uma interface gráfica através do GUI do Matlab. Interface essa, que serve para definir quais os parâmetros de simulação, sendo possível no final visualizar diferentes tipos de gráficos relativos a essa simulação. Os gráficos possíveis de se visualizar são a ocupação total do Ponto-Multiponto (PMP), o número de utilizadores a utilizar banda num dado momento e ainda um gráfico em que se apresenta o tráfego relativo a cada terminal remoto (RT). Existe também a possibilidade de guardar os dados numa folha de cálculo do Microsoft Excel para futuras análises.

Na Figura I.1 encontra-se representada a janela principal do simulador criado em Matlab. Esta janela tem como objectivo a definição dos parâmetros da simulação bem como a escolha do tipo de gráfico a visualizar ou gravar os dados para um ficheiro. Os valores apresentados, são os valores *default*.

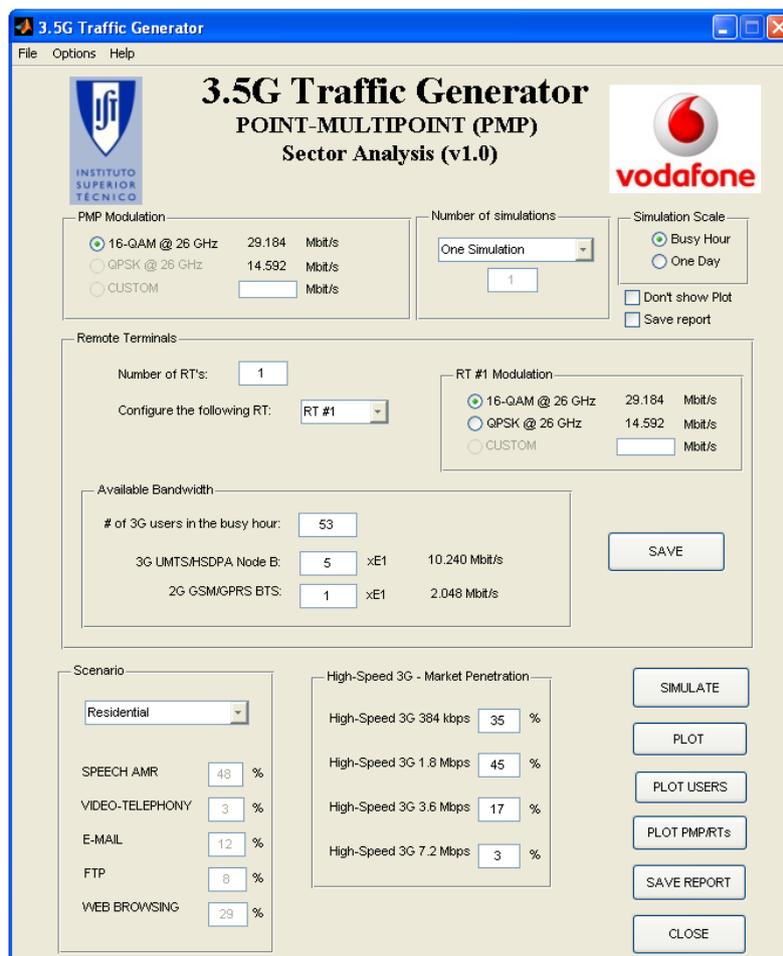


Figura I.1 – Janela principal da interface gráfica do simulador criado em Matlab.

Na Figura I.2 está representado o local onde se define qual a modulação em que o sistema PMP

se encontra a funcionar para comunicar com os RTs. Actualmente existem apenas duas modelações de funcionamento, QPSK e 16-QAM. Mas de modo a que o simulador seja adaptável, encontra-se um campo “CUSTOM” onde é possível inserir a o débito binário alcançável com uma nova modulação.

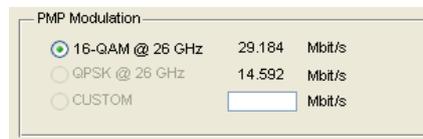


Figura I.2 – Modulação do sistema PMP.

Na Figura I.3 é possível definir o número de simulações a realizar com os mesmos parâmetros. Pode ser escolhida apenas uma simulação, ou várias simulações.

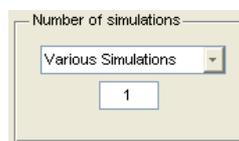


Figura I.3 – Número de Simulações

Na Figura I.4 encontram-se duas opções extra que facilitam as simulações. No final de cada simulação, encontra-se pré-definido que se apresente um gráfico resultante da simulação realizada. Pode-se seleccionar a opção de não mostrar o gráfico do PMP para que não seja apresentado um gráfico no final de cada simulação (útil para várias simulações). Existe também a opção de definir que se grave um ficheiro com os dados relativos à simulação, para posterior análise. Esse ficheiro chamar-se há “*Report.xls*” e ficará localizado na pasta onde o programa irá ser executado.

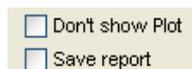


Figura I.4 – Outras opções

As características relativas a cada terminal remoto (RT) são definidas na Figura I.5. Em primeiro lugar, é necessário definir o número de RTs. De seguida, para cada RT (que se selecciona no pop-up menu) escolhe-se a modulação com que esse RT transmite para o PMP. É necessário definir também, o número de E1s correspondente aos serviços 2G a reservar nesse RT, e o número de E1s para o serviço 3G. É necessário definir também, qual o número de utilizadores que irão efectuar os serviços modelados na área de cobertura do RT durante a *busy hour*. O botão *Save*, é utilizado para guardar as características definidas para cada RT, incluindo o cenário (apresentado na Figura I.6 A).

Remote Terminals

Number of RT's:

Configure the following RT:

RT #1 Modulation

- 16-QAM @ 26 GHz 29.184 Mbit/s
- QPSK @ 26 GHz 14.592 Mbit/s
- CUSTOM

Available Bandwidth

of 3G users in the busy hour:

3G UMTS/HSDPA Node B: xE1 10.240 Mbit/s

2G GSM/GPRS BTS: xE1 2.048 Mbit/s

Figura I.5 – Terminais remotos.

Um aspecto importante a ter em consideração na realização das simulações, é os cenários cobertos pelos RTs. Esses cenários podem ser definidos nos campos apresentados na Figura I.6. Na parte A define-se a utilização dos diferentes serviços para um dado RT. Existem já alguns cenários pré-definidos apresentados na secção 5.2, e também um cenário “CUSTOM” que permite definir um cenário não existente. De notar que a soma das percentagens de cada um dos serviços terá que igualar os 100% (assumindo-se então que cada utilizador efectua apenas um serviço). Na parte B, é definida a penetração de mercado das placas 3G no mercado. Limitando o débito disponível por cada utilizador.

Scenario

SPEECH AMR %

VIDEO-TELEPHONY %

E-MAIL %

FTP %

WEB BROWSING %

High-Speed 3G - Market Penetration

High-Speed 3G 384 kbps %

High-Speed 3G 1.8 Mbps %

High-Speed 3G 3.6 Mbps %

High-Speed 3G 7.2 Mbps %

(A) (B)

Figura I.6 – Cenários e penetração do mercado 3G.

A simulação é executada quando se prime o botão *Simulate* apresentado na Figura I.7. O botão *Plot* apresenta um gráfico com o tráfego total do PMP. O botão *Plot Users* apresenta um gráfico onde mostra o número de utilizadores activos por instante de tempo. O botão *Plot PMP/RTs* irá criar um gráfico onde são apresentados: o gráfico total do PMP, e os gráficos de cada RT que seja abrangido pelo PMP. Se na Figura I.4 não foi seleccionada a opção de gravar os dados para um ficheiro, e se pretenderem gravar os dados, é possível, premindo o botão *Save Report*, que cria um ficheiro “*Report.xls*” na pasta de execução da aplicação. Existe também a opção de fechar a aplicação,

pressionando o botão *Close* ou seleccionando *Exit* no menu *File*.



Figura I.7 – Botões do simulador.

Na Figura I.8 encontra-se o resultado de uma simulação, premindo o botão *Plot PMP/RTs*, para os valores *default* que se encontram na Figura I.1 para 3 RTs que cobrem uma área residencial.

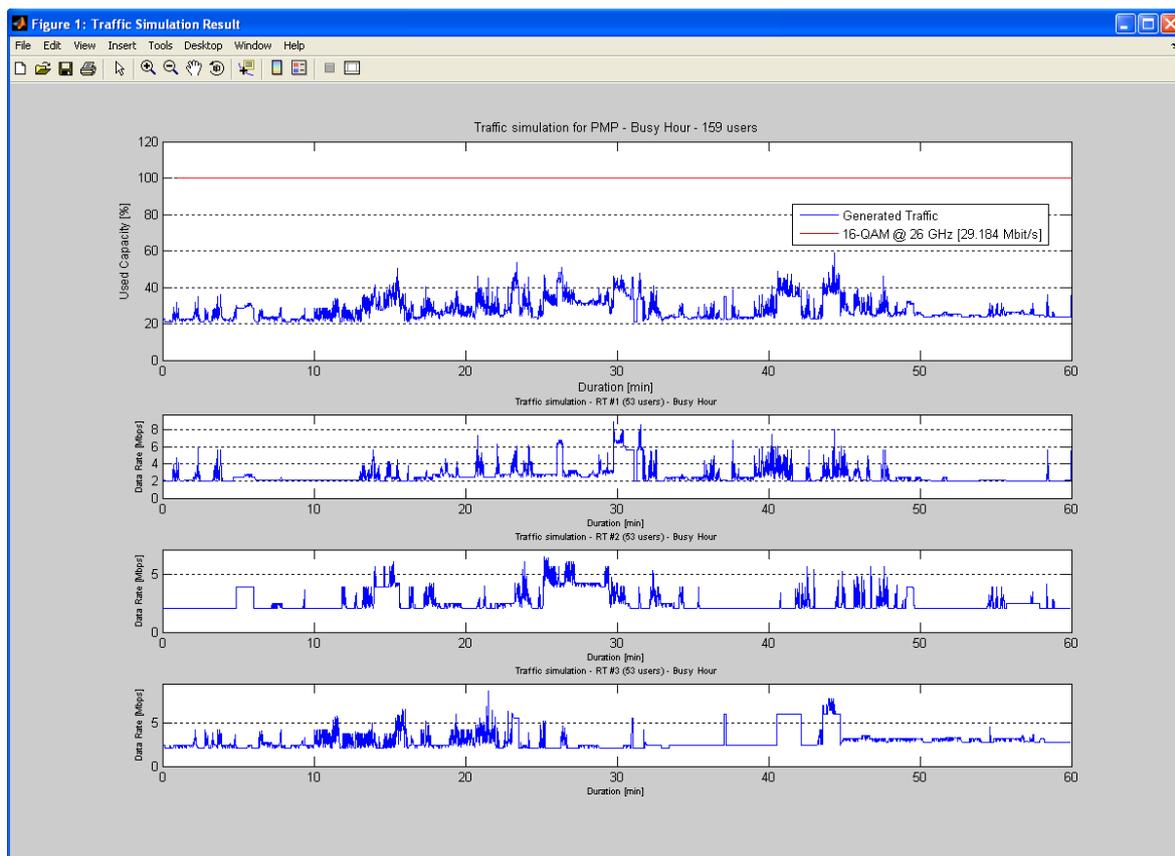


Figura I.8 – Resultado de uma simulação para 3 RTs numa área residencial.

Referências

- [3GPP22.100] 3GPP TS 22.100, *UMTS phase 1 Release 99*.
- [3GPP22.105] 3GPP TS 22.105, *Services and Service Capabilities*.
- [3GPP23.002] 3GPP TS 23.002, *Network Architecture*.
- [3GPP23.107] 3GPP TS 23.107, *Quality of Service (QoS) concept and architecture*.
- [3GPP24.435] 3GPP TS 25.435, *UTRAN Iub Interface User Plane Protocols for Common Transport Channel Data Streams*.
- [3GPP25.308] 3GPP TS 25.308, *UTRA High Speed Downlink Packet Access (HSDPA) – Overall description (Release 5)*.
- [3GPP25.321] 3GPP TS 25.321, *Medium Access Control (MAC) protocol specification*.
- [3GPP25.322] 3GPP TS 25.322, *Radio Link Control (RLC) protocol specification*.
- [3GPP25.331] 3GPP TS 25.331, *Radio Resource Control (RRC) - Protocol Specification*.
- [3GPP25.401] 3GPP TS 25.401, *UTRAN overall description*.
- [3GPP25.427] 3GPP TS 25.427, *UTRAN Iub/Iur interface user plane protocol for DCH data streams*.
- [3GPP25.430] 3GPP TS 25.430; *UTRAN Iub Interface: General Aspects and Principles (R99); 2001*.
- [3GPP25.435] 3GPP TS 25.435, *UTRAN Iub Interface User Plane Protocols for Common Transport Channel data streams*.
- [3GPP25.933] 3GPP TR 25.933, *IP Transport in UTRAN*.
- [3GPP26.071] 3GPP TS 26.071, *AMR Speech Codec; General Description*.

- [3GPP26.090] 3G TS 26.090: *AMR Speech Codec; Transcoding functions*.
- [3GPP99] 3GPP TSGR1#6(99)818; *RACH Capacity Analysis-Packet 1*; TSG-RAN WG 1 meeting #6; Espoo, Finlândia; Julho 1999.
- [3GPPw] 3rd Generation Partnership Project; <http://www.3gpp.com>.
- [Alva01] Alvarion, white paper; *Mobile Telephony Base Station Feeding Using Wireless Point-to-Multipoint Technology*, 2001
- [Anac07] Anacom; *Serviços de Comunicações Electrónicas Móveis, Serviço Telefónico Móvel*, 2^o trimestre 2007.
- [Anac08] Anacom, *Serviços de Comunicações Electrónicas Móveis - 4.º Trimestre de 2007; 3 de Março de 2008*
- [ATMF99] ATM Forum; AF-TM-0121.000; *Traffic Management Specification Version 4.1*; Março de 1999.
- [ATMFw] ATM Forum; <http://www.mfaforum.org>.
- [BrAg02] Alex Brand, Hamid Aghvami; *Multiple Access Protocols for Mobile Communications GPRS, UMTS and Beyond*, John Wiley and Sons, 2002
- [Cisc05] Cisco Systems, Inc.; white paper; *The Business Case for GSM and UMTS Backhaul Optimization with Cisco RAN Optimization*; 2005
- [Cisc07] Cisco Systems, Inc.; white paper; *Cisco RAN Optimization Solution for GSM and UMTS Backhaul Optimization: Application*; 2007
- [CKLM06] Curcio, Igor; Kalliokulju, Juha; Lundan, Miikka; *AMR mode selection enhancement in 3G networks*, Multimedia Tools and Applications, Volume 28, Número 3, Março 2006 , pp. 259-281(23), Springer.
- [CoRo05] Correia Luís M, Rodrigues Carlos; *Analysis of the influence of multiservice users mobility on UMTS-FDD performance*; IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications; 2005.
- [DoPa06] Donegan Patrick; *Backhaul Strategies for Mobile Carriers*; Heavy Reading; Março 2006.
- [ETSI02] ETSI; *Fixed Radio Systems; Point-to-multipoint equipment; Point-to-multipoint digital radio systems in frequency bands in the range 24,25 GHz to 29,5 GHz using different access methods*; EN 301 213 V1.1.2; Fev. 2002.
- [ETSI98] ETSI Technical Report TR 101 112, *Selection Procedures for the Choice of Radio*

- [FeVe04] Ferreira, Jaime; Velez, Fernando J.; "*Deployment Scenarios and Applications Characterization for Enhanced UMTS Simulation*", Proc IEE 3G Conf., London, United Kingdom, Vol. - , pp. 138 - 142, Outubro, 2004.
- [FeVe05] Ferreira, J.; F. J. Velez; *Enhanced UMTS Services and Applications Characterization*, Teletronikk, Vol.101, No.1, pp.113-131, Março, 2005.
- [Forumw] UMTS Forum; <http://www.umts-forum.org/>.
- [GABV02] A. B. García, E. García, M. Álvarez-Campana, J. Berrocal e E. Vázquez; *A Simulation Tool for Dimensioning and Performance Evaluation of the UMTS Terrestrial Radio Access Network*, Dept. Ingeniería de Sistemas Telemáticos, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha, 2002.
- [GKRZ04] Gebala M. Kutylowski M. Rószanski B. Zawada M.; *Optimized UTRAN topology planning including Point-To-Multipoint equipment*; 3rd Polish-German Teletraffic Symposium;
- [GVAC] Garcia A., Vázquez E., Álvarez-Campana M.; *Strategies for the efficient dimensioning of 3G mobile access networks*; Madrid.
- [HaRM03] Timo Halonen, Javier Romero, Juan Melero; *GSM, GPRS and EDGE Performance - Evolution towards 3G/UMTS*, John Wiley and Sons, 2003
- [HoTo04] Harri Holma, Antti Toskala; *WCDMA FOR UMTS Radio Access for Third Generation Mobile Communications Third Edition*, John Wiley and Sons, 2004;
- [HUGH02] Hughes Network Systems; *Airlink Management in Point-To-Point Systems: An Examination of FDMA, FDD and TD*; 2002.
- [Hugh03] Hughes Network Systems; White paper, *Backhauling 3G and 2G Traffic with Point-to-Multipoint Radio Systems*, Janeiro 2003.
- [HUGH05] Hughes; *Aireach[®] Broadband 9400 Product Description (Release 8.4)*; Junho, 2005.
- [HUGH05b] Hughes Network Systems; *Hughes AB9400 Advantages for 2G/3G cellular Transmission*, Dezembro 2005.
- [IEEE03] IEEE; C802.20-03/43; *802.20 Evaluation Methodology Strawman*; IEEE 802.20 Working Group on Mobile Broadband Wireless Access; 2003.
- [INEw] Instituto Nacional de Estatística; <http://www.ine.pt>.
- [ITUTI.371] ITU-T, Rec. I.371; *Traffic control and congestion control in B-ISDN*, Agosto de 1996.

- [JoFu05] Johansson Klas; Furuskär Anders; *Cost efficient capacity expansion strategies using multi-access networks*; IEEE 61st; Volume 5; Junho 2005, Pág.: 2989 - 2993 Vol. 5
- [Kara97] Karabek, R., *A native ATM protocol architecture design and performance evaluation*, Proceedings of the 22nd Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, Pag. 204-210, 1997.
- [KLLM01] Klemm A., Lindemann C., Lohmann M.; *Traffic Modeling and Characterization for UMTS Networks*, Proc. IEEE Globecom 2001, Novembro 2001.
- [KNRR02] Bo Karlander, Szilveszter Nádas, Sandor Rácz e Jonas Reinius; *AAL2 switching in the WCDMA radio access network*, Ericsson Review No. 3, 2002, pág. 114.
- [LaKe91] Law Averil, Kelton W. David; *Simulation Modeling & Analysis*; McGraw-Hill, 1991.
- [NORT05] Nortel, *HSDPA impact on UTRAN dimensioning*; Abril, 2005
- [QUAL04] Qualcomm, White Paper, *HSDPA for Improved Downlink Data Transfer*, October 2004.
- [QUAL07] Qualcomm; *UMTS/HSDPA Backhaul Bandwidth Dimensioning*; Maio, 2007.
- [SaCh04] Samhat, A.; Chahed, T.; *Modeling and Analysis of Transport of Voice and Data in the UMTS Radio Access Network: IP versus AAL2/ATM*; Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE Vol.2, Março 2004.
- [SGHC02] Szlovenscak, A. Godor, I. Harmatos, J. Cinkler, T., *Planning reliable UMTS Terrestrial Access Networks*, IEEE Com. Mazine, p. 66-72, Jan. 2002.
- [Step74] Stephens, M. A. (1974). *EDF Statistics for goodness of fit and some comparisons*. J. Amer. Stat. Assoc., 69, 730–737.
- [TGSL01] P. Tran-Gia; D. Staehle; K. Leibnitz; *Source Traffic Modeling of Wireless Applications*, International Journal of Electronics and Communications (AEÜ), 55(1),1-10, 2001.
- [ViCo05] Vieira Benjamim, Conceição Diogo; *Análise e Simulação de uma rede IP sobre WDM com topologia física em anel*; IST, TFC, 2005.
- [WeisMW] Weisstein, Eric W.; *Geometric Distribution*; MathWorld - A Wolfram Web Resource <http://mathworld.wolfram.com/GeometricDistribution.html>.
- [WIREw] WIRESHARK; <http://www.wireshark.org/>.
- [WLTG06] Weerawardane Thushara, Li Xi, Timm-Giel Andreas, Görg Carmelita, *Modeling and Simulation of UMTS HSDPA in OPNET*, OPNETWORK 2006, Washington D.C., USA.