UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

Dimensionamento de capacidade rádio numa rede GSM/GPRS

Francisco Ferraz Leal Villanueva, nº 47969, AE de Telecomunicações

LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES
Relatório de Trabalho Final de Curso
47/2003/L

Prof. Orientador: Luís M. Correia

Outubro de 2004

Agradecimentos

Quero agradecer a todos os que contribuíram na elaboração deste trabalho. Em primeiro lugar, ao Prof. Luís Correia, cuja orientação e disponibilidade permanentes foram essenciais à execução do trabalho. Agradeço também à *Optimus*, nomeadamente ao Eng.º David Antunes, pelo apoio e amabilidade extremas (ao ponto de me atender nas suas férias) e ainda à Eng.ª Ana Claro, pelo fornecimento de dados e informação relevantes para este estudo.

Aos meus colegas, cuja boa disposição e ajuda foram essenciais na elaboração deste trabalho. Quero agradecer em especial aos colegas que partilharam comigo o laboratório: Daniel Sebastião (pelas preciosas ajudas em detalhes técnicos, conselhos e busca de material para o trabalho), João Cardeiro (por se debruçar comigo em análises teóricas e boa disposição), Luís Gonçalves (pela sua imensa paciência e fantástica colaboração na construção do simulador e explicações do seu projecto), Luís Pires (também muito paciente e extremamente amável com as explicações no seu projecto), Pedro Fernandes (pela ajuda final no trabalho) e ao Maciej (pelo espírito de companheirismo). Não podia deixar de fora a minha querida colega e amiga, Sofia Pires, que me acompanhou desde início, o João Dias, cuja amizade se revelou surpreendentemente agradável, pelo seu apoio e paciência formidáveis.

Agradeço à minha família, em especial, à minha mãe por me ajudar a rever o trabalho.

Quero aproveitar também para agradecer a Michiel Jansen e ao Prof. Manuel Moraes pelo esclarecimento de dúvidas na validação de geradores de números estatísticos.

Por fim, quero agradecer a quem me aconselhou ao longo do curso (e mesmo até a este trabalho): Prof. Isabel Trancoso.

Resumo

O objectivo deste trabalho é o estudo, análise e optimização de tráfego em redes GSM/GPRS. Não há modelos analíticos existentes para o estudo de tráfego nestas redes, pelo que se desenvolveu um simulador em C++ com tráfego diferenciado para esse fim. Este simulador de GSM/GPRS contém um gerador de tráfego de utilizadores, gestor de recursos e fila de transmissão.

No gerador de tráfego, implentaram-se os serviços: Voz, FTP, *E-mail*, *Internet* via WWW, *Internet* via WAP, MMS e *Video streaming*. Os serviços foram modelados e adaptados para GSM/GPRS, de acordo com os modelos de tráfego descritos na literatura actual. Os valores utilizados no gerador de tráfego foram adaptados de estatísticas da rede do operador *Optimus*.

No gestor de recursos, procede-se à atribuição de canais pelos diferentes serviços de GSM/GPRS, seguindo o modelo de *best-effort*. Os serviços em comutação de circuitos (voz), detêm prioridade no uso de recursos partilhados face aos serviços em comutação de pacotes (FTP, *E-mail*, *Internet* via WWW, *Internet* via WAP, MMS e *Video streaming*). Implementou-se o mecanismo de *Intra-cell handover* para optimização na utilização de recursos.

Na fila de transmissão, representa-se a transmissão de dados das chamadas PS, seguindo o modelo *First In, First Out*. A transmissão de dados considera a classe *Multislot*, o *coding-scheme* correspondente a um determinado C/I e o número de canais atribuídos ao terminal móvel.

O estudo do tráfego foi feito com base em cenários baseados na rede actual do operador *Optimus*. A simulação do cenário actual mostrou que o tráfego GPRS é reduzido (1 chamada por hora com volume médio de 67,7 kB) e não influencia o dimensionamento de GSM.

Simularam-se cenários de crescimento de utilizadores de comutação de circuitos e PS. Concluiu-se que para aumentos de 25% dos utilizadores de comutação de circuitos, o bloqueio dimensionado se mantém. No caso de cenários de aumento de utilizadores PS, concluiu-se que a partir de aumentos de 500%, a rede actual não tem capacidade para suportar eficientemente o tráfego de dados. Estudaram-se diferentes configurações de PDCHs e concluiu-se que o uso de PDCHs partilhados para serviços do tipo *bursty* (*Internet* via WWW e WAP) é o mais indicado; nomeadamente, a configuração de 2 PDCHs reservados e 4 PDCHs partilhados para os cenários simulados.

Criaram-se cenários de simulação para estudo do mecanismo de fecho do *Delayed downlink Temporary Block Flow*. Concluiu-se que o uso deste mecanismo deve ser exclusivo para chamadas do tipo *bursty* (*Internet* via WWW e WAP) e apresenta melhoria na transmissão para 0,5 segundos de duração. As chamadas do tipo *on-off* (FTP, *E-mail*, MMS e *Video streaming*) apresentam uma degradação na transmissão ao utilizar este mecanismo.

Por fim, analisaram-se os critérios de decisão de *coding-scheme*. Procedeu-se a simulações onde se empregou saltos em frequência e diferentes perfis *Typical Urban* de GSM (TU3 e TU50). Concluiu-se que o uso de saltos em frequência e o uso de perfis TU3 e TU50 não apresentam variações significativas na transmissão. Observou-se que os critérios de decisão em *downlink* utilizam débitos mais reduzidos (i.e., em média, utiliza mais *coding-scheme* reduzidos) e variam os *coding-schemes* mais suavemente (em média, num intervalo de 4,82 kb/s) que o *uplink* (variações mais abruptas; atinge em média, um intervalo de variação de 21,04 kb/s), nas transmissões de dados. A diferença de débitos médios em DL para o UL é próxima de 18 kb/s.

Palavras Chave: GSM/GPRS, Tráfego, PS, CS, Simulação

Abstract

The objective of this work is the study, analysis and optimization of traffic in GSM/GPRS networks. The inexistence of analytical models for traffic in GSM/GPRS network, led to the development of a simulator in C++ with differentiated traffic. This simulator is formed by 3 essential blocks: user traffic generator, resource manager and transmission queue.

In user traffic generator, the following services were implemented: speech, FTP, E-mail, Internet via WWW, Internet via WAP, MMS and Video streaming. All the services were modelled and adapted to GSM/GPRS networks, according to the current literature on the subject. The values used on the user traffic generator were based on usage data of the network of the operator *Optimus*.

The resource manager deals with channel allocation for each service according to the best-effort model. The circuit switching services (speech) have priority on the allocation of shared resources, when contending with packet switching services (FTP, E-mail, Internet via WWW, Internet via WAP, MMS e Video streaming). The resource manager has also the Intra-cell handover capability, for more efficient resource usage.

The transmission queue represents the transmission of PS calls, according to FIFO model. The parameters taken in account in this block are: Multislot class, coding-scheme (set according to a C/I) and the channels allocated for mobile terminal.

The study of traffic was based on scenarios of the operator *Optimus*'s actual network. Simulations of the actual scenario indicate that GPRS traffic load is very small (an average of 1 call per hour with a data volume of 67.7 kB). Therefore, the GSM capacity remains unchanged.

Scenarios of user (circuit switching e packet switching) growth were simulated. The results show that the 25% growth of circuit switching user doesn't exceed the blocking limit. As for PS user growth, when it reaches 500%, the current network does not have enough capacity for efficient data transmission. The simulation of different PDCH configuration demonstrated that the usage of shared PDCH for bursty traffic type (Internet via WWW and via WAP) is recommended; the usage of 4 shared PDCHs with 2 PDCHs proved to be adequate for the presented traffic.

More scenarios were designed to study the Delayed downlink Temporary Block Flow release mechanism. The results demonstrate that this mechanism is only appropriate for bursty traffic type (Internet via WWW and via WAP); good results were attained for a duration of 0.5 seconds. As for the transmission of on-off traffic type (FTP, E-mail, MMS and Video streaming), this mechanism only spoils it.

The work concludes with the study of coding-scheme decision algorithms. The simulations were conducted in order to observe the impact of frequency hopping and different Typical Urban GSM profiles (TU3 and TU50). The results present no significant change on the transmission when using frequency hopping, as well as changing TU3 to TU50. The downlink algorithm shows average lower throughput (an average of 18 kb/s less), due the frequent use of lower coding-schemes, and also a smoother variation (an average interval of 4.82 kb/s); as for the uplink, the coding-schemes change faster (an average interval of 21.04 kb/s).

Keywords: GSM/GPRS, Traffic, Throughput, Channel allocation, Simulation

Índice

Agradecimentos i
Resumo iii
Abstract iv
Índice v
Lista de Figuras vii
Lista de Tabelas x
Lista de Siglas xii
Lista de Símbolos xiv
1. Introdução 1
2. Aspectos Básicos 3
2.1 Estrutura da Rede 3
2.2 Canais 4
2.3 Serviços e Aplicações 7
3. Modelos 9
3.1 Modelos de Tráfego 9
3.2 QoS no GPRS 13
3.3 Esquemas de Codificação (CS-*n*) 15
3.4 Gestão de Recursos 16
3.5 Classes *Multislot* 18
4. Descrição do Simulador 19
4.1 Perspectiva Geral 19
4.2 Entradas 21
4.3 Modelos 23
4.4 Saídas 29
5. Análise de resultados 33
5.1 Cenários 33
5.2 Impacto do nº de utilizadores de voz e da distribuição dos PDCHs 36
5.3 Impacto do nº de utilizadores de dados e da capacidade GPRS 38
5.4 Impacto de *Delayed* DL TBF 41
5.5 Impacto do FH sobre os CS-*n* 45
6. Conclusões 49
A. Classes Multislot A.1
B. Critério de decisão para CS-*n* B.1
C. Validação de geradores de números aleatórios C.1
D. Estatísticas de tráfego GPRS (*Optimus* - 2004) D.1
E. Resultados E.1
Referências ..... Ref. 1

Lista de Figuras

Fig. 2.1 - Estrutura simplificada do GSM/GPRS (extraída de [Corr03]). 3
Fig. 2.2 - Estrutura de TDMA (extraído de [Stee92]). 5
Fig. 2.3 - Estrutura dos *bursts* (extraído de [Stee92]). 5
Fig. 3.1 - Esquema simplificado de tráfego (extraído de [PeNy03]). 9
Fig. 3.2 - Representação do tráfego gerado para diferentes serviços (extraído de [SeFC03]). 10
Fig. 3.3 - Distribuições existentes na geração de tráfego *bursty* (extraído de [GoPi03]). 11
Fig. 3.4 - Estruturas dos blocos de rádio para os CS-*n* (extraído de [ETSI01]). 16
Fig. 3.5 - *Intra-cell handover* 17
Fig. 3.6 - Atribuição correcta de canais 18
Fig. 3.7 - Atribuição incorrecta de canais. 18
Fig. 4.1 - Estrutura do simulador. 19
Fig. 4.2 - Atribuição de recursos CS e PS executada pelo Gestor de Recursos. 24
Fig. 4.3 - Processos existentes no Gerador de Tráfego. 26
Fig. 4.4 - Fila de Transmissão (PS). 28
Fig. 4.5 - Espaçamentos incluídos numa chamada de acesso à Internet. 29
Fig. 4.6 - *Delayed* DL TBF apresentado pelo simulador. 30
Fig. 4.7 - Atrasos ao longo da transmissão de uma chamada PS. 31
Fig. 5.1 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para a distribuição de canais 0R + 4P. 38
Fig. 5.2 - Percentagem média de utilização máxima *Multislot* para cenários de aumentos de utilizadores PS e diferentes configurações de PDCH. 40
Fig. 5.3 - R_b médio (DL) para cenários de aumentos de utilizadores PS e diferentes configurações de PDCH. 40
Fig. 5.4 - Percentagem média de utilização simultânea de TSs no tempo para a configuração de PDCHs 2R+2P. 41
Fig. 5.5 - Débito médio de transmissão (R_b) em DL. 42
Fig. 5.4 - Variação de $\overline{\text{DDT}}$ para diferentes cenários de aumento de utilizadores PS. 42
Fig. 5.7 - Débito (R_b) médio por chamada PS para *Delayed* DL TBF de [0,5 ; 10]s. 44
Fig. 5.6 - Percentagem média de utilização para *Delayed* DL TBF de [0,5 ; 10]s. 44
Fig. 5.9 - Percentagem média de utilização no tempo de CS-*n* em DL para $C/I \in$ [0, 30]dB. 45
Fig. 5.10 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU3 sem FH). 46
Fig. 5.11 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU3 com FH). 46
Fig. 5.12 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU50 com FH). 46
Fig. 5.10 - Percentagem média de utilização no tempo de CS-*n* em UL para $C/I \in$ [0, 30]dB. 47
Fig. 5.9 - R_b médio e desvio padrão de TU3 sem FH para $C/I \in$ [0, 20], [0, 30] e [0, 50]dB. 47
Fig. 5.10 - Percentagem média de utilização no tempo de CS-*n* em DL para $C/I \in$ [0,20], [0,30] e [0,50] dB. 48
Fig. 5.11 - Percentagem média de utilização no tempo de CS-*n* em UL para $C/I \in$ [0,20], [0,30] e [0,50] dB. 48

Fig. B.1 - BLER em função de *C/I* para CS-1. ..... B.3
Fig. B.2 - BLER em função de *C/I* para CS-2. ..... B.3
Fig. B.3 - BLER em função de *C/I* para CS-3. ..... B.4
Fig. B.4 - BLER em função de *C/I* para CS-4. ..... B.4
Fig. B.5 - Interpolações truncadas usadas no programa para TU3 sem saltos na frequência. B.6
Fig. B.6 - Interpolações truncadas usadas no programa para TU3 com saltos na frequência. B.6
Fig. B.7 - Interpolações truncadas usadas no programa para TU50 sem saltos na frequência. B.7
Fig. B.8 - Interpolações truncadas usadas no programa para TU50 com saltos na frequência. B.7
Fig. C.1 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Uniforme [0,1000]. C.1
Fig. C.2 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição de Poisson (λ = 500). C.2
Fig. C.3 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Exponencial (μ = 100). C.3
Fig. C.4 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Normal (μ = 500 ; σ^2 = 10). C.3
Fig. C.5 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Log-Normal (μ =2, σ^2 =10). C.4
Fig. C.6 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Geométrica (μ =100). C.4
Fig. C.7 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Pareto (k_p =10,5 ; α_p = 1,1). C.5
Fig. E.1 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário E.1.1. ..... E.2
Fig. E.2 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário 5.2.2. ..... E.4
Fig. E.3 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário E.1.3. ..... E.5
Fig. E.4 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário E.2.1. ..... E.8
Fig. E.5 - Percentagem média de chamadas usando capacidade *Multislot* máxima no cenário E.2.1. ..... E.9
Fig. E.6 - Percentagem média de utilização simultânea de TSs no tempo dos cenários ref.1 e de E.2.1. ..... E.9
Fig. E.7 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário E.2.2. ..... E.11
Fig. E.8 - Percentagem média de chamadas usando capacidade *Multislot* máxima no cenário E.2.2. ..... E.12
Fig. E.9 - Percentagem média de utilização simultânea de TSs no tempo do cenário E.2.2. E.12
Fig. E.10 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário E.2.3. ..... E.14
Fig. E.11 - Percentagem média de chamadas usando capacidade *Multislot* máxima no cenário E.2.3. ..... E.14

Fig. E.12 - Percentagem média de utilização simultânea de TSs no tempo do cenário E.2.3. .....E.15
Fig. E.13 - Débito (R_b) médio por chamada PS para *Delayed* DL TBF de [0,5 ; 10]s. E.15
Fig. E.14 - Tempo médio de *Delayed* DL TBF activo de [0,5 ; 10]s.....E.16
Fig. E.15 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU3 sem FH). E.17
Fig. E.16 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU3 com FH). E.17
Fig. E.17 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU50 sem FH). E.17
Fig. E.18 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU50 com FH). E.18
Fig. E.19 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU3 sem FH). E.19
Fig. E.20 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU3 com FH). E.19
Fig. E.21 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU50 sem FH). E.20
Fig. E.22 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU50 com FH). E.20
Fig. E.23 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU3 sem FH). E.21
Fig. E.24 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU3 com FH). E.21
Fig. E.25 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU50 sem FH). E.22
Fig. E.26 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU50 com FH). E.22

Lista de Tabelas

Tab. 2.1 - Débitos de transmissão do HSCSD, EGPRS e do GPRS com diferentes CS-*n* (extraído de [LeMa01]). 6
Tab. 2.2 - Canais Lógicos do GSM (extraído de [Stee92]). 7
Tab. 2.3 - Classes QoS (extraído de [3GPP00]). 8
Tab. 3.1 - Parâmetros para o modelo *web browsing* a 8kbit/s de [ETSI98] (extraído de [Agui03]). 12
Tab. 3.2 - Classes de Atraso (extraído de [3GPP03a]). 14
Tab. 3.3 - Classes de Fiabilidade (extraído de [3GPP03a]). 14
Tab. 3.4 - Parâmetros de codificação dos CS-*n* para GPRS ([ETSI01]). 15
Tab. 4.1 - Valores por omissão para serviços do tipo *On-Off* (DL). 21
Tab. 4.2 - Valores por omissão para serviços do tipo *bursty* (DL). 22
Tab. 4.3 - Valores por omissão para serviços do tipo *On-Off* (UL). 22
Tab. 4.4 - Dimensionamento de canais para bloqueio a 1% (Fornecido pela *Optimus*). 23
Tab. 5.1 - Dados de tráfego de voz (Fornecido pela *Optimus*). 33
Tab. 5.2 - Intensidade de tráfego de voz e número de utilizadores para cada ambiente. 33
Tab. 5.3 - Volume de dados de GPRS referentes a uma célula em ambiente Urbano. 34
Tab. 5.4 - Factores de assimetria para DL e UL do tráfego de dados de GPRS. 34
Tab. 5.5 - Factores de assimetria dos serviços para DL e UL do tráfego *Internet*. 34
Tab. 5.6 - Dados de GPRS de todos os serviços para ambiente Urbano. 35
Tab. 5.7 - μ_{cs} ajustado para o ambiente Urbano (DL). 35
Tab. 5.8 - Distribuição de CS-*n* para os 2 cenários de referência. 36
Tab. 5.9 - Bloqueio, débito de transmissão e probabilidade de atraso dos cenários de 5.2. 37
Tab. 5.10 - Probabilidade de Bloqueio e atraso dos cenários de 5.2. 37
Tab. 5.10 - Atraso e probabilidade de atraso das chamadas PS dos cenários de 5.3. 39
Tab. 5.11 - R_b e $\overline{\mathrm{DDT}}$ para cenário de aumento de 1000% de utilizadores PS (DL). 43

Tab. A.1 - Classes *Multislot* ([3GPP03b]). A.1
Tab. B.1 - Índices do CS-*n* correspondentes a um *C/I* para cada CS-*n*. B.1
Tab. B.2 - % BLER para CS-1. B.1
Tab. B.3 - % BLER para CS-2. B.2
Tab. B.4 - % BLER para CS-3. B.2
Tab. B.5 - % BLER para CS-4. B.2
Tab. B.6 - Interpolações da Fig. B.1 para CS-1. B.4
Tab. B.7 - Interpolações da Fig. B.2 para CS-2. B.5
Tab. B.8 - Interpolações da Fig. B.3 para CS-3. B.5
Tab. B.9- Interpolações da Fig. B.4 para CS-4. B.5
Tab. B.10 - Correspondência entre BLER e CS-*n*. B.8
Tab. C.1 - Erro médio e respectivo desvio padrão para cada função do Gerador de Tráfego. C.5
Tab. D.1 - Volume de dados do serviço MMS (fornecido pela *Optimus*) D.1
Tab. D.2 - μ_{cs} ajustado para todos ambientes (DL). D.1
Tab. D.3 - Dados de GPRS de todos os serviços para todos os ambientes. D.2
Tab. E.1 - Bloqueio obtido para o cenário E.1.1. E.1
Tab. E.2 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.1.1. E.2
Tab. E.3 - Débito e utilização de TSs das chamadas PS (DL) obtidos para E.1.1. E.3
Tab. E.4 - Bloqueio obtido para o cenário E.1.2. E.3
Tab. E.5 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.1.2. E.4
Tab. E.6 - Bloqueio obtido para o cenário E.1.3. E.4
Tab. E.7 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.1.3. E.5
Tab. E.8 - Débito e utilização de TSs das chamadas PS (DL) obtidos para E.1.3. E.6
Tab. E.9 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.1. E.7
Tab. E.10 - Débitos de transmissão das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.1. E.7
Tab. E.11 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.2. E.10
Tab. E.12 - Débitos de transmissão das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.2. E.11
Tab. E.13 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.3. E.13
Tab. E.14 - Débitos de transmissão das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.3. E.13
Tab. E.15 - Interpolações, erro quadrático e domínio de validade obtidos para R_b e $\overline{\mathrm{DDT}}$. E.16
Tab. E.16 - R_b para TU3 e TU50 (DL) com CS-*n* variável. E.16
Tab. E.17 - R_b para TU3 e TU50 (UL) com CS-*n* variável. E.17
Tab. E.18 - R_b para TU3 e TU50 (DL) com CS-*n* variável. E.18
Tab. E.19 - R_b para TU3 e TU50 (UL) com CS-*n* variável. E.19
Tab. E.20 - R_b para TU3 e TU50 (DL) com CS-*n* variável. E.20
Tab. E.21 - R_b para TU3 e TU50 (UL) com CS-*n* variável. E.21

Lista de Siglas

ACCHs	*Associated Control Channel*
AGCH	*Access Grant Channel*
BCCH	*Broadcast Control Channel*
BCS	*Block Check Sequence*
BLER	*Block Error Rate*
BSC	*Base Station Controller*
BSS	*Base Station Sub-System*
BTS	*Base Transceiver Station*
CCH	*Control Channels*
CCCH	*Common Control Channel*
CN	*Core Network*
CRC	*Cyclic Redundancy Check*
CS	*Circuit Switching*
CS-*n*	*Coding Scheme n*
DL	*Downlink*
EB	Estação Base
EDGE	*Enhanced Data Rates for Global Evolutions*
EGPRS	*Enhanced GPRS*
FACCH	*Fast Associated Control Channel*
FCCH	*Frequency Correction Channel*
FDMA	*Frequency Division Multiple Access*
FEC	*Forward Error Correction*
FH	*Frequency Hopping*
FIFO	*First In, First Out*
GGSN	*Gateway GPRS Support Node*
GSM	*Global System Mobile Communications*
GPRS	*General Packet Radio Service*
HLR	*Home Location Register*
HTTP	*Hyper-Text Transfer Protocol*
HSCSD	*High Speed Circuit Switched Data*
IP	*Internet Protocol*
ISDN	*Integrated Services Digital Network*
MAC	*Medium Access Control*
MS	*Mobile Station*
MSC	*Mobile Switching Centre*
NID	Número de identificação
PCH	*Paging Channel*
PDCH	*Packet Data Channel*
PDTCH	*Packet Data Traffic Channel*
PS	*Packet Switching*
PTSN	*Public Telephone Switching Network*
QoS	*Quality of Service*
RACH	*Random Access Channel*
RLC	*Radio Link Control*
SACCH	*Slow Associated Control Channel*
SCH	*Synchronization Channel*
SDCCH	*Stand Alone Dedicated Control Channel*
SDU	*Service Data Unit*

SGSN	*Serving GPRS Support Node*
SMS	*Short Message Service*
TBF	*Temporary Block Flow*
TCH	*Traffic Channels*
TDMA	*Time Division Multiple Access*
TM	Terminal Móvel
TS	*Time-slot*
TU	*Typical Urban*
UL	*Uplink*
UMTS	*Universal Mobile Telecommunications System*
USF	*Uplink State Flag*
WAP	*Wireless Application Protocol*

Lista de Símbolos

α_p	Parâmetro de forma da distribuição de Pareto
ε_i	Erro da amostra *i*
$\overline{\varepsilon}$	Erro médio
λ	Taxa de chegadas de chamadas/pacotes
λ_{GPRS}	Número de chamadas GPRS por utilizador
μ	Valor médio
μ_{cs}	Valor médio da distribuição geométrica do número total de pacotes numa sessão
μ_{pr}	Valor médio da distribuição geométrica do número de pacotes numa rajada
μ_{tl}	Valor médio da distribuição geométrica do tempo de leitura
μ_{tpc}	Valor médio da distribuição geométrica do tempo entre pacotes consecutivos
μ_{Sd}	Volume médio de um pacote
τ_d	Valor médio do atraso
$\overline{\tau}$	Duração média de serviço por chamada/pacote
A	Intensidade de tráfego
A_u	Intensidade de tráfego médio de um utilizador
b_i	Número de bits em cada bloco RLC
C_{TS}	Capacidade de 1 TS
C	Potência da portadora do sinal
d_t	Atraso médio de transmissão
d_u	Atraso médio por utilizador
$\overline{\mathrm{DDT}}$	*Delayed* DL TBF médio activo
F_r	Factor de redução
I	Potência da portadora interferente
k_p	Tamanho mínimo de 1 pacote
m_p	Tamanho máximo para 1 pacote
n	Número de amostras
n_{cs}	Número total de pacotes numa sessão
n_p	Número de pacotes
n_{pr}	Número de pacotes numa rajada
n_{tl}	Tempo de leitura
n_{tpc}	Tempo entre pacotes consecutivos
N_{TCH}	Número de canais de tráfego
N_{TS}	Número de TSs
N_u	Número de utilizadores
P_b	Probabilidade de bloqueio
P_d	Probabilidade de ocorrer atraso
P_p	Probabilidade de gerar 1 pacote
R_b	Débito de transmissão

R_{bCS-n}	Débito de transmissão de CS-*n*
Ttb	Tempo mínimo de transmissão
Tra	Tempo mínimo de recepção
T_{TBF}	Duração do TBF
V_s	Volume médio de dados por serviço de uma dada célula
V_u	Volume médio de dados por chamada efectuada por utilizador

1. Introdução

Com a chegada da 3ª geração das comunicações móveis, UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), surge uma nova tecnologia oferecendo novos serviços. A 2ª geração usou tecnologia digital que permite transportar dados, embora tenha sido dimensionada para voz, enquanto a 3ª geração, utiliza também tecnologia digital cujo dimensionamento é feito para dados e *multimedia*. A implementação da 3ª geração tem partido da 2ª geração, GSM (*Global System Mobile Communications*), já implantada pelos operadores de telecomunicações e dimensionada para a população actual. Contudo, a implementação do UMTS apresenta uma desvantagem face ao GSM: um menor raio de cobertura por célula. Os operadores necessitarão de um número significativamente superior de EBs (Estação Base) para assegurar a mesma cobertura que o GSM. Devido a esta limitação, os operadores têm optado pela coexistência do UMTS e GSM, implementando as evoluções no GSM com o intuito de melhorar o serviço de dados e suportar ainda alguns serviços de UMTS. As evoluções do GSM originaram: HSCSD (*High Speed Circuit Switched Data*), GPRS (*General Packet Radio Service*), EGPRS (*Enhanced GPRS*) e EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolutions*).

O HSCSD assenta em comutação de circuitos em GSM, enquanto o GPRS assenta em comutação de pacotes sobre o GSM. O EGPRS e EDGE são evoluções do GPRS ainda em estudo, mas actualmente, sem implementação nos operadores de comunicações móveis nacionais. Até à data, o HSCSD e o GPRS encontram-se implementados nos operadores de comunicações móveis nacionais. Destas duas tecnologias, o GPRS tem ganho maior destaque pela sua maior eficiência de transmissão, bem como débitos de transmissão superiores aos de HSCSD.

O GPRS é considerado como tecnologia de 2,5ª geração e pretende-se utilizá-la como serviço de dados, bem como para colmatar as zonas de falha, onde o UMTS não tem cobertura mas apenas o GSM. No entanto, o uso do GPRS como tecnologia de apoio ao UMTS levanta questões pertinentes: se a 2ª geração foi dimensionada para voz e a 3ª geração para dados, será que o GPRS consegue responder ao desafio da 2ª geração alcançar a 3ª geração e uni-las? Terá o GPRS capacidade para suportar os serviços da 3ª geração? O tema em estudo insere-se neste contexto, pois procura delinear o dimensionamento do GPRS, uma vez que não há modelos existentes com eficácia comprovada. Este trabalho tem também como objectivo, com auxílio da simulação, estudar o tráfego de comutação pacotes em GPRS juntamente com o tráfego de comutação de circuitos, em busca de limite do funcionamento satisfatório de serviços de voz e dados.

Actualmente, os simuladores desenvolvidos para GPRS não focam o tráfego subjacente aos serviços. A distinção deste simulador face aos existentes destaca-se na diferenciação de tráfego: é possível estudar o desempenho e tráfego por serviço. Esta diferença permite ponderar o impacto das características de cada serviço sobre a gestão de recursos e o desempenho geral do sistema, sem perder de vista as características do GSM/GPRS.

No 2º capítulo, apresentam-se os conceitos básicos das redes de comunicações móveis e respectivo funcionamento, bem como a caracterização dos serviços inerentes ao mesmo. A abordagem apresentada neste capítulo, é de índole genérica.

Partindo da abordagem genérica do 2º capítulo, no 3º capítulo pretende-se especificar a teoria subjacente ao tema em concreto deste trabalho: os modelos de tráfego existentes, critérios de dimensionamento, critérios de qualidade de serviço (*Quality of Service*, QoS), tecnologia de transmissão do GPRS e mecanismos associados à gestão de recursos no GPRS. Para além de caracterizar o GPRS, passa também por definir modelos de fonte para caracterizar o tráfego dos utilizadores.

No 4º capítulo, apresenta-se a ferramenta de simulação desenvolvida para estudar o tráfego de GSM/GPRS. Com base na teoria descrita no capítulo anterior, caracteriza-se a implementação dos modelos teóricos do 3º capítulo, utilizados no simulador. Após uma caracterização da estrutura e funcionamento do simulador, procede-se à descrição das entradas e saídas do mesmo.

No 5º capítulo, utilizam-se dados fornecidos pela *Optimus* com o intuito de estudar cenários mais realistas no simulador e analisar os respectivos resultados. Os dados fornecidos são adaptados às entradas do simulador. A partir de cenários de referência, criam-se outros cenários de modo a extrair conclusões relativamente a diferentes aspectos: crescimento de utilizadores GSM e GPRS, alteração de parâmetros de gestão de recursos e estudo de critérios de decisão relativamente ao canal rádio. Com base nestes resultados, procura-se adquirir sensibilidade relativamente a cada um dos parâmetros de entrada, entender o seu impacto e enquadrá-lo com a teoria.

Dada a situação de transição entre gerações de comunicações móveis, este trabalho permitirá oferecer uma perspectiva crítica relativa à situação actual, bem como, prever possíveis cenários associados à transição, ou mesmo, aos da 3ª Geração. Com base nos resultados, será possível antecipar certos problemas e simular soluções de uma forma rápida e eficiente. Nesta óptica, o simulador poderá ser utilizado como ferramenta de dimensionamento para serviços de dados e voz, recorrendo a este trabalho, como base de interpretação dos resultados de simulação.

A contribuição principal deste trabalho reside na ênfase dada à diferenciação do tráfego dos diferentes serviços, oferecendo a possibilidade de analisar as melhores estratégias para cada tipo de serviço bem como o impacto deste na gestão de recursos. A inserção de mecanismos adicionais da gestão de tráfego contribui para a percepção do impacto total no sistema e sobre cada serviço. Este trabalho possui também algoritmos de decisão relativos ao canal rádio, cuja contribuição permite descrever o seu efeito no sistema e utilizadores. O tráfego gerado por serviço, os parâmetros dos mecanismos adicionais à gestão de tráfego e a configuração do sistema são configuráveis, o que contribui para o estudo um estudo mais completo e sensível aos utilizadores do que a maioria dos simuladores actuais, sem menosprezar as características subjacentes ao sistema GSM/GPRS.

2. Aspectos Básicos

2.1 Estrutura da Rede

O GSM é um sistema cuja arquitectura se pode repartir em blocos com funções distintas separadas por diferentes interfaces [MoPa92]. A Fig. 2.1 representa também a estrutura genérica deste.

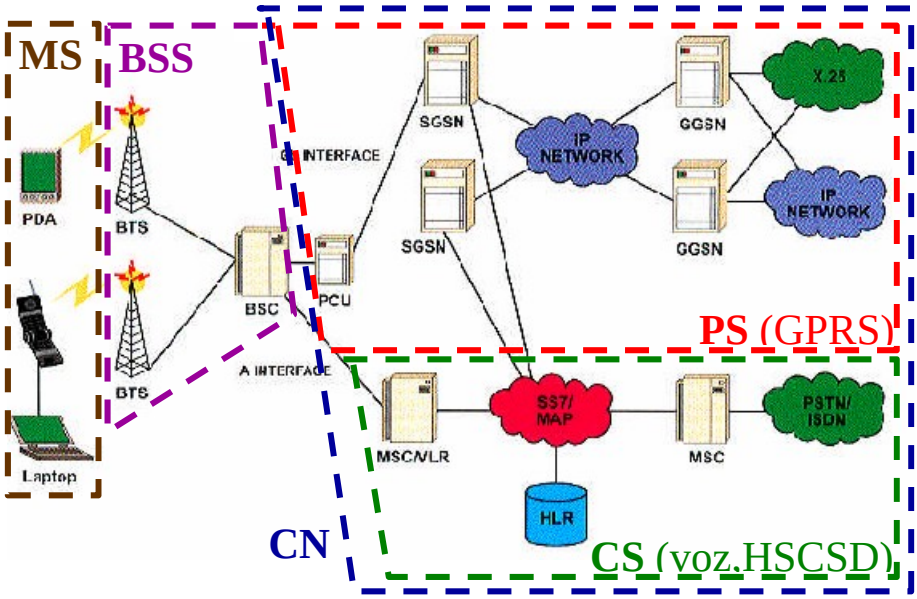


Fig. 2.1 - Estrutura simplificada do GSM/GPRS (extraída de [Corr03]).

Uma distinção importante a fazer no GSM/GPRS consiste na separação dos sistemas baseados em comutação de circuitos (CS, *Circuit Switching*) e de pacotes (PS, *Packet Switching*) que constituem o núcleo da rede (CN, *Core Network)*: em CS há um estabelecimento de ligação de modo a reservar recursos ao longo desta, enquanto em PS, a informação é enviada sob a forma de pacotes que percorrem as ligações necessárias para atingir o destino sem previamente reservar recursos exclusivamente. Pode-se caracterizar a estrutura do GSM/GPRS em blocos diferentes de acordo com a Fig. 2.1:

- MS (*Mobile Station*): consiste no equipamento do Terminal Móvel (TM) através do qual o utilizador acede aos serviços fornecidos pelo operador da rede em que se encontra. A MS inclui o TE (*Terminal Equipment*) bem como a MT (*Mobile Termination*), encarregue de manter o canal físico entre o TM e a Estação de Base (EB). Exemplos de TE encontram-se em equipamentos como os telemóveis, computadores portáteis, etc.
- BSS (*Base Station Sub-System*): é o bloco responsável pela gestão dos canais rádio (inclui funções, como por exemplo, atribuição de canais, supervisão da qualidade de ligação, sinalização, níveis de potência de transmissão e saltos na frequência). Este bloco é composto por BTS (*Base Transceiver Station*), que consiste no equipamento de transmissão para a cobertura rádio da célula, e BSC (*Base Station Controller*), que trata das funções de controlo da BSS composta por uma ou mais BTSs, tais como o *handover* (processo que permite um TM transitar de uma EB para outra).
- CS (*Circuit Switching*): Este sistema contém subsistemas que permitem ao operador estabelecer ligações entre utilizadores, após ter verificado a informação destes nas suas bases dados, HLR (*Home Location Register*) onde se encontram armazenadas informações referentes a todos os utilizadores do operador e VLR (*Visitor Location Register*) onde se encontram registados todos os TMs activos no sistema, mesmo que estes não se

encontrem registados no HLR. Uma vez estabelecidos os protocolos inerentes ao registo nas bases de dados (HLR e VLR), será o MSC (*Mobile Switch Centre*) que estabelece as ligações entre a EB e outras redes de telecomunicações (PTSN (*Public Telephone Switching Network*), ISDN (*Integrated Services Digital Network*), etc.), permitindo o utilizador no TM usar o serviço de voz, SMS (*Short Message Service*) e HSCSD do operador.

- PS (*Packet Switching*): A comutação de pacotes é uma funcionalidade do sistema implementada por 2 componentes: SGSN (*Serving GPRS Support Node*), análogo ao MSC, exercendo funções de gestão de mobilidade, controlo de acesso e sessão ligadas aos TMs, garantindo a entrega dos pacotes da rede até aos TMs; e GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) cuja funcionalidade reside na interligação entre as redes de comutação de pacotes externas (e.g., Rede IP (*Internet Protocol*)) com o SGSN onde o utilizador se encontra, uma vez que este contém o registo do mesmo SGSN.

2.2 Canais

Após uma abordagem sumária da estrutura da rede, pretende-se agora caracterizar os canais do GSM/GPRS onde decorre o tráfego entre a EB e TM. Os canais podem ser classificados segundo diversas perspectivas, sendo divididos em 3 tipos básicos ([Corr03]):

- Canal rádio: canal associado a uma portadora de frequência. No GSM, os canais de rádio ocupam uma largura de banda de 200 kHz no espectro dos [890;915], [1710;1785] MHz no sentido ascendente (*Uplink*, UL) e [935;960], [1805;1880] MHz no sentido descendente (*Downlink*, DL), tendo-se 124 canais na banda de 900 e 372 canais na banda de 1800.
- Canal físico: canal transportando qualquer tipo de informação do sistema, estando neste caso, associado a um *time-slot* (TS). Os canais físicos do GSM/GPRS recorrem a TDMA, onde 8 TSs se integram numa trama TDMA. Um TS, de duração de 0,557 ms (equivale a 156,25 bits de duração), consiste numa estrutura dividida em intervalos com funções definidas consoante o mapeamento das funções lógicas, que se integra numa hierarquia de tramas TDMA, apresentado na Fig. 2.2.
- Canal lógico: canal transportando um tipo específico de informação do sistema. No GSM, cada canal lógico procede a um mapeamento específico do TS através de *bursts*. O *burst* normal é utilizado no mapeamento do canal de tráfego e de quase todos os canais de controle, sendo composto por (Fig. 2.3):
  - 3 bits de cauda (com o objectivo de inicializar o equalizador) no início e no fim da sequência de informação.
  - 2 conjuntos de 58 bits de informação encontram-se separados por uma "sequência de treino".
  - 26 bits de "sequência de treino" que permitem ao receptor estimar as características do canal de propagação.
  - 8,25 bits de "período de guarda", antecipando eventuais flutuações e atrasos de propagação.

Os outros canais lógicos utilizam os seguintes *bursts* (representados na Fig. 2.3):

- "Correcção de Frequência" (canal FCCH): transporta uma sequência fixa de 142 bits que corrigem a frequência do oscilador do TM de modo a coincidir com a frequência da BTS.
- "Sincronismo" (canal SCH): transporta um menor número de bits de informação, mas uma sequência de treino maior para proceder à sincronização temporal entre o TM e a BTS.

- “Acesso”: possui um “período de guarda” superior a todos os outros, visto que a função deste consistir na avaliação da distância entre o TM e BTS com o intuito de permitir o enquadramento correcto com os restantes TSs provenientes de outros TMs.

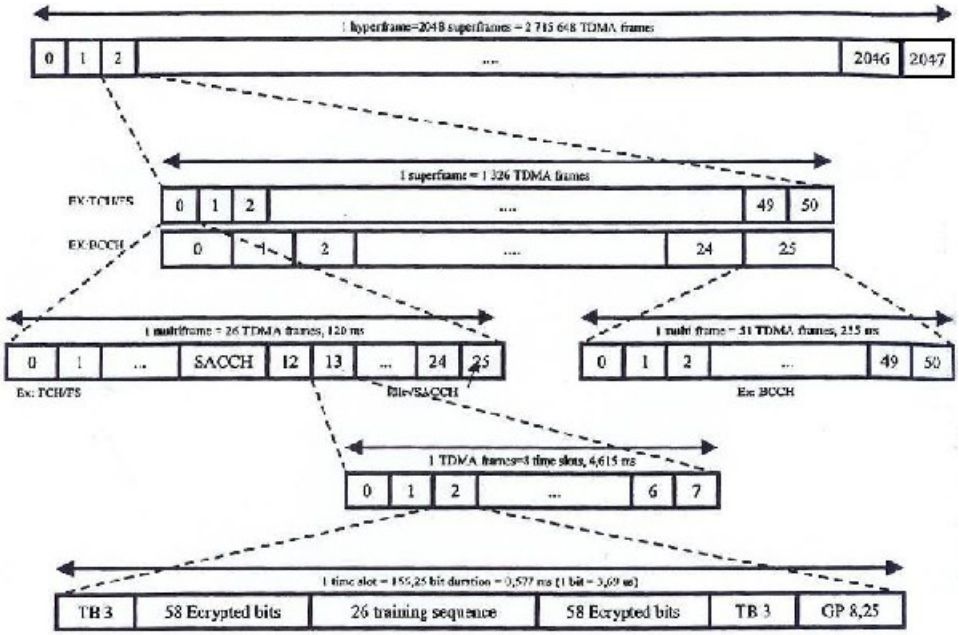


Fig. 2.2 - Estrutura de TDMA (extraído de [Stee92]).

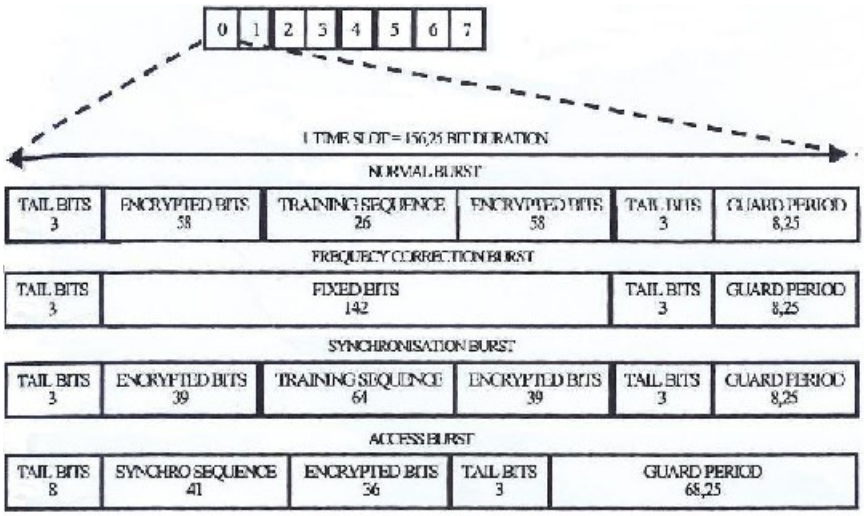


Fig. 2.3 - Estrutura dos *bursts* (extraído de [Stee92]).

O GPRS utiliza as tramas acima descritas, preenchendo os dois campos de informação não apenas com dados a transmitir, uma vez que adiciona bits de cabeçalho, controlo e detecção de erro. Uma vez determinada a quantidade de informação associada a cada TS e trama, podem-se definir os débitos associados, dado que um conjunto reservado de bits de informação é utilizado pelo GSM/GPRS, podendo estes conter voz/dados. No caso concreto do GPRS, existem diferentes esquemas de codificação (CS-*n*, *coding schemes*), que rentabilizam a utilização dos TSs consoante a condição em que o canal de propagação se encontra. Os débitos de transmissão dos diferentes esquemas de codificação do HSCSD, GPRS e EGPRS (*Enhanced* GPRS) encontram-se na Tab. 2.1.

Tab. 2.1 - Débitos de transmissão do HSCSD, EGPRS e do GPRS com diferentes CS-*n* (extraído de [LeMa01]).

Tecnologia		**Débito por TS [kbit/s]**	**Débito Médio [kbit/s]**	**Débito Máximo [kbit/s]**
HSCSD		14,4	58	115,2
GPRS	CS-1	9,05	32	72,4
	CS-2	13,4	48	107,2
	CS-3	15,6	58	124,8
	CS-4	21,4	80	171,2
EGPRS		69,6	275	559,2

Os valores dos débitos máximos teóricos são obtidos considerando que o GPRS utiliza um máximo de 8 TSs para enviar os dados (actualmente só se utilizam 4 TSs). Pode-se constatar que os débitos máximos são bastante superiores aos débitos de transmissão médios, dado que estes correspondem a cenários ideais usando 8 TSs (e.g., ignorando erros de transmissão, condições ideias de propagação, etc.) Logo, os débitos de transmissão médios constituem uma abordagem mais realista à situação existente na prática, pelo que o uso de determinados serviços é condicionado.

O endereçamento dos canais, distingue-se, em geral em:

- Canais comuns: troca de informação entre a EB e TMs genéricos;
- Canais dedicados: troca de informação entre a EB e um ou vários (específicos) TMs.

Seguidamente, apresentam-se os canais de GSM, que podem também ser classificados relativamente ao conteúdo de informação (utilizando os dois tipos de endereçamento mencionados):

- Canais de tráfego: contêm os sinais de voz, dados, vídeo e outros, dos utilizadores; A troca de informação entre os TMs e a EB dá-se através da interface rádio, por meio dos canais de tráfego TCH (*Traffic Channel*). No caso do GPRS, o canal de tráfego é denominado por PDTCH (*Packet Data Traffic Channel*). Um canal físico transporta um canal de tráfego com ritmo máximo (TCH/F- *full rate*) ou 2 canais de tráfego com metade do ritmo máximo (TCH/H- *half rate*). Consoante o caso da voz (TCH-S) ou de dados (TCH-D), os canais de tráfego apresentam diferentes débitos binários como se pode ver pela Tab. 2.2.
- Canais de controle: contêm os sinais de sinalização, informação, sincronização, etc. do sistema. Os canais de controle (CCH) no GSM, por sua vez, repartem-se em 4 categorias:
  - BCCH (*Broadcast Control Channel*): Canais unidireccionais (só transmitem da EB para o TM) que transportam a identificação da EB para o TM. Existem ainda outros tipos de canais: FCCH (*Frequency Correction Channel*), que permite a sincronização de frequência entre a EB e o TM, SCH (*Synchronisation Channe*l), responsável pela sincronização das tramas no TM e para identificar a EB, e Informação Genérica (quando não desempenha nenhuma das 2 funções anteriores; envia informações como o número de canais em utilização no sistema).
  - SDCCH (*Stand-alone Dedicated Control Channel*): Canais bidireccionais que fornecem serviços ao utilizador, podendo utilizar 4 ou 8 sub-canais (SDCCH/4 ou SDCCH/8).
  - CCCH (*Common Control Channel*): Canais unidireccionais, repartem-se em 3 tipos: PCH (*Paging Channel*) contém os sinais de *paging* enviados no estabelecimento duma chamada, RACH (*Random Access Channel*) utilizado quando o TM pretende um canal SDCCH e AGCH (*Access Grant Channel*) canal utilizado na atribuição de SDCCH para um TM.

- ACCH (*Associated Control Channel*): Canais bidireccionais, que transportam no DL (EB para TM) informação de controle (e.g., ajuste dos níveis de potência), enquanto no UL (TM para EB) transportam informação relativa ao estado do TM (e.g., níveis dos sinais provenientes de diferentes EB). Há 2 tipos de ACCH: FACCH (Fast ACCH), onde decorrem acções urgentes (e.g., *handovers*, atribuição de canais nos *handovers* intracelulares), utilizando toda a taxa de transmissão (FACCH/F) ou metade dela (FCCH/H), e SACCH (*Slow* ACCH) que se subdivide em 4 tipos conforme o tipo de canal ao qual está associado, podendo utilizar também toda ou metade da taxa de transmissão, permitindo que a EB troque informações com o TM de modo a negociar os níveis de potência de transmissão entre eles.

A Tab. 2.2 apresenta um sumário dos canais lógicos GSM, bem como a sua direccionalidade.

Tab. 2.2 - Canais Lógicos do GSM (extraído de [Stee92]).

Logical Channels					
Duplex Traf. Chan.: TCH		Control Channels: CCH			
FEC-coded Speech	FEC-coded Data	Broadc. CCH BCCH $BS \rightarrow MS$	Common CCH CCCH	Stand-alone Dedicated CCH SDCCH $BS \leftrightarrow MS$	Associated CCH ACCH $BS \leftrightarrow MS$
TCH/F 22.8 kbit/s	TCH/F9.6 TCH/F4.8 TCH/F2.4 22.8 kbit/s	Freq.Corr.Ch: FCCH	Paging Ch: PCH $BS \rightarrow MS$	SDCCH/4	Fast ACCH: FACCH/F, FACCH/H
TCH/H 11.4 kbit/s	TCH/H4.8 TCH/H2.4 11.4 kbit/s	Synchron. Ch: SCH	Rand. Access Ch: RACH $MS \rightarrow BS$	SDCCH/8	Slow ACCH: SACCH/TF, SACCH/TH SACCH/C4, SACCH/C8
		General Inf.	Access Grant Ch: AGCH $BS \rightarrow MS$		

No GPRS, nos canais unidireccionais de tráfego (como em CS), os dados também podem ser transmitidos até ao débito máximo (PCDTCH/F) ou a metade desse débito (PDTCH/H). Este sistema possui a capacidade de configuração de pacotes *Multislot*, i.e., pode atribuir múltiplos canais de tráfego de pacotes para um mesmo TM, combinando PDTCH/F com PDTCH/H ([3GPP03a]). Um PDTCH/F usando modulação GMSK pode atingir débitos binários instantâneos compreendidos entre 0 a 22,8 kbit/s (caso do GPRS), enquanto o EGRPS utiliza 8-PSK vai até 69,6 kbit/s; os correspondentes PDTCH/H poderão ascender até metades dos débitos mencionados. Os valores de transmissão variam devido à capacidade adaptativa do GPRS perante cenários distintos do canal rádio, tráfego de pacotes, etc. Note-se que o débito máximo 22,8 kbit/s corresponde justamente ao débito máximo correspondente a um canal de voz, que não é totalmente utilizado devido ao factor de redução acima mencionado.

2.3 Serviços e Aplicações

O tráfego existente nos sistemas de comunicações móveis é definido pelos diferentes serviços e aplicações disponíveis aos utilizadores activos no sistema. Estes mesmos serviços são classificados consoante determinados parâmetros (e.g., sensibilidade aos atrasos), de modo a garantir um dado QoS (*Quality of Service*).

Podemos repartir os serviços em 4 classes [3GPP00]: *Conversational*, *Streaming*, *Interactive* e *Background*. O factor decisivo para distinguir as classes é a sensibilidade aos atrasos. Na Tab. 2.3, apresenta-se um sumário destas classes de serviços.

A classe *Conversational* é a mais sensível de todas, sendo a aplicação mais conhecida desta classe, o serviço de voz (baseado na comutação de circuitos). O atraso máximo aceitável

neste tipo de serviço é limitado pelo atraso perceptível pelas pessoas, existindo uma certa simetria existente na comunicação (ambos os interlocutores falam alternadamente).

A classe *Streaming* não é tão sensível como a anterior, pois esta classe é caracterizada pela transferência de dados num fluxo estável e contínuo. Dado que nem todos os utilizadores acedem aos dados na sua totalidade tão rapidamente ao ponto de visualizá-los imediatamente após pedidos, recorre-se a uma estratégia de *buffering*, que permite armazenar uma porção dos dados recebidos e visualizá-los numa aplicação, enquanto os restantes são enviados. Como era de esperar, este tipo de aplicações apresenta uma clara assimetria no fluxo de dados trocado entre a fonte e o destino, e consequentemente são mais tolerantes aos atrasos. Têm também mais tolerância aos erros de transmissão, problema que é atenuado pelo *buffering*.

A classe *Interactive* consiste num tipo de serviço onde um utilizador faz um pedido de informação a um equipamento remoto, como é típico de um utilizador de Internet ao navegar por diferentes páginas. O atraso subjacente a esta classe é estipulado por um intervalo de tempo entre o envio do pedido e a recepção da resposta por parte do utilizador. Outra característica é o facto de que a transferência do conteúdo dos pacotes deve ser transparente (com taxa de erros reduzida).

A classe *Background* situa-se no extremo contrário ao da classe *Conversational*, sendo a mais insensível ao atraso, pois o envio dos dados pode ser feito em paralelo com outras aplicações, dado que estas não requerem acção imediata. O utilizador não prevê receber os dados dentro dum intervalo de tempo específico, podendo demorar minutos porque a única exigência é que os dados sejam recebidos sem quaisquer erros (não tendo em conta o atraso).

Tab. 2.3 - Classes QoS (extraído de [3GPP00]).

Classe de Serviço	*Conversational*	*Streaming*	*Interactive*	*Background*
Tempo-real	Sim	Sim	Não	Não
Simétrico	Sim	Não	Não	Não
Comutação	CS	CS	PS	PS
Ritmo garantido	Sim	Sim	Não	Não
Atraso	Mínimo Fixo	Mínimo Variável	Moderado Variável	Grande Variável
Buffer	Não	Sim	Sim	Sim
Bursty	Não	Não	Sim	Sim
Exemplo	voz	*video-clip*	http	*E-mail*

No caso do GPRS, não foram estabelecidos débitos de transmissão para as diferentes classes. No entanto, existem débitos máximos teóricos e médios associados às diferentes tecnologias inerentes ao GSM/GPRS, que se encontram na Tab. 2.1. Apresentados os serviços e as suas respectivas características, podemos constatar que os serviços pertencentes às classes *Conversational* e *Interactive* podem ser satisfeitos pelo sistema CS do GSM. Enquanto os serviços das classes *Streaming* e *Background* assentam em PS e serão suportados pelo GPRS. Exemplos de aplicações em GPRS fornecidas pela Optimus para cada classe são:

- Classe *Interactive*: acesso à *Internet* (inclui HTTP, *Hyper-Text Transfer Protocol*, FTP, *File Transfer Protocol*, etc.), WAP (*Wireless Access Protocol*) e MMS (*Multimedia Message Service*).
- Classe *Background*: *E-mail* e *Telnet*.
- Classe *Streaming*: acesso WAP (Wireless *Application Protocol*) a páginas WML (*Wireless Markup Language*), com a possibilidade de se visionarem vídeos.

3. Modelos

3.1 Modelos de Tráfego

A caracterização do tráfego nas redes de telecomunicações passa por escolher criteriosamente um modelo probabilístico verosímil, dado que o tráfego não é determinístico e é necessário um planeamento das infra-estruturas dos sistemas de comunicações móveis, de modo a garantir uma dada qualidade de serviço (QoS).

Uma abordagem inicial ([PeNy03]), para o tráfego em comutação de circuitos e pacotes, pode ser modelado como um sistema com ou sem fila de espera onde as chamadas/pacotes têm uma taxa de chegada λ, duração média de serviço por chamada/pacote $\bar{\tau} = 1/\mu$ (sendo μ a taxa de serviço), *m* posições na fila de espera, e *N* servidores em paralelo, representado na Fig. 3.1.

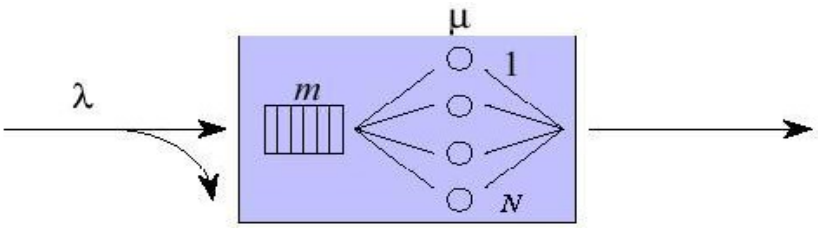


Fig. 3.1 - Esquema simplificado de tráfego (extraído de [PeNy03]).

Esta abordagem caracteriza-se por ser um sistema com perdas, i.e., é possível ocorrer bloqueio de chamadas para CS, atrasos e/ou perdas de pacotes em PS. No caso de não haver fila espera (i.e., $m = 0$), se os *N* servidores estiverem ocupados na altura em que as chamadas/pacotes chegam ao sistema, então serão bloqueadas/os. Nos sistemas com fila de espera (i.e., $m > 0$), se os *N* servidores estiverem completamente ocupados, a chamada/pacote aguarda na fila de espera (desde que esta não esteja totalmente ocupada) até os recursos do sistema estarem disponíveis. Para o caso em estudo, as chamadas CS em GSM terão o comportamento de uma chamada CS, enquanto as chamadas de GPRS terão o comportamento de chamadas PS num sistema com fila de espera.

Pode-se começar por caracterizar as chegadas das chamadas usual do tráfego de voz por processos de Poisson cuja função densidade de probabilidade é dada em função de t (tempo), λ (taxa de chegada das chamadas) e *k* (número de ocorrências):

$$p(k;t) = \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} e^{-\lambda \cdot t} \tag{3.1}$$

Este processo tem propriedades importantes para o estudo, pois (como se pode constatar em (3.1)) trata-se de um modelo sem memória (i.e., um evento actual não depende de nenhum anterior dado que é estatisticamente independente) e a sobreposição de processos de Poisson independentes resultam num novo processo de Poisson. Dado estas propriedades, conclui-se que é um modelo adequado ao tráfego de voz.

Uma vez caracterizada a chegada das chamadas, procede-se à caracterização da duração das chamadas. A distribuição exponencial é a adequada e tem a seguinte função densidade de probabilidade com parâmetros são t e μ (média):

$$p(t) = \mu \cdot e^{-\mu \cdot t} \tag{3.2}$$

Observa-se em (3.2) que a duração da chamada decresce exponencialmente com o tempo, o que é verosímil no tráfego de voz nas redes de telecomunicações, nomeadamente em GSM.

Para o caso de GPRS, podem-se utilizar os modelos de fonte de tráfego adoptados ([Agui02], [Agui03] e [SeFC03]) para UMTS. Para cada um dos serviços descritos na Secção 2.3, apresentam-se exemplos do perfil de tráfego para cada, na Fig. 3.2.

Fig. 3.2 - Representação do tráfego gerado para diferentes serviços (extraído de [SeFC03]).

Constata-se que a maior parte dos serviços tem um comportamento típico de modelos *On-Off* (i.e., transmissão activa seguida de período de inactividade até nova transmissão) excepto para o caso de serviços pertencentes à classe *Interactive* e *Streaming*. Contudo, os serviços da classe *Streaming* no caso de GSM/GPRS, são modelados também como *On-Off*, dado que o débito de GSM/GPRS não é tão sensível quanto UMTS aos atrasos entre pacotes. Para caracterizar um dado serviço do tipo *On-Off* (e.g., FTP e *E-mail*) em GPRS, basta que o modelo descreva o tempo entre chamadas e o respectivo volume de dados a ser transmitido. O tempo entre chamadas é descrito pela função exponencial expressa em (3.2). O volume de dados é descrito pela função log-normal, cuja função densidade de probabilidade com μ_{LN} (média) e σ_{LN} (desvio padrão) é ([SeFC03]):

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{LN} \cdot t} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(t)-\mu_{LN}}{\sigma_{LN}}\right)^2} \tag{3.3}$$

Os serviços pertencentes à classe *Interactive* (nomeadamente Internet via WWW e via WAP), requerem modelo específico e estes podem ser modelados de acordo com o modelo proposto em [ETSI98] para UMTS na Fig. 3.3.

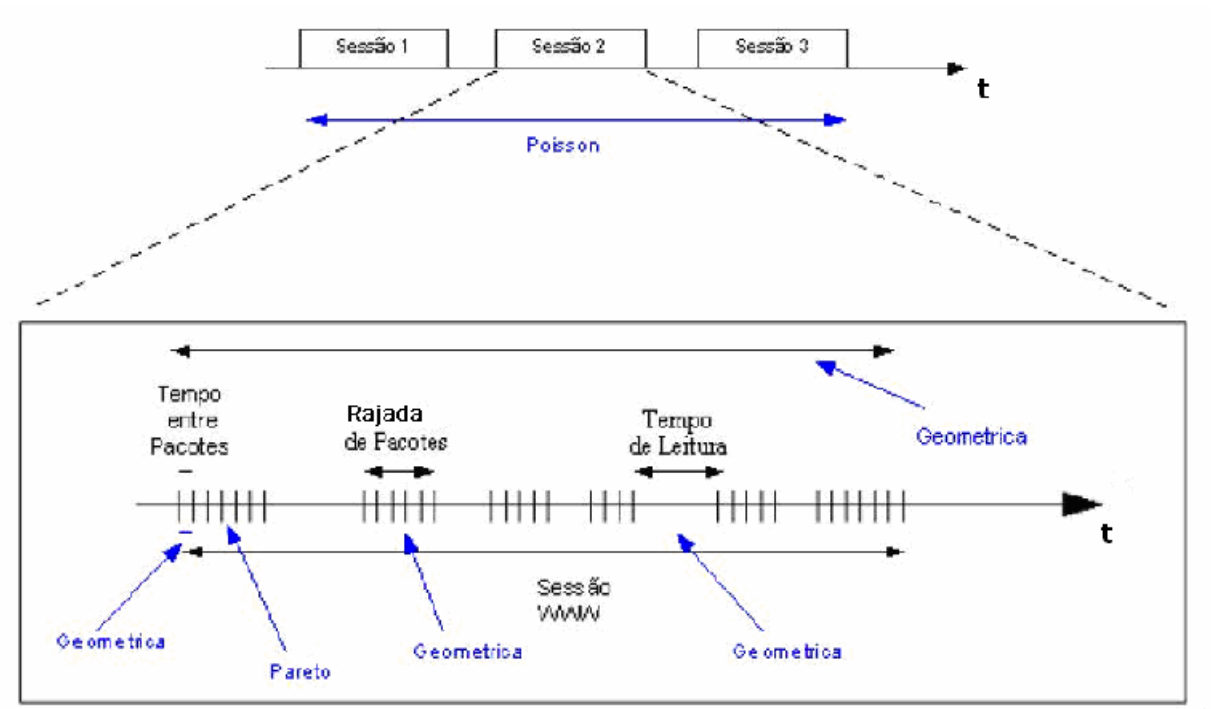


Fig. 3.3 - Distribuições existentes na geração de tráfego *bursty* (extraído de [GoPi03]).

A caracterização deste modelo ao nível do pacote, passa por definir distribuições estatísticas para cada um dos elementos variáveis:

- Número de sessões por hora: distribuição de Poisson.
- Número de pacotes numa rajada (n_{pr}): distribuição geométrica com média μ_{pr}.
- Tempo entre pacotes consecutivos (n_{tpc}): distribuição geométrica com média μ_{tpc}.
- Tempo de leitura (n_{tl}): distribuição geométrica com média μ_{tl}.
- Número total de pacotes numa sessão (n_{cs}): distribuição geométrica com média μ_{cs}.
- O volume médio de um pacote (μ_{Sd}): distribuição de Pareto.

A distribuição geométrica empregue no modelo é caracterizada pela função densidade de probabilidade em (3.5), com μ_p o valor médio que se relaciona com P_p (probabilidade de gerar 1 pacote) e n_p (número de pacotes):

$$P_p = \frac{1}{\mu_p} \tag{3.4}$$

$$p(n_p) = P_p \cdot (1 - P_p)^{n_p} \tag{3.5}$$

A função empregue para o volume de cada pacote, vem dada por min[$p_p(t)$, m_p] onde m_p é o tamanho máximo para 1 pacote (m_p = 66 666 bytes) e $p_p(t)$ é a função densidade de

probabilidade de Pareto com o parâmetro de forma α_p (α_p = 1,1) e k_p (k_p = 81,5 bytes, tamanho mínimo de 1 pacote):

$$p_p(t) = \begin{cases} \dfrac{\alpha_p \cdot k_p^{\alpha_p}}{t^{\alpha_p+1}}, & k_p \le t \\ 0 & , t < k_p \end{cases} \tag{3.6}$$

De acordo com os valores acima definidos para a distribuição de Pareto, o valor médio de cada pacote (μ_{Sd}) é 480 bytes [SeFC03]. Os valores estipulados em [ETSI98] para *web browsing* em 8kbit/s, encontram-se na Tab. 3.1.

Tab. 3.1 - Parâmetros para o modelo *web browsing* a 8kbit/s de [ETSI98] (extraído de [Agui03]).

μ_{pr}	$\mu_{tpc[s^{-1}]}$	$\mu_{tl[s]}$	μ_{cs}
5	0,5	4 a 12	25

Os parâmetros que permitirão avaliar o desempenho do sistema dividem-se também para as chamadas CS e PS. Para as chamadas CS:

- Probabilidade de bloqueio (P_b): probabilidade de não haver estabelecimento da ligação.

Para as chamadas PS serão necessários mais parâmetros devido à existência de fila de espera considerada no modelo:

- Probabilidade de ocorrer um atraso (P_d): probabilidade de um pacote ser colocado na fila de espera.
- Valor médio do atraso (τ_d): o valor médio do tempo de permanência na fila de espera.
- Débito de transmissão (R_b): ritmo binário de transmissão de dados.

Com estes modelos de fonte de tráfego e parâmetros, tem-se devidamente caracterizado o comportamento das chamadas CS e PS que dão entrada no sistema GSM/GPRS.

Os modelos usualmente utilizados na descrição de sistemas de comunicação fixa que serviram de base para o GSM são: Erlang-B, Erlang-C e Engset. O Modelo de Erlang-B considera que o sistema é composto por um número finito de servidores (*N* servidores) mas com número infinito de chamadas. Neste modelo, a distribuição apresenta insensibilidade à distribuição do serviço no tempo (i.e., é válida para qualquer distribuição de serviço no tempo que tenha média $\bar{\tau}$). A probabilidade de bloqueio deste modelo vem dada em função da intensidade de tráfego (A) e o número de canais (*N*):

$$P_b = \frac{\dfrac{A^N}{N!}}{\displaystyle\sum_{n=0}^{N} \frac{A^n}{n!}} \tag{3.7}$$

O Modelo de Erlang-C é uma variante do Modelo Erlang-B que distingue-se pela existência de fila de espera ($m > 0$), mas uma vez que o GSM não possui fila de espera, o modelo de Erlang-C não é aplicável como modelo de base para GSM.

O Modelo de Engset assenta no princípio segundo o qual tráfego fluí por um sistema com um número finito (k) de chamadas e de (N) servidores, sendo o número de chamadas superior ao número de servidores do sistema ($N < k$).

Os modelos mencionados foram desenvolvidos para redes de comunicação fixa, i.e., não consideram mobilidade do utilizador, tornando-os inadequados para descrever com rigor o GSM. Contudo, o Modelo de Erlang-B é utilizado para estimação da capacidade para o GSM devido a bons resultados como aproximação. O cálculo da capacidade para GSM baseia-se em definir uma dada probabilidade de bloqueio, para o modelo de Erlang-B e o número de canais de tráfego ($N = N_{TCH}$), do qual se pode obter a intensidade de tráfego (A) que suporta ([Corr03]):

$$A_{[\mathrm{Erl}]} = \frac{\lambda}{\mu} \tag{3.8}$$

A intensidade de tráfego (A) relaciona-se com o número de utilizadores (N_u) e a intensidade de tráfego médio de um utilizador (A_u), de acordo com:

$$A = A_{u[Erl]} \cdot N_u \tag{3.9}$$

A intensidade de tráfego médio de um utilizador obtém-se a partir de:

$$A_{u[Erl]} = \lambda_{[chamadas/s]} \cdot \bar{\tau}_{[s]} \tag{3.10}$$

Tipicamente, os operadores servem-se deste critério de dimensionamento, baseando-se em dados de utilizadores (A_u e N_u) e definindo a probabilidade de bloqueio (P_b) (em GSM, usualmente dimensiona-se $P_b = 1\%$), podendo assim estabelecer uma estimativa relativamente ao número mínimo de canais necessários (N_{TCH}) para uma dada EB.

No caso do GPRS, não existe actualmente nenhum modelo analítico que sirva para descrever o tráfego de dados em redes GPRS.

3.2 QoS no GPRS

O desempenho do GPRS passa por 4 parâmetros definidos para o QoS na altura de estabelecimento entre a rede e o terminal ([HaRM03]): prioridade do serviço, fiabilidade, atraso e débito de transmissão. Os modos como estes parâmetros são escolhidos são definidos pelos operadores.

As prioridades do serviço estipulam a importância relativa de manutenção do serviço em condições adversas e subdividem-se em 3 categorias: *High* (a mais prioritária), *Normal* (intermédia) e *Low precedence level* (a menos prioritária). Segundo esta hierarquia, o sistema irá atender os pedidos mais prioritários antes de todos e só atende os menos prioritários após os outros terem sido já servidos.

O GPRS funciona segundo a filosofia *best-effort*, que assenta no uso da capacidade máxima disponível atribuída ao utilizador, embora não seja óptimo. Dado que o GPRS não é um serviço *store and forward* (embora haja um armazenamento temporário dos pacotes nos nós da sua rede) e por vezes, ocorrer um atraso devido a limitações de transmissão (e.g., atrasos associados ao acesso ao canal de rádio, processamento do pacotes na rede do GPRS, etc.), pode estipular-se um parâmetro para o atraso de modo a dividi-lo em diferentes classes

(em que este parâmetro corresponde ao valor máximo para o atraso médio de cada classe) apresentadas na Tab. 3.2. A unidade de informação para estes parâmetros é quantificada em SDU (*Service Data Unit*): unidade de dados que decorre entre o utilizador e a rede GPRS através dum ponto de acesso ao serviço da rede (NSAP, *Network Service Access Point*). Note-se que este atraso se prende somente com os tempos dispensados entre a entrada e saída dos pacotes na rede do GPRS (i.e., entre a rede externa e o terminal), que inclui o atraso subjacente ao acesso do canal rádio.

Tab. 3.2 - Classes de Atraso (extraído de [3GPP03a]).

Classe de Atraso	Atraso (valores máximos)			
	Tamanho SDU: 128 Bytes		Tamanho SDU: 1024 Bytes	
	Atraso Médio de Transferência [s]	Percentil 95 de Atraso [s]	Atraso Médio de Transferência [s]	Percentil 95 de Atraso [s]
1. (Preditivo)	< 0,5	< 1,5	< 2	< 7
2. (Preditivo)	< 5	< 25	< 15	< 75
3. (Preditivo)	< 50	< 250	< 75	< 375
4. (*Best Effort*)	Não Especificado			

Os requisitos da fiabilidade são influenciados pela combinação dos modos de transmissão associados aos diversos protocolos da camada de rede. A fiabilidade é medida segundo as taxas residuais de erro das seguintes probabilidades: probabilidade de ocorrência de perda de dados, probabilidade de ocorrer uma troca na ordem de entrega dos dados, probabilidade de entrega de dados repetidos e probabilidade de possível corrupção na informação. A fiabilidade divide-se também em classes com as características na Tab. 3.3.

Tab. 3.3 - Classes de Fiabilidade (extraído de [3GPP03a]).

Classe de Fiabilidade	Prob. de perda de SDU	Prob. de SDU Duplicado	Prob. de SDU Desordenado	Prob. de SDU Corrompido	Exemplo de características de aplicações.
1	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	10^{-9}	Sensível a erros, sem capacidade correctiva de erros, capacidade de tolerância a erros limitada.
2	10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-6}	Sensível a erros, capacidade correctiva de erros limitada, capacidade de tolerância a erros limitada boa.
3	10^{-2}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-2}	Insensível a erros, capacidade correctiva de erros e/ou capacidade de tolerância a erros limitada muito boa.

O débito de transmissão é especificado em termos de classes de transmissão que caracterizam a largura de banda esperada para determinados cenários de tráfego. Neste contexto, é definido consoante o número de TSs (N_{TS}), capacidade de 1 TS (C_{TS}) e um factor de redução (F_r):

$$R_b = N_{TS} \times C_{TS} \times F_r \tag{3.11}$$

Note-se que este débito de transmissão vem afectado por um factor de redução, pois o GPRS possui códigos com correcção de erros, bem como cabeçalhos auxiliares nos dados que reduzirão a rentabilidade de utilização dos mesmos TSs. Este não deve ser no entanto confundido com o débito efectivo apresentado em (3.11), dado que o primeiro é associado ao GPRS, enquanto o segundo é visto como um elemento teórico para caracterizar o processamento dum sistema com fila de espera; daí que seja medido em função de dois parâmetros: débito binário máximo (valor máximo esperado em que os dados podem ser enviados, independentemente dos recursos disponíveis, sem que haja garantia alguma que este débito seja atingido) e débito binário médio (é estipulado num contexto *best-effort* e inclui períodos em que não há dados transmitidos).

3.3 Esquemas de Codificação (CS-*n*)

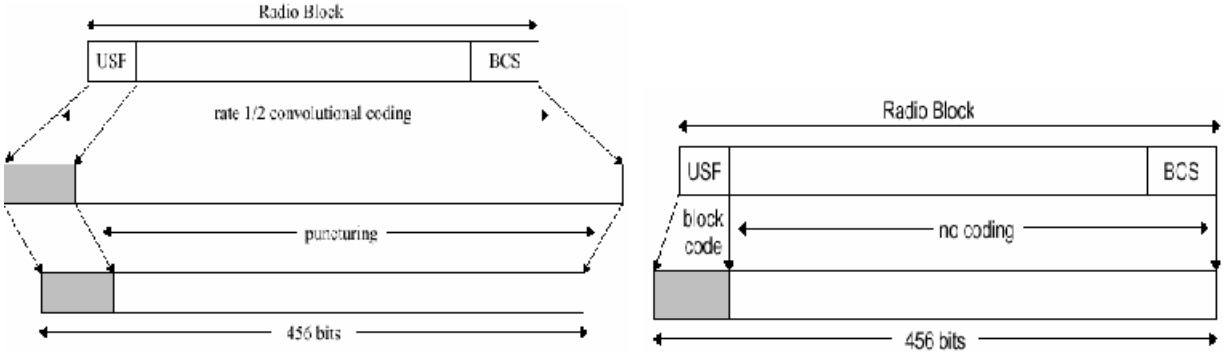
Actualmente, as normas do GPRS definem 4 códigos de canal rádio denominados por *Coding-Schemes* (Esquemas de Codificação, CS-*n*). Existem 4 CS-*n* definidos para os canais de tráfego de pacotes (PDTCH) no GPRS, enquanto para os restantes canais de controle apenas CS-1 é utilizado. Os 4 CS-*n* são obrigatórios para TMs que utilizem GPRS; o CS-1 é obrigatório para a rede de suporte GPRS. A codificação dos CS-n, começa na adição de um bloco de detecção de erros BCS (*Block Check Sequence*). Nos CS-1 a CS-3, ocorre uma pré-codificação USF (*Uplink State Flag*) (excepto para CS-1), adicionando 4 bits de cauda e um código convolucional com metade do ritmo para correcção de erros, que é perfurado para atingir uma dada taxa de codificação. No CS-4 não há codificação para correcção de erros. Na Tab. 3.4 apresentam-se os detalhes dos códigos utilizados, que incluem: o comprimento de cada campo, o número de bits codificados (após adicionar os bits de cauda e a codificação convolucional), o número de bits perfurados e o débito binário (incluindo o cabeçalho RLC, *Radio Link Control*, e informação RLC).

Tab. 3.4 - Parâmetros de codificação dos CS-*n* para GPRS ([ETSI01]).

Esquema	Taxa de codificação	USF	Bloco RLC excepto USF e BCS	BCS	Cauda	Bits codificados	Bit perfurados	Débito [kb/s]
CS-1	$1/2$	3	181	40	4	456	0	9,05
CS-2	$\approx 2/3$	3	268	16	4	588	132	13,4
CS-3	$\approx 3/4$	3	312	16	4	676	220	15,6
CS-4	1	3	428	16	-	456	-	21,4

O CS-1 é o mesmo CS-*n* especificado no GSM para o SACCH e consiste num código convolucional de metade do débito para FEC (*Foward Error Correction*) e BCS (e opcionalmente com FEC). CS-2 e CS-3 são versões perfuradas do mesmo código convolucional do CS-1 para FEC, enquanto o CS-4 não tem FEC. Os CS-2 a CS-4 usam o mesmo CRC (*Cyclic Redundacy Code*) de 16 bits para o BCS. O CRC é calculado para o bloco RLC de dados descodificados (incluindo o cabeçalho MAC, *Medium Access Control*). A USF tem 8 estados possíveis representados por 3 bits contidos no cabeçalho MAC, que permite multiplexar vários blocos de rádio em UL para diferentes TMs utilizando um canal PDCH. Para o CS-1, o bloco todo é codificado com um código convolucional e a USF terá que ser descodificada como parte integrante dos dados. Os CS-*n* restantes geram o mesmo código de 12 bits para a USF, podendo este ser descodificado como parte dos dados ou um bloco de código. As estruturas dos blocos dos diferentes CS-*n*, encontram-se representadas na Fig. 3.4.

Neste trabalho, o critério prende-se com um parâmetro do canal rádio: relação portadora-interferência (*C/I*), expressa em dB, que quantifica a relação da potência da portadora recebida com a potência interferente. O valor de *C/I*, expressa a qualidade do canal rádio: quanto mais elevado for, melhor são as condições de comunicação entre o TM e a EB. Neste caso concreto, quanto maior for *C/I*, menor a necessidade de correcção de erros, aumentando consequentemente o débito da ligação, i.e., o CS-*n*.



(a) CS-1 a CS-3 (b) CS-4

Fig. 3.4 - Estruturas dos blocos de rádio para os CS-*n* (extraído de [ETSI01]).

- No caso do UL, implementou-se um algoritmo que relaciona directamente o valor de *C/I* a um CS-*n* específico (Tab. B.1 do Anexo B). A estimação é feita a partir de cada multitrama TDMA, que contém 52 tramas TDMA (Fig. 2.2), onde 48 tramas TDMA transportam informação para o TM e 2 tramas são utilizadas para estimar *C/I*. Estas 2 tramas não transportam qualquer informação, destinam-se somente para medição de *C/I*.
- No caso do DL, o critério é a percentagem BLER (*Block Error Rate*). O BLER consiste na estimação da percentagem de erros nos blocos de dados transmitidos e é estimado pela rede, cada vez que o TM manda uma mensagem de *Packet Downlink Ack/Nack*, fazendo o *ackowledge/non-acknowledge* dos blocos de rádio recebidos. O BLER pode ser associado a um dado valor de *C/I*, uma vez que também expressa a qualidade do canal rádio (quanto menor for o BLER, melhor é o canal rádio para comunicação). No Anexo B, apresentam-se as tabelas com pontos contendo a correspondência entre os valores do BLER com *C/I* para 4 diferentes modelos de EB. Com base nestas tabelas de pontos, procedem-se a interpolações destes, de modo a obter uma função contínua. Quer as tabelas (Tab. B.2 a Tab. B.5 no Anexo B), quer as equações obtidas a partir das interpolações (Tab. B.6 a Tab. B.9 no Anexo B), permitem definir para um intervalo de C/I, os CS-*n* correspondentes a esse canal rádio (Tab. B.10 no Anexo B).

3.4 Gestão de Recursos

As redes GSM/EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolutions*), CS e GPRS têm coexistido no mesmo meio graças à partilha dos mesmos recursos ([HaRM03]). A atribuição de canal pode ser feita consoante 2 estratégias básicas: reserva de recursos em separado para PS e CS, ou partilha total dos recursos entre PS e CS.

Quando se reservam os recursos em separado, o PS só pode utilizar o conjunto de canais reservados para este e o CS só utiliza o conjunto restante de canais reservados. Esta utilização só é permitida desde que em cada conjunto existam canais livres, podendo por vezes haver reservas dentro de cada conjunto, de modo a garantir uma capacidade mínima para PS/CS. Note-se que, em caso de PS/CS esgotarem os seus recursos, não poderão recorrer

aos recursos de CS/PS (respectivamente), ainda que este tenha recursos livres. Esta estratégia apresenta diversas vantagens:

- os canais de PS permanecem consecutivos, o que permite maximizar a probabilidade de atribuição do número máximo de TS para cada TM.
- melhora a multiplexagem estatística, permitindo uma melhor utilização dos TSs.
- criação de algoritmos para optimizar a atribuição de CS/PS. Estes distinguem-se por CS necessitar uma atribuição de TS contínua e estável enquanto o PS usa frequentemente TSs dum modo irregular e mais curta duração.

No entanto, apresenta uma desvantagem significativa dado que é inflexível na organização destes conjuntos, pois muitas vezes os TSs atribuídos sequencialmente, nem sempre chegam a ser utilizadas, o que impede a rentabilização total dos recursos, quando um dos conjuntos esgota os seus recursos e o outro tem recursos livres.

A outra estratégia consiste em ambos terem acesso a todos os recursos livres, o que concede um grau maior de liberdade ao sistema na atribuição de canais. A desvantagem desta estratégia reside na impossibilidade de optimizar separadamente a atribuição de canais para PS/CS, pois a atribuição deixa de ser sequencial, levando a uma eficiência de utilização inferior dos TSs.

Existem diversos algoritmos para implementar o modo como a partilha é levada a cabo para ambas estratégias.

Outro mecanismo (existente em EBs) que permite rentabilizar o uso dos recursos, denomina-se como *intra-cell handover*, que consiste em transferir uma chamada activa ocupando um canal partilhado para outro canal reservado livre. Ao libertar canais partilhados e ocupar recursos reservados, haverá uma diminuição da probabilidade de atraso (para o GPRS) bem como um aumento de canais livres para uso de GSM/GPRS. Note-se que o mecanismo de *intra-cell handover* se aplica às chamadas CS e PS. Na Fig. 3.5 apresenta-se um exemplo de *intra-cell handover*.

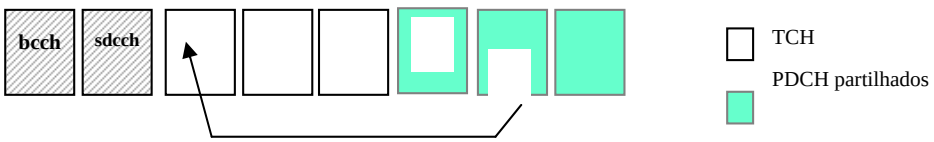


Fig. 3.5 - *Intra-cell handover*.

Por fim, outro mecanismo existente na gestão de recursos relaciona-se com *temporary block flow* (TBF), que consiste numa ligação temporal e temporária entre o TM e a rede, que emprega recursos da interface rádio para o envio de dados contidos em blocos rádio. O TBF relaciona-se com o R_b de acordo com (3.11) ([HaRM03]), onde b_i é o número de bits em cada bloco RLC (depende de CS-*n* utilizado) e T_{TBF} é a duração do TBF:

$$R_b = \frac{\sum b_i}{T_{\text{TBF}}} \tag{3.12}$$

O TBF é somente aberto em caso de haver dados a transmitir, contudo os fabricantes definem um atraso no fecho do TBF em DL (*Delayed* DL TBF), i.e., quando já tiver terminado o envio de dados, o TBF mantém-se aberto durante um período de tempo adicional. Este atraso serve para evitar a abertura e fecho do TBF (provocando atrasos desnecessariamente), visto que podem ser necessárias retransmissões de blocos RLC, que sofreram erros de transmissão, e também porque aplicações *bursty* (e.g., HTTP da classe *Interactive*) enviam dados em rajadas

espaçadas de tal modo que provocaria numerosas aberturas e fechos de TBF, causando atrasos e má gestão dos recursos rádio.

3.5 Classes *Multislot*

A capacidade *Multislot* mencionada na Secção 2.2 , consiste na atribuição de um ou mais canais de tráfego de pacotes para um mesmo TM. Podem-se definir diferentes combinações de utilização do número de canais em DL e UL. Contudo, os TMs requerem tempo adicional para poder medir o nível do sinal e iniciar a transmissão/recepção, o que significa que não se podem arbitrar valores para as classes *Multislot*. Estipulam-se diferentes classes para cada combinação de utilização de canais em DL/UL, consoante o TM. Há 2 classificações possíveis para os TMs e suas características, são:

- Tipo 1: TMs não têm que possuir a capacidade de transmitir e receber, simultaneamente.
- Tipo 2: TMs têm que possuir a capacidade de transmitir e receber, simultaneamente.

Na Fig. 3.6, exemplifica-se o caso de 1 TM do tipo 1 com capacidade de utilizar 3 canais em DL e 1 UL, com tempo mínimo de transmissão de 1 TS (Ttb) e tempo mínimo de recepção de 3 TSs (Tra). Na Fig. 3.7, exemplifica-se para 1 TM com as mesmas características que da Fig. 3.6, desrespeitando os tempos de Ttb e Tra.

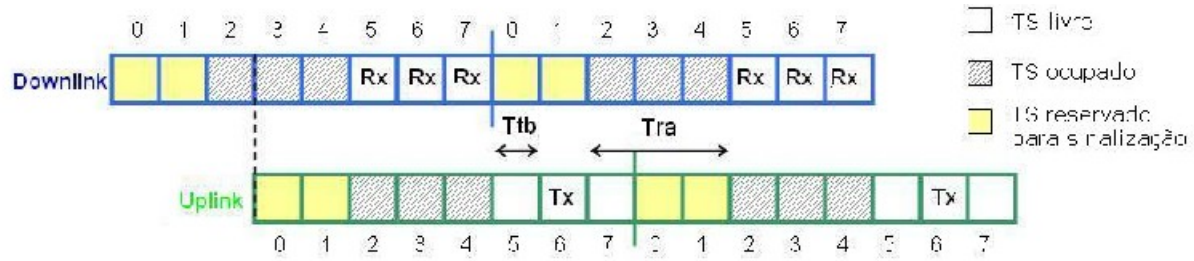


Fig. 3.6 - Atribuição correcta de canais.

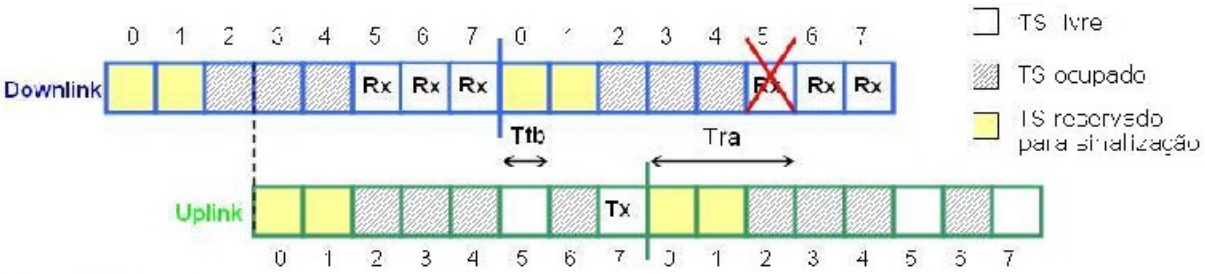


Fig. 3.7 - Atribuição incorrecta de canais.

Nas normas [3GPP03b], encontram-se definidas as diferentes combinações (i.e., classes *Multislot*) de uso simultâneo de canais em DL e UL. No Anexo A, apresentam-se as classes *Multislot* correspondentes a TMs do tipo 1, actualmente disponíveis.

4. Descrição do Simulador

4.1 Perspectiva Geral

A simulação do GSM/GPRS compreende 3 blocos básicos implementados na linguagem C++: gestão de recursos, gerador de tráfego e fila de transmissão de dados. Após estes 3 blocos interagirem, procede-se ao tratamento de dados para obter estatísticas do sistema e dos utilizadores para análise de resultados, representado na Fig. 4.1.

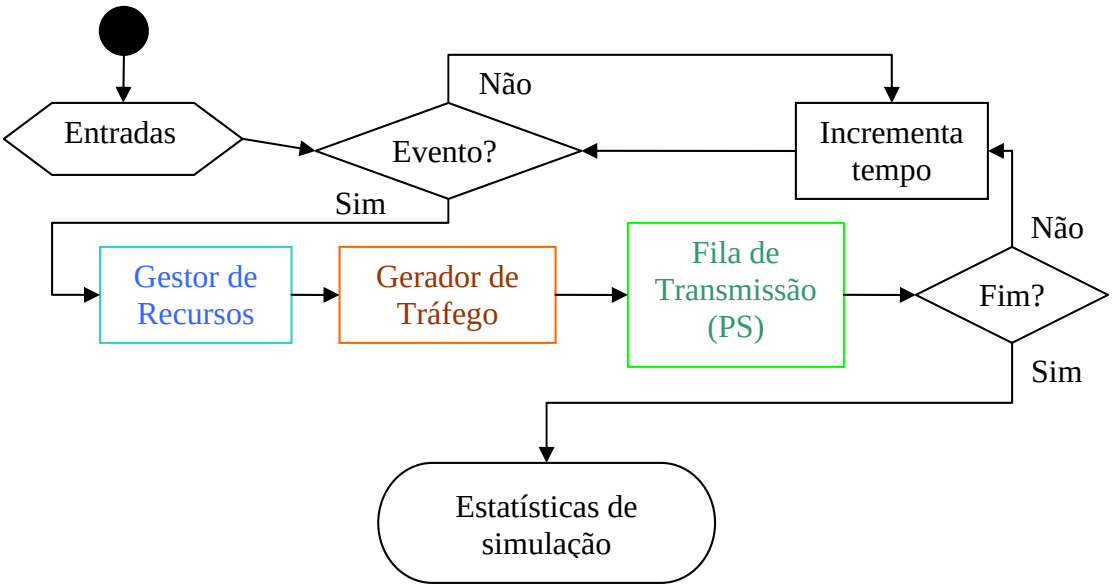


Fig. 4.1 - Estrutura do simulador.

No início da simulação, estipulam-se os dados de entrada (Secção 4.2) do simulador, e.g., número total de utilizadores (TMs), características dos TMs, número total de canais, parâmetros para geração de tráfego, etc.. Cada utilizador realizará chamadas, sendo estas representadas no sistema como eventos para o Gerador de Tráfego. Estes eventos são associados ao utilizador através de um número de identificação (NID) e inseridos numa lista ordenada por ordem cronológica. O simulador, em cada iteração (i.e., em cada trama GSM de duração de 4,615 ms), verifica se já chegou o tempo de algum evento (ou seja, o tempo associado a um evento ser maior ou igual ao tempo do relógio do simulador), o que leva ao accionamento do Gestor de Recursos, de modo a que o sistema tente atribuir recursos à nova chamada. O evento acciona o gerador de tráfego para completar os dados referentes a este evento (e.g., duração da chamada (CS), volume de dados (PS), etc.) consoante o serviço. Caso não haja recursos disponíveis, a chamada será bloqueada (CS) ou atrasada (PS) até que o sistema tenha novamente recursos disponíveis.

O Gestor de Recursos contém as variáveis que monitorizam o uso dos canais reservados e partilhados, permitindo em cada iteração saber o número de chamadas activas bem como os canais em uso. Estas mesmas variáveis expressam o número total de TSs. Cada TS só é utilizada por um utilizador CS, enquanto um utilizador PS pode utilizar mais do que um TS. O Gestor de Recursos não contém a informação do número de TSs atribuídas a cada utilizador PS, mas somente o número de utilizadores PS.

Quando a chamada CS atinge a duração gerada pelo Gerador de Tráfego, o Gestor de Recursos actualiza as variáveis de uso de canais, procede ao *Intra-cell handover* descrito em 3.4, colocando chamadas PS em espera na fila de transmissão (caso haja chamadas PS em

espera) e insere na lista de eventos, o evento de fim de chamada. A transmissão das chamadas PS é gerida pelo bloco da Fila de Transmissão.

Quando o Gestor de Recursos e Gerador de Tráfego tiverem desempenhado a sua função, a Fila de Transmissão distribui os recursos disponíveis (representados pelas variáveis do Gestor de Recursos) pelas chamadas PS e debita o volume de dados da chamada PS consoante o TM. A distribuição de recursos será feita seguindo a filosofia de *best-effort*, descrita na Secção 3.2. Será neste bloco onde se encontra a informação relativa ao número de TSs atribuídas (de acordo com as classes *Multislot*, caracterizadas no ficheiro auxiliar "MultislotClass.txt") a cada utilizador PS e se debita o volume de dados correspondente. O volume de dados debitado é calculado de acordo com o débito correspondente a CS-*n* (R_{bCS-n}) e o número de TSs (N_{TS}), de acordo com (3.3):

$$R_b = N_{TS} \times C_{TS} \times F_r = N_{TS} \times R_{bCS-n} \tag{4.1}$$

Uma vez transmitido o volume de dados, a chamada PS aguarda na Fila de Transmissão um tempo adicional correspondente ao *Delayed* DL TBF descrito na Secção 3.4 e configurado no início da simulação, antes da chamada PS ser removida da fila (fecho do DL TBF) e gerar o evento de fim de chamada.

O CS-*n* de cada TM é actualizado periodicamente com base num gerador aleatório de canal: no início do programa define-se um período múltiplo de blocos rádio (equivalente a 4 tramas GSM), ao fim do qual o simulador percorre os TMs na Fila de Transmissão, gerando um valor para C/I de acordo com o Anexo B, seleccionando o CS-*n* indicado para o C/I, consultando para esse efeito 2 ficheiros ("CodSchDL.txt" e "CodSchUL.txt"). Note-se que no caso de se optar por simular os TMs com CS-*n* fixo, não há geração de C/I nem a correspondente actualização do CS-*n*.

Ao terminar a chamada, o simulador cria o evento de fim de chamada, que acciona o Gerador de Tráfego para uma nova chamada, bem como o registo dos dados da chamada concluída num ficheiro; o novo evento irá desencadear o mesmo ciclo até aqui descrito. O simulador percorre a lista de eventos (que vai sendo actualizada à medida que o tempo de simulação é incrementado) e as chamadas vão decorrendo.

Uma vez atingida a duração escolhida no início da simulação, a simulação termina, procedendo ao tratamento dos dados nos ficheiros e apresentando os resultados inerentes ao cenário simulado.

Cada um dos blocos foi testado à medida que foi implementado; na Secção 4.3, descrevem-se os testes efectuados para validação dos modelos.

Procederam-se a diversas optimizações que minimizassem o número de operações em cada iteração: após verificação de novo evento (se sim, realiza o ciclo ilustrado na Fig. 4.1), transmissão de dados das chamadas PS na fila de transmissão e actualização de estatísticas. As optimizações no ciclo da Fig. 4.1 consistiram em:

- Gestor de Recursos: Só é activado ao surgir nova chamada ou fim de chamada activa. Em caso da chamada terminar, só atribui recursos (caso sejam partilhados) às chamadas em espera, seguida de uma redistribuição geral dos recursos (função da fila de transmissão).
- Gerador de Tráfego: Só é activado quando uma chamada inicia/finaliza, preenchendo todos os dados relativos à chamada nesse instante. Só insere eventos dentro do intervalo de simulação definido no início do programa.
- Fila de Transmissão: Percorre só as chamadas PS activas (não contabiliza as chamadas CS, que estão a cargo do Gestor de Recursos) em cada iteração uma única vez e ignora a distribuição de TSs por cada portadora (i.e., na transmissão só considera o número de TSs atribuídos ao TM). A distribuição de TSs só é efectuada quando o Gestor de Recursos

detecta alteração nos recursos partilhados ou em caso de nova/fim de chamada; a distribuição é feita de modo equitativo (i.e., atribui o valor médio dos recursos disponíveis pelos utilizadores, após o qual distribui os recursos que sobrarem pelos TMs há mais tempo na fila), evitando a distribuição unitária por cada TMs percorrendo numerosas vezes a fila de transmissão para concluir a distribuição total de TSs.

- O tempo de simulação é iniciado logo no tempo do 1º evento, evitando a espera desnecessária que precede a ocorrência deste.

Apresenta-se uma descrição dos modelos utilizados nos 3 blocos principais do simulador na Secção 4.3.

4.2 Entradas

As entradas do simulador estipulam as condições de simulação e o cenário de tráfego que se pretende estudar. As entradas necessárias para correr o simulador são:

- Duração do tempo total de simulação: definição da duração total de simulação em segundos.
- Número de utilizadores na EB: definição do número de utilizadores a ser distribuídos pelos serviços a ser gerados pelo gerador de tráfego.
- Definição de Canais: Estipulam-se os recursos do sistema consoante o número de portadoras (Tab. 4.4). Uma vez retirados os canais para sinalização e controle, definem-se o número de canais reservados para GSM e GPRS.
- Taxas de penetração de cada serviço: definição em percentagem do número de utilizadores a distribuir por cada serviço (Voz, FTP, *E-mail*, *Internet* via WWW, *Internet* via WAP, MMS e Vídeo).
- Parâmetros estatísticos para cada serviço: os parâmetros das distribuições de cada serviço que serão os valores das distribuições estatísticas do Gerador de Tráfego. Apresentam-se os dados por omissão que podem ser configurados e funções estatísticas de cada, utilizadas no Gerador de Tráfego em DL, nas Tab. 4.1 (dados típicos de cenário urbano, fornecidos pela *Optimus*, excepto FTP. Os dados de FTP foram retirados de [SeFC03] e [Agui03]), Tab. 4.2 (com os parâmetros de Tab. 3.1, mas com λ e μ_{cs} adaptados aos valores fornecido pela *Optimus* seguindo [SeFC03]) e em UL na Tab. 4.3. Os cálculos dos valores apresentados na Tab. 4.1 a Tab. 4.3, encontram-se explicados na Secção 5.1 .

Tab. 4.1 - Valores por omissão para serviços do tipo *On-Off* (DL).

Parâmetros	FTP	*E-mail*	MMS	Vídeo
Valor médio do volume de dados (μ_{LN}, Log-normal) [kB]	8,49	2,67	9,82	7,09
Desvio padrão do volume de dados (σ_{LN}, Log-normal) [kB]	3,66	123,95	18,21	13,13
Número de chamadas por hora (μ, Exponencial) [/h]	0,001	0,04	0,15	0,10

- Taxas de penetração para cada classe *Multistlot*: distribuição dos utilizadores PS por cada classe *Multislot*.
- Taxas de penetração para CS-*n*: distribuição dos utilizadores PS por cada CS-*n*.
- Modo CS-*n* (fixo ou variável): O CS-*n* de cada utilizador pode ser fixo ao longo da simulação ou pode ser alterado periodicamente segundo um simulador de canal de rádio aleatório (com distribuição uniforme).

- Frequência de actualização de CS-*n*: No caso de optar por CS-*n* variável, pode-se definir a periodicidade de actualização CS-*n* (o tempo é inserido em segundos, mas é convertido em múltiplos da duração de blocos RLC) ao fim do qual o canal rádio é gerado aleatoriamente e CS-*n* é alterado consoante o canal.

Tab. 4.2 - Valores por omissão para serviços do tipo *bursty* (DL).

Parâmetros	Internet via WWW	Internet via WAP
Número de chamadas por hora [/h] (λ , Poisson)	0,53	1,39
Número de pacotes numa rajada (μ_{pr} , Geométrica)	5	5
Tempo entre pacotes consecutivos [/s] (μ_{tpc} , Geométrica)	0,5	0,5
Tempo de leitura do utilizador [s] (μ_{tl} , Geométrica)	8	8
Número total de pacotes numa sessão (μ_{cs} , Geométrica)	75	196
O volume médio de cada pacote [Bytes] (Pareto)	480	480

Tab. 4.3 - Valores por omissão para serviços do tipo *On-Off* (UL).

Parâmetros	FTP	*E-mail*	MMS
Valor médio do volume de dados (μ_{LN} , Log-normal) [kB]	8,49	2,67	9,82
Desvio padrão do volume de dados (σ_{LN} , Log-normal) [kB]	3,66	123,95	18,21
Número de chamadas por hora (μ , Exponencial) [/h]	0,0001	0,04	0,15

- Intervalo de variação do canal rádio: Definição dos limites da distribuição uniforme que vai gerar o valor de *C/I* em [dB].
- Tipo de EB: A variação de CS-*n* depende do tipo de estação base e dum dado canal rádio. Consideram-se 2 perfis TU (*Typical Urban*) de EB com e sem FH (*Frequency Hopping*): TU3 com/sem FH e TU50 com/sem FH. Os perfis TU são correspondentes a cenários de propagação de ambiente Urbano definidos nas normas GSM. Estes mesmos perfis consideram a velocidade a que o TM se desloca: TU 3 (3 km/h, equivale a um utilizador pedestre) e TU 50 (50 km/h, equivale a um utilizador veicular). Por fim, as EBs podem possuir ou não, FH. O uso de FH consiste em alterar a frequência em que as tramas TDMA são enviadas para outra, o que permite evitar o desvanecimento mais intenso em algumas frequências. No Anexo B, apresentam-se os critérios de decisão de CS-*n* para os perfis TU mencionados.
- Duração do *Delayed* DL TBF: Define-se a duração em segundos do tempo do TBF após ter esvaziado o *buffer* de transmissão de uma chamada PS.
- Ficheiros Auxiliares: O simulador requer 3 ficheiros em que 2 servem para poder determinar os CS-*n* em DL e UL ("CodSchDL.txt" e "CodSchUL.txt") descritos no Anexo B, e o outro contendo os TSs disponíveis para cada classe *Multislot* ("MultislotClass.txt"), expresso na Tab. A.1 do Anexo A.

Uma vez inseridos estes dados, o simulador irá gerar tráfego para cada utilizador (pertencente a cada serviço) e processá-lo-á como o sistema GSM/GPRS durante o tempo de simulação definido.

4.3 Modelos

Os modelos utilizados no simulador baseiam-se nos modelos descritos no Capítulo 3, a descrição destes pode ser repartida de acordo com a estrutura básica do simulador: Gestor de Recursos, Gerador de tráfego e Fila de transmissão. Por fim, apresentam-se adaptações no simulador, correspondentes a outros modelos que não se enquadram com nenhum dos 3 blocos básicos do simulador (Fig. 4.1).

Gestor de Recursos

Na gestão de recursos, contabilizam-se o número e tipo de chamadas a decorrer no sistema, de modo a concluir qual o destino da chamada. Uma das entradas consiste no número de portadoras, onde se retiram os canais para efeitos de sinalização e controle, dimensionando o sistema (ver Secção 3.1) para uma probabilidade de bloqueio de 1% para o modelo de Erlang-B, obtendo os canais para tráfego de acordo com Tab. 4.4.

Tab. 4.4 - Dimensionamento de canais para bloqueio a 1% (Fornecido pela *Optimus*).

Número de Portadoras	**Número Total de TS**	**Número de TS por Canal**		
		BCCH	**SDCCH**	**TCH + PDTCH**
1	8	1	1	6
2	16	1	1	14
3	24	1	2	21
4	32	1	2	29
5	40	1	3	36
6	48	1	3	44

Uma vez definidos os canais para tráfego, estes repartem-se em canais partilhados e/ou reservados para CS e/ou GPRS no caso do DL. No caso do UL, não há esta repartição, os canais são todos partilhados.

O sistema começa por atribuir os recursos reservados, ocupando os recursos partilhados somente quando não existirem recursos reservados disponíveis. O gestor de recursos dá prioridade na atribuição de recursos às chamadas CS, face às chamadas PS. O resultado da atribuição de recursos é feito consoante o tipo de chamada (Fig. 4.2):

- CS: A chamada ocupará um canal até que esta termine ou bloqueie, em caso de inexistência de recursos disponíveis (canais reservados para CS e canais partilhados). Note-se que uma chamada CS, pode retirar um canal partilhado no decorrer da transmissão de uma chamada PS que esteja a utilizar esse mesmo canal.
- PS: A chamada será colocada na fila de transmissão ou será colocada na fila de espera, caso não haja recursos disponíveis.

Uma vez terminadas as chamadas, o gestor de canais novamente tem uma abordagem para cada tipo de chamada:

- CS: Caso os recursos partilhados estejam a ser ocupados por esta, o gestor de canais verifica se alguma chamada PS se encontra na fila de espera, antes de os libertar, cedendo-os em caso afirmativo (corresponde ao mecanismo de *intra-cell handover* descrito na Secção 3.4). Caso contrário, libertará o recurso ocupado.
- PS: As chamadas podem terminar por 2 motivos: o *buffer* do utilizador não tem mais dados para transmitir ou uma chamada CS retira um canal partilhado em utilização pelo PS (colocando-a na fila de espera).

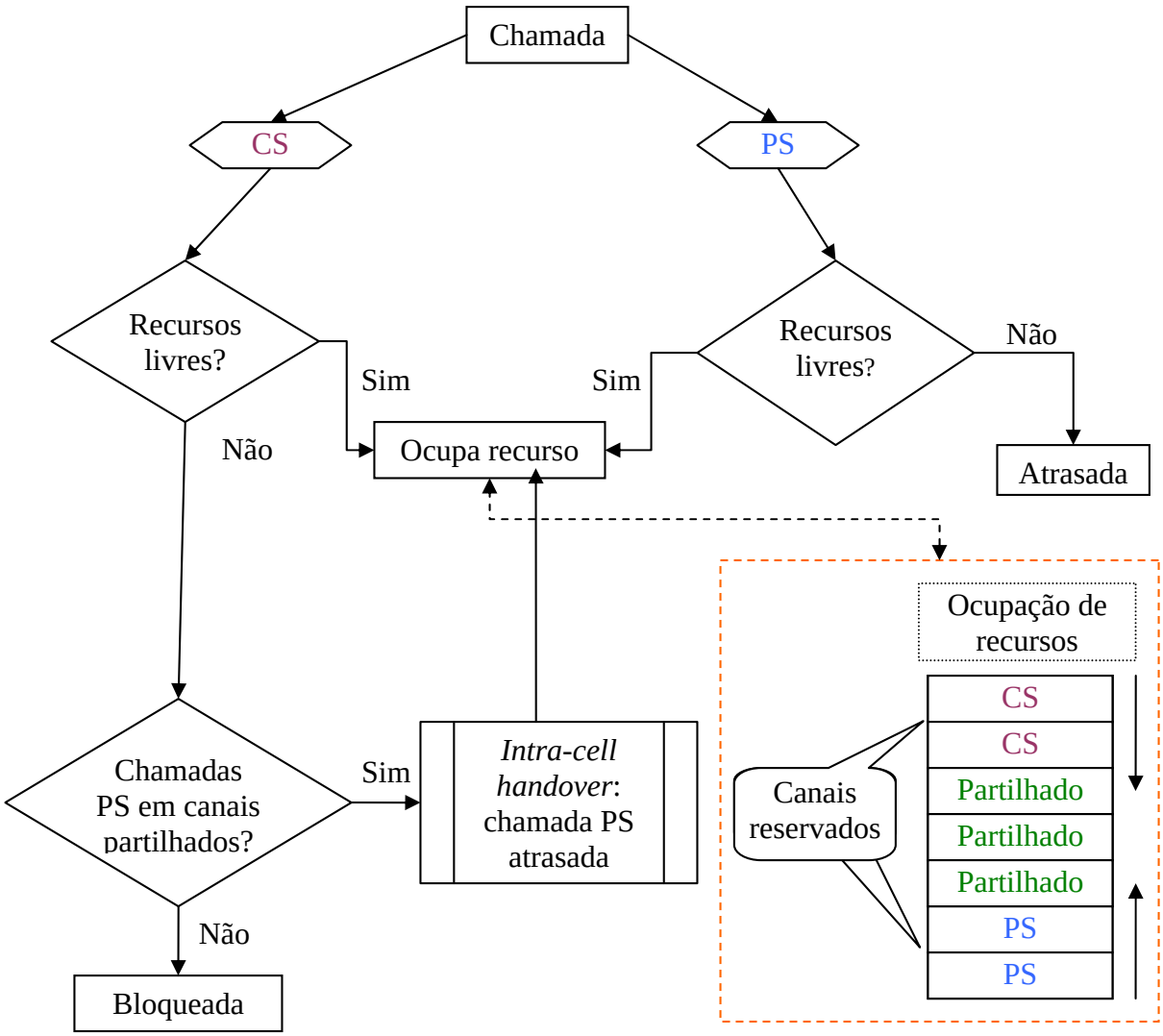


Fig. 4.2 - Atribuição de recursos CS e PS executada pelo Gestor de Recursos.

Note-se que no caso das chamadas do tipo *Internet*, visto serem compostas por várias rajadas de pacotes que dão entrada no sistema em instantes distintos, o sistema terá 3 abordagens possíveis para cada pacote pertencente a uma sessão:

- se existirem pacotes na fila de transmissão de dados, este é adicionado ao *buffer* do utilizador juntamente com os dados já existentes para transmitir;
- se não existirem pacotes na fila de transmissão de dados, mas sim na fila de espera, será adicionado ao *buffer* do utilizador, novamente;
- se não existirem pacotes dessa chamada existentes no sistema, o gestor atribui recursos como se fosse uma chamada nova de PS.

Sublinhe-se que o Gestor de Recursos segue o modelo de FIFO (*First In, First Out*), dando prioridade nos recursos às chamadas que estiverem na fila de transmissão há mais tempo e em caso de atraso (e.g., uma chamada CS ocupar um recurso partilhado que esteja a ser utilizado por uma chamada PS), coloca as chamadas que estejam na fila de transmissão há menos tempo.

O gestor de canais, acciona o gerador de tráfego e a fila de transmissão (no caso das chamadas PS), após contabilizar o uso de recursos.

Testes efectuados a este modelo basearam-se em simular cenários onde as chamadas CS retirassem canais partilhados em uso por chamadas PS, colocando as chamadas PS em

espera enquanto estas decorressem. Uma vez que diferentes chamadas CS (que ocuparam canais reservados) terminassem, observou-se que as chamadas PS deram entrada no sistema respeitando FIFO de acordo com o mecanismo *Intra-cell handover* (Fig. 3.5). Este teste, para além de permitir verificar FIFO e *Intra-cell handover*, permitiu testar também as filas de espera bem como as variáveis que registavam os atrasos das chamadas PS.

Gerador de Tráfego

No caso das chamadas PS, a geração ocorre independentemente dos recursos existentes no instante em que a chamada dá entrada no sistema, dado que em caso de não existirem recursos disponíveis, em vez de transmitir, esta é colocada em fila de espera até que haja recursos disponíveis. Note-se que o novo evento só é incluído na lista de eventos a decorrer no sistema caso o tempo gerado se encontre no intervalo de simulação, evitando o uso desnecessário de recursos informáticos. As implementações dos modelos de tráfego em DL foram adoptadas de [Agui03], [SeFC03] e [GoPi03]:

- Voz: O tempo entre chamadas e a duração das mesmas são gerados segundo uma distribuição exponencial negativa.
- FTP: O tempo entre chamadas é gerado segundo uma distribuição exponencial negativa e o volume de dados por uma função Log-Normal.
- *E-mail*: o modelo de tráfego é o mesmo que o utilizado para FTP.
- MMS: Como foi mencionado na Secção 3.1, visto o débito de GSM/GPRS não ser tão sensível quanto o UMTS aos atrasos entre pacotes, aproxima-se a um serviço do tipo *On-Off*, acabando por ser descrito tal como o FTP, por uma distribuição exponencial negativa e o volume de dados por uma função Log-Normal.
- Vídeo: Analogamente ao caso do MMS, o modelo de tráfego é aproximado também ao utilizado no FTP.
- *Internet* via HTTP: O modelo implementado para este serviço *bursty* foi seguido rigorosamente de acordo com o modelo de [ETSI98], descrito na Secção 3.1.
- *Internet* via WAP: Dado que o seu comportamento é igual ao caso de *Internet* via HTTP diferindo apenas nos valores empregues nas distribuições, o modelo utilizado foi o mesmo que *Internet* via HTTP ([ETSI98]).

No caso do UL, mantiveram-se os serviços FTP, MMS e *E-mail*. O motivo para retirar os restantes serviços prende-se com as características de tráfego: o vídeo é serviço acentuadamente assimétrico em que o tráfego em UL é residual (e.g., mensagens de controlo), enquanto no caso do acesso à *Internet* (via WWW e WAP), o tráfego gerado em UL é resultante dos protocolos e não evidencia os dados de utilizador.

O Gerador de Tráfego trata de modo distinto os serviços de tráfego do tipo *on-off* e *bursty*. No caso *on-off*, o evento passa a ser tratado como chamada após preencher os seus campos segundo as funções estatísticas acima descritas para cada serviço. No caso *bursty*, as rajadas e respectivos pacotes, são gerados e inseridos como eventos na lista de eventos, até chegar o seu tempo e serem tratados como pacotes duma chamada (os dados necessários à sua caracterização são inseridos na altura da inserção na lista de eventos). Uma vez que o evento passe a chamada, esta é processada no gestor de recursos. A geração de tráfego é sempre precedida de registo dos dados em ficheiros de texto para posteriores cálculos estatísticos. Na Fig. 4.3, representam-se os processos descritos do Gerador de Tráfego.

Uma vez concluída a chamada, são registados os restantes dados resultantes da transmissão e gera novo evento representando uma nova chamada a ser realizada posteriormente. O gerador de tráfego só regista chamadas concluídas, as chamadas a decorrer no sistema não o influenciam dada a optimização descrita na Secção 4.1.

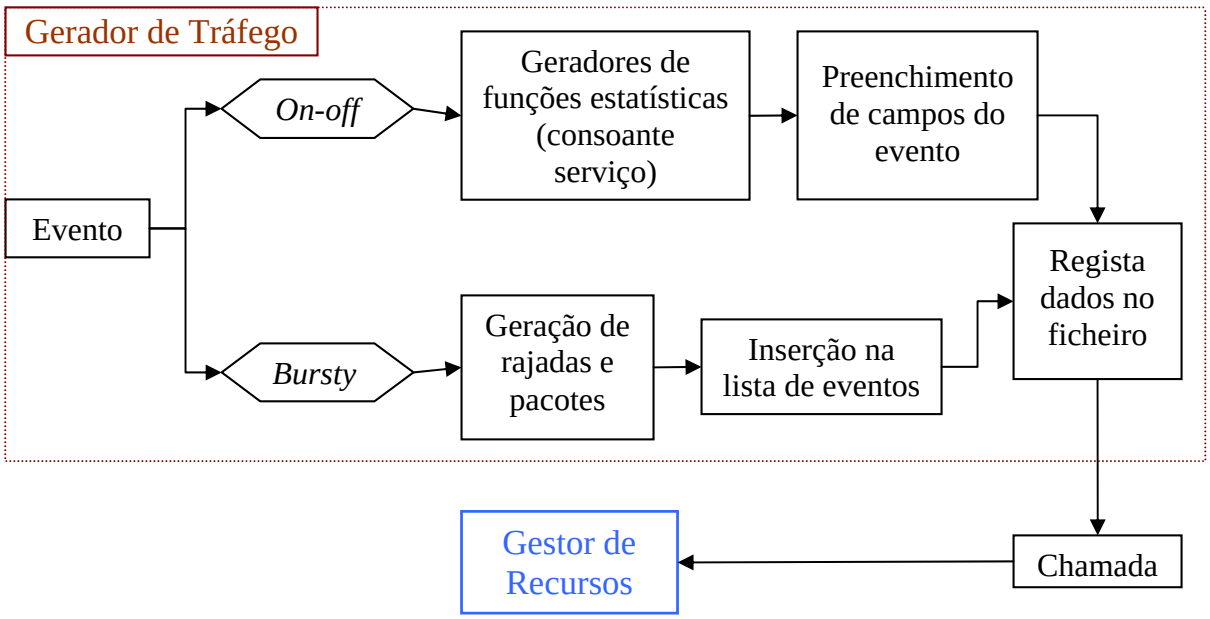


Fig. 4.3 - Processos existentes no Gerador de Tráfego.

Usualmente, acrescenta-se um intervalo adicional ao intervalo de simulação (geralmente, 10 minutos) com o intuito de estabilizar o comportamento (do ponto de vista estatístico) do cenário de tráfego.

Os testes associados ao Gerador de Tráfego, passaram pela validação das distribuições estatísticas utilizadas para cada serviço (no Anexo C) bem como verificação nos instantes de tempo e volumes gerados nas saídas do simulador. Uma vez que não se obtiveram discrepâncias significativas nos testes e nas simulações, os modelos empregues no Gerador de Tráfego consideraram-se válidos.

Fila de transmissão (PS)

Em cada iteração, a fila de transmissão de dados irá atribuir os recursos existentes (i.e., os recursos definidos pelo Gestor de Recursos) para PS (canais reservados para PS e canais partilhados livres) do sistema de acordo com as características dos TM. A fila de transmissão de dados só contém chamadas PS, dado que as chamadas CS são contabilizadas de acordo com o Gestor de Recursos (uma chamada CS ao entrar no sistema ocupa os recursos disponíveis para CS, não sendo necessário colocá-la na fila de transmissão).

Na fila de transmissão, só se encontram as chamadas PS cujos eventos possuam todos os campos devidamente caracterizados pelo Gerador de Tráfego. Em cada iteração, o sistema percorre a fila de transmissão debitando o volume de dados concordante com as características do TM: classe *Multislot* e CS-*n* (DL/UL).

Uma chamada PS encontra-se associada a uma classe *Multislot* consoante o TM, ao dar entrada na fila de transmissão; com base na classe, o sistema procederá à atribuição de um dado número de TSs do seguinte modo: verifica qual o número máximo de TSs suportados pelos TMs (informação contida num dos ficheiros auxiliares ao programa) contidos na fila de transmissão, compara com os recursos existentes e, caso os recursos do sistema forem superiores, atribuirá o número máximo de TSs a cada um dos TMs. Em caso contrário, o sistema procederá a uma distribuição equitativa respeitando as limitações inerentes à classe *Multislot* (i.e., caso a distribuição equitativa de TSs seja superior a número máximo de TSs de um TM pertencente a uma dada classe, atribuir-lhe-á o seu valor máximo e não o valor equitativo). Se após a distribuição equitativa sobrem recursos, a fila de transmissão será

percorrida novamente e estes serão distribuídos pelos TMs cujas classes *Multislot* que não tenham atingido o número máximo de TSs em transmissão (contido no ficheiro "MultislotClass.txt"), dando prioridade às chamadas que estejam há mais tempo na fila de transmissão, respeitando a filosofia de FIFO. Este processo de atribuição de recursos foi optimizado, de modo a ser feito somente quando as chamadas terminam ou quando as novas chamadas que influenciam esta atribuição de TSs (todas as chamadas excepto as chamadas CS que ocupam recursos reservados para CS, que nunca podem ser utilizadas por chamadas PS) dão entrada no sistema. Outra optimização, consistiu em atribuir o valor equitativo dos recursos na primeira vez que percorre a fila de transmissão e os recursos que sobrarem, serem atribuídos um de cada vez, a cada TM. Sem esta optimização, o sistema atribuiria um TS de cada vez, a cada TM, levando a que percorresse a fila de transmissão várias vezes, tornando a distribuição de recursos mais morosa.

Em cada iteração, o sistema percorre as chamadas PS na fila de transmissão debitando o volume de dados correspondente ao débito CS-*n* (R_{bCS-n}), obtendo o débito de transmissão descrito em (4.1). A operação é repetida em cada iteração até o volume de dados ser nulo. Ao anular o volume de dados, a chamada PS aguarda o tempo estipulado para o *Delayed* DL TBF antes de ser retirada da fila de transmissão em DL. No caso da fila de transmissão em UL, tudo se mantém excepto que a chamada não aguarda o tempo equivalente ao *Delayed* DL TBF. Quando a chamada seja retirada da fila de transmissão, o simulador insere o evento de fim de chamada para proceder à recolha dos dados estatísticos e acciona o gerador de tráfego para uma nova chamada. Na Fig. 4.4, representam-se os processos inerentes a uma iteração da Fila de Transmissão (PS).

Um dos testes a este bloco, consistiu em verificar o débito de transmissão duma chamada, onde se fixou R_{bCS-n} e a classe *Multislot* (nomeadamente, N_{TS}), sem que a chamada PS sofresse qualquer alteração (e.g., atraso, diminuição de N_{TS} ao longo da transmissão), obtendo o valor exacto de (4.1). Ao inserir o *Delayed* DL TBF, o débito de transmissão da mesma chamada, baixou de acordo com (3.11).

Outro teste a este bloco, consistiu na verificação na distribuição de recursos pelas chamadas PS. Impuseram-se diferentes classes *Multislot* aos TMs associados, de modo a verificar os 2 casos possíveis:

- Cada TM utiliza o máximo de TSs sem que haja qualquer limitação de recursos por parte do sistema. Verificou-se que o sistema atribuiu o máximo de TSs definido para cada classe *Multislot* (Tab. A.1 no Anexo A contido em "MultislotClass.txt").
- Cada TM utiliza os recursos disponíveis por limitação de recursos por parte de sistema. Verificou-se que o sistema procede a uma distribuição equitativa sempre que possível, i.e., as chamadas PS recebem o mesmo número de TSs sempre que este não exceda o máximo definido para a sua classe *Multislot*. Caso o número médio TSs definido na distribuição equitativa fosse superior ao máximo suportável pelo TM, verificou-se que o sistema atribuiu o máximo definido pela sua classe *Multislot*, distribuindo as TSs restantes pelos TMs que não tivessem atingido o máximo suportável pela sua classe *Multislot*, seguindo também a filosofia FIFO.

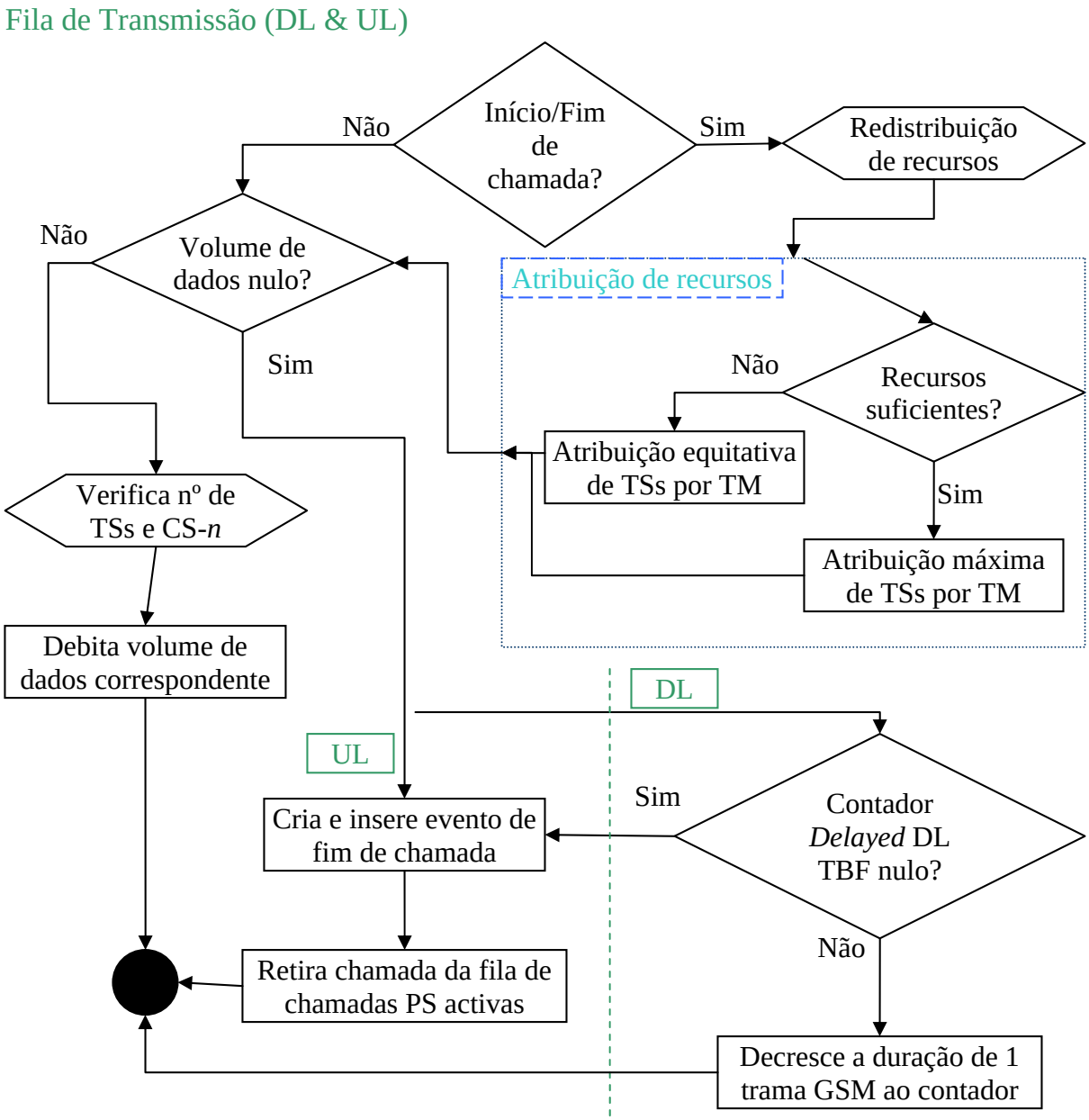


Fig. 4.4 - Fila de Transmissão (PS).

Outros modelos

Outros modelos empregues (não ligados directamente aos 3 blocos básicos descritos), relacionam-se com o *buffer* de utilizador, transparência no envio de dados, simulador de canal rádio e contabilização de atrasos nas chamadas PS de *Internet* via HTTP e WAP:

- *Buffer* infinito: [AGPR02] menciona a existência dum mecanismo no SGSN (implementado no BSC) que impede *overflow* de dados por insuficiência de recursos rádio. Assim justifica-se considerar o *buffer* infinito, visto que a situação de *overflow* não ocorre na EB e BSC. Outra consequência que advém do *buffer* ser infinito, é o facto de o sistema não descartar pacotes, em caso de inexistência de recursos disponíveis, e o consequente atraso dos mesmos.
- O simulador é transparente ao envio de dados: não considera erros nem retransmissões, limita-se a transmitir o volume de dados existente no *buffer* de utilizador sem considerar mensagens protocolares da sessão e o seu estabelecimento.

Note-se também, que o simulador não dimensiona os blocos rádio para o envio de dados ([AGPR02]). A transmissão de pacotes será mais eficiente se os pacotes encapsulados nos blocos rádios forem da mesma dimensão; pois se estes fossem demasiado inferiores à dimensão dos blocos rádio, o *overhead* seria elevado, enquanto se fossem demasiado superiores à dimensão dos blocos rádios, em caso de erro, as retransmissões seriam extremamente longas, provocando um atraso significativo.

- Simulador de canal rádio: foi aproximado a uma distribuição uniforme (Anexo C). Devido a impossibilidade de aceder a um simulador de canal rádio, optou-se por uma distribuição uniforme para poder observar mais facilmente os algoritmos inerentes à decisão de CS-*n* com base em *C/I*.
- Nas chamadas de *Internet* (HTTP e WAP), o simulador contabiliza no tempo de transmissão: o espaçamento entre pacotes; enquanto o tempo de leitura do modelo [ETSI98], não é considerado no tempo de transmissão, já que é latente ao utilizador e não à transmissão de dados. Na Fig. 4.5, ilustra-se os espaçamentos incluídos (a verde) e excluídos (a vermelho) no tempo de transmissão numa chamada Internet.

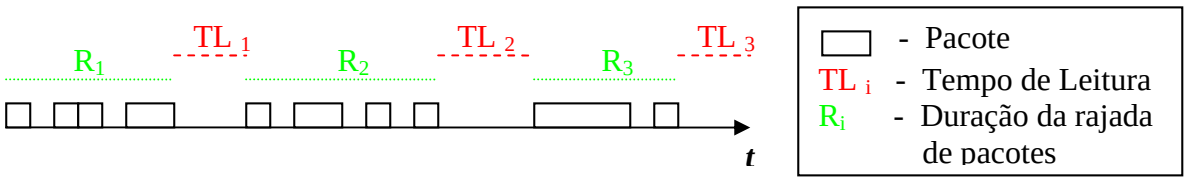


Fig. 4.5 - Espaçamentos incluídos numa chamada de acesso à Internet.

O simulador regista num ficheiro os dados, para cálculos posteriores de estatísticas, após processar as chamadas como o sistema GSM/GPRS no fim de cada uma.

4.4 Saídas

Uma vez terminada a simulação de chamadas e respectivo processamento, o simulador processa 4 ficheiros de texto com os dados das chamadas: CS, PS em UL e DL e Estatísticas. Para as chamadas CS ("CSCall.txt"), regista:

- NID: O número de identificação do TM.
- Início da chamada: instante em que a chamada começou.
- Fim da chamada: instante em que a chamada terminou.
- Duração [s]: diferença entre o instante de início e fim. As chamadas com duração nula, representam chamadas bloqueadas.

Para as chamadas PS (DL e UL) ("PSCall_DL.txt" e "PSCall_UL.txt"), regista:

- NID: O número de identificação do TM.
- Serviço: cada serviço é representado por um número (1- FTP, 2- *E-mail*, 3- *Internet* via HTTP, 4- *Internet* via WAP, 5-MMS e 6- Vídeo *Streaming*).
- Início da chamada: instante em que a chamada começou.
- Fim da chamada: instante em que a chamada terminou.
- Atraso[s]: atraso cumulativo total da chamada.
- Número de atrasos: número de vezes que deu entrada na fila de espera.

- Tempo de leitura [s]: para o caso de *Internet* via HTTP e via WAP, este valor tinha que ser registado de modo a ser diferenciado de um atraso. Para os outros serviços, este campo será nulo.
- Volume total de dados [bits]: volume gerado pelo Gerador de Tráfego.
- Débito [bits/s]: com base no volume de dados e na duração da chamada (diferença entre o instante de início e fim desta), calcula o débito de transmissão.
- Classe *Multislot*: Indica a classe *Multislot* do TM associado a chamada.

Findo o ciclo principal e escritos os ficheiros acima, um último ficheiro é gerado: o ficheiro de estatísticas da simulação. Neste ficheiro ("Stats.txt"), o simulador apresenta valores de variáveis da simulação e processamento dos 3 ficheiros anteriores:

- Dados de entrada: intervalo de simulação [s], repartição de canais para GSM/GPRS e a distribuição dos utilizadores por serviço, classe *Multislot* e CS-*n* em DL e UL.
- Utilização no tempo dos canais: número de tramas utilizadas por um determinado número de canais e respectiva percentagem, i.e., a percentagem é calculada relativamente ao número de canais para um dado tipo: canais reservados (para GSM e GPRS) e canais partilhados (utilizados por GSM e GPRS), no caso de DL. No caso de UL, resume-se só a canais partilhados usados por GSM e GPRS.
- Estatística de utilização de *Delayed* DL TBF: Apresenta o tempo estipulado para *Delayed* DL TBF, o número de vezes em que foi activado, o somatório do tempo em que este esteve activado, permitindo estimar a média de *Delayed* DL TBF activo ($\overline{DDT}$), i.e., o tempo médio em que *Delayed* DL TBF esteve activo sem transmitir dados. Na Fig. 4.6, representa-se $\overline{DDT}$ (a verde) descrito e a sua definição em (4.2).
- Estatísticas das Chamadas CS: Número total de chamadas CS, número de chamadas bloqueadas, probabilidade de bloqueio, duração média das chamadas e respectivo desvio padrão. Estes dados são obtidos partir do ficheiro auxiliar "CSCall.txt".
- Estatísticas das Chamadas PS (DL e UL): Número total de chamadas PS, número de utilizadores activos atrasados e respectiva percentagem. Por serviço, apresenta número de chamadas, débito médio e o seu desvio padrão, número de chamadas atrasadas e respectiva probabilidade de ocorrer atraso, atraso médio de transmissão (d_t) (i.e., a média dos atrasos sofridos pela chamada PS, perceptível ao sistema) e o seu desvio padrão e por fim, média do atraso por utilizador (d_u) (i.e., atraso total sofrido pela chamada PS, perceptível ao utilizador) e o seu desvio padrão. Na Fig. 4.7, encontra-se um exemplo para ilustrar as definições de d_t e d_u em (4.3) e (4.4). Estes dados são obtidos a partir dos ficheiros auxiliares "PSCall_DL.txt" e "PSCall_UL.txt".

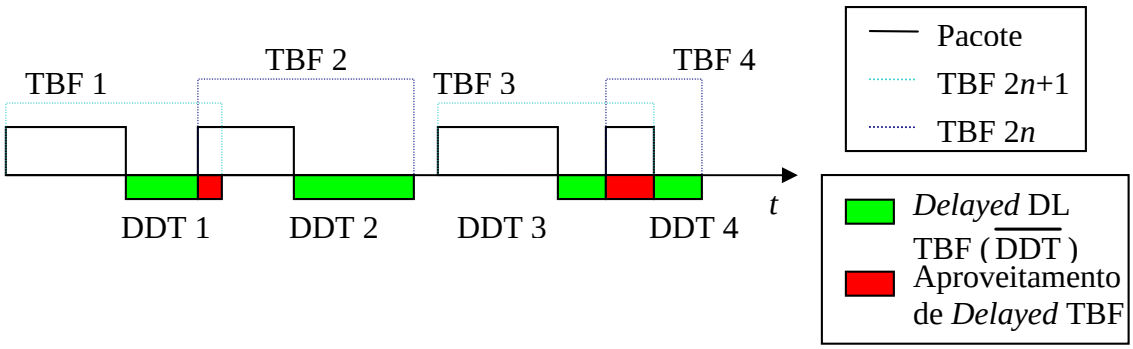


Fig. 4.6 - *Delayed* DL TBF apresentado pelo simulador.

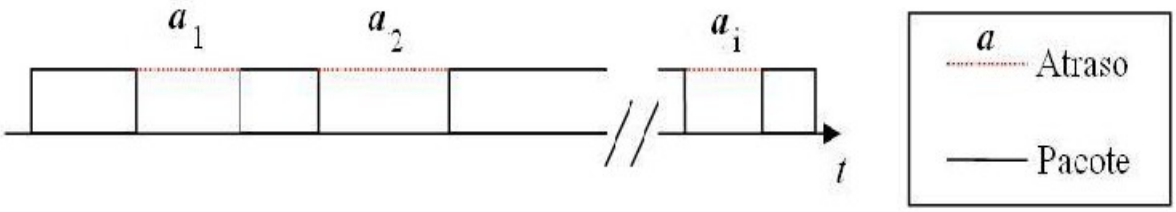


Fig. 4.7 - Atrasos ao longo da transmissão de uma chamada PS.

$$\overline{\mathrm{DDT}}_{[s]} = \frac{\sum \mathrm{DDT}_{i\,[s]}}{i} \tag{4.2}$$

$$d_{t[s]} = \frac{\sum a_{i\,[s]}}{i} \tag{4.3}$$

$$d_{u[s]} = \sum a_{i\,[s]} \tag{4.4}$$

- Utilização de CS-*n* (DL e UL): Número de vezes que uma chamada PS utilizou um dado CS-*n* e o número de TSs que utilizou um dado CS-*n*. Esta estatística só contabiliza a utilização de CS-*n* enquanto a chamada estiver em transmissão, i.e., enquanto o seu volume de dados no *buffer* era maior que zero.
- Utilização do número TSs (DL e UL): Número de TSs que cada chamada PS utilizou enquanto o seu volume de dados no *buffer* era maior que zero.
- Utilização do número TSs por classe *Multislot* (DL e UL): Número de TSs que cada chamada PS utilizou enquanto o seu volume de dados no *buffer* era maior que zero. Esta saída permite concluir quanto à rentabilização do uso do número de TSs para um dado TM.
- Número de chamadas PS na fila de transmissão e na fila de espera (DL e UL): Número de chamadas PS em transmissão e/ou em espera.

5. Análise de resultados

5.1 Cenários

A *Optimus* colaborou neste trabalho, fornecendo dados referentes à utilização de recursos da rede e cenários de simulação para análise de resultados. Os dados enviados pela *Optimus* repartem-se em 5 ambientes: Axial (utilizadores veiculares), Interior (utilizadores em ambientes interiores), Rural (utilizadores em espaços rurais e abertos), Suburbano (utilizadores situados em periferias de zonas urbanas), Urbano (utilizadores situados em zonas urbanas) e Urbano-micro (utilizadores situados em micro células situadas zonas urbanas). Os dados relativos ao tráfego de voz (nomeadamente, $\overline{\tau}$ e λ) na hora maior intensidade, estimados pela *Optimus* para cada um dos ambientes descritos, encontram-se na Tab. 5.1.

Tab. 5.1 - Dados de tráfego de voz (Fornecido pela *Optimus*).

Ambiente	$\overline{\tau}$ [s]	λ [chamadas/s]
Axial	66,22	0,04
Interior	78,48	0,03
Rural	62,58	0,04
Suburbano	71,40	0,06
Urbano	83,14	0,05
Urbano-micro	89,28	0,01

De acordo com a *Optimus*, a intensidade de tráfego médio por utilizador (A_u) é 15 mErl. Com base em (3.9) e (3.10), é possível estimar a intensidade de tráfego (A) e o número de utilizadores (N_u), cujo resultado se encontra na Tab. 5.2.

Tab. 5.2 - Intensidade de tráfego de voz e número de utilizadores para cada ambiente.

Ambiente	A [Erl]	N_u
Axial	2,45	163
Interior	2,28	152
Rural	2,41	160
Suburbano	4,00	267
Urbano	4,27	284
Urbano-micro	0,94	62

Como é usual, os ambientes Urbano e Suburbano caracterizam-se por tráfego mais intenso, contrariamente ao Rural. Note-se que Urbano-micro e Interior se caracterizam por ser ambientes fisicamente mais reduzidos, levando a N_u menor que os outros ambientes, como se pode constatar na Tab. 5.2.

O tráfego de dados de GPRS fornecido pela *Optimus*¸ reparte-se em: *Internet* (abrange os serviços *E-mail* e *Internet* via HTTP descritos em 2.3 e 4.2), WAP, *Video streaming* e MMS. De acordo com a *Optimus*, o serviço FTP gera volumes bastante reduzidos (ao ponto de não serem mensuráveis para estatísticas de utilização) ao contrário dos outros serviços, pelo que se utilizaram os valores apresentados em [Agui03] e [AgCo03] para caracterização deste serviço. O ambiente Urbano será utilizado para a maior parte dos cenários de simulação, já que é o ambiente com tráfego de voz mais intenso e tráfego de GPRS bastante elevado. Na Tab. 5.3 apresenta-se o volume de dados de GPRS (DL+UL) referentes a uma célula em ambiente Urbano na hora de tráfego mais intenso.

Tab. 5.3 - Volume de dados de GPRS referentes a uma célula em ambiente Urbano.

Serviço	Volume de Dados (DL+UL) [kB]	
	Média	Desvio Padrão
Internet	48,298	123,958
WAP	132,444	204,153
Video streaming	7,085	13,127
MMS	19,638	18,210

O volume médio de dados por chamada efectuada por utilizador (V_u) é 67,763 kB. Tendo em conta o volume médio de dados por serviço (V_s) da Tab. 5.3, pode ser determinado o número de chamadas de cada utilizador GPRS (λ_{GPRS}) para cada serviço com base em (5.1):

$$\lambda_{\text{GPRS}} = \frac{V_u}{V_s} \tag{5.1}$$

A separação dos volumes de dados em DL e UL, consistiu em multiplicar V_s pelos factores de assimetria do tráfego da Tab. 5.4.

Tab. 5.4 - Factores de assimetria para DL e UL do tráfego de dados de GPRS.

Serviço	Factor de assimetria [%]	
	DL	UL
Internet	79,3	20,7
WAP	70,9	29,1
Video streaming	100	0

Para obter os dados dos serviços *E-mail* e *Internet* via HTTP, foi necessário aplicar os factores de assimetria de tráfego da Tab. 5.5, tal como no caso anterior.

Tab. 5.5 - Factores de assimetria dos serviços para DL e UL do tráfego *Internet*.

Serviço	Factor de assimetria [%]	
	DL	UL
Internet via HTTP	62,5	93,0
E-mail	37,5	7,0

Uma vez aplicados os factores de assimetria, obtêm-se os dados para todos os serviços. Para o ambiente Urbano, apresenta-se o volume de dados e número de chamadas dos utilizadores GPRS na Tab. 5.6. No caso do MMS, não foram fornecidos dados para cada ambiente, razão pela qual se utilizaram os dados da *Optimus* na Tab. D.1 para todos os ambientes. Na Tab. D.2 do Anexo D, apresentam-se os volumes de dados e número de chamadas dos utilizadores GPRS para os restantes ambientes, após ter aplicado os mesmos passos acima descritos para o ambiente Urbano. Note-se que no simulador (Tab. 4.1), o número de chamadas FTP foi adaptado de modo a que o tráfego gerado correspondesse a tráfego residual, como a *Optimus* informou.

Por fim, é necessário adaptar os dados da *Optimus* ao modelo proposto em [ETSI98]. Os dados referentes aos serviços *Internet* via HTTP e *Internet* via WAP, foram adaptados aos modelos de tráfego com base em [SeFC03]: considera-se que μ_{Sd} = 480 Bytes, onde dividindo

os volumes médios de dados obtidos para *Intenet* da Tab. 5.6 por μ_{Sd}, obtém-se o parâmetro μ_{cs} ajustado aos dados fornecidos.

Tab. 5.6 - Dados de GPRS de todos os serviços para ambiente Urbano.

Serviço	Volume de Dados [kB]			λ_{GPRS} [/h]	
	Média		Desvio Padrão	DL	UL
	DL	UL			
E-mail	2,70	10,00	123,96	0,04	0,15
Internet via HTTP	35,60	6,25	123,96	0,53	0,09
Internet via WAP	93,90	38,54	204,15	1,39	0,57
Video streaming	7,09	0	13,13	0,10	0,00
MMS	9,82	9,82	18,21	0,14	0,14
FTP	8,49	8,49	3,67	-	-

Os ajustes de μ_{cs} para os serviços *Internet* via HTTP e *Internet* via WAP no caso do ambiente Urbano em DL, encontram-se Tab. 5.7.

Tab. 5.7 - μ_{cs} ajustado para o ambiente Urbano (DL).

Serviço	Volume Médio [kB]	μ_{cs}
HTTP	35,6	75
WAP	93,9	196

Na Tab. D.3 do Anexo D, apresentam-se os valores adaptados de μ_{cs} para os restantes ambientes. Os restantes valores da Tab. 4.2 foram retirados da Tab. 3.1.

Uma vez caracterizado o tráfego de CS e PS, o Gerador de Tráfego possui todos os dados necessários para representar as chamadas dos TMs. Os cenários de referência utilizarão para entrada do Gerador de Tráfego um utilizador para cada serviço com os valores da Tab. D.2 e Tab. D.3 do Anexo D, consoante o ambiente a simular.

A *Optimus* propôs 2 cenários de referência para estudo. Ambos os cenários de referências apresentam condições comuns:

- O dimensionamento do número de TCH deve ser feito de modo a garantir uma probabilidade de bloqueio inferior a 1%.
- O número de PDCH deve ser 4: 2 são partilhados e os outros 2 são reservados para PS.
- A duração do *Delayed* DL TBF deve ser 5 s.
- Os TMs são distribuídos uniformemente pelas 12 primeiras classes *Multislot*.
- Intervalo a simular é 4200 s, i.e., 1 hora mais 10 minutos para estabilização na geração de tráfego, como foi explicado na Secção 4.3 no modelo do Gerador de Tráfego.
- CS-*n* fixos ao longo da simulação.

A distinção dos 2 cenários assenta somente na distribuição de CS-*n* dos utilizadores e no tipo de TU, como se pode ver na Tab. 5.8.

Para calcular o número de TCH (N_{TCH}), aplicaram-se os passos descritos na Secção 3.1, escolhendo o cenário Urbano (devido a este ser o ambiente com maior intensidade de tráfego, o que leva a que o dimensionamento obtido para este ambiente seja válido para os restantes): definindo o valor de A na Tab. 5.2 e P_b = 1%, obtêm-se N_{TCH} aplicando (3.7). O valor obtido para N_{TCH} foi 10, donde se conclui, com base na Tab. 4.4, que serão necessárias 2 portadoras.

Tab. 5.8 - Distribuição de CS-*n* para os 2 cenários de referência.

Cenário de Referência	TU	CS-*n* [%]			
		CS-1	CS-2	CS-3	CS-4
1	Sem FH	5	50	15	30
2	Com FH	10	90	0	0

Uma vez que todos os parâmetros definidos para os cenários de referência são entradas configuráveis no simulador, procura-se variar diferentes parâmetros para simular diferentes cenários de estudo e analisar o impacto a variação dos parâmetros de entrada relativamente aos cenários de referência. Os cenários de simulação propostos pela *Optimus* são definidos de modo a estudar:

- Impacto do nº de utilizadores de voz (CS) e da distribuição dos PDCHs (Secção 5.2).
- Impacto do nº de utilizadores de dados (PS) e da capacidade GPRS (Secção 5.3).
- Impacto do *Delayed* DL TBF (Secção 5.4).
- Impacto do FH sobre os CS-*n* (Secção 5.5).

Para todos os cenários simulados, foram efectuadas 10 simulações de cada cenário, após o qual os dados foram extraídos e tratados para análise posterior. As 10 simulações permitem estabelecer um comportamento geral com base nas saídas, sem que o carácter aleatório dos cenários induza conclusões erróneas devido aos resultados pontuais que não possuem validade do ponto de vista estatístico.

5.2 Impacto do nº de utilizadores de voz e da distribuição dos PDCHs

Pretende-se comparar os cenários de referência com os cenários em ambiente Urbano, onde se aumenta a percentagem dos utilizadores CS em 10% e 25% para diferentes distribuições de PDCHs. Os resultados obtidos no Anexo E são válidos para ambos os cenários de referência dado que a distribuição de CS-*n* é incorrelacionada com o aumento da percentagem do número de utilizadores CS, pelo que se utiliza para comparação o cenário de Ref. 1 (Tab. 5.8). A distribuição de PDCHs utilizada nas simulações, foram:

- 4 PDCHs repartidos em 2 PDCHs partilhados e 2 PDCHs reservados para GPRS, como nos cenários de referência (2R+2P).
- 4 PDCHs totalmente partilhados (0R+4P).
- 4 PDCHs totalmente reservados para GPRS (4R+2P).

Os parâmetros de saída a serem estudados são: probabilidade de bloqueio (CS), atraso, débito de transmissão e probabilidade de atraso das chamadas PS, bem como a utilização de canais das chamadas CS e PS. O sentido de ligação escolhido para análise de resultados é o DL, devido a existência de canais reservados para CS que acabam por limitar o desempenho do GSM/GPRS. No caso do UL, uma vez que os canais são todos partilhados e o número de chamadas é inferior, a limitação na utilização de recursos é mais uma vez imposta pela reserva no DL.

As chamadas CS têm prioridade no uso dos canais partilhados, logo somente no caso de reserva de PDCHs para GPRS é que as chamadas CS poderão sofrer influência da distribuição de PDCHs. No caso das chamadas PS, a configuração de PDCHs delimita o impacto das chamadas CS sobre estas.

Nas Tab. 5.9 e Tab. 5.10, apresenta-se o bloqueio, débitos de transmissão e probabilidade de atraso obtido para os cenários descritos. Verifica-se que o impacto da configuração dos PDCH nas chamadas CS, só se verifica no caso de 4 PDCHs reservados para PS, onde o bloqueio ascende com o aumento das chamadas CS. No entanto, quando o

aumento das chamadas CS é de 25%, P_b atinge 1%, o que respeita o dimensionamento da Secção 5.1 para o cenário de referência. Facilmente se entende que a diminuição de PDCHs (e consequentemente, de N_{TCH}), leva a que haja menor capacidade do sistema para suportar tráfego, como seria de prever (veja-se (3.7)).

Tab. 5.9 - Bloqueio, débito de transmissão e probabilidade de atraso dos cenários de 5.2 .

Cenário	Configuração PDCH	Chamadas bloqueadas		P_b [%]	R_b [kb/s]		P_d [%]
		Média	Desvio Padrão	Média	Média	Desvio Padrão	Média
Ref.1	2R+2P	0,1	0,32	0	8,0	6,12	0
CS aumenta 10%	2R+2P	0,4	0,69	0	6,9	6,04	0
	0R+4P	0	0	0	11,4	5,44	0
	4R+0P	2,1	2,61	0,6	13,6	9,79	0
CS aumenta 25%	2R+2P	0,5	0,53	0	8,8	7,79	0
	0R+4P	0	0	0	10,2	2,92	0
	4R+0P	3,9	3,57	1,0	10,6	2,54	0

Tab. 5.10 - Probabilidade de Bloqueio e atraso dos cenários de 5.2 .

Cenário	Configuração PDCH	P_b [%]		P_d [%]	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Ref.1	2R+2P	0	0	0	0
CS aumenta 10%	2R+2P	0	0	0	0
	0R+4P	0	0	0	0
	4R+0P	0,6	1,1	0	0
CS aumenta 25%	2R+2P	0	0	0	0
	0R+4P	0	0	0	0
	4R+0P	1,0	0,6	0	0

No caso das chamadas PS, quer o aumento das chamadas CS, quer a configuração de PDCH, não causam impacto razoável: P_d é sempre nulo e R_b não apresenta variações significativas. A justificação para o observado deve-se à reduzida utilização de PDCHs (como se pode verificar no Anexo E, e.g., Fig. E.3): as chamadas PS apresentam uma média de 1,23 (com desvio padrão de 0,88) chamadas por simulação. O número reduzido de chamadas PS (como se verifica na Tab. 5.6) não apresenta utilização considerável dos recursos, motivo pelo qual a configuração de PDCHs e a interacção com as chamadas CS, é irrelevante. Na Fig. 5.1, apresenta-se para o caso de 0R+4P a percentagem de utilização simultânea de canais no tempo, cuja configuração de canais equivale a $N_{TCH} = 14$. A observação da Fig. 5.1 reforça a análise descrita. Observa-se que o aumento de canais para tráfego CS não conduz a uma utilização elevada, o que significa que o reduzido uso destes canais não apresenta impacto considerável no tráfego PS (que partilha os mesmos canais), nem apresenta vantagem significativa para o tráfego em CS.

No Anexo E, apresentam-se as percentagens de utilização de canais para os restantes casos, que demonstram esta conclusão bem como o facto de as chamadas PS terem aproveitamento de recursos.

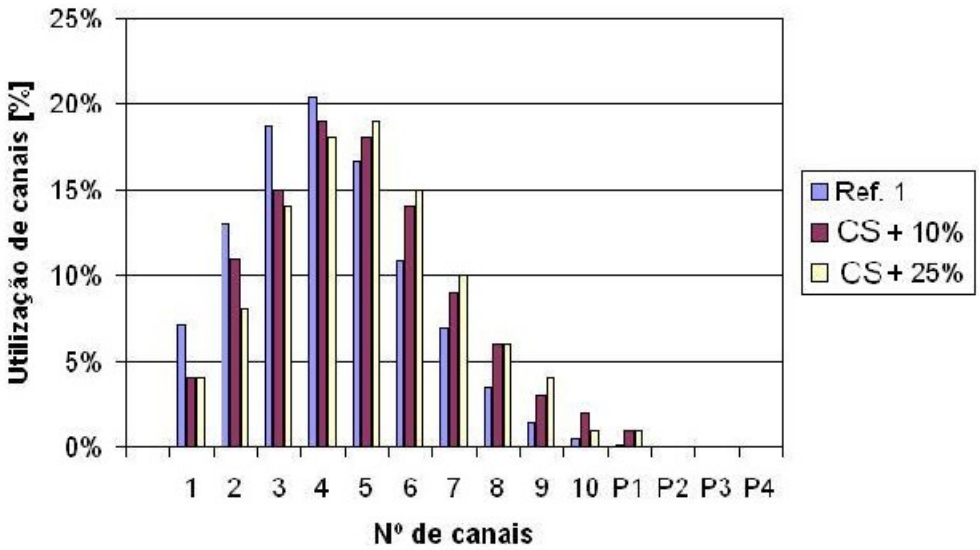


Fig. 5.1 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para a distribuição de canais 0R + 4P.

5.3 Impacto do nº de utilizadores de dados e da capacidade GPRS

Uma vez estudado o impacto dos utilizadores CS, pretende-se analisar impacto dos utilizadores PS. Para esse efeito, aumentou-se o número de utilizadores PS e simularam-se diferentes configurações de PDCHs. O aumento de utilizadores de GPRS proposto pela *Optimus* foi de 100%, 200%, 500% e 1000%, empregando as seguintes distribuições de PDCHs (os resultados para cada um dos casos, encontram-se no Anexo E):

- 4 PDCHs repartidos em 2 PDCHs partilhados e 2 PDCHs reservados para GPRS, como nos cenários de referência (2R+2P).
- 6 PDCHs repartidos em 4 PDCHs partilhados e 2 PDCHs reservados para GPRS (2R+4P).
- 8 PDCHs repartidos em 5 PDCHs partilhados e 3 PDCHs reservados para GPRS (3R+5P).

Os parâmetros mais relevantes para a análise de resultados, são: atraso, probabilidade de atraso, débito de transmissão e utilização de canais no tempo e por classe *Multislot*. Pretende-se com estes parâmetros entender o impacto nas chamadas PS, dado que o impacto das chamadas CS já foi analisado na Secção 5.2 .

Novamente, o estudo focou o DL, dado que a reserva de canais em DL é responsável por eventuais restrições. Consequentemente, o DL comparado com o UL, pode ser tomado como pior caso.

Na Tab. 5.11, apresentam-se a probabilidade de atraso, os atrasos de transmissão (d_t) e de utilizador (d_u) das chamadas PS, para os diferentes aumentos de utilizadores PS e configurações de PDCHs. Observa-se na Tab. 5.11 que a tendência geral do atraso (d_t e d_u) é: crescer com a percentagem de utilizadores PS, e particularmente, a partir de 500%. Este comportamento é expectável dado que o aumento de chamadas PS requer mais recursos PS (que escasseiam quando o aumento de utilizadores PS atingem 1000%) para que a transmissão decorra sem restrições (i.e., atrasos). Os valores obtidos para d_t e d_u apresentam a mesma ordem de grandeza, o que significa que em média, o número de atrasos por utilizadores eram unitários, de acordo com (4.3) e (4.4).

Tab. 5.11 - Atraso e probabilidade de atraso das chamadas PS dos cenários de 5.3 .

Cenário	Configuração PDCH	d_t [s]		d_u [s]		P_d [%]	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Ref.1	2R+2P	0	0	0	0	0	0
Utilizadores PS aumentam 100%	2R+2P	0,47	1,49	1,15	3,64	4	12,6
	2R+4P	0	0	0	0	0	0
	3R+5P	0	0	0	0	0	0
Utilizadores PS aumentam 200%	2R+2P	0	0	0	0	0	0
	2R+4P	0	0	0	0	0	0
	3R+5P	0	0	0	0	0	0
Utilizadores PS aumentam 500%	2R+2P	1,15	1,99	3,06	4,06	11	16,2
	2R+4P	0	0	0	0	0	0
	3R+5P	0	0	0	0	0	0
Utilizadores PS aumentam 1000%	2R+2P	15,52	17,12	16,43	16,70	30	19,7
	2R+4P	0,51	0,63	2,01	2,61	13,4	18,7
	3R+5P	0,14	0,44	0,29	0,94	0	0,01

Verifica-se também que, relativamente ao cenário de referência (2R+2P), a adição de canais partilhados (2R+4P e 3R+5P) reduz substancialmente o atraso, como se pode verificar no aumento de 1000% de utilizadores PS. No caso de 3R+5P, a redução de atraso relativamente a 2R+2P não é tão significativa, pelo que se conclui a configuração de PDCHs mais eficiente na redução de atraso da Tab. 5.11 é 2R+4P, uma vez que não altera o dimensionamento de TCH (i.e., N_{TCH} mantém-se igual a 12) e reduz substancialmente o atraso das chamadas PS. A redução de atraso (i.e., redução de T_{TBF}), implica uma transmissão mais rápida (i.e., aumento de R_b), como se descreveu em (3.12).

Na Fig. 5.2, apresenta-se a percentagem média de chamadas PS que atingiram a utilização máxima da capacidade *Multislot*, i.e., a percentagem média de chamadas PS que utilizaram o número máximo de TSs possíveis em DL da sua classe *Multislot*. Observa-se que no cenário de referência (Ref. 1), a utilização dos recursos por TM foi sempre máxima (dado que as chamadas PS são escassas e os PDCHs são suficientes para responder à transmissão destas), enquanto para os restantes cenários de aumento de utilizadores PS, é perceptível uma redução substancial (acima de 55%) desta percentagem. Este comportamento é coerente com o expectável: novamente o aumento de chamadas PS, leva a uma maior utilização de recursos que são insuficientes para garantir a utilização máxima da capacidade *Multislot* de cada TM. A introdução de canais partilhados (no caso de 2R+4P), leva a uma melhoria, que apresenta saturação quando o aumento de utilizadores PS atinge 1000%. Contudo, o caso de 3R+5P, apresenta uma melhoria considerável face às restantes configurações, mesmo no caso do aumento de utilizadores atingir 1000%.

Conclui-se que o aumento de PDCHs (nomeadamente, no caso de 3R+5P), permite uma melhoria no aproveitamento na utilização da capacidade *Mutlislot* de cada TM (i.e., aumento de N_{TS}), o que conduzirá a uma transmissão mais rápida das chamadas PS (i.e., aumento de R_b), de acordo com (4.1).

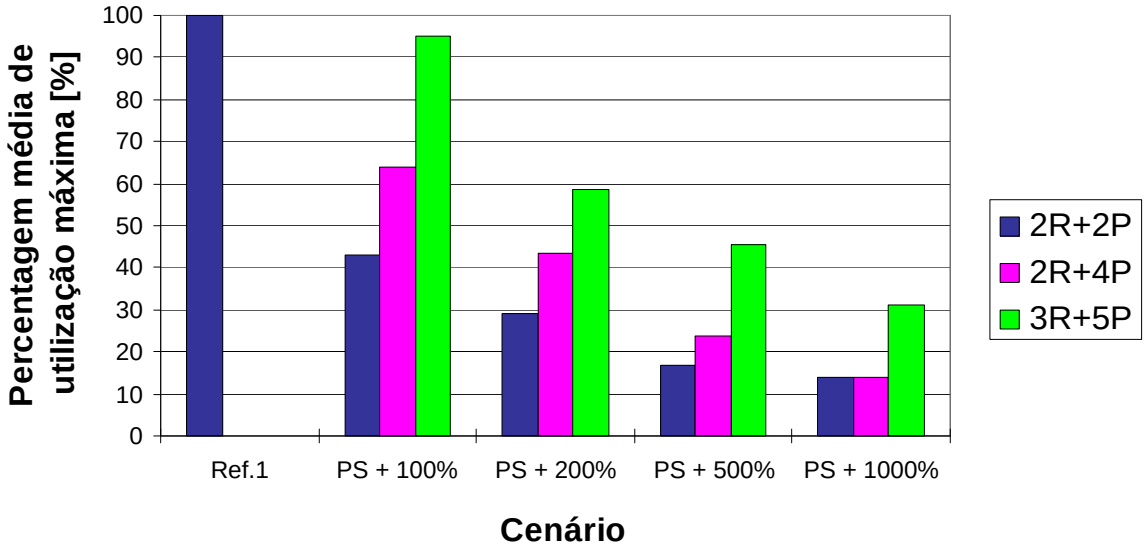


Fig. 5.2 - Percentagem média de utilização máxima *Multislot* para cenários de aumentos de utilizadores PS e diferentes configurações de PDCH.

Na Fig. 5.3, apresenta-se a variação de R_b para as diferentes configurações de PDCH, para os diferentes cenários de aumento de utilizadores PS.

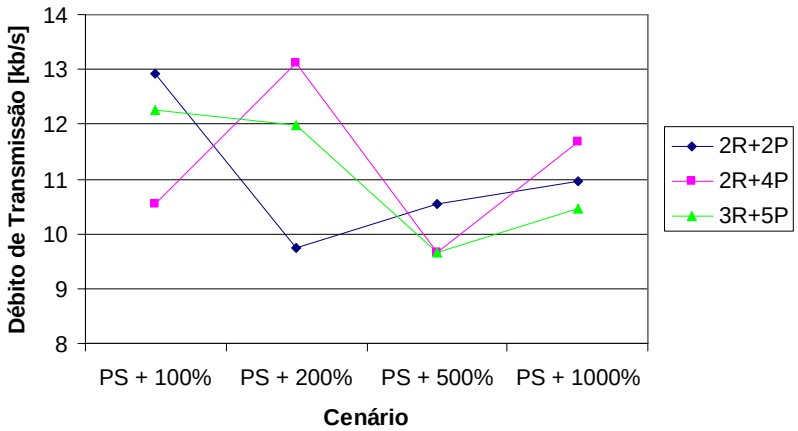
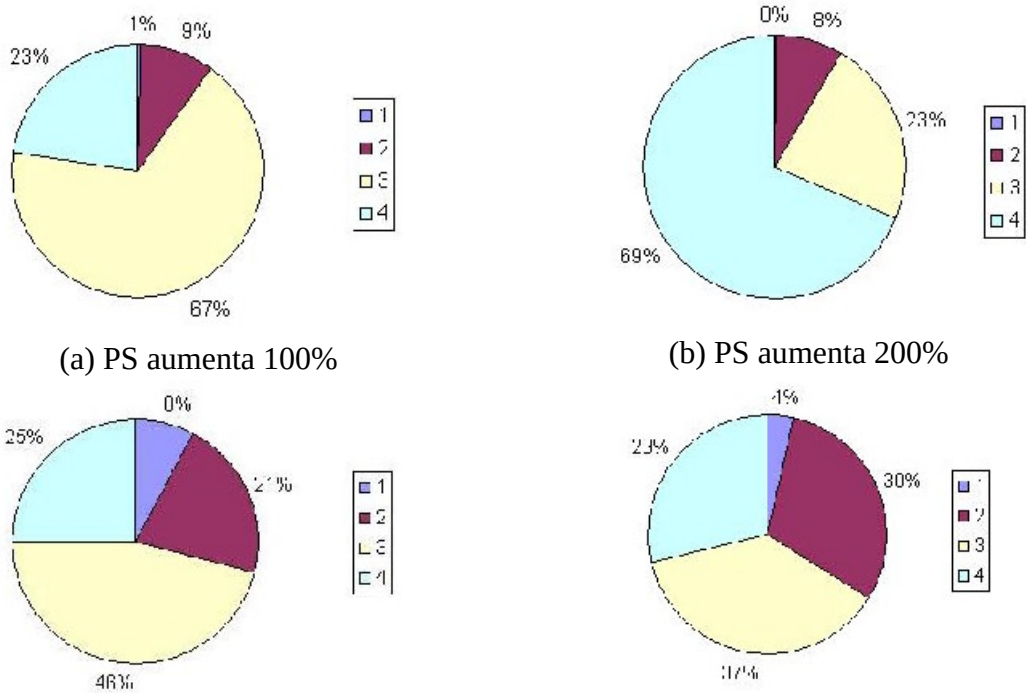


Fig. 5.3 - R_b médio (DL) para cenários de aumentos de utilizadores PS e diferentes configurações de PDCH.

Da Fig. 5.3, observa-se que R_b não varia significativamente ao longo dos cenários, nem apresenta uma tendência definida. Este comportamento é contraditório com o observado anteriormente: o aumento de chamadas PS e a escassez de recursos associada a este (i.e., redução de N_{TS} por chamada PS), leva a uma degradação da transmissão (i.e., redução de R_b), de acordo com (4.1). Contudo, a justificação para este resultado prende-se com o tipo de serviço das chamadas PS: as chamadas do tipo *bursty* (i.e., os serviços *Internet* via WAP e WWW), que não são descritíveis por (4.1), predominam face às chamadas do tipo *on-off* (i.e., os restantes serviços) que seguem (4.1). As chamadas do tipo *bursty* (pertencentes à classe *Interactive*) não são particularmente sensíveis a atrasos (Tab. 2.3) nem aos recursos: os dados são enviados em pacotes de dimensão reduzida (face aos outros serviços) espaçados por

rajadas de tempo variáveis; o que significa que há um subaproveitamento dos recursos PS, dado que na maior parte do tempo em que o TBF está aberto (incluindo o *Delayed* DL TBF), não há transmissão de dados. A baixa sensibilidade de R_b aos recursos (N_{TS}) deve-se ao facto dos volumes de dados dos pacotes serem reduzidos e a sua transmissão é rápida, não sendo necessário muitos PDCHs para esse efeito (especialmente porque há subaproveitamento destes). No caso das chamadas do tipo *on-off*, estas apresentam o comportamento concordante com (4.1), como se verá mais adiante.

Finalmente, apresenta-se na Fig. 5.4, um exemplo de utilização simultânea de TSs no tempo para os vários cenários de crescimento de utilizadores PS com a configuração de PDCHs de 2 canais reservados para PS e 2 canais partilhados (2R+2P).



(a) PS aumenta 100%

(b) PS aumenta 200%

(c) PS aumenta 500%

(d) PS aumenta 1000%

Fig. 5.4 - Percentagem média de utilização simultânea de TSs no tempo para a configuração de PDCHs 2R+2P.

Observa-se que, com o aumento de utilizadores PS, a utilização de 3 e 4 TSs simultaneamente baixa substancialmente. Esta redução justifica-se pela escassez de recursos por utilizador PS, o que leva a que o sistema proceda a uma distribuição equitativa dos recursos pelos utilizadores PS. Este resultado permite comprovar o algoritmo *best-effort* implementado para a atribuição de recursos no simulador, pois o sistema tenta sempre atribuir o máximo de recursos por utilizador sempre que possível, mantendo a equidade quando tal não é possível.

5.4 Impacto de *Delayed* DL TBF

O atraso inerente ao fecho do TBF (*Delayed* DL TBF) tem influência significativa em 2 aspectos, como referido na Secção 3.4 : a gestão de recursos e o débito de transmissão (veja-se também a definição em (3.12)). No caso da gestão de recursos, o seu impacto prende-se com o atraso associado à abertura do TBF, que no simulador não é mensurável dado que este não foi definido; por isso, os 2 parâmetros de estudo vão ser o débito de transmissão (R_b) e a

média do tempo em que o *Delayed* DL TBF esteve activo ($\overline{DDT}$), saídas do simulador definidas na Secção 4.4 .

Com base no cenário de referência, procura-se variar a duração *Delayed* DL TBF e verificar o impacto com base nos parâmetros descritos. Na Fig. 5.5 apresenta-se o débito médio de transmissão quando o *Delayed* DL TBF é igual a 2 e 5 s, para diferentes cenários em ambiente Urbano. No caso do cenário Ref. 1, verifica-se alguma disparidade nos valores obtidos relativamente aos outros casos, o que é justificado pelo número reduzido de chamadas que conduzem a um valor médio pouco fiável, dado o desvio padrão significativo dos resultados. Contudo, os restantes cenários apresentam valores mais estáveis já que o número mais elevado de chamadas conduz a amostras mais completas para análise. Verifica-se que R_b aumenta em média 4,35 kb/s quando se reduz *Delayed* DL TBF para 2 s, pois o débito é inversamente proporcional à duração de TBF, o que verifica (3.12) na Secção 3.4.

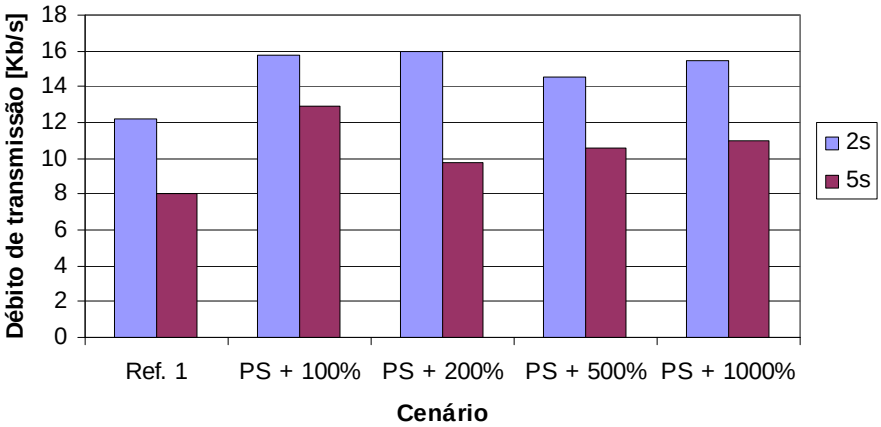


Fig. 5.5 - Débito médio de transmissão (R_b) em DL.

Na Fig. 5.6, apresenta-se o tempo médio do *Delayed* DL TBF activo ($\overline{DDT}$) quando este é igual a 2 e 5 s, para diferentes cenários de crescimento de utilizadores PS em ambiente Urbano. Constata-se que $\overline{DDT}$ não apresenta variações significativas com o aumento de utilizadores tal como o débito.

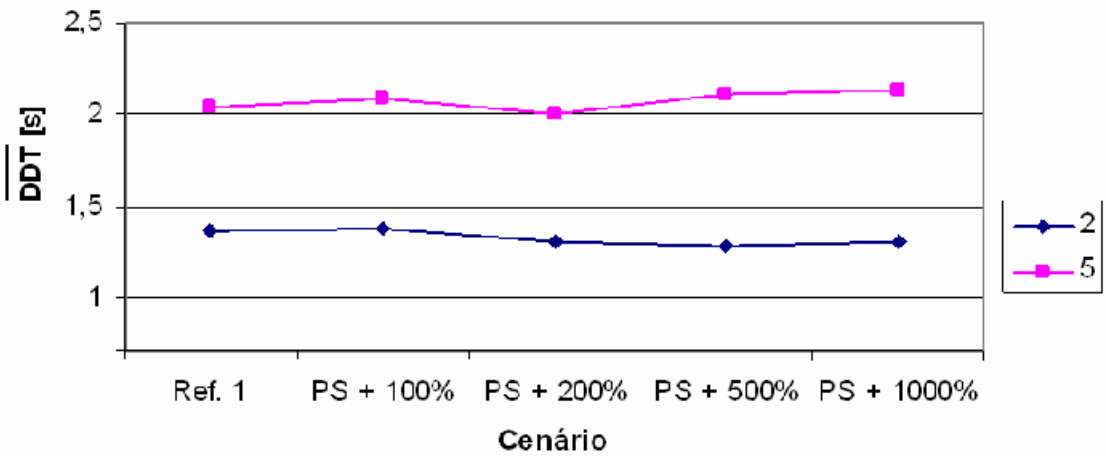


Fig. 5.6 - Variação de $\overline{DDT}$ para diferentes cenários de aumento de utilizadores PS.

Dado que as chamadas PS de acesso à *Internet* são predominantes e cada chamada possui dezenas de pacotes (Tab. 5.7), as amostras obtidas são suficientes para as estatísticas pretendidas, o que permite considerar neste caso os resultados do cenário Ref. 1 como fiáveis (veja-se que o seu comportamento relativamente aos outros casos é coerente).

Facilmente se entende o motivo pelo qual $\overline{\text{DDT}}$ não apresenta variações significativas com o número de utilizadores: este depende somente do espaçamento entre pacotes (tempo entre pacotes consecutivos (n_{tpc}), tempo de leitura (n_{tl}) e a duração definida para *Delayed* DL TBF). Uma vez que n_{tpc} e n_{tl}, são fixos na geração de tráfego, o único parâmetro responsável pela variação de $\overline{\text{DDT}}$, é justamente a duração definida para *Delayed* DL TBF: $\overline{\text{DDT}}$ varia no mesmo sentido que a duração de *Delayed* DL TBF. Assim sendo coloca-se a questão qual a variação de $\overline{\text{DDT}}$ com a duração de *Delayed* DL TBF.

Dado que se procura caracterizar este comportamento, são necessários mais valores para poder caracterizar o mesmo. Fizeram-se novas simulações para diferentes valores de *Delayed* DL TBF, mas para o cenário de aumento de 1000% de utilizadores PS (aproveitando o número maior de chamadas, que permite obter uma amostra estatística mais viável para análise) em ambiente Urbano. Os valores utilizados para o *Delayed* DL TBF foram: 0.5, 2, 3.5, 5, 6.5, 8 e 10 s. Na Tab. 5.12, apresentam-se os valores médios e desvios padrão obtidos para R_b por chamada PS, $\overline{\text{DDT}}$ e a sua percentagem de utilização relativa a *Delayed* DL TBF quando este varia entre 0,5 a 10 s.

Tab. 5.12 - R_b e $\overline{\text{DDT}}$ para cenário de aumento de 1000% de utilizadores PS (DL).

Delayed DL TBF [s]	R_b [kb/s]		$\overline{\text{DDT}}$ [s]		$\frac{\overline{\text{DDT}}}{\textit{Delayed}\ \text{DL TBF}}$ [%]
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
0,5	30,32	11,46	0,439	0,015	88
2	15,48	8,18	1,308	0,046	65
3,5	12,42	4,62	1,936	0,158	55
5	10,96	1,77	2,137	0,028	43
6,5	9,19	4,08	2,464	0,052	38
8	9,93	4,10	2,649	0,055	33
10	8,73	4,41	2,824	0,028	28

Verifica-se que R_b apresenta um comportamento quadrático, enquanto $\overline{\text{DDT}}$ apresenta comportamento logarítmico, o que demonstra que ambos são bastantes sensíveis a *Delayed* DL TBF; dados os comportamentos, podem-se recorrer a interpolações de modo a obter equações para descrever ambos os parâmetros. Nas Fig. 5.7 e Fig. 5.8 representam-se as interpolações de R_b e $\overline{\text{DDT}}$ da Tab. 5.12, cuja definição encontra-se na Tab. E.15 e comprova o comportamento observado (apesar de não ser possível discernir analiticamente e separadamente o peso de n_{tpc}, n_{tl} e *Delayed* DL TBF no $\overline{\text{DDT}}$).

Conclui-se que valores elevados para a duração de *Delayed* DL TBF conduzem a uma degradação do desempenho da transmissão, como se pode constatar pela variação de R_b (Fig. 5.7), como seria de prever.

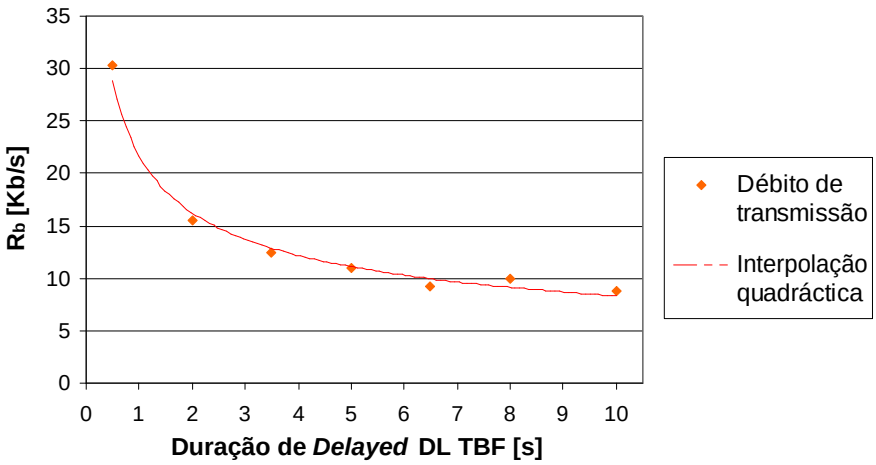


Fig. 5.7 - Débito (R_b) médio por chamada PS para *Delayed* DL TBF de [0,5 ; 10]s.

Relativamente a $\overline{\text{DDT}}$, este parâmetro permite adquirir sensibilidade relativamente ao valor adequado para *Delayed* DL TBF: valores elevados degradam a transmissão (R_b), enquanto valores reduzidos (que levam à anulação da percentagem de utilização), conduzem a uma má gestão de recursos pois leva a que o sistema tenha que proceder a numerosas aberturas/fechos de TBF, o que invalida o propósito do uso de *Delayed* DL TBF (como sucede no TBF 2 da Fig. 4.6). Idealmente, pretende-se dimensionar *Delayed* DL TBF de modo a maximizar a percentagem de utilização, sem que esta atinja 100% (que corresponde ao ilustrado em TBF 2 da Fig. 4.6) e sem sobredimensionar (dado que desperdiça recursos como se denota R_b na Tab. 5.12 e Fig. 5.7). Normalmente, é conveniente ter uma margem no dimensionamento (i.e., dimensionar para um valor inferior a 100%), como é no caso de *Delayed* DL TBF igual a 0,5 s onde este atinge 88%, para acomodar eventuais oscilações.

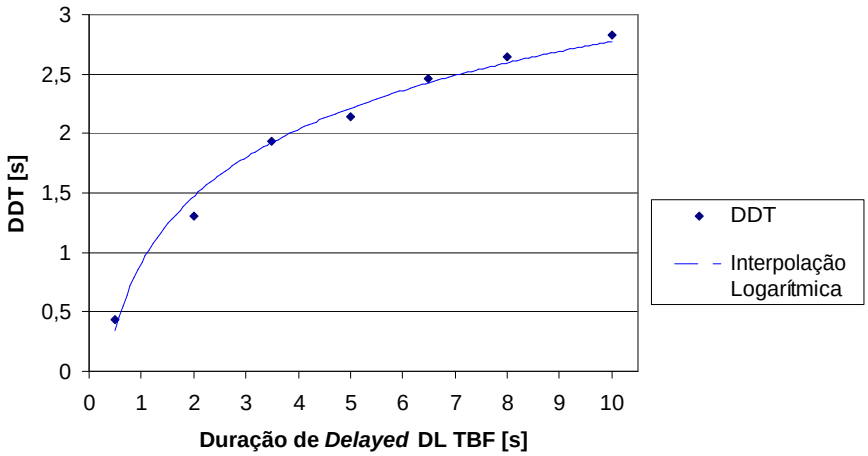


Fig. 5.8 - Percentagem média de utilização para *Delayed* DL TBF de [0,5 ; 10]s.

Destaca-se que o aumento de R_b tenderá a saturar para valores inferiores a 0,5 s até atingir valores concordantes com (3.11), onde o factor de redução (F_r) tende para 1 até obter (4.1); esta situação justifica o aumento do desvio padrão do R_b, pois a variação de F_r com o *Delayed* DL TBF (neste caso), confere maior sensibilidade às chamadas PS aos recursos e CS-*n*, e consequentemente, melhor desempenho na transmissão.

5.5 Impacto do FH sobre os CS-*n*

Ao longo das simulações, a variação do canal rádio foi anulada e o critério de decisão para o respectivo CS-*n* (dado que estes se fixaram) não influenciou a transmissão. Uma vez que se pretende estudar os algoritmos de decisão dos *CS-n* e o impacto no desempenho da transmissão, o modo CS-*n* foi alterado para variável e a frequência de actualização escolhida foi 3 blocos RLC (i.e., 12 tramas GSM, que equivale a 55,38 ms) (Secção 4.2). A escolha do perfil de EB foi feita concordante com o cenário: TU3 para utilizadores pedestres (ambiente Urbano) e TU50 para utilizadores veiculares (ambiente Axial), utilizando as distribuições de CS-*n* da Tab. 5.8. Nos cenários a simular pretende-se variar: opção de TU com/sem FH e o intervalo de variação de *C/I*. Os parâmetros de saída utilizados para análise, foram: débito médio de transmissão por chamada PS (R_b) e percentagem de utilização de CS-*n* no tempo (cujos valores são praticamente iguais ao caso da percentagem de utilização de CS-*n* em número de TSs). Neste conjunto de cenários, estudaram-se ambos os sentidos UL e DL, dado que os critérios de decisão para CS-*n* diferem (Secção 3.3). Novamente, optou-se por utilizar os cenários com aumento de 1000% de utilizadores PS com o intuito de possuir uma amostra mais completa para estatísticas.

Uma vez definidos os cenários, o parâmetro a variar para cada um dos cenários será o intervalo de *C/I*, cujos valores são: [0,30] dB, [0,20] dB e [0,50] dB. No Anexo E, apresentam-se os resultados de todas as saídas acima descritas, bem como as análises para cada um dos casos.

Na Fig. 5.9 e Fig. 5.13, apresenta-se para o intervalo de $C/I \in$ [0, 30] dB, a percentagem média de utilização para cada um dos TU3 e TU50 com/sem FH em DL e UL, respectivamente.

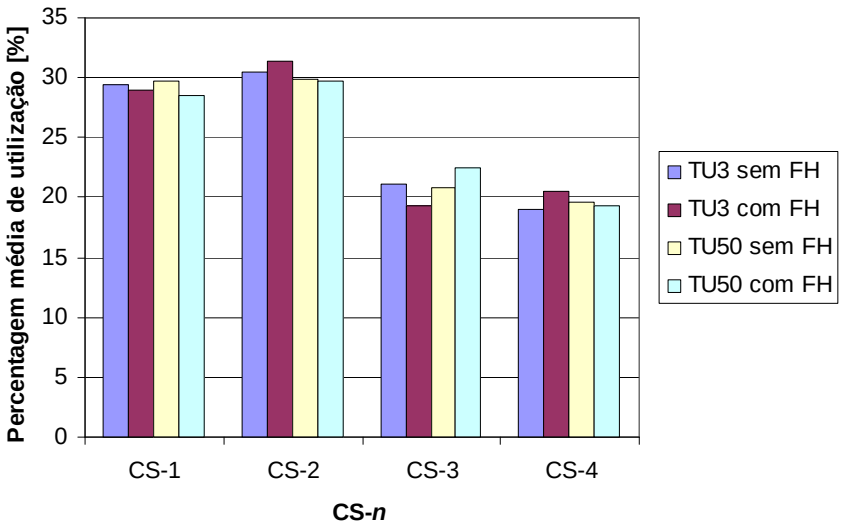
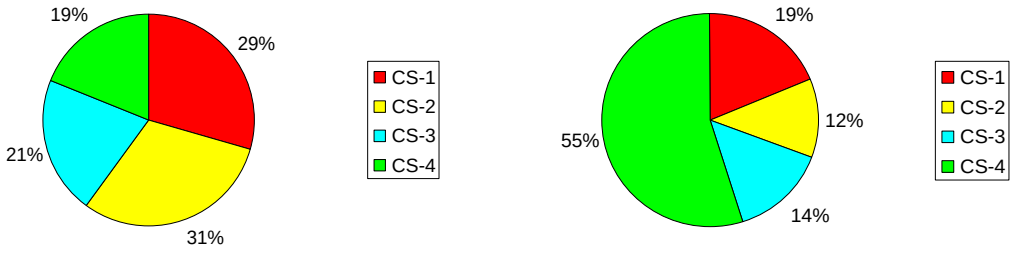


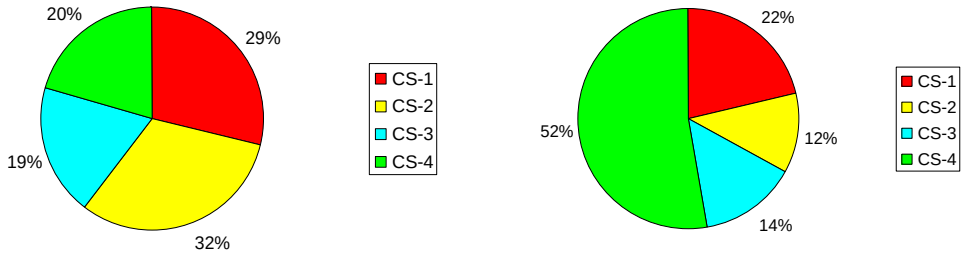
Fig. 5.9 - Percentagem média de utilização no tempo de CS-*n* em DL para $C/I \in$ [0, 30]dB.

Constata-se que, em caso de haver FH ou não, bem como TU3 para TU50, o critério de decisão de CS-*n* não apresenta variações significativas, i.e., o comportamento é idêntico em todos os CS-*n* em DL e UL. O caso obtido para o cenário de Ref.1, nas Fig. 5.10 a Fig. 5.12 (os restantes casos encontram-se no Anexo E), confirma esta afirmação. É perceptível a semelhança das percentagens para cada perfil de EB, verifica-se que as diferenças são claramente entre o UL e o DL, e não no uso de FH ou considerando o caso de TU3 ou TU50.



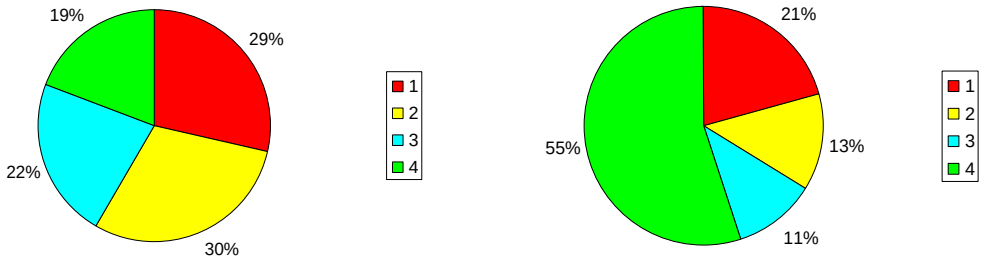
(a) DL (b) UL

Fig. 5.10 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU3 sem FH).



(a) DL (b) UL

Fig. 5.11 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU3 com FH).



(a) DL (b) UL

Fig. 5.12 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU50 com FH).

A distinção principal entre o DL e UL, reside na utilização de CS-4: esta é predominante no UL face aos restantes CS-*n*, contrariamente ao DL, onde CS-1 e CS-2 predominam. Esta diferença expressa que o critério de escolha de CS-*n* no DL, prima pela robustez na transmissão de dados (i.e., reduz $R_{b_{CS-n}}$, garantindo maior protecção de erros), enquanto no UL, a rapidez na transmissão de dados é mais acentuada.

Na Fig. 5.14, onde se apresentam os débitos de transmissão para os 3 intervalos de variação mencionados para TU3 sem FH em DL e UL (como representante para os outros casos), cujas observações são válidas para os restantes casos (descritos no Anexo E) que apresentam o mesmo comportamento.

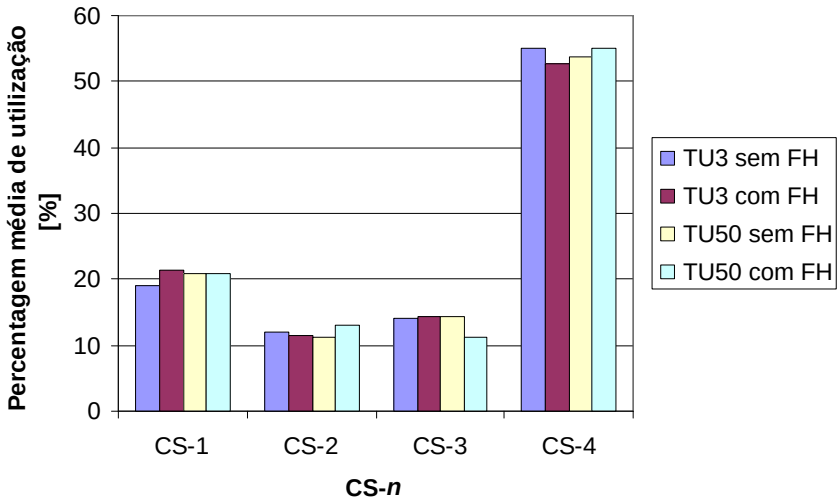


Fig. 5.13 - Percentagem média de utilização no tempo de CS-*n* em UL para $C/I \in$ [0, 30]dB.

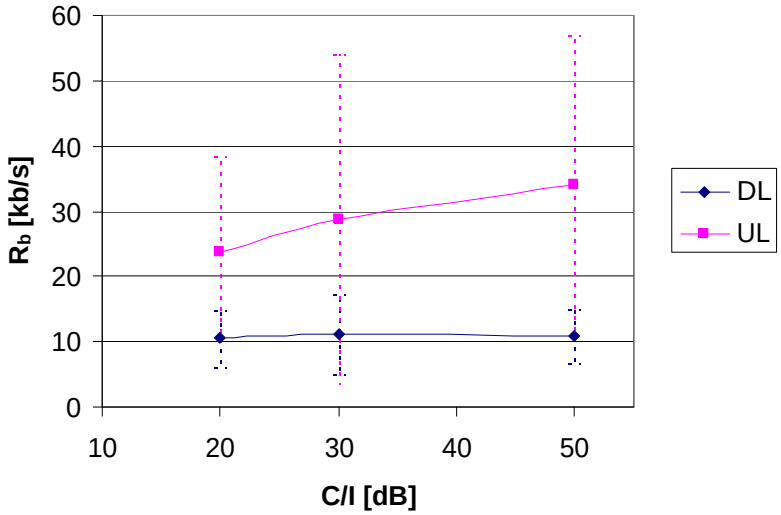


Fig. 5.14 - R_b médio e desvio padrão de TU3 sem FH para $C/I \in$ [0, 20], [0, 30] e [0, 50]dB.

Observa-se que o critério de decisão de CS-*n* em DL não apresenta sensibilidade significativa à variação de *C/I*, enquanto no UL, o critério apresenta elevada sensibilidade (dado o elevado desvio padrão). A discrepância entre o DL e UL, mais uma vez deve-se ao tipo de serviços: em DL a predominância de serviços do tipo *bursty*, leva a que R_b apresente pouca sensibilidade a CS-*n* (R_{bCS-n}) e aos recursos (N_{TS}) (Secção 5.3); enquanto o UL, onde os serviços são inteiramente do tipo *on-off*, podem ser descritos por (4.1), onde R_{bCS-n} aumenta devido ao aumento de *C/I* (Tab. B.1). A diferença entre o desvio padrão de UL e DL, explica-se com base em Tab. B.1 e Tab. B.10: a transição de CS-*n* no UL é mais rápida (a passagem de CS-1 para CS-4 é possível), enquanto no DL, a transição do CS-*n* para outro só ocorre para o CS-*n* adjacente (e.g., CS-1 para CS-2, CS-2 para CS-1 e CS-3, etc.).

Nas Fig. 5.15 e Fig. 5.16, apresenta-se a variação da percentagem média de utilização no tempo para os 3 intervalos de *C/I* para DL e UL, respectivamente.

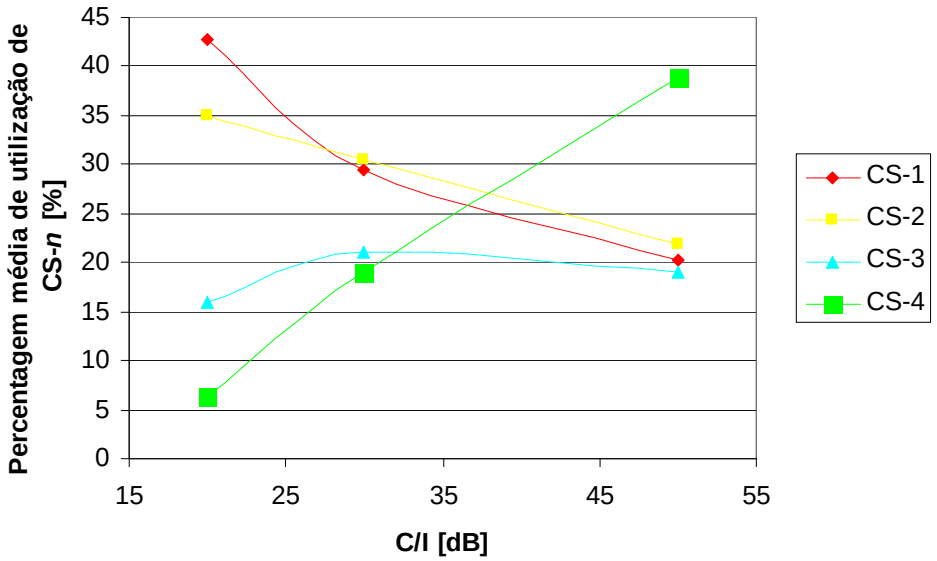


Fig. 5.15 - Percentagem média de utilização no tempo de CS-*n* em DL para $C/I \in$ [0,20], [0,30] e [0,50] dB.

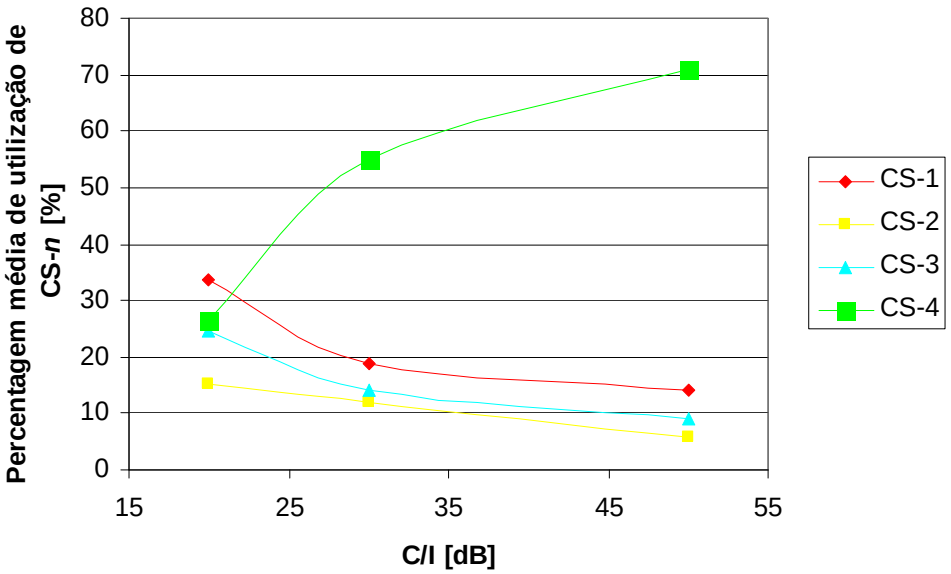


Fig. 5.16 - Percentagem média de utilização no tempo de CS-*n* em UL para $C/I \in$ [0,20], [0,30] e [0,50] dB.

É perceptível a mesma diferença observada e analisada para R_b, nos 2 critérios: a variação de CS-*n* com *C/I* no DL é mais suave que em UL. O que significa que o UL é mais sensível a *C/I*, que o DL. Relativamente às observações feitas para R_b, estes resultados vão ao encontro das conclusões: o DL apresenta a insensibilidade às mudanças de CS-*n* (e consequentemente, R_{bCS-n}), ao contrário do UL.

6. Conclusões

A introdução de novos serviços e novas tecnologias (e.g., UMTS e GPRS) sobre as tecnologias já existentes (e.g., GSM), levantam questões relativas ao dimensionamento inicial: as redes existentes não foram concebidas para suportar determinados serviços e tecnologias, qual será o impacto ao introduzir estes novos serviços e tecnologias? A diferença de filosofia das tecnologias CS e PS latente às tecnologias GSM e GPRS (respectivamente), requer cuidado no dimensionamento e antecipação na interacção dos recursos para ambas. A falta de modelos de caracterização de tráfego dificulta o dimensionamento dos recursos, o que leva a recorrer a outros métodos como a simulação. Neste trabalho, construiu-se um simulador, onde se implementam detalhes relativos à gestão de recursos e ao tráfego gerado por utilizadores, com o intuito de estudar o impacto e dimensionamento do GSM/GPRS.

Este trabalho teve como objectivo focar aspectos ligados à gestão de recursos, e consequentemente, a construção do simulador foi orientada nesse sentido, não considerando os aspectos ligados à camada física (e.g., caracterização do canal rádio, controlo de potência, etc.), mas sim aspectos ligados à camada de gestão de recursos (e.g., mecanismos de gestão de canais, caracterização de tráfego de utilizadores, critérios de decisão para CS-*n* e configuração de canais, etc.), devido a isto, o simulador não sofre nenhuma degradação associada à camada física, pelo que se considera (no caso geral) um desempenho superior a uma situação real. Contudo, permite o estudo do tráfego, de modo a determinar o impacto de diferentes mecanismos e estratégias de gestão de tráfego, bem como a previsão do comportamento perante cenários de crescimento de utilizadores.

A *Optimus* colaborou neste trabalho, permitindo integrar dados e informação relevante para a caracterização de cenários actuais e futuros, nomeadamente: aumento de utilizadores de voz (CS), aumento de utilizadores de dados (PS), mecanismo de *Delayed* DL TBF e critérios de decisão de CS-*n*. A *Optimus* forneceu também estatísticas inerentes ao tráfego de utilizadores, que foram adaptadas para a geração de tráfego no simulador.

A configuração de PDCHs de 2 partilhados e 2 reservados para PS em 2 portadoras, de acordo com as simulações feitas, mostra ser adequada ao tráfego actual. O dimensionamento expresso na Secção 5.1, com base no Modelo de Erlang-B, confirma a validade do uso deste como uma boa aproximação para dimensionamento. Com esta mesma configuração de PDCHs, é possível suportar um crescimento de utilizadores de voz até 25%, sem desrespeitar o dimensionamento inicial de P_b = 1%. No caso dos utilizadores PS, o dimensionamento actual da rede é suficiente, visto o uso de recursos por parte dos utilizadores PS ser muito baixo (na prática, não utiliza muita capacidade do sistema).

Nos cenários de aumento de utilizadores PS para a configuração actual de PDCHs (2 PDCHs partilhados e outros 2 reservados para PS), a partir de 500% é perceptível a insuficiência de recursos para os utilizadores PS, dado o aumento de atraso e o subaproveitamento na capacidade de transmissão de dados. No entanto, esta insuficiência de recursos só é perceptível no R_b nos serviços do tipo o*n-off* (i.e., FTP, *E-mail*, MMS e Vídeo), e não no tipo *bursty* (i.e., *Internet* via WAP e WWW). Contudo, não significa que os utilizadores não se apercebam da escassez de recursos, pois o R_b é estimado de acordo com a perspectiva do sistema e não do utilizador. Os atrasos subjacentes ao aumento de utilizadores de PS, são suficientemente elevados para que os utilizadores se apercebam dos mesmos, o que significa que estes são sensíveis aos recursos do sistema.

O uso doutras configurações (nomeadamente, 2 PDCHs reservados para PS mais 4 PDCHs partilhados (2R+4P) e 3 PDCHs reservados para PS mais 5 PDCHs partilhados (3R+5P)), permitem melhorar o desempenho das chamadas PS sem degradação significativa no desempenho das chamadas CS, perante cenários de aumento de utilizadores PS. Contudo,

com o crescimento de utilizadores PS, a melhoria inerente a esta alteração de PDCHs, é particularmente vantajosa para os serviços do tipo *on-off* e não para os serviços do tipo *bursty*, que não apresentam muita sensibilidade aos recursos, devido ao seu subaproveitamento; logo a predominância das chamadas dos serviços do tipo *bursty* (*Internet* via WAP e WWW), não justifica a reserva de PDCHs, na maior parte dos cenários.

A predominância das chamadas dos serviços do tipo *bursty* em DL, permitiu obter resultados completos relativamente à análise do impacto *Delayed* DL TBF, dado que este atraso no fecho de TBF foi concebido para rentabilizar de modo mais eficiente o uso dos recursos para o caso dos serviços do tipo *bursty*. No caso dos serviços do tipo o*n-off* (como é o caso do UL), este atraso é desvantajoso, uma vez que ocupa recursos desnecessariamente. O caso do UL, revelou que a inexistência deste atraso para os serviços *on-off*, aumenta o débito de transmissão, sinónimo de melhoria na transmissão. Constatou-se que no DL, a variação do débito com a duração de *Delayed* DL TBF é quadrática, enquanto a média do tempo em que *Delayed* DL TBF se encontra activo (i.e., após transmissão de dados) apresenta variação logarítmica com a duração definida para este. Conclui-se que o ideal seria configurar a duração de *Delayed* DL TBF consoante o serviço; para este efeito, seria necessário haver diferenciação do tráfego.

Por fim, estudou-se os critérios de decisão do CS-*n* bem como o seu impacto no débito de transmissão. Constatou-se que o uso de FH e o uso de TU3 e/ou TU50, não apresenta impacto significativo no débito de transmissão, o que significa que (relativamente à gestão de tráfego) os critérios são idênticos. No entanto, no DL a transmissão é feita predominantemente com CS-*n* mais baixos, sinónimo de maior protecção dos dados na transmissão, enquanto no UL, o uso frequente de CS-*n* mais elevados aponta para maior sensibilidade ao canal rádio (nomeadamente, *C/I*). Verificou-se também que a variação de CS-*n* no tempo é bastante maior no UL que no DL, dado que o critério de decisão em UL permite a transição de um dado CS-*n* para qualquer outro, enquanto no DL, a transição de CS-*n* só se dá para os CS-*n* vizinhos.

Para trabalho futuro, sugere-se a adição de mobilidade dos utilizadores (i.e., considerar uma população de utilizadores variável e *handovers*) bem como a aglutinação a um simulador de canal rádio, de modo a interligar a gestão de tráfego à camada física; pressupõe-se que o simulador de canal rádio funciona conjuntamente com ferramentas de sistemas de informação geográfica, de modo a ter em conta as consequências do espaço físico. Também seria interessante inserir novos algoritmos de gestão de tráfego para além do algoritmo *best-effort* implementado, de modo a proporcionar uma comparação de desempenhos entre eles. Finalmente, o estudo de TBF ficaria mais completo se se inserisse o atraso associado à abertura deste, para verificação de qual o valor adequado para o *Delayed* DL TBF em dimensionamentos realistas. Estas adições oferecem maior fiabilidade e exactidão do simulador nos dimensionamentos e estudos do desempenho do sistema.

Anexos
A. Classes Multislot

Em [3GPP03b], estão definidas 29 classes *Multislot*, contudo neste trabalho, foram abordadas somente as primeiras 12 classes *Multislot*, uma vez que as restantes classes actualmente não se encontram disponíveis no mercado abrangido pela *Optimus*. Na Tab. A.1, apresentam-se para as classes *Multislot* indicadas pela *Optimus*, onde se encontram para cada sentido da ligação o número máximo de TSs que o TM pode utilizar simultaneamente.

Tab. A.1 - Classes *Multislot* ([3GPP03b]).

Classe *Multislot*	Número máximo de TSs		
	DL	UL	DL+ UL
1	1	1	2
2	2	1	3
3	2	2	3
4	3	1	4
5	2	2	4
6	3	2	4
7	3	3	4
8	4	1	5
9	3	2	5
10	4	2	5
11	4	3	5
12	4	4	5

B. Critério de decisão para CS-*n*

Os CS-*n* podem diferir para cada sentido numa ligação, pois os critérios de escolha para cada sentido diferem. Apresentam-se os critérios mencionados no cap. 3. No UL, o equipamento estima o valor de *C/I* [dB], elegendo um CS-*n*, de acordo com a Tab. B.1, no ficheiro "CodSchUL.txt".

Tab. B.1 - Índices do CS-*n* correspondentes a um *C/I* para cada CS-*n*.

C/I [dB]	1	…	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	…	20
				CS1 ↔ CS2			CS2 ↔ CS3				CS3 ↔ CS4					
CS-1	1						2			3				4		
CS-2	1			2						3				4		
CS-3	1			2			3							4		
CS-4	1			2			3				4					

No caso do DL, consideram-se 2 perfis de estações base com ou sem saltos na frequência (FH, *Frequency Hopping*): TU3 (*Typical Urban* - 3 km/h) e TU50 (*Typical Urban* - 50 km/h). As Tab. B.2 a Tab. B.5 apresentam o BLER equivalente a um dado C/I, para cada CS-*n*:

Tab. B.2 - % BLER para CS-1.

C/I [dB]	BLER [%]			
	TU3		TU50	
	sem FH	com FH	sem FH	com FH
0	76,5	86,9	85,6	87,0
1				79,3
2	60	69,3		69,1
4	43,3		45,3	44,9
5		32,7		32,8
7	23,1	14,6		14,4
8			9,63	8,89
10	11	2,56		2,60
12			0,826	0,607
13	4,3	0,25		0,275
15	1,85	0,052	0,07	0,046

Tab. B.3 - % BLER para CS-2.

C/I [dB]	BLER [%]			
	TU3		TU50	
	sem FH	com FH	sem FH	com FH
0	91	97,7	97,3	97,6
2	79,27	91,54	90,8	91,6
4	63,6	77,14	76,27	77,8
5		67		67
6	46,38	55,4	54,74	
7				43,86
8	31,39	32,32	32,9	32,78
10	20,1	15,4	15,7	15,7
12	11,6		6,2	
13	9	3,46	3,6	3,44
15	4,68	1	1,05	1,0469

Tab. B.4 - % BLER para CS-3.

C/I [dB]	BLER [%]			
	TU3		TU50	
	sem FH	com FH	sem FH	com FH
0	85,6	99,2	98,4	99,3
2	76,7	96,6	94,8	96,7
4	65,2	88,7	86	89
6	51,4	72,7	70,5	73,15
8	37,6	50	50,4	51
10	25,7	29	30,4	29,5
15	7,34	3,1	3,65	3,25
20	1,4	0,13	0,145	0,13
25	0,15			

Tab. B.5 - % BLER para CS-4.

C/I [dB]	BLER [%]			
	TU3		TU50	
	sem FH	com FH	sem FH	com FH
0	96	100	100	100
2	92,2	100	99,87	100
4	86,6	99,74	99,4	99,78
6	77,8	98,86	97,9	98,9
8	66,4	95,6	93,6	95,9
10	52,7	87,3	85,3	88
15	21,6	46,17	47,16	48,2
20	5,7	12,25	14,8	14,7
25	0,1	1,8	3,3	3,34

Com base nos valores destas tabelas, procurou-se obter uma função para descrever o BLER em função dos valores de *C/I* através da interpolação polinomial apresentada nas Fig. B.1 a

Fig. B.4. Nas Tab. B.6 a Tab. B.9, apresentam-se as equações obtidas das interpolações e os, o valor de R^2 (coeficiente de correlação) e os zeros/mínimos mais baixos, de modo a poder determinar o valor adequado para a truncatura (como se pode constatar pelas Fig. B.1 a Fig. B.4, as funções possuem valores que oscilam fora do domínio de validade dos pontos):

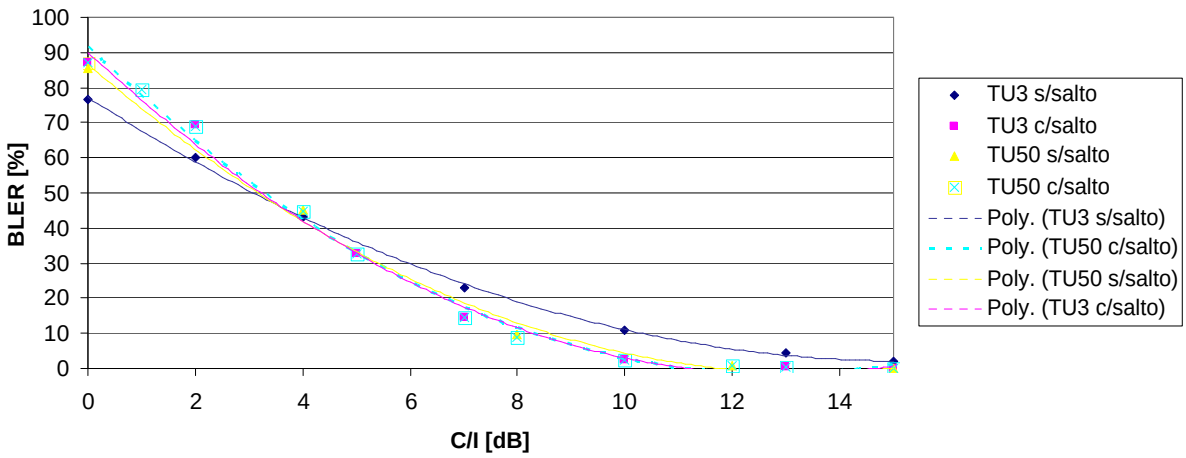


Fig. B.1 - BLER em função de *C/I* para CS-1.

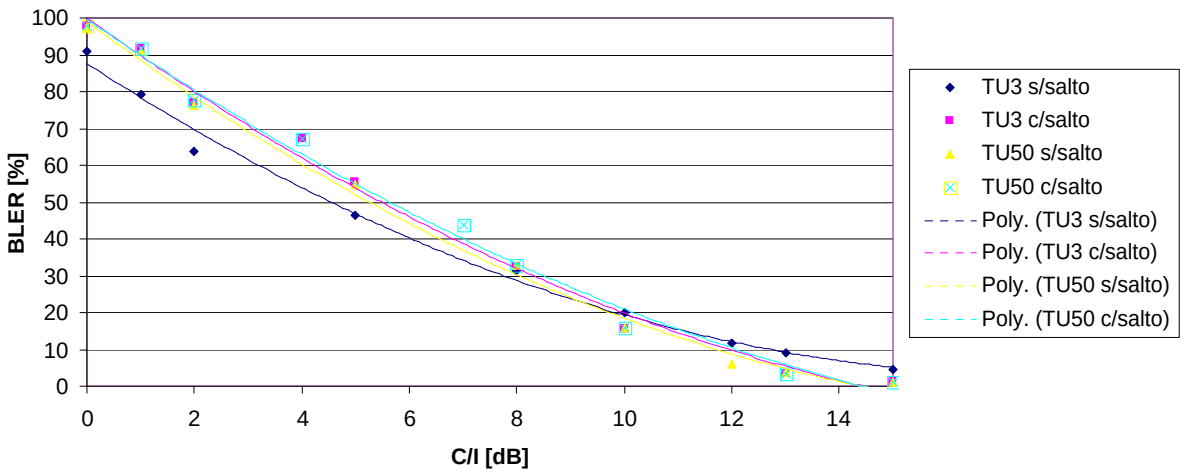


Fig. B.2 - BLER em função de *C/I* para CS-2.

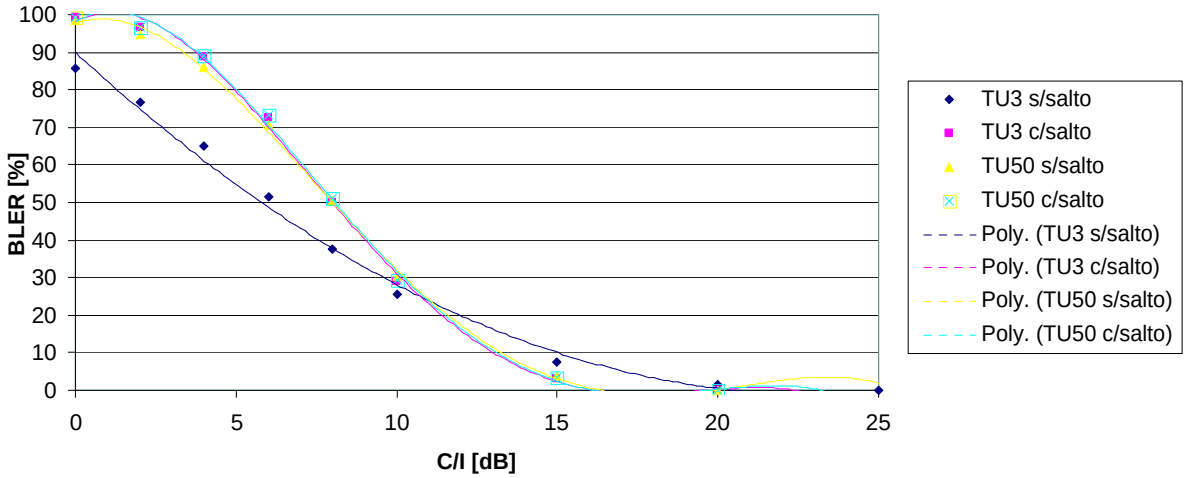


Fig. B.3 - BLER em função de *C/I* para CS-3.

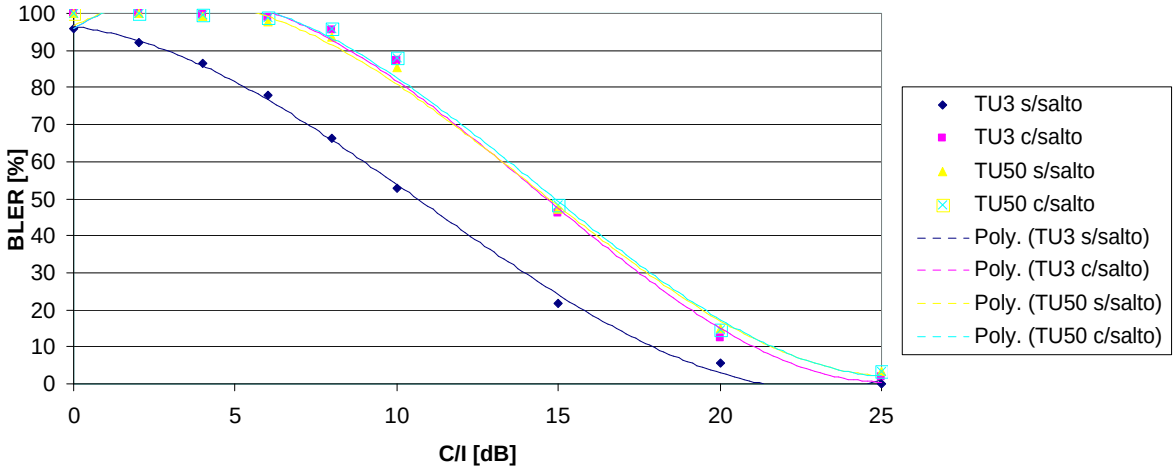


Fig. B.4 - BLER em função de *C/I* para CS-4.

Tab. B.6 - Interpolações da Fig. B.1 para CS-1.

% BLER (C/I)	CS-1	R^2	Zeros	Domínio [dB]
TU3 sem FH	$0{,}3225x^2 - 9{,}848x + 77{,}25$	0,999	15,3*	[0 ; 15]
TU3 com FH	$0{,}5507x^2 - 14{,}22x + 90{,}09$	0,993	12,2	[0 ; 15]
TU50 sem FH	$0{,}4917x^2 - 13{,}15x + 86{,}71$	0,996	11,8	[0 ; 15]
TU50 com FH	$0{,}5680x^2 - 14{,}54x + 91{,}55$	0,994	11,2	[0 ; 15]

Tab. B.7 - Interpolações da Fig. B.2 para CS-2.

% BLER (C/I)	CS-2	R^2	Zeros	Domínio [dB]
TU3 sem FH	$0{,}2671x^2 - 9{,}503x + 87{,}64$	0,993	17,8*	[0 ; 15]
TU3 com FH	$0{,}2461x^2 - 10{,}48x + 100{,}1$	0,993	14,4	[0 ; 15]
TU50 sem FH	$0{,}2690x^2 - 10{,}74x + 98{,}97$	0,996	14,4	[0 ; 15]
TU50 com FH	$0{,}2174x^2 - 10{,}05x + 99{,}68$	0,992	14,4	[0 ; 15]

Tab. B.8 - Interpolações da Fig. B.3 para CS-3.

% BLER (C/I)	CS-3	R^2	Zeros	Domínio [dB]
TU3 sem FH	$0{,}1714x^2 - 7{,}905x + 90{,}06$	0,993	20,5	[0 ; 25]
TU3 com FH	$-0{,}0028x^4 + 0{,}1518x^3 - 2{,}380x^2 + 4{,}767x + 98{,}14$	0,998	16,5*	[0 ; 25]
TU50 sem FH	$-0{,}0021x^4 + 0{,}1197x^3 - 1{,}934x^2 + 2{,}951x + 97{,}64$	0,999	15,8*	[0 ; 25]
TU50 com FH	$-0{,}0027x^4 + 0{,}1465x^3 - 2{,}327x^2 + 4{,}686x + 98{,}23$	0,998	16,5	[0 ; 25]

Tab. B.9- Interpolações da Fig. B.4 para CS-4.

% BLER (C/I)	CS-4	R^2	Zeros	Domínio [dB]
TU3 sem FH	$0{,}0142x^3 - 0{,}4676x^2 - 1{,}003x + 96{,}43$	0,998	21,4	[0 ; 25]
TU3 com FH	$0{,}0206x^3 - 0{,}8818x^2 + 5{,}353x + 95{,}86$	0,992	-	[0 ; 25]
TU50 sem FH	$0{,}0187x^3 - 0{,}8008x^2 + 4{,}572x + 96{,}56$	0,994	-	[0 ; 25]
TU50 com FH	$0{,}0195x^3 - 0{,}8445x^2 + 5{,}159x + 95{,}99$	0,992	-	[0 ; 25]

Todas as interpolações foram escolhidas de modo a maximizar R^2 (maior 0,99) e minimizar o grau do polinómio. O valor da truncatura consistiu em eleger o zero em cada tabela. No caso de não haverem zeros, a truncatura consiste no mínimo (i.e., a derivada, assinalado com *) dentro do domínio das funções. Note-se que acima do valor máximo do domínio da função, considera-se que BLER = 0%. Apresentam-se a interpolações truncadas utilizadas no programa nas Fig. B.5 a Fig. B.8.

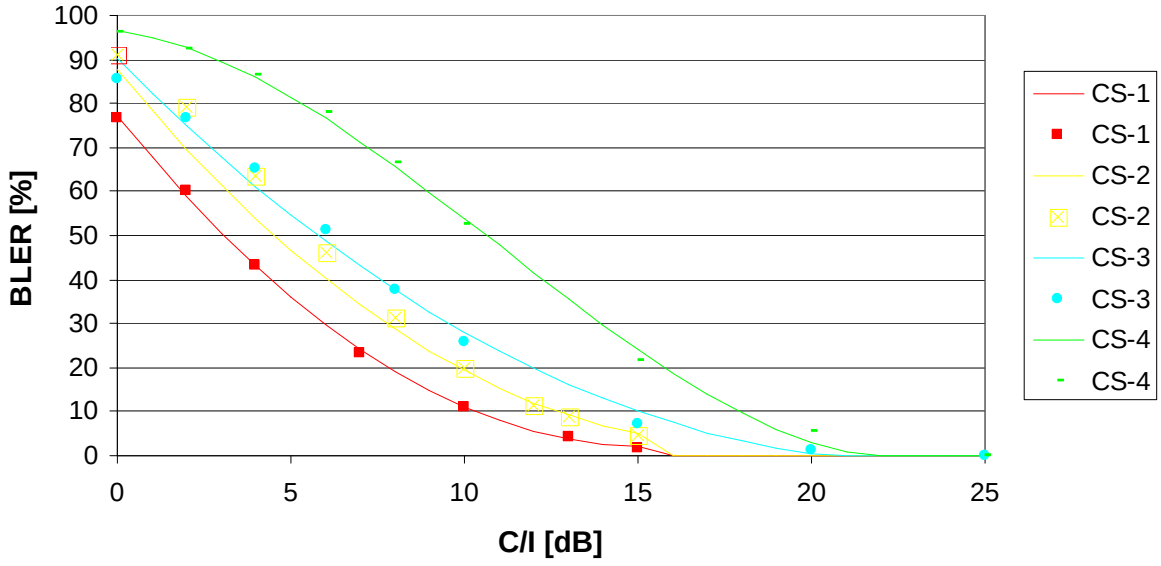


Fig. B.5 - Interpolações truncadas usadas no programa para TU3 sem saltos na frequência.

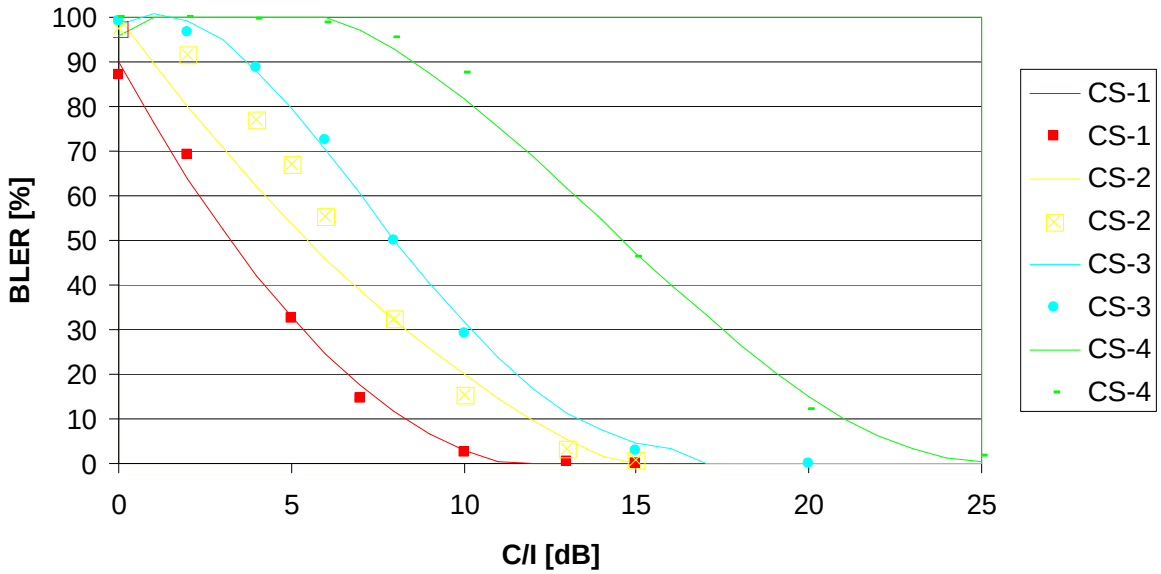


Fig. B.6 - Interpolações truncadas usadas no programa para TU3 com saltos na frequência.

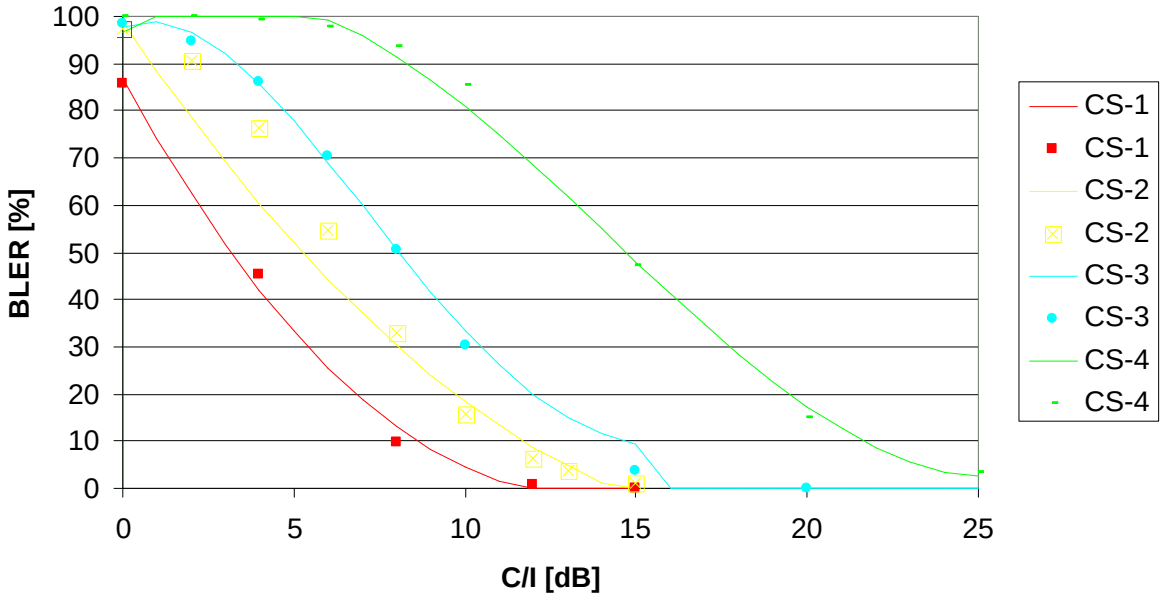


Fig. B.7 - Interpolações truncadas usadas no programa para TU50 sem saltos na frequência.

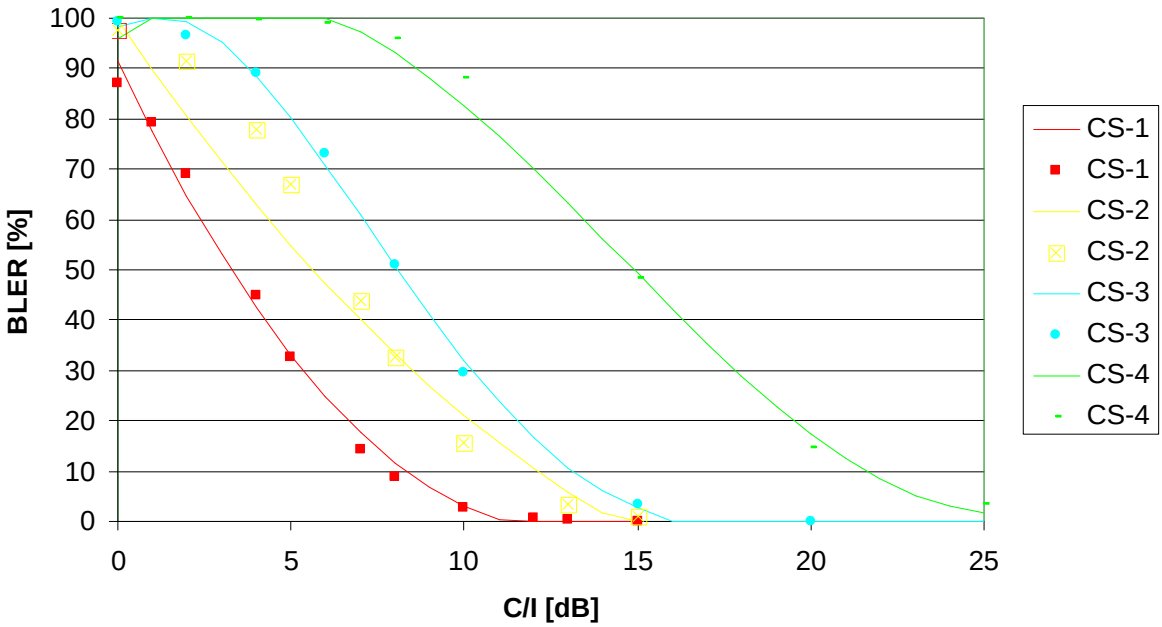


Fig. B.8 - Interpolações truncadas usadas no programa para TU50 com saltos na frequência.

Uma vez determinado o BLER, pode obter-se o respectivo CS-*n* inspeccionando os intervalos da Tab. B.10, que se encontra no ficheiro auxiliar “CodSchDL.txt”:

Tab. B.10 - Correspondência entre BLER e CS-*n*.

BLER [%]	0	1	2	3	…	15	16	…	30	31	…	45	46	…	75	76	…	100
CS-1				←CS2-CS1														
	2			1						1								
CS-2				←CS3-CS2														
	3			2						1								
CS-3				←CS4-CS3			←CS3-CS2				CS3-CS1→							
	4			3			2						1					
CS-4									CS4-CS3→		CS4-CS2→		CS4-CS1→					
	4									3			2			1		

C. Validação de geradores de números aleatórios

A validação das distribuições estatísticas consistiu em gerar 5000 amostras (*n*) de cada uma das funções utilizadas no Gerador de Tráfego (Uniforme, Poisson, Exponencial, Normal, Log-Normal, Geométrica e Pareto) e descritas no Capítulo 3, impondo os valores para a média e variância (consoante a distribuição), de modo a criar um histograma de ocorrências (de intervalo [0, 1000]). Uma vez obtido o histograma, este é normalizado de modo a obter a função da densidade de probabilidade (da Fig. C.1 a Fig. C.7), que será comparada com respectiva função analítica da densidade de probabilidade, obtendo o erro ε_i:

$$\varepsilon_i = \left[p_{\text{teorica}}\left(x_i\right) - p_{\text{simulada}}\left(x_i\right) \right] \tag{C.1}$$

O erro médio ($\bar{\varepsilon}$) e o desvio padrão do erro (σ), serão utilizados para determinar a validade das funções e definem-se como:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{i=0}^{n} \varepsilon_i}{n} \tag{C.2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n} \left(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}\right)^2}{n-1}} \tag{C.3}$$

Uniforme

Para a distribuição Uniforme, definiu-se o mínimo e máximo da função igual ao intervalo definido para o histograma: [0 ; 1000]. A função densidade obtida encontra-se na Fig. C.1.

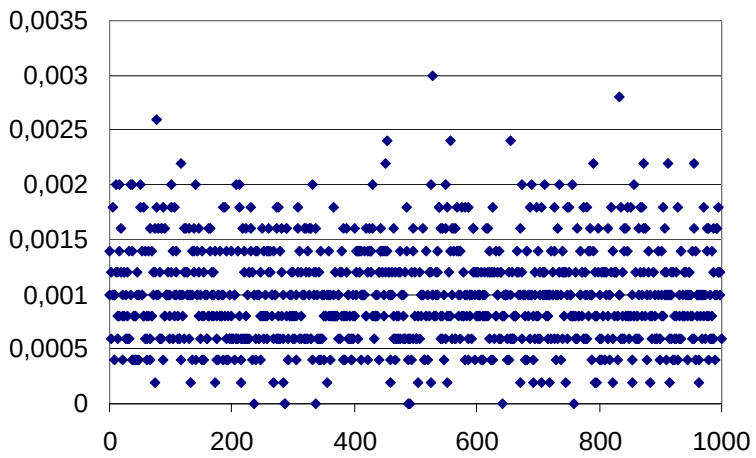


Fig. C.1 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Uniforme [0,1000].

Poisson

No caso da função de Poisson, escolheu-se para valor médio λ = 500 e foi necessário utilizar a fórmula recursiva da distribuição de Poisson [Carg03], dado que o valor médio

escolhido para a validação ser elevado e o uso da expressão usual da distribuição de Poisson conduz a valores intermédios tão elevados, que não existe precisão numérica suficiente para os representar. A fórmula recursiva utilizada define-se com base em:

$$\Pr(0) = e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\Pr(n) = \frac{\lambda \cdot t}{n} \cdot \Pr(n-1) \tag{C.4}$$

A função densidade obtida encontra-se representada na Fig. C.2 e o erro médio tal como o seu desvio padrão na Tab. C.1.

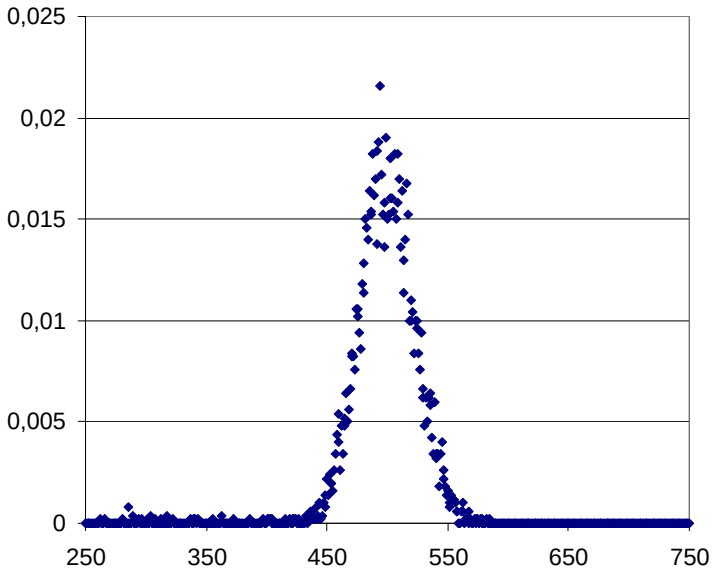


Fig. C.2 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição de Poisson (λ = 500).

Exponencial

Para a distribuição Exponencial, definiu-se a média μ = 100. A função densidade obtida encontra-se na Fig. C.3 e o erro médio tal como o seu desvio padrão na Tab. C.1.

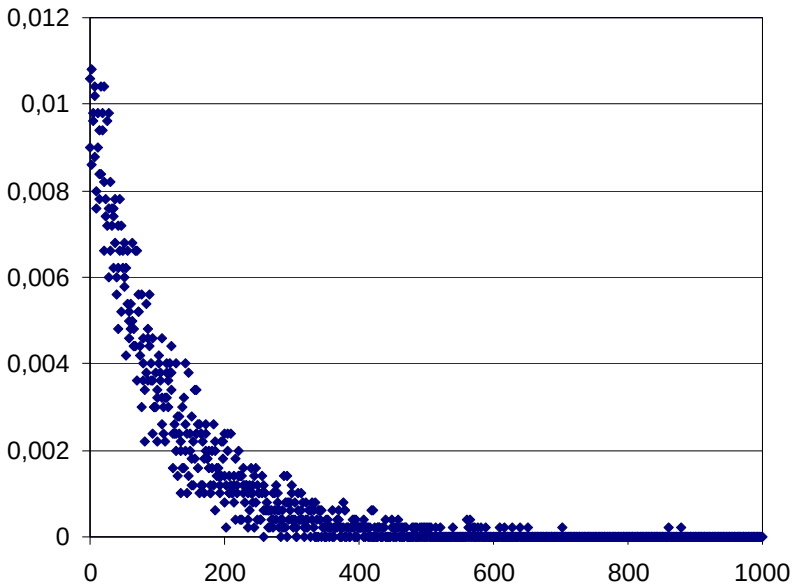


Fig. C.3 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Exponencial (μ = 100).

Normal

Para a distribuição Normal, definiu-se a média μ = 500 e variância σ^2 = 10. A função densidade obtida encontra-se na Fig. C.4 e o erro médio tal como o seu desvio padrão na Tab. C.1.

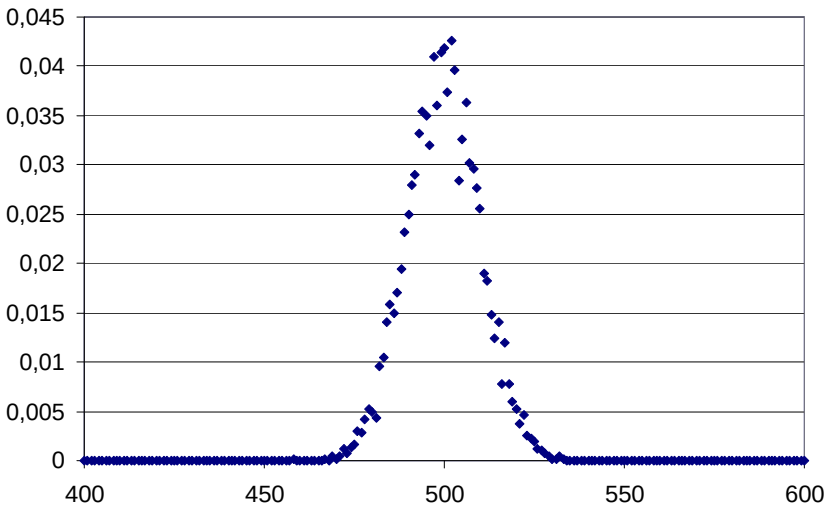


Fig. C.4 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Normal (μ = 500 ; σ^2 = 10).

Log-Normal

Para a distribuição Log-Normal, definiu-se a média μ = 2 e variância σ^2 =10 e a sua implementação é feita a partir da função Normal (descrito em [Jans03]). A função densidade obtida encontra-se na Fig. C.5 e o erro médio tal como o seu desvio padrão na Tab. C.1.

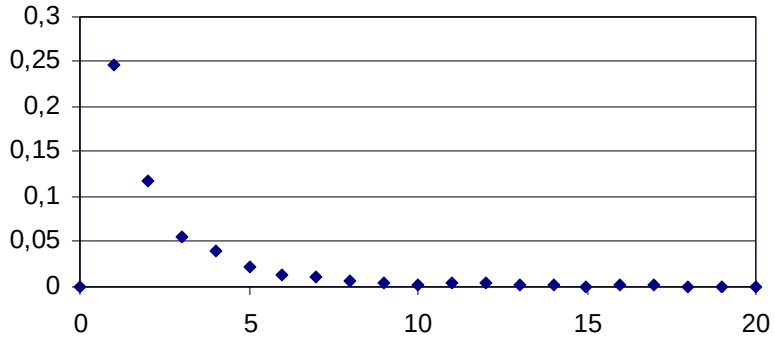


Fig. C.5 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Log-Normal (μ =2, σ^2 =10).

Geométrica

Para a distribuição Geométrica, definiu-se a média μ =100. A função densidade obtida encontra-se na Fig. C.6 e o erro médio tal como o seu desvio padrão na Tab. C.1.

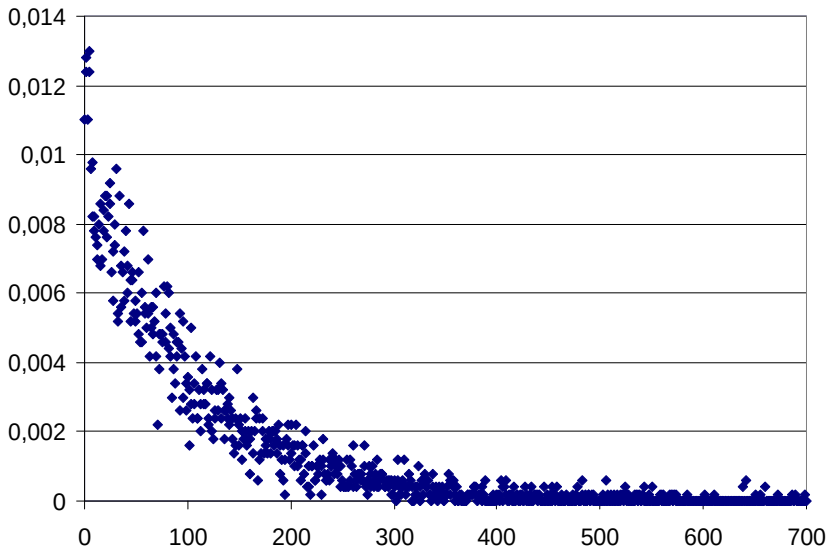


Fig. C.6 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Geométrica (μ =100).

Pareto

Para a distribuição de Pareto, definiu-se k_p =10,5 e α_p = 1,1. A função densidade obtida encontra-se na Fig. C.7 e o erro médio tal como o seu desvio padrão na Tab. C.1.

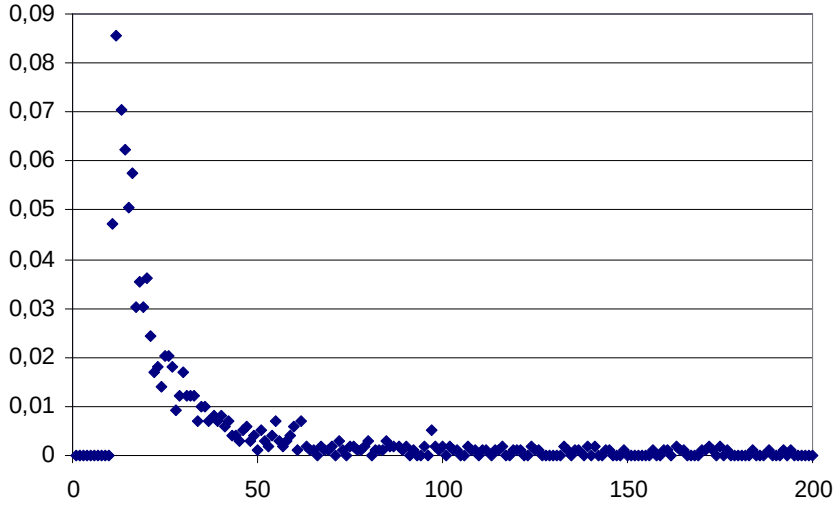


Fig. C.7 - Função densidade de probabilidade obtida para a distribuição Pareto (k_p =10,5 ; α_p = 1,1).

Na Tab. C.1, apresentam-se os valores obtidos para o erro médio ($\bar{\varepsilon}$) e desvio padrão (σ), para cada uma das funções:

Tab. C.1 - Erro médio e respectivo desvio padrão para cada função do Gerador de Tráfego.

Função	Erro Médio ($\bar{\varepsilon}$)	Desvio Padrão (σ)
Uniforme	0, 000 343	0, 000 282
Poisson	0, 000 141	0, 000 452
Exponencial	0, 000 210	0, 000 352
Normal	0, 000 094	0, 000 527
Log-Normal	0, 000 574	0, 007 575
Geométrica	0, 000 214	0, 000 394
Pareto	0, 000 345	0, 001 750

Uma vez que o erro médio para cada uma das funções estatísticas do Gerador de Tráfego é inferior a 1%, tal como o seu desvio padrão, conclui-se que a utilização das funções é válida.

D. Estatísticas de tráfego GPRS (*Optimus* - 2004)

Os dados enviados pela *Optimus* foram devidamente tratados segundo o procedimento descrito na Secção 5.1, com o intuito de serem adaptados às entradas do Gerador de Tráfego.

No caso do MMS, os dados não vieram separados por ambiente, motivo pelo qual se utilizou para todos os ambientes os valores da Tab. D.1.

Tab. D.1 - Volume de dados do serviço MMS (fornecido pela *Optimus*)

Serviço	Volume de dados [kB]	
	Média	Desvio Padrão
MMS	19,63778	18,21014

Apresenta-se na Tab. D.3, os dados GPRS utilizados no gerador de tráfego do simulador para todos os ambientes (Axial, Interior, Rural, Suburbano, Urbano e Urbano-micro).

De acordo com a Secção 5.1, o cálculo de μ_{cs} para os restantes cenários, obtêm-se dividindo o volume médio de dados da Tab. D.3 por μ_{Sd} = 480 Bytes. Os resultados obtidos para μ_{cs} ajustado aos dados da Tab. D.3, encontram-se na Tab. D.2.

Tab. D.2 - μ_{cs} ajustado para todos ambientes (DL).

Ambiente	Serviço	Volume Médio (DL) [kB]	μ_{cs}
Axial	*Internet* via HTTP	24,799424	52
	Internet via WAP	74,675794	156
Interior	*Internet* via HTTP	25,945454	54
	Internet via WAP	54,693103	114
Rural	*Internet* via HTTP	19,926099	42
	Internet via WAP	70,304369	147
Suburbano	*Internet* via HTTP	33,833801	71
	Internet via WAP	131,326408	274
Urbano	*Internet* via HTTP	35,600606	75
	Internet via WAP	93,903075	195
Urbano-micro	*Internet* via HTTP	13,797570	29
	Internet via WAP	29,794721	62

Tab. D.3 - Dados de GPRS de todos os serviços para todos os ambientes.

Ambiente	Serviço	Volume de dados [kB]			λ_{GPRS} [/h]	
		Média		Desvio Padrão	DL	UL
		DL	UL			
Axial	*E-mail*	1,880644	2,610385	112,122572	0,027753	0,038522
	Internet via HTTP	24,799424	4,354021	112,122572	0,365973	0,064254
	Internet via WAP	74,675794	30,649726	211,034811	1,102014	0,452308
	Video streaming	5,175129	-	12,639313	0,076371	-
	MMS	9,818892	9,818892	18,210137	0,144900	0,144900
	FTP	8,494400	8,494400	3,667400	0,000100	0,000001
Interior	*E-mail*	1,967552	2,731016	88,882240	0,029036	0,040302
	Internet via HTTP	25,945454	4,555229	88,882240	0,382885	0,067223
	Internet via WAP	54,693103	22,448086	378,526667	0,807123	0,331273
	Video streaming	45,128721	-	170,936076	0,665979	-
	MMS	9,818892	9,818892	18,210137	0,144900	0,144900
	FTP	8,494400	8,494400	3,667400	0,000100	0,000001
Rural	E-mail	1,511079	5,595834	83,654196	0,022299	0,082579
	Internet via HTTP	19,926099	3,498414	83,654196	0,294056	0,051627
	Internet via WAP	70,304369	28,855531	198,482751	1,037503	0,425830
	Video streaming	8,594917	-	11,645344	0,126838	-
	MMS	9,818892	9,818892	18,210137	0,144900	0,144900
	FTP	8,494400	8,494400	3,667400	0,000100	0,000001
Suburbano	*E-mail*	2,565759	9,501524	98,356117	0,037864	0,140217
	Internet via HTTP	33,833801	5,940182	98,356117	0,499296	0,087661
	Internet via WAP	131,326408	53,901248	278,826491	1,938024	0,795437
	Video streaming	7,673804	-	10,683054	0,113245	-
	MMS	9,818892	9,818892	18,210137	0,144900	0,144900
	FTP	8,494400	8,494400	3,667400	0,000100	0,000001
Urbano	*E-mail*	2,699743	9,997695	123,957731	0,039841	0,147539
	Internet via HTTP	35,600606	6,250379	123,957731	0,525369	0,092239
	Internet via WAP	93,903075	38,541318	204,152597	1,385757	0,568766
	Video streaming	7,085230	-	13,126800	0,104559	-
	MMS	9,818892	9,818892	18,210137	0,144900	0,144900
	FTP	8,494400	8,494400	3,667400	0,000100	0,000001
Urbano-micro	*E-mail*	1,046327	3,874763	40,365007	0,015441	0,057181
	Internet via HTTP	13,797570	2,422432	40,365007	0,203615	0,035749
	Internet via WAP	29,794721	12,228863	88,670512	0,439690	0,180465
	Video streaming	6,464506	-	10,692640	0,095399	-
	MMS	9,818892	9,818892	18,210137	0,144900	0,144900
	FTP	8,494400	8,494400	3,667400	0,000100	0,000001

E. Resultados

Após ter efectuado 10 simulações para cada cenário descrito no Capítulo 5, apresentam-se resultados auxiliares que permitiram chegar às conclusões obtidas para cada situação. Os resultados da Secção E.1 são referentes à Secção 5.2 (Aumento de utilizadores CS), da Secção E.2 são referentes à Secção 5.3 (Aumento de utilizadores PS), da Secção E.3 são referentes à Secção 5.4 (Impacto do *Delayed* DL TBF) e da Secção E.4 são referentes à Secção 5.5 (Impacto do FH sobre CS-*n*).

E.1 Impacto do nº de utilizadores de CS e da distribuição dos PDCHs

Pretende-se comparar os cenários de referência com os cenários onde se aumenta a percentagem dos utilizadores CS em 10% e 25% para diferentes distribuições de PDCHs (considerando para todos os casos, ambiente Urbano):

- 4 PDCHs repartidos em 2 PDCHs partilhados e 2 PDCHs reservados para GPRS (PS), como nos cenários de referência (Secção E.1.1).
- 4 PDCHs totalmente partilhados (Secção E.1.2).
- 4 PDCHs totalmente reservados para GPRS (PS) (Secção E.1.3).

Os parâmetros de saída a serem estudados serão: probabilidade de bloqueio, atraso probabilidade de atraso e utilização de canais.

E.1.1 Aumento do nº de utilizadores de CS com 2 PDCHs partilhados e 2 PDCHs reservados para PS

Mantendo a distribuição de 4 PDCHs, com 2 PDCHs partilhados (i.e., N_{TCH} =12) e 2 PDCHs reservados para PS, os resultados obtidos podem ser comparados a ambos os cenários de referência dado que a distribuição de CS-*n* é incorrelacionada com o aumento da percentagem do número de utilizadores CS. Relativamente ao número de chamadas bloqueadas e probabilidade de bloqueio em ambiente Urbano, obtiveram-se os resultados na Tab. E.1. Observando os dados da Tab. E.1, pode-se constatar que o impacto de aumentar a percentagem de utilizadores CS, não é significativo para estes, dado que o bloqueio é bastante reduzido e não se reflecte na probabilidade de bloqueio (que se manteve sempre em 0%). Conclui-se que o dimensionamento de N_{TCH} efectuado para o cenário de referência previamente descrito, respeita o limite imposto, sinónimo de que o modelo de Erlang-B constitui uma aproximação razoável para dimensionamento.

O impacto do aumento de utilizadores CS sobre os utilizadores PS, mede-se com base no atraso que as chamadas PS sofrem. Para o ambiente Urbano, obtiveram-se os atrasos para as chamadas PS em DL expressas na Tab. E.2.

Tab. E.1 - Bloqueio obtido para o cenário E.1.1.

Cenário	Número de chamadas CS		Número de chamadas bloqueadas		P_b [%]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	212	20,4	0,10	0,32	0	0
Aumento de 10% de utilizadores CS	228	12,1	0,40	0,69	0	0
Aumento de 25% de utilizadores CS	246	43,9	0,50	0,53	0	0

Tab. E.2 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.1.1.

Cenário	Número de chamadas PS		Número de chamadas atrasadas		P_d [%]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	1,0	0,82	0	0	0	0
Aumento de 10% de utilizadores CS	1,0	0,94	0	0	0	0
Aumento de 25% de utilizadores CS	0,9	0,79	0	0	0	0

Observando a Tab. E.2, conclui-se que o aumento do número de utilizadores CS não influenciou a transmissão de dados das chamadas PS, devido a inexistência de atrasos. O impacto das chamadas CS não se reflectiu sobre as chamadas PS, dada que estas são poucas.

Por fim, procura-se adquirir sensibilidade relativamente ao uso de canais. Na Fig. E.1, apresenta-se a percentagem de utilização simultânea de canais para os 3 cenários em ambiente Urbano, onde os canais P1 e P2 correspondem a canais partilhados. Note-se que a utilização dos canais mais à direita, implicam que os canais à esquerda já estejam ocupados, e.g., o uso de P2 implica que todos os canais encontrem-se ocupados. Analisando a Fig. E.1, verifica-se que o aumento de utilizadores CS tende a que haja uma utilização de mais canais, i.e., as barras do cenário de referência são "deslocadas" para a direita. Facilmente se compreende que o aumento de utilizadores CS requer mais canais, contudo os PDCHs partilhados são pouco utilizados (1% do tempo), o que significa que o débito de transmissão de uma chamada PS não sofre quebras significativas. Somente quando o aumento de utilizadores CS atinge 25%, é que os utilizadores CS ocupam os 2 PDCHs partilhados. Outro indicador para a insensibilidade das chamadas de PS para este aumento, consiste na percentagem de utilização de TSs por classe *Multislot* que se reflecte no débito de transmissão das chamadas PS. Na Tab. E.3, apresenta-se o débito médio bem como percentagem média de máxima utilização de TSs em DL.

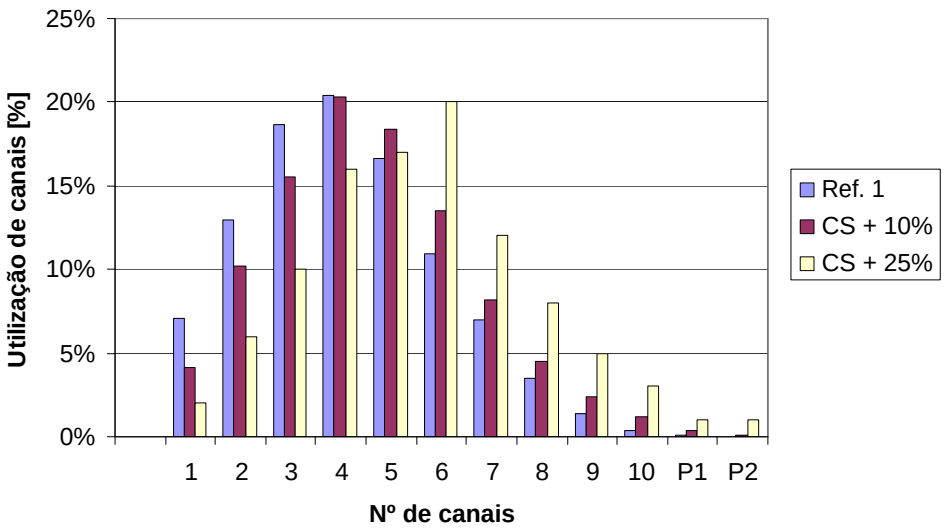


Fig. E.1 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário E.1.1.

Tab. E.3 - Débito e utilização de TSs das chamadas PS (DL) obtidos para E.1.1.

Cenário	R_b [kb/s]		Utilização de TSs por classe *Multislot* [%]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	7,99	6,12	100	0
Aumento de 10% de utilizadores CS	6,92	6,04	100	0
Aumento de 25% de utilizadores CS	8,81	7,79	100	0

Observando a Tab. E.3, as chamadas PS demonstram pouca sensibilidade ao aumento de utilizadores CS, uma vez que a média e desvio padrão não apresentam variações significativas. A utilização de TSs por classe *Multislot* foi máxima para todos os casos, o que é justificado, novamente, pelo facto de as chamadas PS ocorrerem com pouca frequência e pelo facto da probabilidade das chamadas CS ocuparem os 2 PDCHs partilhados ser muito reduzida.

E.1.2 Aumento do nº de utilizadores de CS com 4 PDCHs partilhados

Relativamente ao cenário anterior, a diferença deste cenário reside em os 4 PDCHs serem partilhados. A análise efectuada para o caso anterior, será repetida para este cenário também. Na Tab. E.4, apresenta-se o bloqueio observado para este cenário.

Tab. E.4 - Bloqueio obtido para o cenário E.1.2.

Cenário	Número de chamadas CS		Número de chamadas bloqueadas		P_b [%]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	212	20,4	0,10	0,32	0	0
Aumento de 10% de utilizadores CS	233	15,1	0	0	0	0
Aumento de 25% de utilizadores CS	257	15,6	0	0	0	0

Constata-se que o aumento das chamadas CS (ao utilizar 4 PDCHs partilhados) não se verifica qualquer bloqueio das chamadas. Relativamente ao cenário de referência, há uma diminuição do bloqueio devido aos utilizadores CS terem mais canais disponíveis (N_{TCH} = 14 em vez de 10), o que implica que o sistema tem maior capacidade para a voz.

Para as chamadas PS (DL) em ambiente Urbano, obtiveram-se os atrasos expressas na Tab. E.5. Apesar das chamadas PS estarem mais vulneráveis a atrasos (dado que os PDCHs são partilhados), o aumento das chamadas CS não é significativo ao ponto de ocupar todos os PDCHs e causar atrasos, como se verifica na Tab. E.5. Verifica-se que o comportamento da Fig. E.2 é idêntico ao da Fig. E.1. Na Fig. E.2, compreende-se facilmente que o uso de PDCHs partilhados é muito pouco frequente (só houve ocupação de 1 PDCH), daí que se conclua que as chamadas PS apresentarão muito pouca sensibilidade ao aumento das chamadas CS.

Conclui-se que esta distribuição de PDCHs é mais favorável às chamadas CS e o que o seu impacto sobre as chamadas PS não é significativo, dado que os PDCHs servem bem as necessidades das poucas chamadas PS que ocorrem (como se pode verificar na Tab. E.5).

Tab. E.5 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.1.2.

Cenário	Número de chamadas PS		Número de chamadas atrasadas		P_d [%]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	1,0	0,82	0	0	0	0
Aumento de 10% de utilizadores CS	1,6	1,35	0	0	0	0
Aumento de 25% de utilizadores CS	1,0	0,82	0	0	0	0

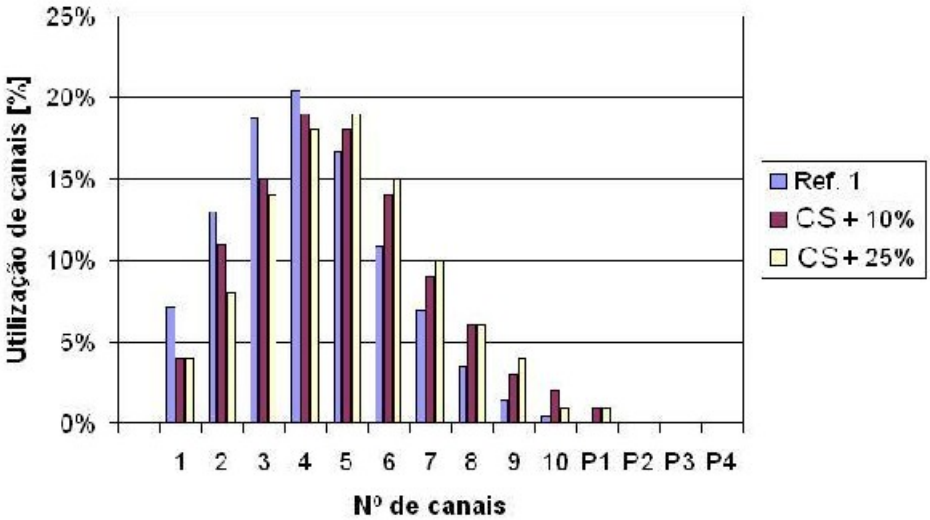


Fig. E.2 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário 5.2.2.

E.1.3 Aumento do nº de utilizadores de CS com 4 PDCHs reservados para PS

Para concluir, os 4 PDCHs são reservados para PS e consequentemente, N_{TCH} = 10, em vez de N_{TCH} = 12 do cenário de referência. Seguindo os passos anteriores, o bloqueio obtido para este cenário encontra-se na Tab. E.6.

Tab. E.6 - Bloqueio obtido para o cenário E.1.3.

Cenário	Número de chamadas de voz		Número de chamadas bloqueadas		P_b [%]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	212	20,4	0,10	0,32	0	0
Aumento de 10% de utilizadores CS	230	7,8	2,10	2,61	0,6	1,1
Aumento de 25% de utilizadores CS	265	16,3	3,90	3,57	1	0,6

Verifica-se na Tab. E.6 que o aumento de chamadas CS leva a um aumento perceptível do bloqueio, contudo só atinge P_b = 1% no caso em que há o aumento de 25% de utilizadores CS, mantendo o dimensionamento inicial apesar de tudo.

Relativamente às chamadas PS (DL), o facto dos 4 PDCHs serem todos reservados, implica haverem mais recursos disponíveis para PS e insensibilidade ao aumento de chamadas CS como se pode confirmar pelo atraso da Tab. E.7.

Tab. E.7 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.1.3.

Cenário	Número de chamadas PS		Número de chamadas atrasadas		P_d [%]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	1	0,82	0	0	0	0
Aumento de 10% de utilizadores CS	1,5	0,53	0	0	0	0
Aumento de 25% de utilizadores CS	2,1	0,99	0	0	0	0

O aparente aumento do número de chamadas, pode induzir que o aumento de recursos permite que as transmissões das chamadas PS decorram mais rapidamente, dando lugar a novas chamadas PS. Contudo os dados da Fig. E.3 e da Tab. E.8, permitem concluir que o aumento dos recursos não tem o impacto descrito. Observando a Fig. E.3, constata-se que não há utilização simultânea dos 4 PDCHs. No caso do aumento de chamadas CS atingir 25%, há utilização simultânea de 3 PDCHs, mas somente em 2% do tempo, donde se conclui que reservar mais 2 PDCHs relativamente ao cenário de referência, não constitui uma vantagem significativa para as chamadas PS.

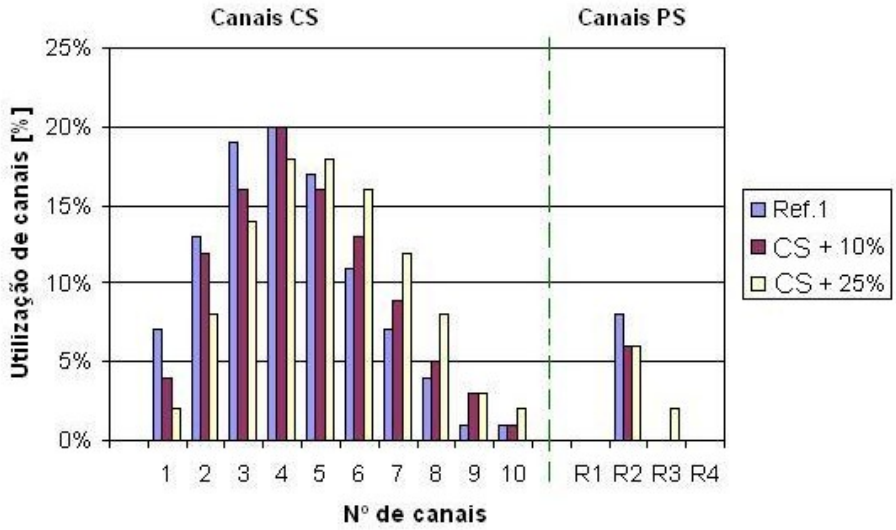


Fig. E.3 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário E.1.3.

Da Tab. E.8, é possível verificar que o aumento de PDCHs conduz a um ligeiro incremento do débito (em ambos os cenários), mas não muito significativo; no entanto, a validade deste resultado não é elevada dado que as chamadas PS são reduzidas, sendo difícil a confirmação a nível estatístico. Note-se que o aumento das chamadas CS não influencia o débito, logo

conclui-se que as chamadas PS são insensíveis às chamadas CS dado que os PDCHs são reservados para PS.

Tab. E.8 - Débito e utilização de TSs das chamadas PS (DL) obtidos para E.1.3.

Cenário	R_b [kb/s]		Utilização de TSs por classe *Multislot* [%]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	7,99	6,12	100	0
Aumento de 10% de utilizadores CS	13,6	9,79	100	0
Aumento de 25% de utilizadores CS	10,6	2,54	100	0

E.2 Impacto do nº de utilizadores de dados e da capacidade GPRS

O aumento de utilizadores de GPRS (PS) proposto pela *Optimus* com o objectivo de analisar a capacidade do sistema, foi para 100%, 200%, 500% e 1000% empregando diferentes distribuições de PDCHs:

- 4 PDCHs repartidos em 2 PDCHs partilhados e 2 PDCHs reservados para GPRS (PS), como nos cenários de referência (Secção E.2.1).
- 6 PDCHs repartidos em 4 PDCHs partilhados e 2 PDCHs reservados para GPRS (PS) (Secção 5.3.2).
- 8 PDCHs repartidos em 5 PDCHs partilhados e 3 PDCHs reservados para GPRS (PS) (Secção 5.3.3).

Os parâmetros mais relevantes para a análise de resultados, são: atraso, probabilidade de atraso, débito de transmissão e utilização de canais no tempo e por classe *Multislot*.

E.2.1 Aumento de utilizadores de PS com 2 PDCHs partilhados e 2 PDCHs reservados para PS

Dado que os cenários de referência utilizam 1 utilizador para serviço, o aumento de utilizadores PS de 100%, 200%, 500% e 1000%, equivale a ter 2, 3, 6, 10 utilizadores para cada serviço, respectivamente, com os mesmos parâmetros de geração de tráfego (ambiente Urbano). Na Tab. E.9, apresentam-se o número de chamadas atrasadas, probabilidade das chamadas PS sofrerem atrasos, duração de atrasos de transmissão e por utilizador definidos (4.3) e (4.4), respectivamente. Observando a Tab. E.9, verifica-se que a partir do aumento de 500% ocorrem atrasos que até ao aumento de 200% não eram significativos. Constata-se que o número de atrasos, duração e probabilidade de atraso aumentam progressivamente com o aumento de utilizadores PS, como seria de prever. Verifica-se também que d_t e d_u são da mesma ordem de grandeza, sinónimo de que um utilizador PS em média não sofre muitos atrasos de transmissão. O impacto destes atrasos no débito de transmissão (R_b) é avaliado com base na Tab. E.10. Verifica-se que R_b não apresenta variação significativa com os aumentos das chamadas PS. Relativamente ao cenário de referência, ocorre um ligeiro aumento devido ao aumento das chamadas PS, que conduzem a uma maior rentabilidade dos recursos. Observando os atrasos obtidos da Tab. E.9, seria de esperar que R_b baixasse com o aumento de utilizadores (i.e., diminuísse devido ao aumento do atraso), contudo cerca de 75% das chamadas PS são acesso à *Internet*, pertencentes à classe *Interactive* (Tab. 2.3), que apresenta pouca sensibilidade a atrasos (Secção 2.3), o que justifica a estabilidade obtida para

o débito médio das chamadas PS. Esta insensibilidade justifica-se por estas chamadas ocuparem recursos onde a transmissão é feita em rajadas de pacotes com baixo volume (comparado com os volumes de outros serviços) espaçadas com intervalos de tempo significativos (acentuando a baixa rentabilidade de recursos) e variáveis.

Tab. E.9 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.1.

Cenário	Número de chamadas atrasadas		d_t [s]		d_u [s]		P_d [%]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Aumento de 100% de utilizadores PS	0,2	0,63	0,47	1,49	1,15	3,64	4	12,6
Aumento de 200% de utilizadores PS	0	0	0	0	0	0	0	0
Aumento de 500% de utilizadores PS	1,1	1,54	1,15	1,99	3,06	4,06	11	16,2
Aumento de 1000% de utilizadores PS	3,7	2,95	15,52	17,12	16,43	16,70	30	19,7

Tab. E.10 - Débitos de transmissão das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.1.

Cenário	Número de chamadas PS		R_b [kb/s]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	1	0,81	7,99	6,12
Aumento de 100% de utilizadores PS	2,3	1,25	12,93	3,30
Aumento de 200% de utilizadores PS	3,5	1,08	9,75	2,73
Aumento de 500% de utilizadores PS	8,1	3,78	10,54	0,99
Aumento de 1000% de utilizadores PS	11	5,64	10,96	1,77

Por fim, resta determinar a origem dos atrasos: será que as chamadas CS retiram os recursos partilhados ou os recursos disponíveis para PS são insuficientes? A resposta a esta questão prende-se com a utilização de canais, nomeadamente a utilização de canais PS reservados (R) e partilhados (P) na Fig. E.4, pois da Secção E.1 , constatou-se que as chamadas CS (cenário de referência) utilizam os canais partilhados quase em 1% do tempo (Fig. E.1), o que significa que não influenciam significativamente as chamadas PS. Recorde-se que os canais partilhados (P) são utilizados somente após os canais reservados (R) serem ocupados.

A Fig. E.4 apresenta um comportamento idêntico ao observado na Fig. E.1: o aumento de chamadas PS leva a um aumento do uso no tempo de canais bem como maior número de canais em utilização simultânea (recorde-se que o uso de P2, implica que todos os canais encontram-se em utilização). Na Fig. E.4, é possível reparar que o uso dos 2 canais reservados é maior que os restantes casos, o que é explicado pelas classes *Multislot*: exceptuando a classe 1, todos TM's têm capacidade de utilizar no mínimo 2 TSs em simultâneo.

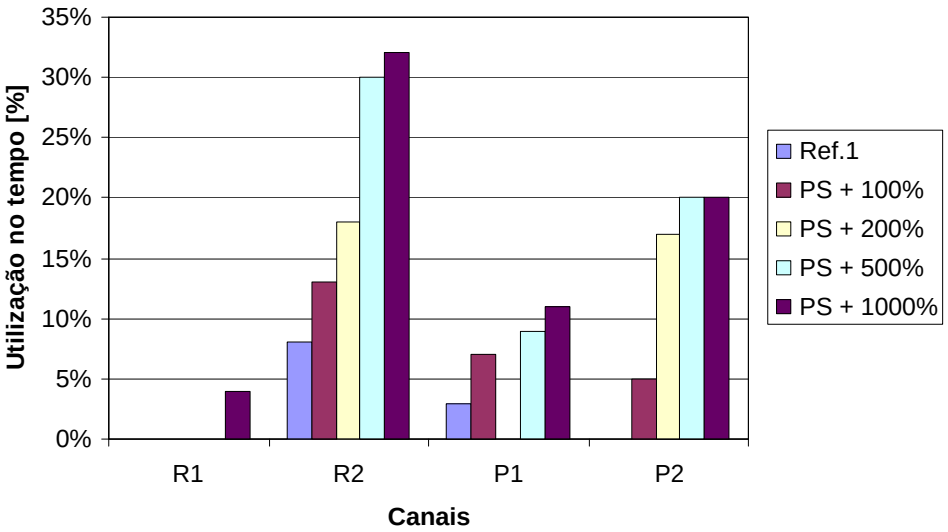


Fig. E.4 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário E.2.1.

Em caso de 2 ou mais chamadas PS ocorrerem simultaneamente, a repartição equitativa dos recursos na maior parte dos casos leva a que se atribuam 2 TSs a uma chamada PS, o que explica o uso mais frequente de 2 (R1+R2) e 4 (R1+R2+P1+P2) canais face a 1 (R1) e 3 (R1+R2+P1) canais. O uso de R1 no caso das chamadas PS aumentarem 1000%, reflecte insuficiência de recursos pois dadas as capacidades das classe *Multislot* (Anexo A), o uso de 1 canal na filosofia *best-effort* corresponde ao mínimo possível numa distribuição equitativa de canais. Pode-se constatar o subaproveitamento das capacidades dos TMs devido a escassez de recursos para aumentos de PS significativos com base na Fig. E.5, onde se representa a percentagem de chamadas que utilizaram a capacidade máxima *Multislot* em DL dos TMs, e na Fig. E.6, onde se apresenta percentagem de utilização simultânea de TSs por chamada. Relativamente ao cenário de referência da Fig. E.6 (a), onde apenas 3 TSs eram suficientes para garantir utilização máxima de recursos, os aumentos de chamadas PS conduzem a uma quebra na rentabilidade de recursos (Fig. E.5), dado que a utilização no tempo de 1 TS nas chamadas cresce (sinónimo de escassez de TSs) e o uso de 4 TSs simultaneamente, decresce bastante mais rapidamente (devido à distribuição equitativa de recursos pelas chamadas PS) na Fig. E.6 (b) a (e).

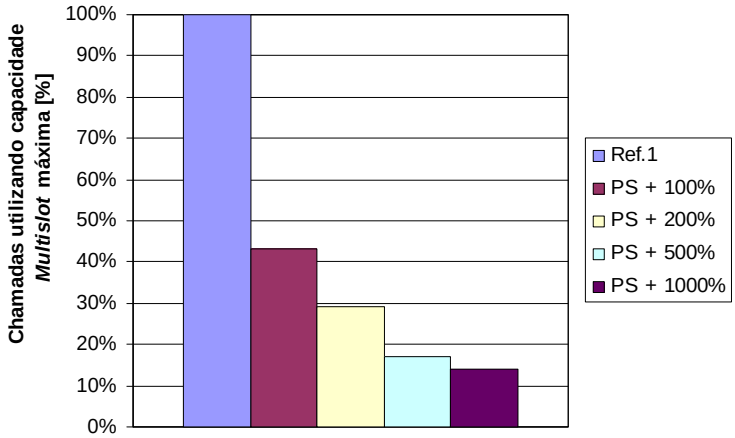
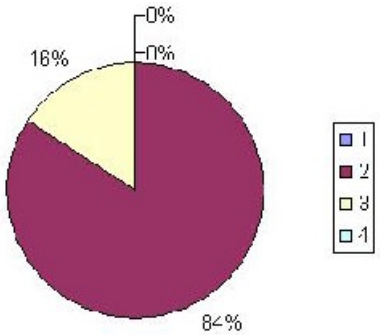
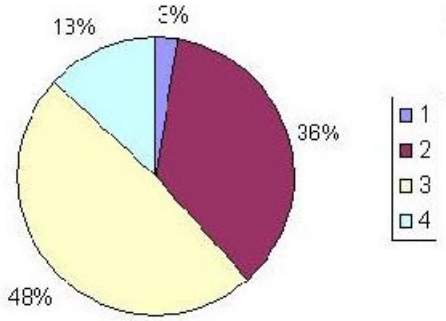


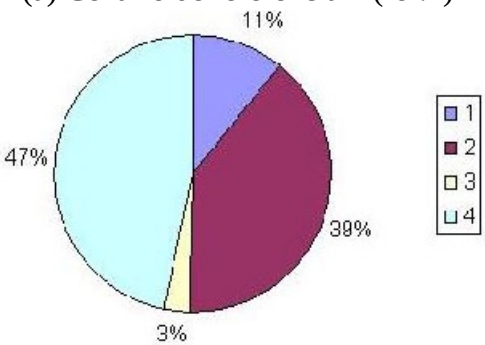
Fig. E.5 - Percentagem média de chamadas usando capacidade *Multislot* máxima no cenário E.2.1.



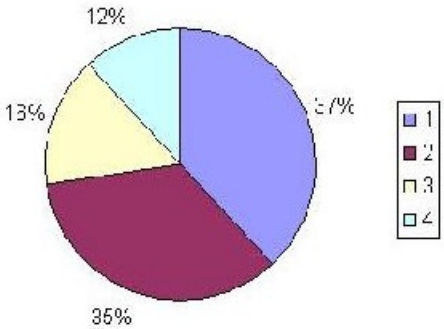
(a) Cenário de referência 1 (ref.1)



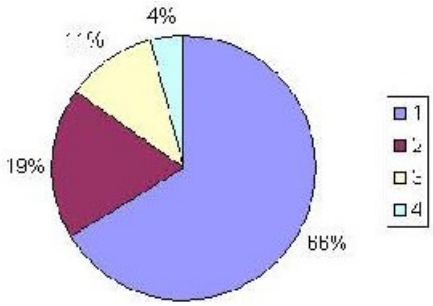
(b) PS aumenta 100%



(c) PS aumenta 200%



(d) PS aumenta 500%



(e) PS aumenta 1000%

Fig. E.6 - Percentagem média de utilização simultânea de TSs no tempo dos cenários ref.1 e de E.2.1.

Verifica-se que as chamadas PS no cenário ref.1 (Fig. E.6 (a)) não vão para além do uso de 2 TSs, o que é justificável pela distribuição das classes *Multislot* (o baixo número de utilizadores, leva a que a distribuição de utilizadores na simulação, predomine nas classes *Multislot* 1 a 5 no Anexo A) e um baixo aproveitamento dos recursos PS existentes.

Dada a variação do número de TSs (Fig. E.6) na transmissão e a manutenção de R_b (Tab. E.10), deduz-se que ocupação dos recursos é feita com baixa rentabilidade e consequentemente, a transmissão não será afectada significativamente pelo número de TSs atribuídos. Conclui-se que os recursos PS não limitam severamente a transmissão de chamadas PS de acesso à *Internet* (tipo *bursty*) por diminuição de recursos. Isto equivale a que as chamadas PS do tipo *bursty* apresentam insensibilidade a N_{TS} , o que invalida o uso de (4.1) na Secção 4.1 para descrever o débito de transmissão.

E.2.2 Aumento de utilizadores de PS com 4 PDCHs partilhados e 2 PDCHs reservados para PS

Repetiram-se as simulações de E.2.1, alterando somente a distribuição de PDCHs para 4 partilhados e 2 reservados para PS. Tal como na Secção anterior apresentam-se os atrasos na Tab. E.11 e o débito de transmissão na Tab. E.12.

Tab. E.11 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.2.

Cenário	Número de chamadas atrasadas		d_t [s]		d_u [s]		P_d [%]
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
Referência 1	0	0	0	0	0	0	0
Aumento de 100% de utilizadores PS	0	0	0	0	0	0	0
Aumento de 200% de utilizadores PS	0	0	0	0	0	0	0
Aumento de 500% de utilizadores PS	0	0	0	0	0	0	0
Aumento de 1000% de utilizadores PS	1,7	2,54	0,51	0,63	2,01	2,61	13

O aumento de recursos PS levou a uma redução considerável (anulação inclusivamente) do atraso relativamente ao cenário E.2.1 (Tab. E.9), o que confirma a análise previamente feita: o atraso devia-se à escassez de recursos PS. Verifica-se que só ocorrem atrasos no caso do aumento ascender a 1000%, com probabilidade de 13% (aproximadamente 3 vezes menos que no cenário 5.3.1).

Na Fig. E.8, encontra-se a percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL); verifica-se que há uso considerável de todos os canais (dada a percentagem de P4), o que se deve à distribuição equitativa: as chamadas PS ocuparão os canais reservados e partilhados separadamente, i.e., cada chamada procurará maximizar o número de TSs (2 - 4 TSs), dentro dos 6 PDCHs livres, aproveitando PDCHs partilhados também. O modo como esta distribuição média por chamada PS é feita, encontra-se na Fig. E.9. Na Fig. E.9, relativamente ao cenário E.2.1 (Fig. E.6), verifica-se que um aumento substancial do uso simultâneo de 3 e 4 TSs, sinónimo maior rentabilidade de recursos devido ao aumento de recursos. Confirma-se que o uso de 4 TSs é possível quando se encontra uma chamada PS activa (P2) e/ou outra chamada PS com capacidade Multislot máxima de 2 TSs, enquanto o uso de 3 TSs (no caso da capacidade Multislot máxima ser 4 TSs), corresponde a 2 chamadas

PS em simultâneo (P4) usando os 3 PDCHs cada. Por este motivo, P3 apresenta percentagem reduzida face aos outros canais. Estes resultados permitem aferir o modelo best-effort na distribuição de recursos descrito na Secção 4.3.

A rentabilidade de recursos relativamente ao cenário E.2.1, é melhorada devido ao aumento de recursos como se pode verificar na Fig. E.8. Contudo, não há melhoria para o caso em que o aumento de utilizadores PS atinge 1000%, o que se deve à distribuição equitativa: em caso de não haverem recursos disponíveis para maximizar a capacidade *Mutlislot* do TM, há uma distribuição equitativa que reduz o uso dessa capacidade. Note-se que esta distribuição de PDCHs não influenciará o bloqueio das chamadas CS dado que no caso PDCHs partilhados, a prioridade das chamadas CS permite retirar estes canais às chamadas PS, mantendo N_{TCH} e o respectivo dimensionamento.

Tab. E.12 - Débitos de transmissão das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.2.

Cenário	Número de chamadas PS		R_b [kb/s]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	1	0,81	7,99	6,12
Aumento de 100% de utilizadores PS	3,3	1,57	10,55	1,90
Aumento de 200% de utilizadores PS	3,2	2,39	13,12	4,00
Aumento de 500% de utilizadores PS	6,8	3,60	9,65	2,30
Aumento de 1000% de utilizadores PS	10,5	3,17	11,69	2,99

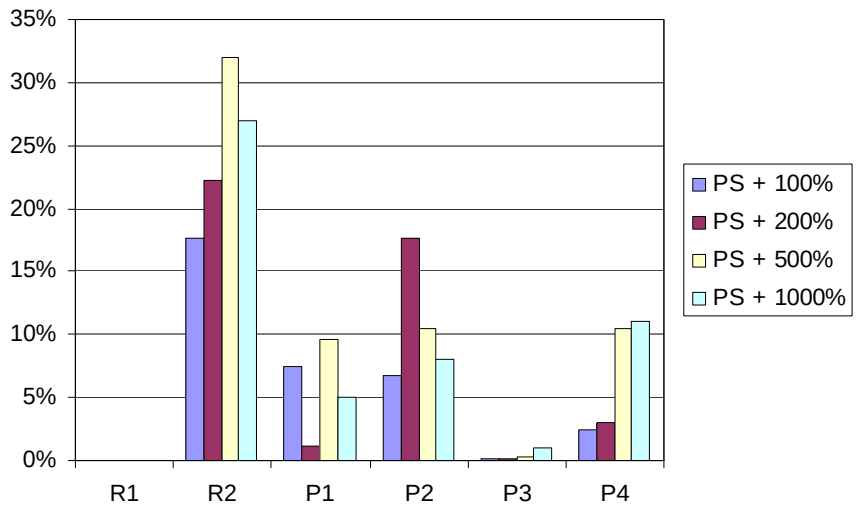


Fig. E.7 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário E.2.2.

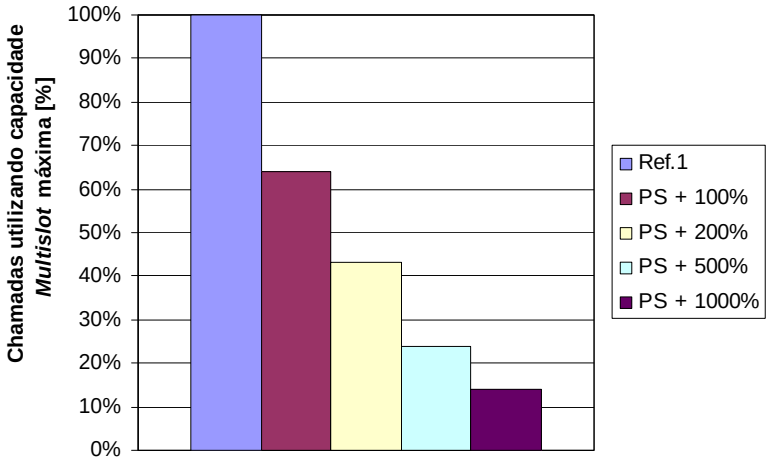
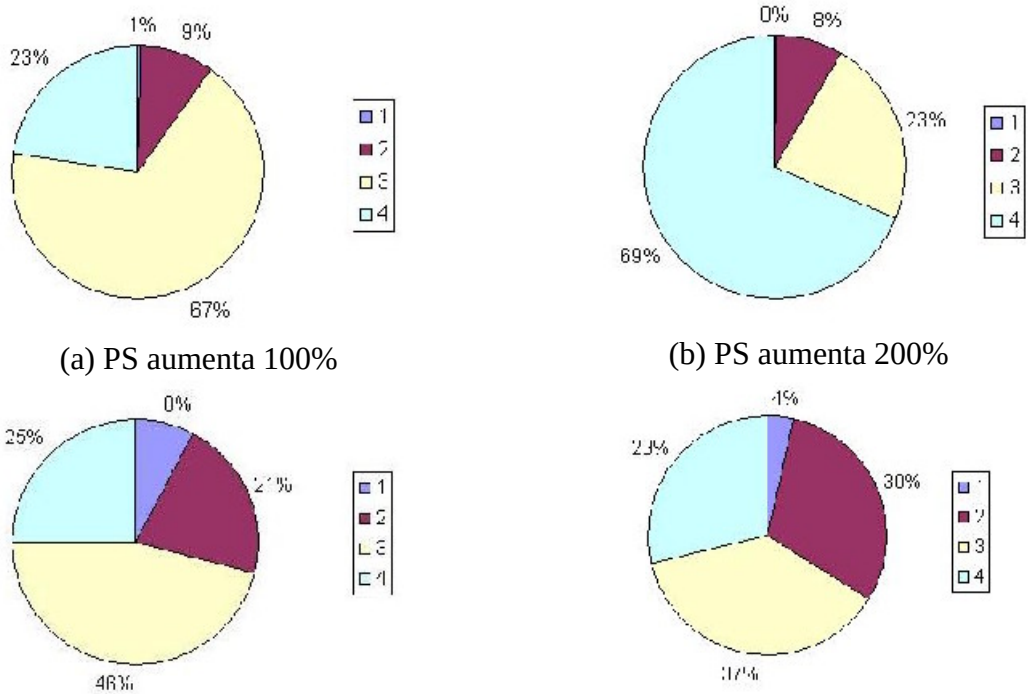


Fig. E.8 - Percentagem média de chamadas usando capacidade *Multislot* máxima no cenário E.2.2.



(a) PS aumenta 100%

(b) PS aumenta 200%

(c) PS aumenta 500%

(d) PS aumenta 1000%

Fig. E.9 - Percentagem média de utilização simultânea de TSs no tempo do cenário E.2.2.

E.2.3 Aumento de utilizadores de PS com 5 PDCHs partilhados e 3 PDCHs reservados para PS

De novo, repetiram-se as simulações de E.2.1, alterando a distribuição de PDCHs para 5 partilhados e 3 reservados para PS. Tal como na Secção anterior apresentam-se os atrasos na Tab. E.13 e o débito de transmissão na Tab. E.14.

Relativamente aos cenários anteriores (E.2.1 e E.2.2), este aumento de recursos acentua a redução de atraso justificada na Secção E.2.2. Note-se que o atraso é anulado para todos os aumentos de utilizadores PS, excepto no caso de 1000%, que ascende a valores reduzidos (para os utilizadores, estes serão pouco perceptíveis).

No caso de R_b (Tab. E.14), os valores mantêm-se na mesma ordem grandeza, seguindo um comportamento idêntico aos cenários de anteriores. A justificação para este comportamento encontra-se descrita em E.2.1. A percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais na Fig. E.10, denota a tendência *best-effort* com que o GPRS foi implementado, dado que o aumento de canais conduz a um aumento do uso destes, procurando sempre maximizar a capacidade de transmissão por chamadas. O uso de todos os canais PS (P5), sugere que as chamadas PS utilizam todos os recursos evitando a partilha. As chamadas PS ao evitar a partilha, maximizam a sua capacidade *Multislot* como se pode ver pela Fig. E.11. Verifica-se que houve um aumento significativo face aos cenários anteriores na rentabilidade da capacidade *Multislot* na transmissão das chamadas PS, apesar dos aumentos das chamadas PS. Este resultado reforça a diminuição da partilha de recursos entre as chamadas PS.

Na Fig. E.12, apresenta-se a percentagem média de utilização simultânea de TSs no tempo deste cenário. Constata-se que o uso de 1 TS por chamada decresceu bastante comparado com o cenário Ref. 1, sinónimo de maior rentabilidade de recursos PS. O comportamento relativo ao aumento predominante de 3 e 4 TSs por chamada PS verificado no cenário E.2.2, é mais acentuado neste cenário.

Tab. E.13 - Atraso das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.3.

Cenário	Número de chamadas atrasadas		d_t [s]		d_u [s]		P_d [%]
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
Referência 1	0	0	0	0	0	0	0
Aumento de 100% de utilizadores PS	0	0	0	0	0	0	0
Aumento de 200% de utilizadores PS	0	0	0	0	0	0	0
Aumento de 500% de utilizadores PS	0	0	0	0	0	0	0
Aumento de 1000% de utilizadores PS	0,3	0,94	0,14	0,44	0,29	0,94	0,4

Tab. E.14 - Débitos de transmissão das chamadas PS (DL) obtidos para o cenário E.2.3.

Cenário	Número de chamadas PS		R_b [kb/s]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Referência 1	1	0,81	7,99	6,12
Aumento de 100% de utilizadores PS	3,1	1,73	12,25	3,21
Aumento de 200% de utilizadores PS	5,2	1,93	11,97	4,40
Aumento de 500% de utilizadores PS	5,7	2,58	9,65	2,30
Aumento de 1000% de utilizadores PS	10,5	3,17	10,46	3,21

A justificação deste comportamento mantém-se: o aumento de recursos PS oferece maior flexibilidade na atribuição de PDCHs, que se reflecte no aumento PDCHs por chamada PS.

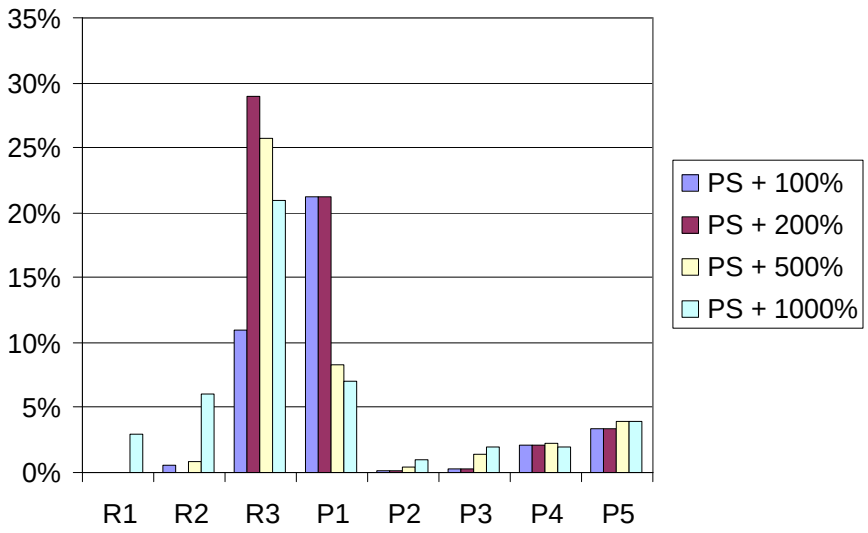


Fig. E.10 - Percentagem média de utilização simultânea no tempo de canais (DL) para o cenário E.2.3.

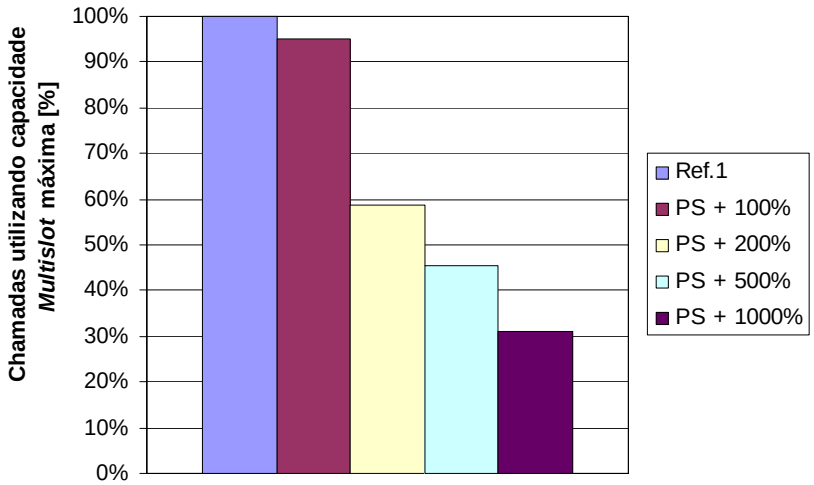
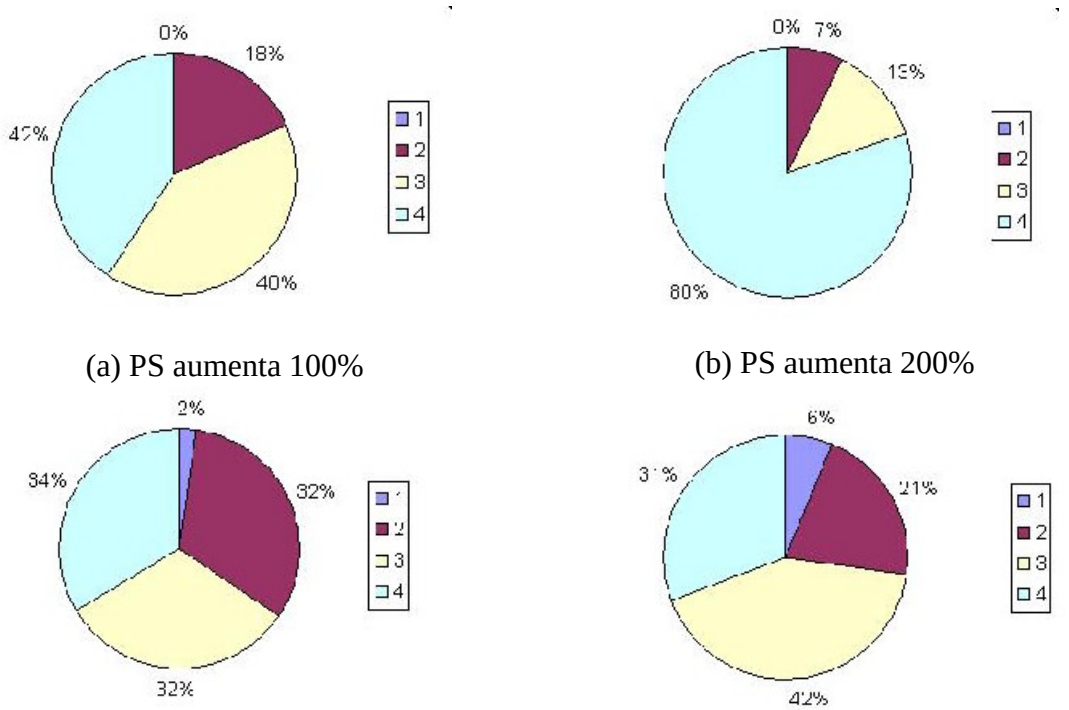


Fig. E.11 - Percentagem média de chamadas usando capacidade *Multislot* máxima no cenário E.2.3.

Por fim, é de salientar que esta alteração na distribuição de PDCHs não influenciará severamente o desempenho das chamadas PS (como se verifica pelo atraso na Tab. E.13 e débito de transmissão na Tab. E.14) e das chamadas CS, pois da Fig. E.1 e Fig. E.2, verifica-se que o uso de 12 canais em simultâneo (P2) é bastante reduzido e daí que, retirar um canal para tráfego PS não alterará o bloqueio para o qual o sistema foi dimensionado. Note-se que o aumento de PDCHs partilhado não afecta as chamadas CS dado que estas têm prioridade sobre as chamadas PS.



(a) PS aumenta 100%

(b) PS aumenta 200%

(c) PS aumenta 500%

(d) PS aumenta 1000%

Fig. E.12 - Percentagem média de utilização simultânea de TSs no tempo do cenário E.2.3.

E.3 Impacto de *Delayed* DL TBF

Os pontos obtidos na Tab. 5.11 na Secção 5.4, foram interpolados como se pode ver nas Fig. E.13 e Fig. E.14. As expressões resultantes da interpolação encontram-se na Tab. E.15.

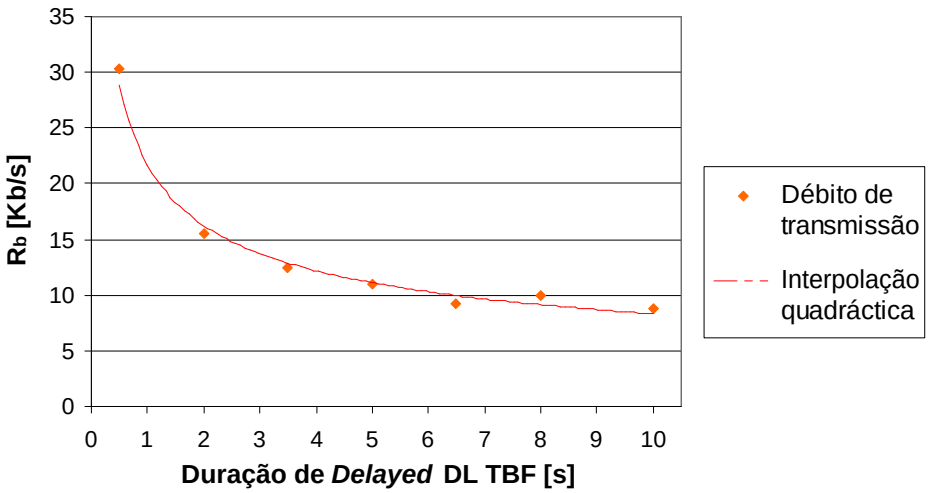


Fig. E.13 - Débito (R_b) médio por chamada PS para *Delayed* DL TBF de [0,5 ; 10]s.

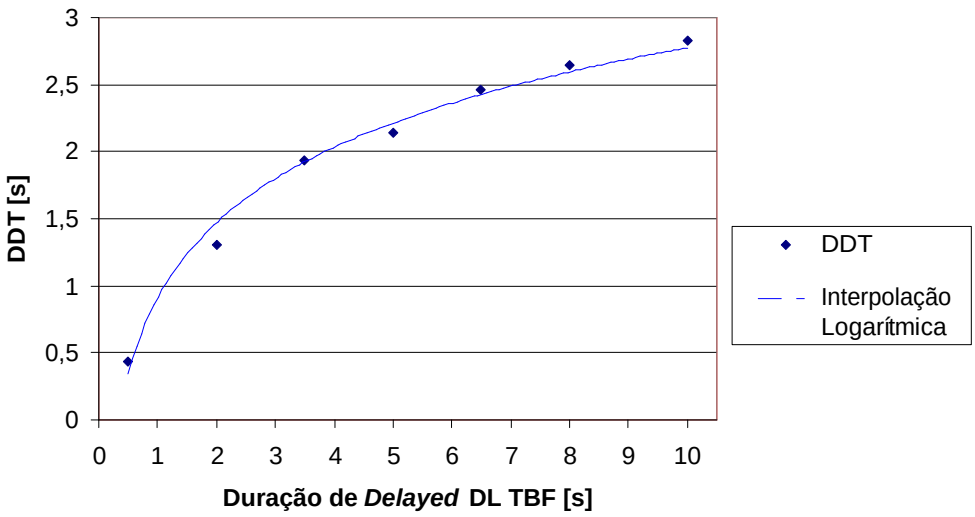


Fig. E.14 - Tempo médio de *Delayed* DL TBF activo de [0,5 ; 10]s.

Tab. E.15 - Interpolações, erro quadrático e domínio de validade obtidos para R_b e $\overline{\text{DDT}}$.

Parâmetro	Equação	R^2	Domínio [s]
R_b	$21{,}68 \cdot t^{-0{,}4158}$	0,9806	[0,5 ; 10]
$\overline{\text{DDT}}$	$0{,}811 \cdot \text{Ln}(t) + 0{,}9092$	0,9887	[0,5 ; 10]

E.4 Impacto do FH sobre os CS-*n*

As simulações descritas na Secção 5.5 foram divididas em ambiente Urbano e Axial para ambos os cenários de referência, variando o intervalo de geração de *C/I* para os seguintes valores:

- [0 , 30] dB (Secção E.4.1).
- [0 , 20] dB (Secção E.4.2).
- [0 , 50] dB (Secção E.4.3).

Os valores obtidos para a percentagem de utilização CS-*n* no tempo são praticamente iguais para a percentagem de utilização CS-*n* em número de TSs utilizadas na transmissão, pelo que se apresenta somente o primeiro.

E.4.1 *C/I* entre [0 , 30] dB

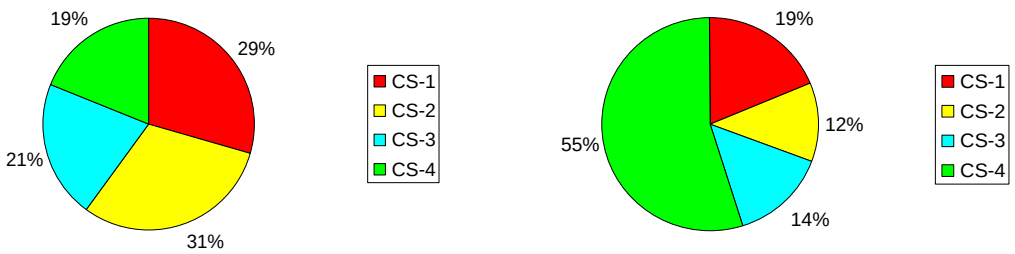
Na Fig. E.15 a Fig. E.18, Tab. E.16 e Tab. E.17, apresentam-se os valores obtidos para o débito de transmissão e a percentagem de utilização no tempo de CS-*n* do cenário Ref. 1 e 2.

Tab. E.16 - R_b para TU3 e TU50 (DL) com CS-*n* variável.

Cenário	R_b [kb/s]			
	TU3		TU50	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Ref. 1 (sem FH)	11,14	6,03	10,47	3,41
Ref. 2 (com FH)	11,02	6,85	10,99	5,43

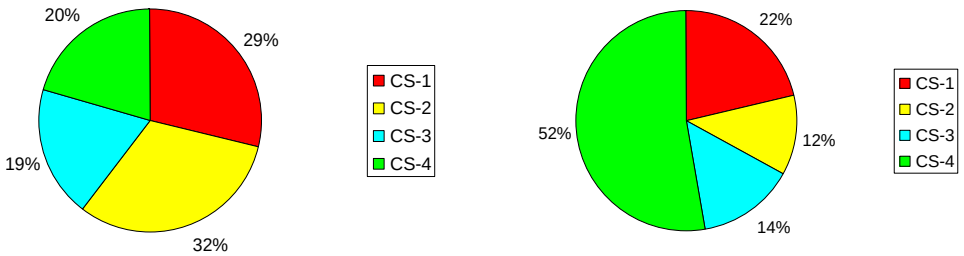
Tab. E.17 - R_b para TU3 e TU50 (UL) com CS-*n* variável.

Cenário	R_b [kb/s]			
	TU3		TU50	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Ref. 1 (sem FH)	28,77	25,46	22,67	13,53
Ref. 2 (com FH)	25,42	21,19	18,86	12,36



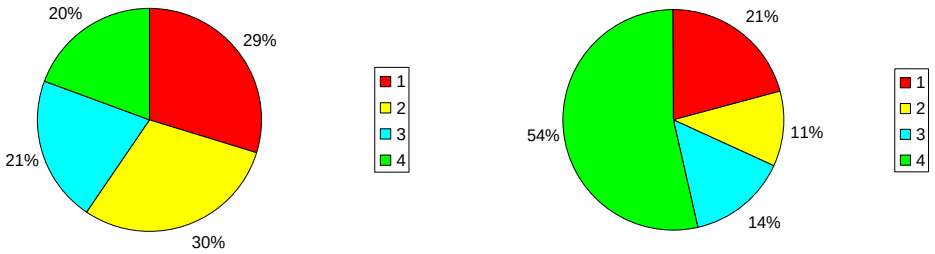
(a) DL (b) UL

Fig. E.15 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU3 sem FH).



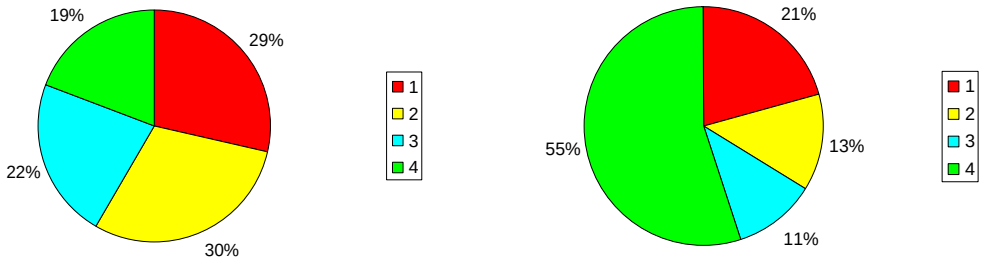
(a) DL (b) UL

Fig. E.16 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU3 com FH).



(a) DL (b) UL

Fig. E.17 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU50 sem FH).



(a) DL (b) UL

Fig. E.18 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU50 com FH).

Todas as figuras e tabelas, mostram o que o uso de FH não alteram significativamente R_b nem percentagem média de utilização de CS-*n* no tempo, quer em UL, quer em DL. Contudo entre o DL e UL, as diferenças são bastante perceptíveis:

- Percentagem média de utilização de CS-*n* no tempo: a diferença subjacente entre os critérios de decisão revelam que o uso de CS-3 e CS-4 em DL é bastante mais reduzido face ao UL, o que significa que o critério de decisão de CS-*n* em DL prima pela robustez (predominância no uso de CS-1 e CS-2), enquanto em UL, critério de decisão de CS-*n* apresenta mais sensibilidade ao canal rádio. Relativamente ao TU3 e TU50, verifica-se que o critério de decisão se mantém apesar da alteração da velocidade do TM, mantendo o mesmo comportamento verificado para o DL e UL.
- Débito de transmissão (R_b): não se nota alteração considerável quando se introduz FH (para TU3 e TU50), o que confirma a conclusão anterior: o critério de decisão não apresenta alterações significativas. As diferenças verificadas entre o DL e UL também vão ao encontro do observado no parâmetro: o DL apresenta débitos mais reduzidos (consequência do uso mais frequente de CS-1 e CS-2, que conferem maior robustez) face ao UL, onde os débitos médios são mais elevados mas mais instáveis, como se pode verificar pelo aumento considerável do desvio padrão.

E.4.2 *C/I* entre [0 , 20] dB

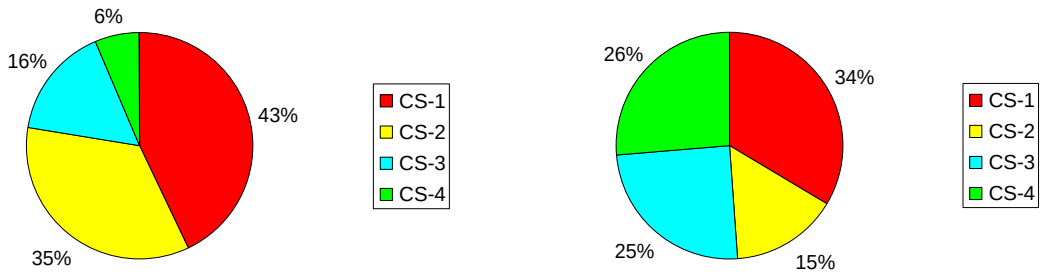
Mantendo as condições do cenário anterior, diminuindo apenas o máximo do intervalo de para 20 dB, repetiram-se as mesmas simulações. Na Fig. E.19 a Fig. E.22, Tab. E.18 e Tab. E.19, apresentam-se os valores obtidos para o débito de transmissão e a percentagem de utilização no tempo de CS-*n* do cenário Ref. 1 e 2.

Tab. E.18 - R_b para TU3 e TU50 (DL) com CS-*n* variável.

Cenário	R_b [kb/s]			
	TU3		TU50	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Ref. 1 (sem FH)	10,50	4,29	11,40	5,83
Ref. 2 (com FH)	9,30	4,27	10,44	4,26

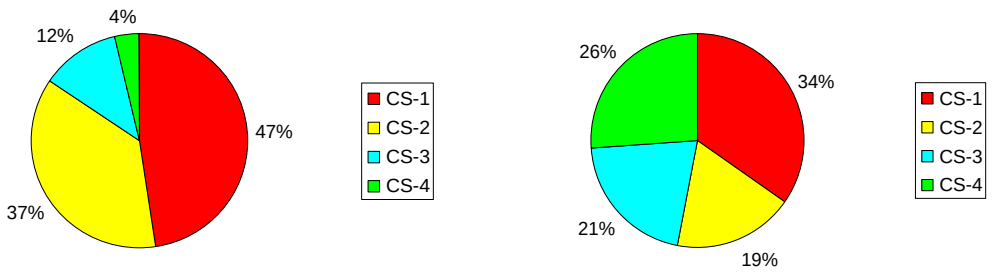
Tab. E.19 - R_b para TU3 e TU50 (UL) com CS-*n* variável.

Cenário	R_b [kb/s]			
	TU3		TU50	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Ref. 1 (sem FH)	23,74	14,79	18,77	13,98
Ref. 2 (com FH)	22,13	16,36	20,35	13,82



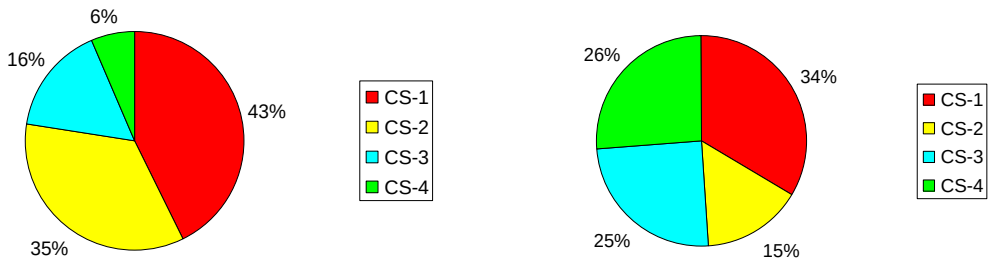
(a) DL (b) UL

Fig. E.19 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU3 sem FH).



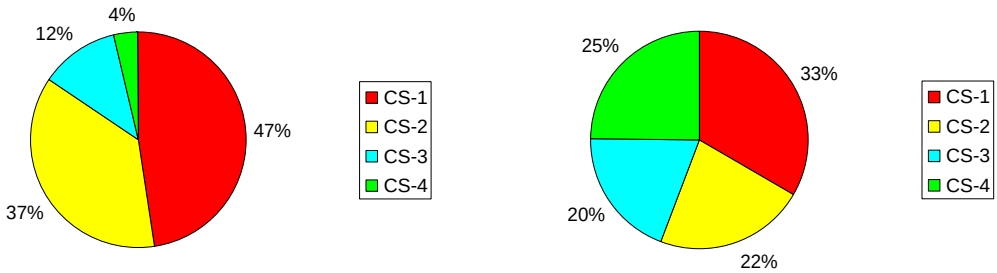
(a) DL (b) UL

Fig. E.20 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU3 com FH).



(a) DL (b) UL

Fig. E.21 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU50 sem FH).



(a) DL (b) UL

Fig. E.22 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU50 com FH).

O impacto do FH, da velocidade (TU3 para TU50) e do critério para UL e DL mencionado em E.4.1, mantém-se i.e., praticamente desprezável. O débito de transmissão e a percentagem média de utilização mantêm a concordância observada anteriormente. Contudo as diferenças principais na:

- Percentagem média de utilização de CS-*n* no tempo: há uma redução acentuada de CS-3 e CS-4 em detrimento de CS-1 e CS-2, como seria de prever, pois a qualidade do canal rádio (expresso por *C/I*) sofreu uma degradação notável (*C/I* varia num intervalo cujo máximo diminuiu 10 dB face ao caso anterior) e consequentemente, a transmissão baixa o débito e o CS-*n* para conferir maior protecção dos dados aos erros de transmissão. Sublinha-se que a utilização de CS-4 decresce abruptamente face a CS-3, tal como a utilização de CS-1 aumenta bastante, o que demonstra que a variação para cada CS-*n* é distinta.
- Débito de transmissão (R_b): Os valores obtidos em DL, não apresentam variações consideráveis. No caso do UL, observou-se uma redução perceptível para todos os valores da Tab. E.19. Este comportamento aponta novamente para o facto da predominância de chamadas de acesso à *Internet* no DL, influenciar severamente R_b, de modo a que este não seja sensível às variações de CS-*n*, enquanto no UL, os serviços do tipo *on-off* são mais sensíveis às variações de CS-*n*. Tal como foi observado na Secção 5.3 relativamente aos recursos empregues (N_{TS}), as chamadas do tipo *bursty* (predominantes no DL) não

seguem a definição em (4.1) na Secção 4.1, ao contrário das chamadas do tipo *on-off* (como é o caso do UL), onde o impacto de CS-*n* é expresso por R_{bCS-n}.

E.4.3 *C/I* entre [0 , 50] dB

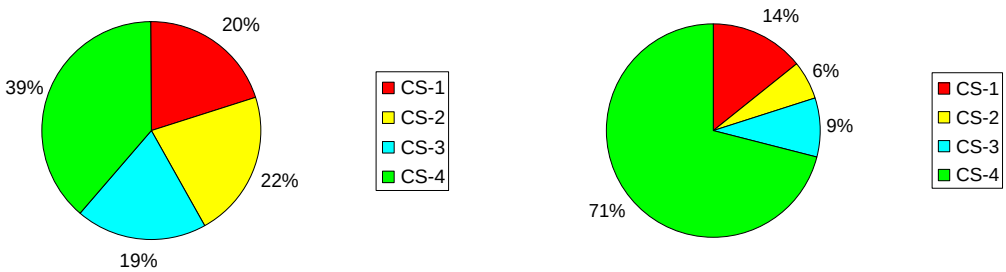
À semelhança dos cenários, alterou-se apenas o máximo do intervalo para 50 dB e repetiram-se as mesmas simulações. Na Fig. E.23 a Fig. E.26, Tab. E.20 e Tab. E.21, apresentam-se os valores obtidos para o débito de transmissão e a percentagem de utilização no tempo de CS-*n* do cenário Ref. 1 e 2.

Tab. E.20 - R_b para TU3 e TU50 (DL) com CS-*n* variável.

Cenário	R_b [kb/s]			
	TU3		TU50	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Ref. 1 (sem FH)	10,79	4,16	10,26	4,08
Ref. 2 (com FH)	11,94	6,06	9,23	4,42

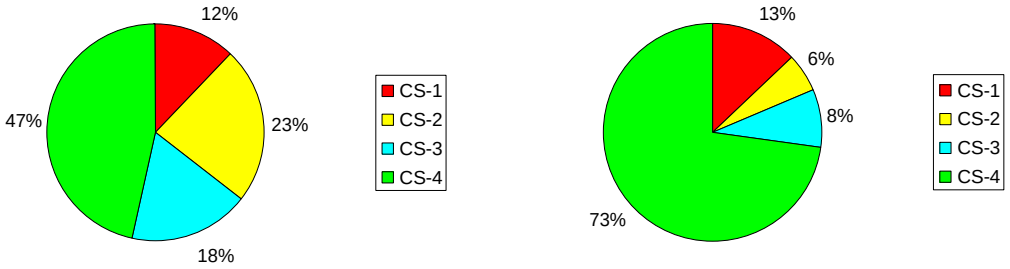
Tab. E.21 - R_b para TU3 e TU50 (UL) com CS-*n* variável.

Cenário	R_b [kb/s]			
	TU3		TU50	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Ref. 1 (sem FH)	33,95	22,86	28,62	20,01
Ref. 2 (com FH)	32,25	21,00	32,57	22,51



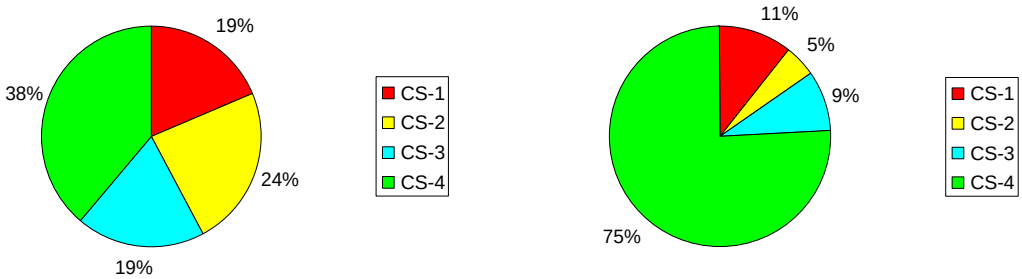
(a) DL (b) UL

Fig. E.23 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU3 sem FH).



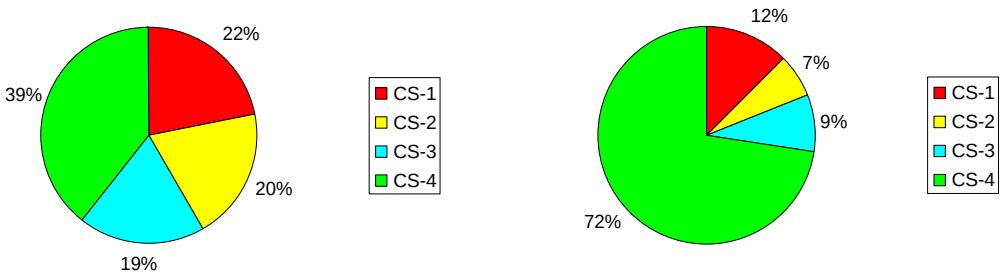
(a) DL (b) UL

Fig. E.24 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU3 com FH).



(a) DL (b) UL

Fig. E.25 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.1 (TU50 sem FH).



(a) DL (b) UL

Fig. E.26 - Percentagem média de utilização de CS-*n* variável no tempo para o cenário Ref.2 (TU50 com FH).

A variação do máximo do intervalo de *C/I* para 50 dB, corresponde a uma melhoria na qualidade do canal rádio, o que se traduz por um aumento do uso de CS-4. O comportamento entre cenários com/sem FH e TU3/TU50, manteve o comportamento explicado anteriormente (Secção E.4.1). Relativamente às diferenças nos cenários anteriores, verifica-se que:

- Percentagem média de utilização de CS-*n* no tempo: o CS-4 apresenta a maior percentagem de utilização de todos os CS-*n*. Uma vez que *C/I* a partir de 16 dB para o UL (Tab. B.1) e 25 dB para o DL (Fig. B.5 a Fig. B.8) o CS-4 é eleito, a percentagem de

utilização de CS-4 expressa claramente as diferença entre os limiares de UL e DL: UL perto de 75% do tempo, enquanto o DL perto de 40%. Contudo, se em 50% do tempo *C/I* encontra-se acima de 25 dB (dada a distribuição uniforme), seria de prever uma utilização no DL idêntica à proporção (i.e., próxima de 50%) como se verificou (de modo aproximado) no UL; esta situação é justificada pela variação não linear de CS-*n* com *C/I*: quando *C/I* baixa bruscamente, o CS-*n* baixa de modo idêntico (atingindo rapidamente CS-1, para *C/I* reduzidos), contudo quando *C/I* aumenta subitamente, o CS-*n* aumenta mais lentamente, atingindo CS-4 somente se os valores elevados para *C/I* persistirem (Tab. B.10). Comparando o UL (Tab. B.1) com DL (Tab. B.10), verifica-se que no UL é possível passar de um CS-*n* para qualquer outro, enquanto no DL, a mudança de CS-*n* só é possível para outro CS-*n* adjacente (e.g., CS-1 para CS-2, CS-2 para CS-1 e CS-3, etc.).

- Débito de transmissão (R_b): Em DL, não houve alterações significativas, o que reforça a conclusão mencionada anteriormente (a predominância de chamadas de acesso à *Internet*, levam a que R_b apresente insensibilidade às variações de CS-*n*). Por este motivo, a variação de CS-*n* em DL é menos brusca que em UL (daí o desvio padrão de R_b em UL ser consideravelmente maior que em DL), pois o comportamento de R_b em UL é descritível por (4.1), contrariamente ao DL.

Referências

[3GPP00] 3GPP, *UTRAN Overall Descripition*, Report 3G TS 25.401 V3.3.0, 2000, (http://www.3gpp.org)

[3GPP03a] 3GPP, *Technical Specification Group Services and System Aspects, General Packet Radio Service (GPRS)*, Report TS 22.060 V6.0.0, 2003, (http://www.3gpp.org)

[3GPP03b] 3GPP, *Multiplexing and multiple access on the radio path*, Report TS 05.02 version 8.8.0 1999, (http://www.3gpp.org)

[AgCo03] Correia,L.M. e Aguiar,J., *Traffic Source Models - Implementations Outputs*, IST-FLOWS Project, Internal Report WP6_IST_TUL_TN_INT_049_01, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Portugal, Mar. 2003

[AGPR02] Aalto,O., Gurtov,A., Passoja,M. and Raitola,M., Multi-Layer Protocol Tracing in a GPRS Network , in *Proc. of VTC 2002 Spring- 55th IEEE Vehicular Technology Conference*, Birmingham, Alabama, USA, May 2002

[Agui02] Aguiar,J., *Traffic Source Models*, IST-FLOWS Project, Internal Report WP6_IST_TUL_TN_INT_14_01, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Portugal, July 2002

[Agui03] Aguiar,J., *Traffic Analysis at the Radio Interface in Converging Mobile and Wireless Communication Systems*, Master Thesis, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Portugal, 2003

[CaFe01] Casadevall,F. and Ferrús,R., "Using Time Advance Information to choose Coding Scheme in GPRS", in *Proc. of VTC 2001 Spring- 54th IEEE Vehicular Technology Conference*, Atlantic City, NJ, USA, June 2001

[Carg03] Cargal,J.M., *Discrete Mathematics for Neophytes: Number Theory, Probability, Algorithms, and Other Stuff*, 2003, (http://www.cargalmathbooks.com/lectures.htm)

[Corr03] Correia,L.M., *Sistemas de Comunicações Móveis e Pessoais*, IST, Lisboa, 2003 (https://fenix2.ist.utl.pt/publico/viewSiteExecutionCourse.do?method=firstPage&executionPeriodOID=80&curYear=4&index=13&page=1&objectCode=36738)

[ETSI98] ETSI, *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS* (UMTS 30.03 version 3.2.0), TR 101 112 v3.2.0, France, Apr. 1998.

[ETSI01] ETSI, *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Overall description of the GPRS radio interface; Stage 2* (3GPP 03.64 version 8.9.0 Release 1999), ETSI TS 101 350 V8.9.0 (2001-11), France, Nov. 2001 (http://www.etsi.org)

[GoPi03] Gonçalves,L. e Pires,L., *Planeamento em Redes Móveis de 3ª Geração - UMTS*, Trabalho Final de Licenciatura, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal, 2003

[Jans03] Jansen, M., *ASSA: algorithms for stochastic sensitivity analysis*, Wageningen University & Research Centre, The Netherlands, 2003 (http://www.stat.lanl.gov/SAMO2004/abstracts/pdf_files/Abs_086%20M_Jansen.pdf)

[LeMa01] Lempiäinien,J. and Manninen,M., *Radio Interface System Planning for GSM/GPRS/UMTS*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2001

[HaRM03] Halonen,T., Romero,J. and Melero,J., *GSM, GPRS and EDGE Performance: evolution towards 3G/UMTS* (2nd ed.), John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2003

[HoTo00] Holma,H. and Toskala,A., *WCDMA for UMTS*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2000

[MoPa92] Mouly,M. and Pautet, *The GSM System for Mobile Communications*, M. Mouly et M. B. Pautet, Palaiseau, France, 1992

[SeFC03] Serrador,A., Ferreira,L. e Correia,L.M., *Models and Simulations for Network Planning and Control of UMTS*, IST-MOMENTUM Project, Contribution to Deliverable D2.2, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Portugal, July 2003

[Stee92] Steele,R., *Mobile Radio Communications*, Pentech Press, London, UK, 1992

[PeNy03] Penttinen,A. and Nyberg,E., *Introduction to Teletraffic Theory (2 cr) Spring 2003*, Helsinki University of Technology- Networking Laboratory, Finland, 2003 (http://www.netlab.hut.fi/opetus/s38145/k03/eindex.shtml/)

[Yaco93] Yacoub,M.D., *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1993