Análise de Modelos de Tráfego para Comunicações Celulares em GSM

Trabalho realizado por:

José Costa **Nº 39376**

Hugo Araújo **Nº 39545**

Lisboa

Outubro de 2000

“ The most exciting phrase to hear in science, the one that heralds new discoveries, is not “EUREKA” but that’s funny!! “

Isaac Asimov

Sob a orientação de

Prof. Luís M. Correia

Secção de Propagação e Radiação
Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores
Instituto Superior Técnico

Agradecimentos

Agradecemos ao Prof. Luís Correia por nos ter escolhido para este projecto permitindo-nos assim trabalhar 1 ano na sua companhia, que mais do que a companhia de um coordenador foi a companhia de um colega. Um colega de projecto que partilhou connosco as duvidas, as perguntas e muitas das respostas encontradas neste trabalho, nunca negando ajudar e pondo-se , a nós e a ele, à disposição.

Obrigado à Telecel e ao *"Mobile Group"* pela ajuda e companhia dispensada regularmente ao longo deste último ano.

Um agradecimento especial à D. Olívia, D. Isabel e ao Sr. Brito por partilharem connosco o seu cantinho no Técnico, fazendo-nos sentir o mais possível em casa.

Ao Pedro, Rui e Miguel pela companhia que foram nos bons e menos bons momentos passados no Figanier.

Ao Manolo, Luca, Krzystof, Juan e à Teresa por nos mostrarem os mundos lá de fora, aqui tão perto.

Ao João Eira, Cristina Mota, Miguel Pinto e Vítor Silva por nos terem ensinado a dar os primeiros passos na direcção certa.

Um abraço muito especial aos nossos amigos do Técnico, e não só, que por motivos de espaço não os podemos mencionar um a um.

Um agradecimento especial às nossas famílias por todo o apoio e ajuda dadas não só neste ultimo ano, mas em todos os anos da nossa vida.

Um agradecimento especial a duas pessoas que ao longo dos últimos anos nos têm dado uma preciosa ajuda para ultrapassarmos, com sucesso, todos os obstáculos que surgiram, e a quem nunca é demais agradecer, Mariana e Patrícia.

Índice

ÍNDICE ..... **II**

LISTA DE FIGURAS ..... **III**

1. INTRODUÇÃO **1**

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

2.1 ARQUITECTURA DO SISTEMA ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

2.2 ESTRUTURA DO GSM ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

3. TRÁFEGO DE VOZ ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

3.1 PROCESSOS DE POISSON ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

3.2 MODELOS DE ERLANG ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

3.3 MODELO DE ENGSET ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

4. TRÁFEGO COM MOBILIDADE ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

4.1 PROBABILIDADE DE HANDOVER E OUTROS PARÂMETROS DE TRÁFEGO . **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

4.2 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

5. TRÁFEGO PARA REDES DE DADOS ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

6. MODELOS DE TRÁFEGO PARA VOZ E DADOS ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

REFERÊNCIAS ..... ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Arquitectura do sistema GSM. 3

Figura 2.2 - Arquitectura do sistema GPRS 4

Figura 2.3 - Estrutura da trama TDMA e de um *time-slot*. 6

Figura 2.4 - Probabilidade de bloqueio para modelo Erlang-B. 9

Figura 2.5 - Probabilidade de atraso para modelo Erlang-C. 10

Figura 2.6 - Probabilidade de bloqueio para vários canais com M=38. 11

Figura 2.7 - Probabilidade de bloqueio para vários utilizadores com N=30. 11

Figura 2.8 - Processos de tráfego numa célula com *N* canais e *g* canais de guarda. 12

Figura 2.9 - Probabilidade de queda de chamada *Pq* em função do número de canais de guarda, *g*. 15

Figura 2.10 - Probabilidade de falha de *handover*, P_{hf}, para vários canais de guarda, *g*. 16

Figura 2.11 - Probabilidade de bloqueio, $P_{b,}$ em função do número de canais de guarda, *g*. 17

Figura 2.12 - Efeito do uso de canais de guarda para *handover* em P_b e P_{hf}. 18

Figura 2.13 - Efeito da velocidade do utilizador e do nº de canais de guarda sobre P_d. 19

Figura 2.14 - Modelo para um servidor com uma fila de espera. 19

Figura 2.15 - Tempo necessário ao servidor para processar um pacote após a sua recepção, τ_{del}. 21

Figura 2.16 - Probabilidade de *Overflow* 22

Figura 2.17 - Atribuição estatística e dinâmica para dados. 23

Figura 2.18 - Representação esquemática do algoritmo HRRA para GPRS. 25

Figura 2.19 - Utilização de canais em função de n_{gprs} 26

Figura 3.1 - Parâmetros de entrada e saída do algoritmo 27

Figura 3.2 - Diagrama de blocos do algoritmo 28

Figura 3.3 - Esquema do bloco de atribuição do algoritmo 28

Figura 3.4 - Gerador da chegada de chamadas com N=410 amostras 30

Figura 3.5 - Gerador da chegada de chamadas com N=2000 amostras 30

Figura 3.6 - Gerador da duração das chamadas de voz com N=410 amostras 31

Figura 3.7 - Gerador da duração das chamadas de voz com N=2000 amostras 32

Figura 3.8 - Probabilidade de bloqueio para 7 canais de tráfego e 1.88 Erl 34
Figura 3.9 - Probabilidade de bloqueio para 30 canais de tráfego e 20 Erlang 35
Figura 3.10 - Probabilidade de bloqueio de chamadas de voz para A=1,88 Erlang 37
Figura 3.11 - Total de atraso em função da *data load*. 39
Figura 3.12 - Total de atraso em função do número de canais dedicados a GPRS. 40
Figura 3.13 - Atraso médio por pacote de dados em função de Cgprs. 40
Figura 3.14 - Atraso médio por pacote de dados em função da data load. 41
Figura 3.15 - função de distribuição de probabilidade do atraso para vários Cgprs. 42
Figura 3.16 - Distribuição de probabilidade do atraso de pacotes em função do *data load*. 43
Figura 3.17 - Curvas das regressões da distribuição de probabilidade do atraso de pacotes 43
Figura 4.1 - Probabilidade de bloqueio para T=25 s. 49
Figura 4.1 - Probabilidade de bloqueio para T=50 s. 49
Figura 4.3 - Comparação entre as Probabilidade de bloqueio para T=25 s e T=50 s. 50
Figura 4.4 - Atraso médio de pacotes no caso T=25 em função da carga de dados 51
Figura 4.5 - Atraso médio de pacotes no caso T=25 em função do #Cgprs 52
Figura 4.6 - Atraso médio de pacotes no caso T=50 em função da carga de dados 53
Figura 4.7 - Atraso médio de pacotes no caso T=50 em função do # Cgprs 53
Figura 4.8 - Comparação do atraso médio de pacotes em função da carga de dados 54
Figura 4.9 - Comparação do atraso médio de pacotes em função do # Cgprs 55
Figura 4.10 - Distribuição de probabilidade para 30% de carga de dados e T=25 s. 55
Figura 4.11 - Distribuição de probabilidade para 4 Cgprs e T=25 s 56
Figura 4.12 - Comparação da distribuição de probabilidade para 30% de carga de dados 57
Figura 4.13 - Comparação da distribuição de probabilidade para 4 Cgprs 57
Figura 4.14 - Curvas das regressões da distribuição de probabilidade do atraso de pacotes. 58
Figura 4.15 - Atraso máximo para T=25 s em função da carga de dados 59
Figura 4.16 - Atraso máximo para T=25 s em função do # Cgprs 60
Figura 4.17 - Comparação do atraso máximo para T=25 s e 50 s em função da carga de dados 60
Figura 4.18 - Comparação do atraso máximo para T=25 s e T=50 s em função do Cgprs. 61

Figura 4.19 - Probabilidade de bloqueio e atraso médio de pacotes para λ = 2,5, 30% carga de dados e 8 Cgprs. 62
Figura 4.20 - Distribuição de probabilidade para 8 Cgprs e 30% de carga de dados, para tráfegos diferentes. 63
Figura 4.21 - Atraso máximo para 8 Cgprs e 30% de carga de dados, para tráfegos diferentes. 63

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Erro médio e desvio padrão do erro para a distribuição de Poisson. 29
Tabela 3.2 - Erro médio e desvio padrão do erro para a distribuição exponencial. 32
Tabela 3.3 - *Data load* para 7 canais de tráfego. 33
Tabela 3.4 - Erro médio e desvio padrão do erro para probabilidade de bloqueio. 35
Tabela 3.5 – Suposições efectuados para o estudo do HRRA em [KeLi99] 36
Tabela 3.6 - Comparação da probabilidade de bloqueio com o resultado do algoritmo HRRA. 44
Tabela 3.7 - Comparação do atraso médio com o resultado do algoritmo HRRA. 45
Tabela 4.1 - Tempos de permanência. 46
Tabela 4.2 - Tráfego de voz na célula consoante a portadora. 46
Tabela 4.3 - Tempos das chamadas. 47
Tabela 4.4 - Número de pacotes a introduzir no sistema. 47
Tabela 4.5 - Número de chamadas de voz geradas consoante o tráfego. 48

Lista de siglas

GSM - *Global System for Mobile Comunications*

HSCSD - *High Speed Circuit Switched Data*

GPRS - *General Packet Radio System*

WWW - *World Wide Web*

FTP - *File Transfer Protocol*

EDGE - *Enhanced Data rates for Global Evolution*

CDMA - *Code Division Multiplex Acess*

TDMA - *Time Division Multiplex Acess*

ETSI - *European Telecommunications Standarization Institute*

MS - *Mobile Station*

BTS - *Base Transceiver Station*

BSC - *Base Station Controller*

MSC - *Mobile Switching Center*

PSTN - *Public Switched Telephone Network*

ISDN - *Integrated Services Digital Network*

CSPDN - *Circuited Switched Public Data Network*

PSPDN - *Packet Switched Public Data Network*

HLR - *Home Location Register*

VLR - *Visitor Location Register*

AUC - *Autthentication Center*

SGSN - *Serving GPRS Support Node*

GGSN - *Gateway GPRS Support Node*

PDU - *Packet Data Unit*

IP - *Internet Protocol*

HRRA - *Hybrid Radio Resource Allocation*

QoS - *Quality of Service*

Cgprs - canais dedicados a dados (GPRS)

Lista de simbolos

k - novas chamadas

t - tempo

λ - ritmo de chegadas

μ - ritmo de partidas

A - tráfego

N - número de canais

Pb - probabilidade de bloqueio

Pdel - Probabilidade de atraso

M- número de utilizadores

Chamadas *handover*, η

Falha de *handover*, P_{hf}

g canais de guarda

$\bar{v}$ - velocidade média

η - taxa de mudança de célula

L - perímetro da célula

S - área da célula

Pq - probabilidade de queda de chamada

P_h - probabilidade de *handover*

τ_{del} - atraso

j - *jitter*

γ - débito do servidor

$P_{overflow}$ - probabilidade de *overflow*

$\bar{\varepsilon}$ - atraso médio

$\overline{Q}$ - número médio de pacotes que se encontram na fila de espera

ρ - probabilidade do servidor estar ocupado

C_s - coeficiente de variação

n- canais físicos

F - número de frequências

T - duração média das chamadas de voz

Cgprs - canais dedicados a dados (GPRS)

1. Introdução

As comunicações sem fios permitem um estilo de vida como nunca foi possível até hoje. As pessoas estão contactáveis em qualquer altura e lugar utilizam essa facilidade tanto para lazer como para trabalho. É neste ultimo aspecto, o trabalho, que o utilizador está a exigir mais ao sistema de comunicações sem fios. Qualquer empresário, homem de negócios, quer hoje em dia ter acesso a uma rede de dados que o possa actualizar onde quer que esteja. Estes factores conduzem a um aumento da procura deste tipo de serviços e a uma maior exigência em termos da qualidade do serviço. Assim o sistema de comunicações móveis *Global System for Mobile Comunications* (GSM) teve a necessidade de expandir os seus serviços de dados introduzindo dois novos serviços, o *High Speed Circuit Switched Data* (HSCSD) e o *General Packet Radio System* (GPRS).

Estes serviços vão completar os serviços de dados já existentes em GSM, como o serviço de mensagens curtas e o serviço de dados por comutação por circuitos. O HSCSD é uma evolução do serviço de dados por comutação por circuitos que permite atribuir e combinar até seis canais de dados o que aumenta o ritmo de transmissão de 9.6 k bit/s até um máximo de 64 k bit/s. O GPRS vai trazer algumas inovações como são basear-se na comutação por pacotes, que é a maneira mais eficiente de transmissão para aplicações que produzem tráfego em rajadas, não precisar de modem para estar ligado à rede de dados e permitir um ritmo de transmissão mais elevado até um máximo de 171.2 k bit/s. Surgem assim novas aplicações como por exemplo aplicações www, ftp, e-mail e aplicações multimédia como videoconferência e scanners de alta definição. Está previsto um melhoramento do GPRS com a introdução de uma nova modelação surgindo assim o *Enhanced Data rates for Global Evolution* (EDGE) que irá permitir até 384 k bit/s de ritmo de transmissão. Todas estas evoluções irão ser ultrapassadas pelo sistema de comunicações móveis de 3ª geração, no que respeita a débitos binários, que, com a introdução da técnica *Code Division Multiplex Acess* CDMA ao invês de *Time Division Multiplex Acess* TDMA, e o aumento da largura de banda permitirá um ritmo de transmissão até 2 M bit/s. Este sistema ainda está numa fase de estudo estando previsto que comece a ser implantado em 2003.

Com este cenário nas comunicações móveis é objectivo deste trabalho modelar tráfego simultâneo de Voz e Dados para o sistema GSM na sua última versão, ETSI GSM *Phase 2+*, tendo particular atenção à evolução GPRS para a transferência de dados sobre GSM. Para

chegarmos a um modelo de tráfego que abranja simultaneamente Voz e Dados, num sistema de comunicações onde a mobilidade assume um papel essencial, é conveniente ter um conhecimento prévio de modelos de tráfego; impõe-se assim uma análise detalhada de modelos de tráfego consensualmente aceites e usados para cada caso particular de comunicação.

No capítulo 2, descreve-se brevemente a arquitectura do sistema GSM, tendo em conta as modificações devidas ao novo serviço, o GPRS, faz-se um breve estudo dos modelos de tráfego mais consensuais tanto para voz (tendo em conta também a mobilidade), como para dados, usando transferência por comutação por pacotes e apresenta-se gráficos para os vários modelos. Por último é explicado o funcionamento de um algoritmo para um sistema de comunicação misto, voz e dados, sendo que este algoritmo, desenvolvido para o sistema GPRS, vai ser a base do simulador a ser implementado. No capítulo 3, apresentam-se os resultados das diversas etapas da construção do algoritmo por nós implementado, fazendo-se no final a aferição, comparação do mesmo com o algoritmo estudado no capítulo anterior. No 4º capítulo apresentam-se resultados da simulação feita para valores reais de tráfego e tempos de permanência na célula fornecidos pela operadora Telecel. Por fim no capítulo 5 apresentam-se algumas conclusões, bem como sugestões de trabalho futuro a poder ser desenvolvido.

2. Princípios Teóricos

2.1 Conceitos fundamentais

2.1.1 Arquitectura do sistema

A arquitectura do sistema GSM está dividida em três funcionalidades: os terminais móveis (MS), as estações base (BTS) e as suas controladoras (BSC) (responsáveis respectivamente pela interface radio com o MS e pela gestão dos recursos rádio e controlo de

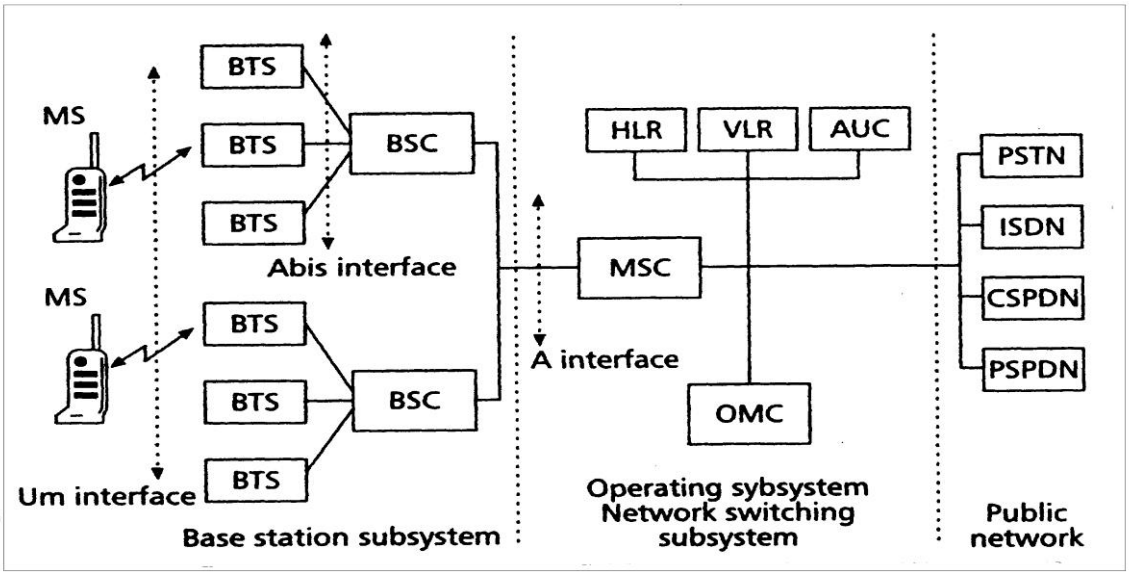


Figura 2.1.- Arquitectura do sistema GSM (extraído de [CaGo97]).

handovers) e o centro de comutação móvel (MSC) [CaGo97]. Apresentamos na figura 2.1 um esquema representativo da arquitectura do sistema GSM indicando as funcionalidades em que esta se divide. Pode-se observar que o MSC comunica com outros tipos de redes como a *public switched telephone network* (PSTN), a *integrated services digital network* (ISDN), a *circuited switched public data network* (CSPDN) e a *packet switched public data network* (PSPDN). Na rede estão também definidas três bases de dados: a *home location register* (HLR), a *visitor location register* (VLR) e o *autthentication center* (AUC) que contêm informação sobre os clientes.

Para a evolução do GSM e seus serviços, em particular o GPRS, torna-se necessário criar novas estruturas de suporte. Apresentamos na figura 2.2 um esquema representativo da arquitectura do GSM para o GPRS.

Teremos portanto duas novas estruturas: o *serving GPRS support node* (SGSN) e o *gateway GPRS support node* (GGSN). Estas duas novas estruturas, em conjunto com a introdução de *software* nos nós já existentes, (nomeadamente o HLR) proporcionam o modo de transferência por pacotes. Assim, o SGSN é responsável por entregar os pacotes aos MSs da sua área de serviço, fazendo-o através de informação contida no HLR; o GGSN é o elo de ligação com a rede de dados externa, construindo as *packet data unit* (PDU) que são constituidas pelos pacotes de informação e pelos cabeçalhos, e são transmitidas segundo o *internet protocol* (IP) através da rede de dados externa até ao GGSN de destino onde se desfaz a PDU. Além disso o GGSN tem ainda funções de encaminhamento dos pacotes para o SGSN que está a servir o MS [CaGo97].

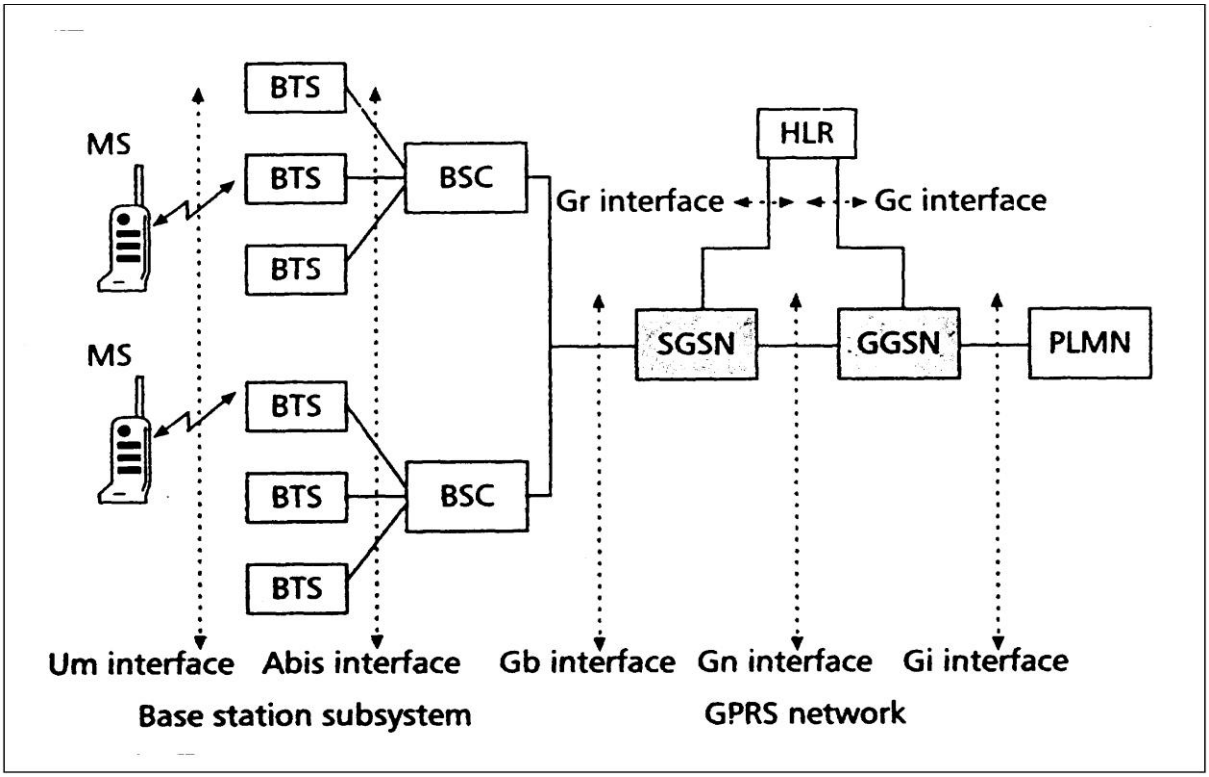


Figura 2.2 - Arquitectura do sistema GPRS (extraído de [CaGo97]).

2.1.2 Estrutura do GSM

O GSM, sendo um sistema de comunicações móveis, tem como grande vantagem o facto de estar implementado com uma estrutura celular, permitindo uma reutilização de frequências que vai implicar o aumento do número de utilizadores sem ser necessário o aumento de espectro. A área de serviço está dividida em repetidos grupos de, normalmente, quatro células de forma hexagonal. Cada célula tem uma estação base que dispõe de um conjunto de frequências, distinto das células que lhe são contíguas. Como o GSM utiliza *time division multiple access* (TDMA), a estrutura da trama está dividida em oito *time-slots*, permitindo assim que em cada célula haja um número de canais físicos igual a oito vezes o número de frequências na célula.

Existem dois grandes tipos de canais em GSM, os canais de tráfego e os de sinalização. Estes ultimos podem ser divididos em canais de *broadcast*, *common control* e *dedicated common control*. Todos esses três tipos de canais de sinalização se subdividem, sendo os canais de *broadcast* utilizados para a estação base transmitir a todos os móveis na sua area de serviço informação sobre sincronização, correcção de frequências e controlo de sinal. Os de common control são usados para transmitir e receber informação específica para cada móvel, como por exemplo sinal de chamada e canais para estabelecimento das mesmas; os de *dedicated common control* usam os canais atribuídos a cada móvel e são usados para transmitir mensagens de sinalização entre o móvel e a estação base quando este não está a realizar chamada e para transmitir mensagens de controlo quando o móvel está com uma chamada. Deste modo, numa célula GSM são usados os dois grandes tipos de canais, sendo que habitualmente, para 3 ou 4 frequências por célula, se utilizam 2 canais para sinalização e controlo, sendo os restantes canais físicos usados para tráfego.

Temos a seguinte estrutura de tramas: uma trama tem oito *time-slots*, sendo cada *time-slot* constituido por dois grupos de 57 bits de informação, 2 bits de stealing flag, 26 bits de training, dois grupos de 3 bits de tail e um período de guarda correspondente a 8,25 bits, como é ilustrado na Figura 2.3.

O serviço GPRS utilizará esta estrutura de tramas do GSM, preenchendo os dois campos de informação não apenas com os dados a transmitir, mas também com informação adicional, isto é, *bits* cabeçalho, de controlo e detecção de erro.

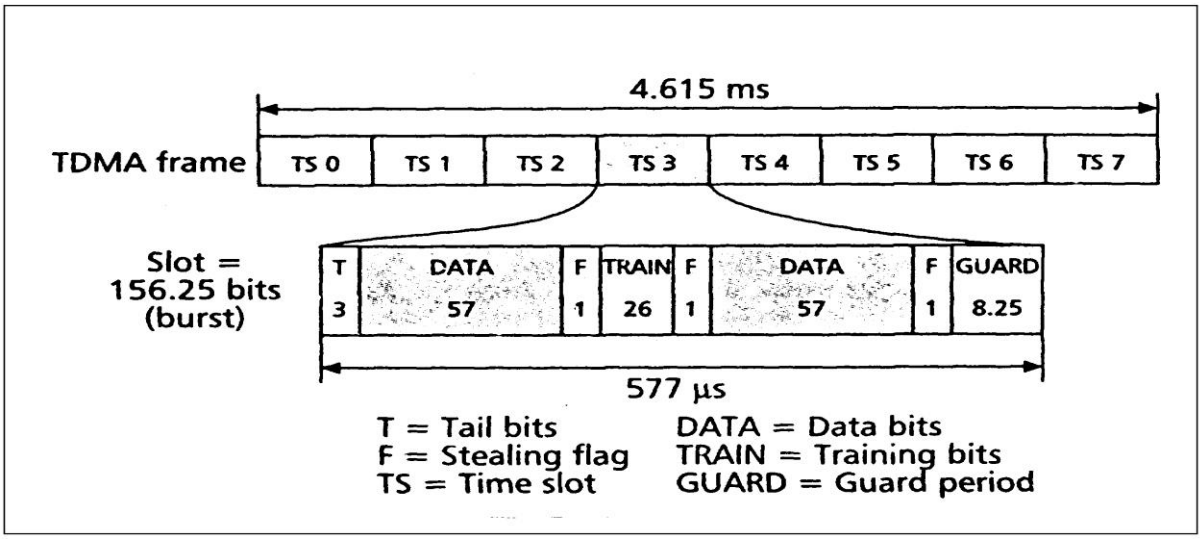


Figura 2.3 - Estrutura da trama TDMA e de um *time-slot* (extraído de [CaGo97]).

2.2 Tráfego de voz

2.2.1 Processos de Poisson

Os modelos de tráfego usam, consensualmente, a distribuição de Poisson para a descrição da chegada de chamadas. A probabilidade de k novas chamadas no intervalo de tempo t vem dada por [FrMe94], em que λ é o ritmo de chegadas.

$$P[k] = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \tag{2.1}$$

A média e a variância são respectivamente:

$$E[k] = \lambda t \tag{2.2}$$

$$E\left[k^2\right] - E^2[k] = \lambda t \tag{2.3}$$

Os processos de Poisson possuem propriedades analíticas com bastante importância para a engenharia de tráfego,. como são a sobreposição de processos de Poisson independentes resultar num novo processo de Poisson, e os processos de Poisson serem processos sem memória, pois o número de eventos em intervalos de tempo disjuntos é estatisticamente independente.

2.2.2 Distribuição exponencial

A distribuição exponencial é usada nos modelos de tráfego para descrever a duração das chamadas. A probabilidade de uma chamada não terminar antes de um certo tempo *t* é dada por,

$$H(t) = 1 - \exp(-\mu t) \qquad (2.4)$$

onde μ é o ritmo de partidas. A densidade de probabilidade vem dada pela fórmula (2.5) que também é conhecida por distribuição exponencial negativa,

$$h(t) = \mu \exp(-\mu t) \qquad (2.5)$$

A média é dada por,

$$E[t] = 1/\mu \qquad (2.6)$$

2.2.3 Modelos de Erlang

Duas grandes classes de sistemas são actualmente usadas: os sistemas com fila de espera e os sistemas sem fila de espera. Sistemas sem fila de espera são sistemas em que o utilizador, caso os recursos do sistema estejam todos ocupados, tem a sua chamada bloqueada, tendo que repetir a tentativa posteriormente. Em sistemas com fila de espera existe a possibilidade de uma chamada, que em dado momento entre no sistema e não existam recursos disponiveis para a realizar, aguarde numa fila de espera, até que sejam libertados recursos suficientes para permitir a sua realização.

O modelo de Erlang é o modelo mais aceite para descrever processos de tráfego. Para a sua utilização, aceitam-se normalmente as suposições de que a chegada de chamadas tem distribuição de Poisson e há um número quase infinito de utilizadores.

2.2.3.1 Erlang B

No caso mais simples, onde não existe fila de espera, o modelo de Erlang dá-nos a probabilidade de bloqueio e é conhecido como modelo de Erlang-B. Tem as seguintes

características: considerando um equilíbrio estatístico temos que o ritmo de chegadas é constante [Yaco93]

$$\lambda_k=\lambda \quad k=0,1,\ldots,N-1 \tag{2.7}$$

e que o ritmo de partidas é dado por:

$$\mu_k=k\mu \quad k=1,2,\ldots,N \tag{2.8}$$

sendo o tráfego A dado em Erlang por:

$$A=\lambda/\mu \text{ [Erl]} \tag{2.9}$$

Sendo a probabilidade de bloqueio para uma população infinita com N canais disponíveis para tráfego e tráfego A:

$$P_b = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{n=0}^{N}\frac{A^n}{n!}} \tag{2.10}$$

Esta fórmula é conhecida pela fórmula de Erlang–B e está representada na Fig. 2.4. Pode-se observar, nessa figura, a variação da probabilidade de bloqueio com o uso de diferentes números de canais, 7, 14, 22 e 30, que correspondem respectivamente ao caso de se usar 1, 2, 3 e 4 frequências numa célula GSM.

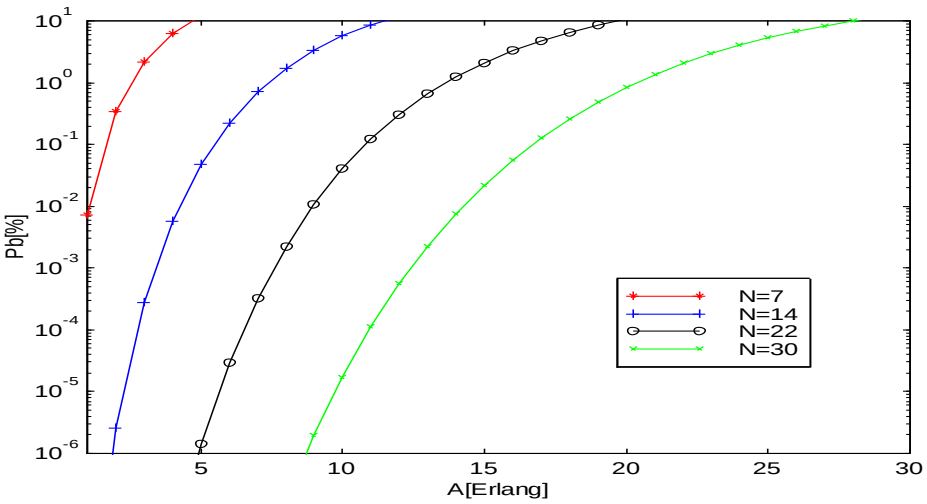


Figura 2.4 – Probabilidade de bloqueio para modelo Erlang-B.

2.2.3.1 Erlang C

Para sistemas com atraso, sistemas em que existe fila de espera, o modelo de Erlang dá-nos a probabilidade de uma chamada ter de esperar pela libertação de recursos para ser realizada. Tal como para a fórmula de Erlang–B, é assumida uma população infinita, servida por N canais, em que a chegada de chamadas tem uma distribuição de Poisson e a fila de espera é infinita. Para o ritmo de chegadas temos,

$$\lambda_k = \lambda \qquad k = 0, 1, \ldots \infty \tag{2.11}$$

e o ritmo de partidas é dado por,

$$\mu_k = \begin{cases} k\mu \rightarrow k = 1,2,,N \\ c\mu \rightarrow k = N+1,\ldots,\infty \end{cases} \tag{2.12}$$

A probabilidade da chamada ter que esperar pela libertação de recursos é dada pela seguinte fórmula também conhecida por fórmula de Erlang-C, [Yaco93]

$$P_{del} = \frac{A^N}{A^N + N! \cdot \left(1 - \frac{A}{N}\right) \sum_{n=0}^{N-1} \frac{A^n}{n!}} \tag{2.13}$$

e que está representada na Fig. 2.5 para os diferentes números de canais, já definidos anteriormente.

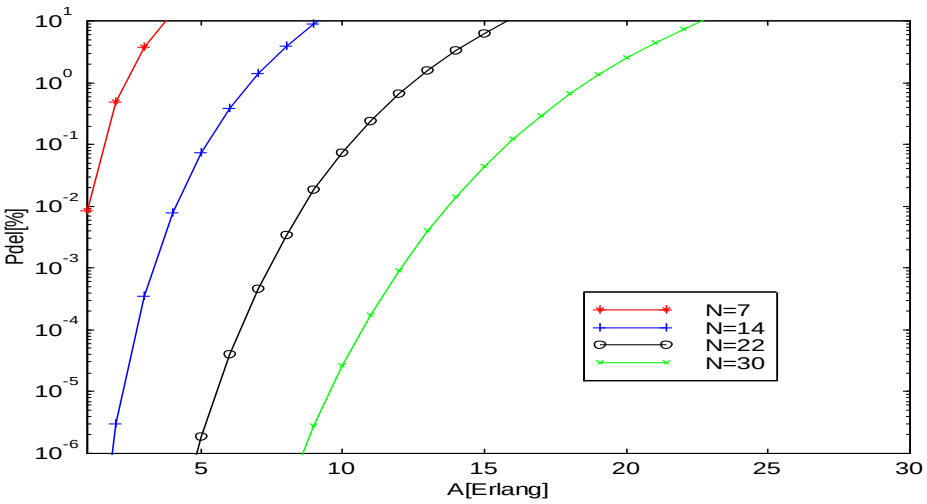


Figura 2.5 - Probabilidade de atraso para modelo Erlang-C.

2.2.4 Modelo de Engset

Assumiu-se para os modelos Erlang-B e Erlang-C que a população é infinita, o que na realidade não acontece, dado que o número de utilizadores do sistema é finito. Considerando então que existe um número específico de utilizadores, teremos uma dependência entre esse número e o ritmo a que chegam novos pedidos ao sistema. Este caso é estudado no modelo de Engset, onde se admite também que a população é maior que o número de canais e a probabilidade de bloqueio é dada por [Yaco93]:

$$P_b = \frac{\binom{M}{N} A^N}{\sum_{i=0}^{N} \binom{M}{i} A^i} \tag{2.14}$$

Em que:

M- número de utilizadores

Na Figura 2.6 está representada a probabilidade de bloqueio para uma população fixa de 38 utilizadores, fazendo variar o número de canais N, de entre o número usual de canais quando se usa 2, 3, 4 e 5 frequências.

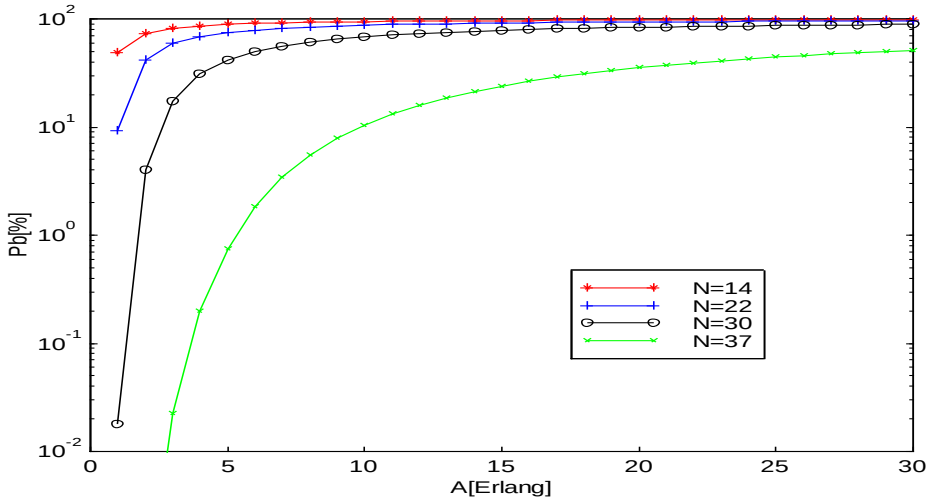


Figura 2.6 - Probabilidade de bloqueio para vários canais com M=38.

Na Figura 2.7, representa-se, para um número fixo de canais (N=30), os efeitos da variação da população na probabilidade de bloqueio. A sua análise permite concluir que, se a população aumentar, a probabilidade de bloqueio também aumenta.

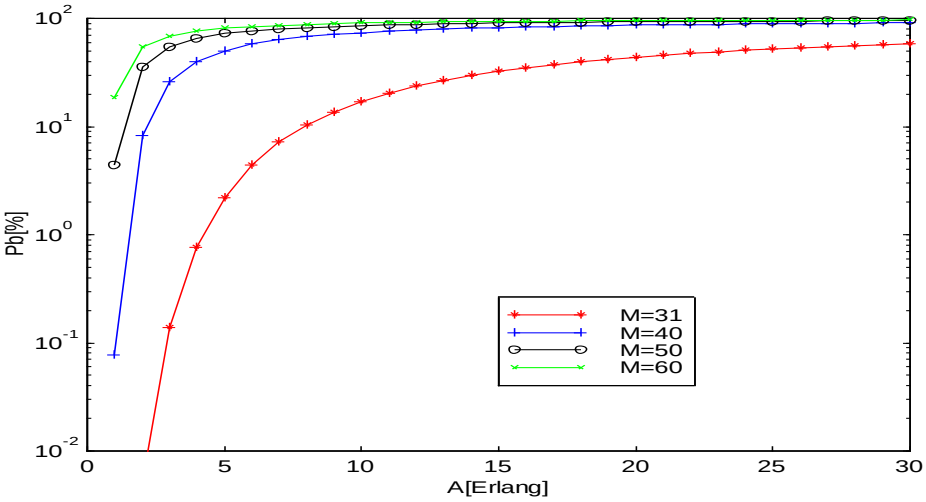


Figura 2.7 - Probabilidade de bloqueio para vários utilizadores com N=30.

2.3 Tráfego com mobilidade

2.3.1 Probabilidade de handover e outros parâmetros de tráfego

Em sistemas em que existe mobilidade, a modelação do tráfego tem que ter em conta certos parâmetros não considerados até aqui. Nesses parâmetros incluem-se o tempo de ocupação de canal e a probabilidade de mudança de célula, *handover*.

A Fig. 2.8 representa de forma simples todos os processos associados ao tráfego numa célula [Jabb96]:

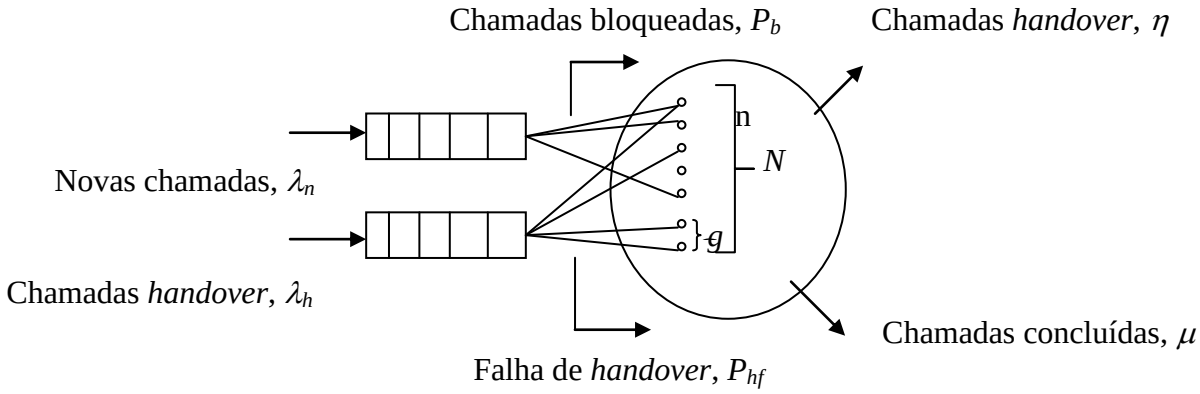


Figura 2.8 – Processos de tráfego (novas chamadas e *handover)* numa célula com N canais e g canais de guarda para *handover* (extraído de [Jabb96]).

O propósito dos modelos de mobilidade e tráfego em comunicações é a captura de um padrão de movimentos e comportamento de chamadas (*calling behavior*) dos assinantes, como forma de prever e/ou avaliar capacidades e desempenhos de redes de telecomunicações sem fios [GSCL98]. Para o estudo do tráfego com influência da mobilidade, temos necessariamente de fazer suposições que permitam de alguma forma simplificar a modelação do sistema. No modelo para mobilidade apresentado em [Jabb96], as seguintes suposições foram feitas:

- distribuição uniforme de terminais móveis e tráfego numa dada célula.
- velocidade média [$\bar{v}$] e distribuição uniforme da direcção de movimento, em [0,2π], dos terminais móveis.
- duas classes de tráfego: chamadas novas e chamadas de *handover*.
- filas de espera inexistentes para ambas as classes.
- N canais por célula.
- g canais de guarda, com $g \in [0,N]$.

Tem-se nestas condições uma taxa de mudança de célula [Jabb96]:

$$\eta = V\frac{L}{\pi S} \tag{2.15}$$

onde L e S são respectivamente o perímetro e a área da célula. O tempo médio de duração das chamadas é dado por:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\mu} \tag{2.16}$$

enquanto o tempo médio de manutenção da chamada com *handover* é:

$$\bar{\tau}_h = \frac{1}{\eta} \tag{2.17}$$

Assim sendo o tempo de ocupação de um canal dentro de uma dada célula é :

$$\bar{\tau}_c = \frac{1}{\mu_c} = \min\left\{\bar{\tau}, \bar{\tau}_c\right\} = \frac{1}{\mu + \eta} \tag{2.18}$$

A probabilidade de *handover* para uma célula é dada pela razão entre o número de chamadas que necessitam mudar de célula e o número total de chamadas em curso dentro da mesma

$$P_h = P\left\{\tau > \tau_h\right\} = \frac{\eta}{\mu + \eta} \tag{2.19}$$

Usando a propriedade de equilíbrio dos fluxos para um sistema num estado estável podemos relacionar o ritmo de chegada de chamadas novas, λ_n, e de *handovers*, λ_h, [Jabb96]:

$$\lambda_h = \frac{P_h(1 - P_b)}{\left[1 - P_h(1 - P_{hf})\right]}\lambda_n \tag{2.20}$$

onde *Pb* é a probabilidade de bloqueio de uma chamada e P_{hf} a probabilidade de bloqueio de uma chamada quando esta tenta um *handover*. Para valores pequenos das probabilidades de *handover*, P_h, e de falha de *handover*, P_{hf},, é válida a aproximação:

$$\lambda_h \cong \frac{\eta}{\mu}\lambda_n \tag{2.21}$$

A partir dos ritmos de chegada podemos facilmente obter o tráfego para cada classe:

$$A_n = \frac{\lambda_n}{\mu + \eta} \quad \text{[Erl]} \tag{2.22}$$

$$A_h = \frac{\lambda_h}{\mu + \eta} \quad \text{[Erl]} \tag{2.23}$$

Usando a propriedade de equilíbrio dos fluxos para um sistema num estado estável podemos relacionar o ritmo de chegada de chamadas novas, λ_n, e de *handovers*, λ_h, [Jabb96]:

$$\lambda_h = \left[\frac{P_h(1-P_b)}{1-P_h(1-P_{hf})}\right]\lambda_n \tag{2.24}$$

2.3.2 Medidas de eficiência

Numa rede de comunicações móveis, o *handover* assume uma importância fundamental no desempenho do sistema, quer para o operador quer para o utilizador. Para este último é importante que no decurso de uma chamada exista uma baixa probabilidade de queda de chamada, *Pq*. A perda da chamada pode resultar de um desvanecimento rápido da potência do sinal ou de uma tentativa de *handover* falhada. Considerando negligenciavel a probabilidade de um desvanecimento rápido, a probabilidade de queda de chamada será proporcional à probabilidade de falha de *handover*, P_{hf}, e ao número de *handovers* que uma chamada necessita, probabilidade de *handover*, P_h. A probabilidade de queda de chamada é dada por [Jabb96]:

$$Pq = P_h P_{hf} \sum_{k=0}^{\infty} P_h^k (1-P_{hf})^k = \left[\frac{P_h P_{hf}}{1-P_h(1-P_{hf})}\right] \tag{2.25}$$

para valores pequenos de P_{hf}, tem-se:

$$P_q \cong \frac{\eta}{\mu} P_{hf} \tag{2.26}$$

O comportamento da probabilidade de queda de chamada em função do tráfego *A*=20Erl e do número de canais de guarda para *handover*, g, pode ser analisado na Fig. 2.9:

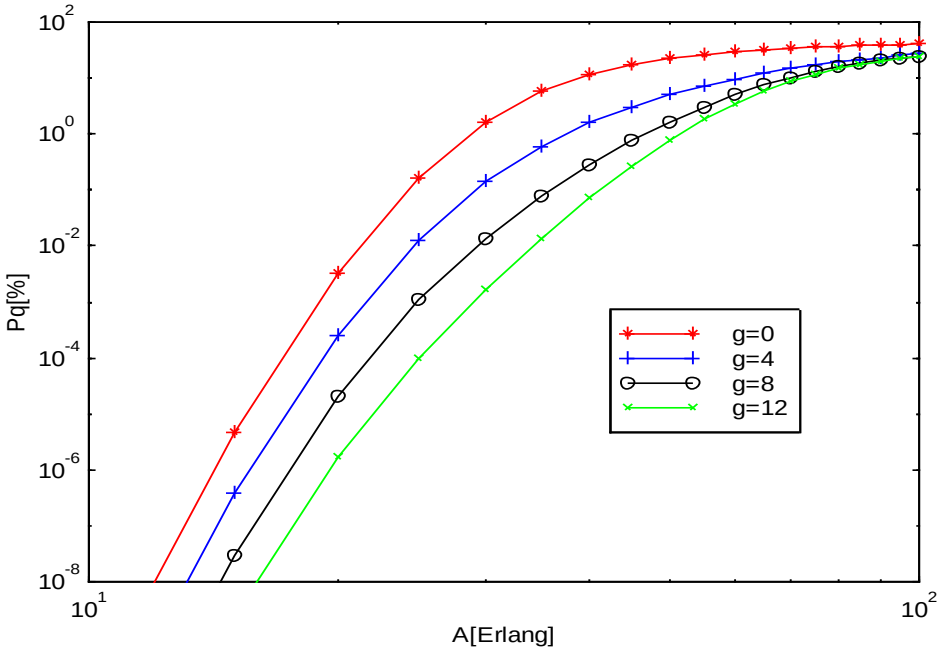


Figura 2.9 – Probabilidade de queda de chamada *Pq* em função do número de canais de guarda, *g*.

A probabilidade de queda de chamada, *Pq*, é a probabilidade de uma chamada não ser completada. As outras probabilidades que serão analisadas, P_b e P_{hf},, são medidas de eficiência mais específicas de processos individuais dentro do sistema.

Fazendo uma análise de fluxos ao sistema apresentado na Fig. 2.8 conclui-se que, numa dada célula os recursos são pretendidos por novas chamadas e por chamadas de *handovers*, competindo assim ao sistema gerir esses recursos da maneira mais eficiente possível. Para tal define-se probabilidade de bloqueio, P_b, e probabilidade de falha de *handover*, P_{hf}, como medidas da eficiência do sistema. As suas expressões para o caso em que não são usadas filas de espera para qualquer das chamadas e existem canais guarda para *handover* são [Jabb96]:

$$P_b = \frac{(A_n + A_h)^c \sum_{k=c}^{c+g} \frac{A_h^{k-c}}{k!}}{\sum_{k=0}^{c-1} \frac{(A_n + A_h)^k}{k!} + (A_n + A_h)^c \sum_{k=c}^{c+g} \frac{A_h^{k-c}}{k!}} \tag{2.27}$$

$$P_{hf} = \frac{(A_n + A_h)^c \frac{A_h^g}{(c+g)!}}{\sum_{k=0}^{c-1} \frac{(A_n + A_h)^k}{k!} + (A_n + A_h)^c \sum_{k=c}^{c+g} \frac{A_h^{k-c}}{k!}} \tag{2.28}$$

Com $N=c+g$ e o tráfego de chamadas novas e da *handover* respectivamente, A_n e A_h.

Para os utilizadores a probabilidade de queda de chamada é aquela que mais interesse tem: para o utilizador é indesejável que, no decurso de uma chamada, esta seja terminada abruptamente. No entanto para o operador da rede a probabilidade de falha de *handover* é a melhor medida da eficácia do sistema. Para diminuir a probabilidade de falha de *handover* os operadores podem introduzir canais de guarda, canais reservados exclusivamente para receberem chamadas já a decorrer provenientes de outras células do sistema, i.e., chamadas de *handover*. A Fig. 2.10. mostra o comportamento da probabilidade de falha de *handover* com um número diferente de canais de guarda para um tráfego de 20Erl e 30 canais de tráfego:

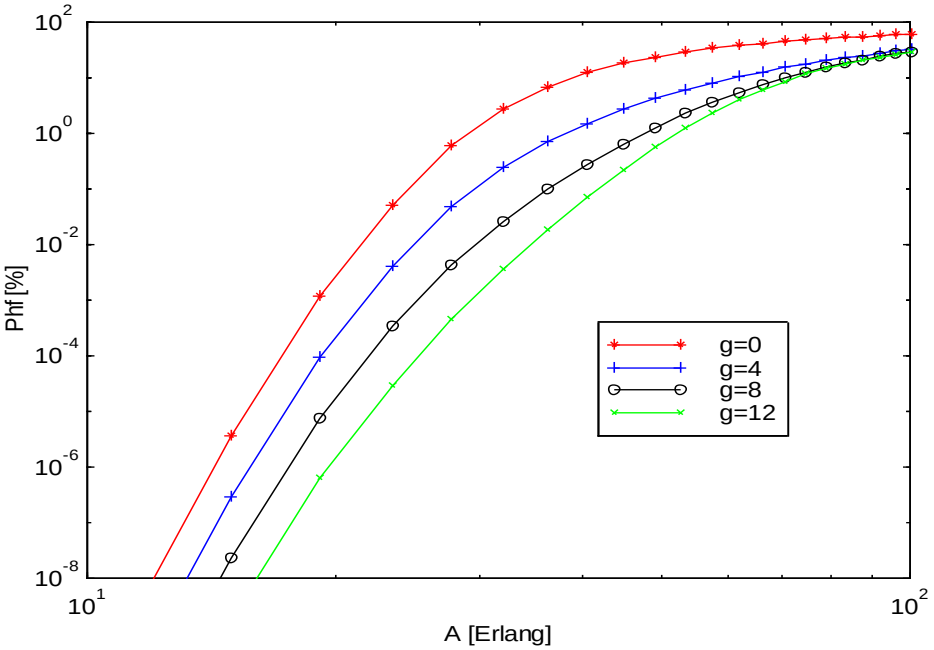


Figura 2.10 - Probabilidade de falha de *handover*, P_{hf}, em função do número de canais de guarda.

Como seria de esperar face às aproximações feitas, $Pq \approx P_{hf}$.

Com a introdução de canais de guarda há a necessidade de definir classes de serviço e as suas prioridades. Os canais de guarda são para uso exclusivo de uma classe enquanto os

restantes canais serão partilhados. As novas chamadas só podem aceder a *N-g* canais quando há canais de guarda para *handovers*, o que leva a um aumento da probabilidade de bloqueio com o aumento de *g*, como aliás se verifica na Fig. 2.11.

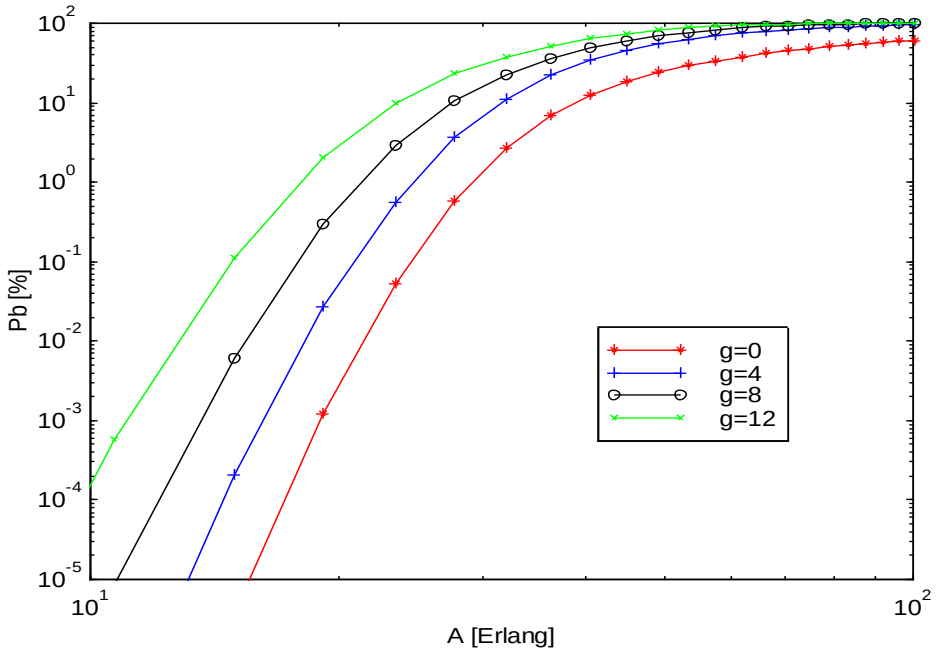


Figura 2.11 – Probabilidade de bloqueio P_b, em função do número de canais de guarda, *g*.

Quando não se considera o uso de canais de guarda para *handover*, *g*=0, não existe distinção entre classes e todas as chamadas são tratadas de igual modo. Nessa situação a probabilidade de bloqueio de chamadas novas e de *handover* é igual, $P_b=P_{hf}$, e o modelo usado transforma-se no modelo de Erlang-B, Fig.2.12.

O aumento do número de canais reservados para a classe de chamadas de *handover* causa uma redução no número de recursos disponíveis a todas classes, *N-g*, provocando um aumento da probabilidade de bloqueio. Com *g* canais exclusivamente dedicados a *handover* esta classe terá menos necessidade de recorrer aos canais comuns e a probabilidade de bloqueio de um *handover* para os N canais diminui, como se pôde ver na Fig. 2.10.

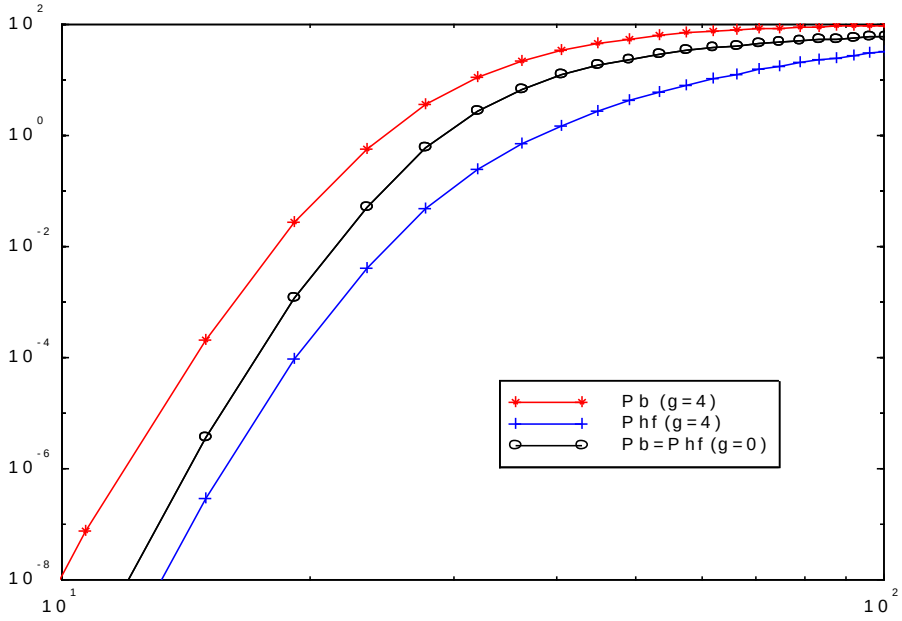


Figura 2.12 – Efeito do uso de canais de guarda para *handover* em P_b e P_{hf}.

Para o operador do sistema a escolha do número de canais de guarda a usar será sempre um compromisso entre a probabilidade de bloqueio de chamadas novas e de *handover*, ou, visto de outra forma, entre a capacidade de tráfego transportado pelo sistema e a qualidade do mesmo. È necessário ter sempre em consideração a mobilidade do utilizador, já que esta pode afectar grandemente a eficiência do sistema. Na Fig. 2.13 apresenta-se o andamento da probabilidade de queda de chamada em função da velocidade média do móvel, V_{av}, e do número de canais de guarda para *handover* no caso em que o tráfego é 20Erl e a célula tem 1Km de raio. No entanto o uso de canais de guarda em situações de grande mobilidade dos utilizadores apenas melhorará o desempenho do sistema nas chamadas de curta duração, como é demonstrado em [VeCo99], porque quanto maior for o tempo de chamada mais *handovers* tem que ser tentados, e maior será probabilidade de queda, mesmo com o uso de canais de guarda.

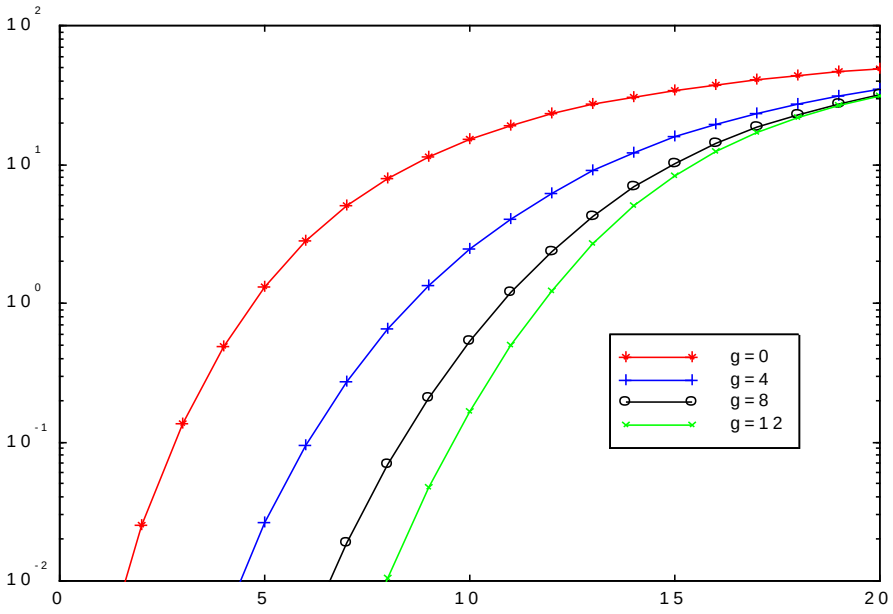


Figura 2.13 – Efeito da velocidade do utilizador e do número de canais de guarda sobre *Pq*.

2.4 Tráfego para redes de dados

Existem dois tipos de comutação comuns em redes de dados: a comutação de circuitos usualmente associada à comunicação de voz e a comutação de pacotes associada à transmissão de dados. Numa rede de pacotes os dados são agregados em blocos de acordo com o protocolo da camada de rede utilizado: pacotes para o IP (*Internet Protocol*) ou células, no caso do ATM (*Assynchronos Transfer Mode*). Esses blocos, a que chamaremos pacotes são as peças fundamentais na modulação de tráfego em redes de dados. Cada rede é composta por várias centrais de comutação num modo de funcionamento *store-and-forward*, introduzindo assim atrasos aleatórios nas filas de espera existentes ao longo da rede.

O estudo de um sistema simples, composto por um servidor com uma única fila de espera, é muito importante para a compreensão de modelos de tráfego para dados. Neste capítulo apenas consideraremos o modelo definido na Fig. 2.14.

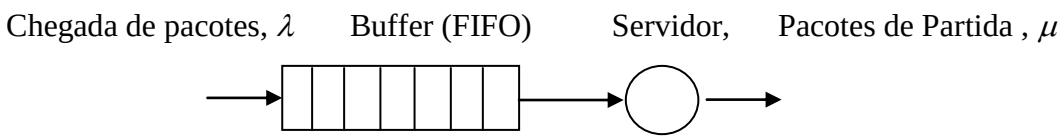


Figura 2.14 - Modelo para um servidor com uma fila de espera.

Esta simplificação de um sistema, que pode ser complexo, permite estabelecer medidas fundamentais para redes de dados [AdZN98]:

- atraso, τ_{del} – é o tempo necessário ao servidor para processar um pacote após a sua recepção.
- *jitter*, j – é uma medida da variância do tempo de atraso.

No caso em que consideramos um *buffer* finito temos ainda:

- Taxa de perdas – é a razão entre o número de pacotes perdidos e o número de pacotes chegados e está relacionado com o débito (γ) do servidor.

Caso o *buffer* a considerar seja infinito não faz sentido falar em perdas e o débito é igual a λ. Nesse caso, a medida do desempenho é dada pela:

- probabilidade de *overflow*, $P_{overflow}$ – percentagem do tempo total em que o número de pacotes num *buffer* excede um certo limiar.

Qualquer uma destas quatro medidas é uma quantidade estatística com a respectiva média, variância e função densidade de probabilidade [AdZN98].

Considerando um *buffer* e uma população infinita podemos recorrer a cadeias de Markov para modelar o sistema num qualquer estado estacionário. Esse método foi usado para alcançar as fórmulas de Pollaczek-Klinchine para o atraso médio e o número médio de pacotes que se encontram na fila de espera, respectivamente [DuSm94]:

$$\bar{\tau} = \frac{\rho}{2(1-\rho)}(1+C_s^2)\frac{1}{\mu} \tag{2.29}$$

$$\bar{Q} = \left(\frac{\rho}{1-\rho}\right)\left[1-\frac{\rho}{2}\left(1-C_s^2\right)\right] \tag{2.30}$$

onde ρ é a probabilidade do servidor estar ocupado e C_s é o coeficiente de variação que está directamente relacionado com o *jitter*. Quando, para além das considerações anteriores, se

supõe um período de utilização de serviço com distribuição exponencial, as fórmulas de Pollaczek-Klinchine simplificam-se:

$$\bar{\tau}_{del} = \frac{\rho}{1-\rho}\frac{1}{\mu} \tag{2.31}$$

$$\bar{Q} = \frac{\rho^2}{1-\rho} \tag{2.32}$$

Considerando um sistema com único tipo de serviço calculámos o tempo necessário ao servidor para processar um pacote após a sua recepção, τ_{del}, fazendo corresponder a μ dois tempos distintos T=25 s e T=50 s, Fig.2.15.

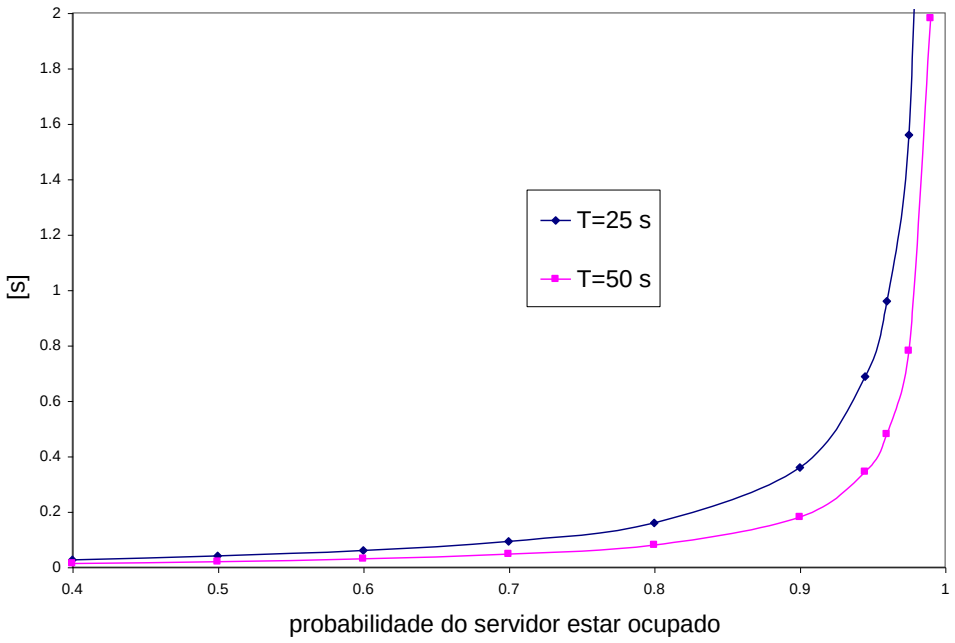


Figura 2.15 - Tempo necessário ao servidor para processar um pacote após a sua recepção, τ_{del}.

A partir destas fórmulas podemos facilmente obter a probabilidade de a fila de espera no servidor ultrapassar um dado limite *l*, sendo esta representada na Fig. 2.16:

$$P_{overflow} = \frac{(1-\rho)\rho^{l+1}}{1-\rho^{l+2}} \tag{2.33}$$

O *débito* (γ) do servidor virá assim de:

$$\gamma = \lambda(1 - P_{overflow}) \tag{2.34}$$

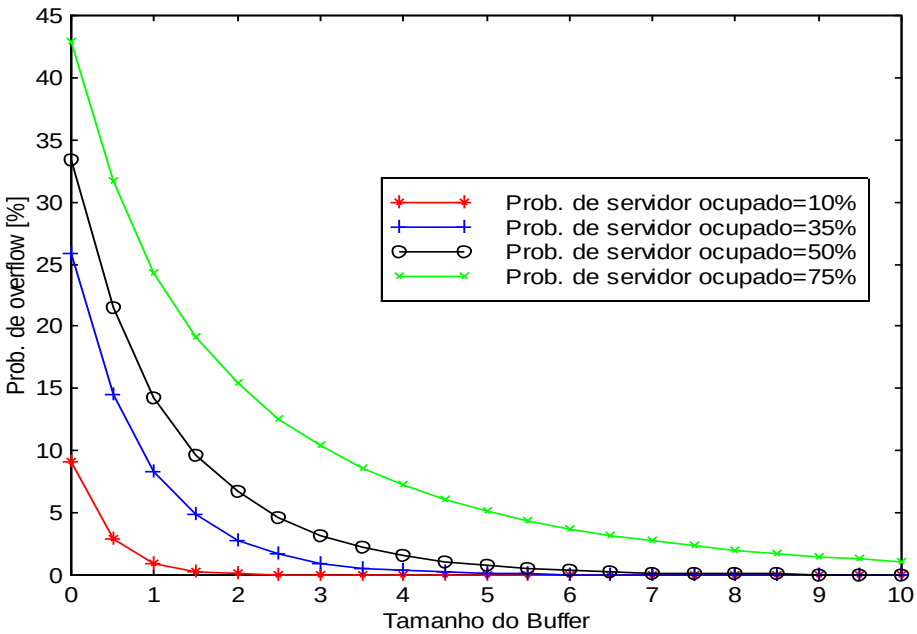


Figura 2.16 - Probabilidade de *Overflow*

Observa-se que à medida que o *buffer* aumenta a probabilidade da fila de espera chegar a um certo limite diminuí. Limite este, que pode ser usado para que a partir desse ponto qualquer pacote que chegue ao servidor seja bloqueado. Logo se tivermos um comprimento do *buffer* igual a 0, vamos obter o modelo de Erlang-B visto não haver fila de espera.

2.5. Modelos de tráfego para voz e dados

Com a implementação do GPRS no GSM e a tendência crescente para o uso do serviço de dados é necessário integrar voz e dados simultaneamente. Isto levanta algumas dificuldades devido às necessidades não serem as mesmas. Assim sendo, tem que se fazer um estudo do comportamento do sistema integrado de voz e dados GSM/GPRS utilizando, por exemplo, o algoritmo Hybrid Radio Resource Allocation (HRRA) [KeLi99].

Neste algoritmo são utilizados os períodos de inactividade entre chamadas de voz, bem como um certo número de canais dedicados, para a transmissão de dados. Entende-se por canais dedicados os canais que são usados exclusivamente para dados, ou seja, mesmo que não haja dados a transmitir, estando esses canais livres, nenhuma chamada de voz os pode utilizar. Inversamente, as chamadas de dados podem utilizar qualquer recurso que esteja livre, sendo atribuídas dinamicamente. Esta situação está ilustrada na Fig.2.17, em que se está a

utilizar exclusivamente para dados 1 canal (o oitavo), mas o sistema atribuí mais canais para dados conforme os recursos disponíveis.

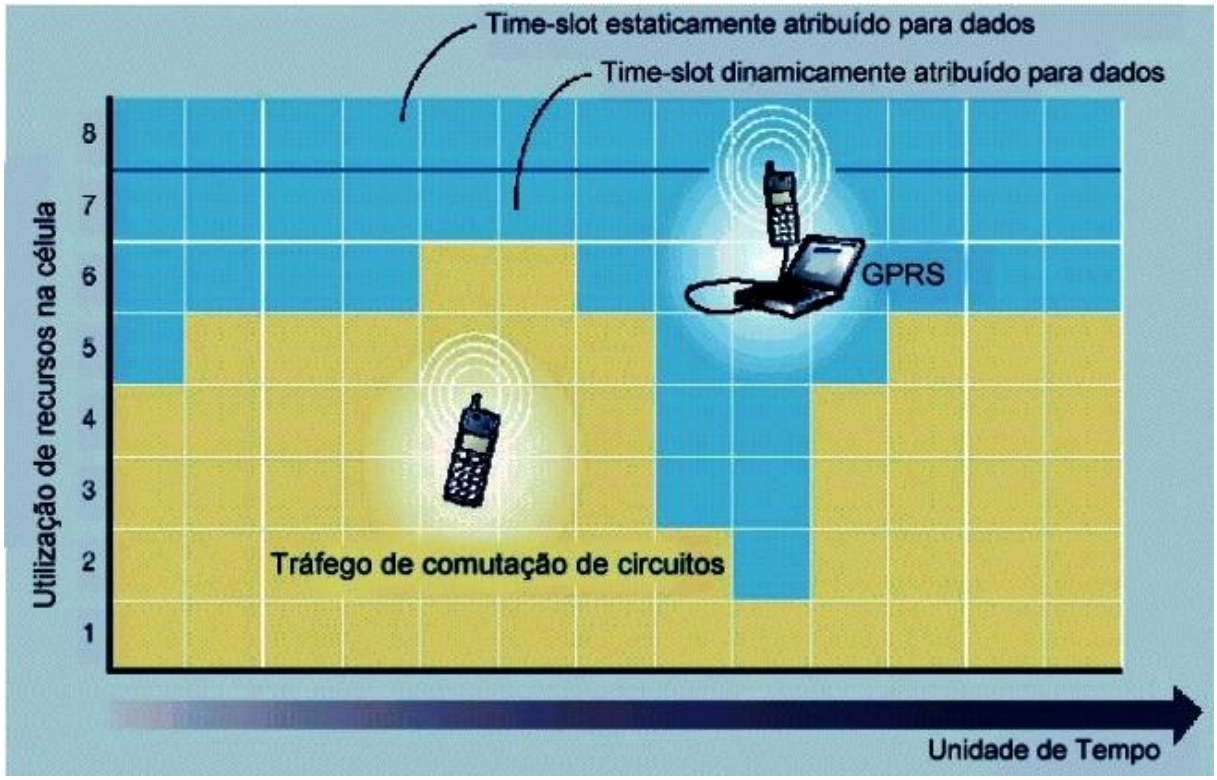


Figura 2.17 - Atribuição estatística e dinâmica para dados.

Devido a esta interligação entre a voz e os dados ter-se-á uma relação entre os dois tipos de comunicação. O desempenho, no caos da comunicação de voz, é medido através da probabilidade de bloqueio Pb e no caso de comunicação de dados, através da Quality of Service, QoS. Estas duas grandezas dependem do tráfego de voz e de dados, bem como do número de canais dedicados exclusivamente à transferência de dados. São estes os parâmetros de entrada do algoritmo.

A transferência de pacotes entre um computador e um terminal GPRS utiliza um percurso com um segmento fixo e outro móvel. O algoritmo apenas analisa o percurso móvel, dado ser o mais limitativo, e só analisa também a direcção de maior intensidade de tráfego para dados, ou seja, a comunicação da estação base para o terminal móvel *donwlink*.

O estudo do algoritmo considera somente uma célula, não se considerando *handover*. Nessa a célula existem F frequências, ou seja, n canais físicos (n=8*F) de onde se retiram canais para controlo, restando um certo número de canais disponíveis para tráfego. Por sua vez, os canais de tráfego dividem-se em canais para GPRS e canais partilhados.

Considerando que não existem canais reservados exclusivamente para chamadas de voz, tendo estas que usar os canais partilhados, o algoritmo considera que existe prioridade para as chamadas de voz em relação à transferência de dados no uso dos canais partilhados.

O tratamento das chamadas de voz e de dados é feito independentemente. Para a voz, o sistema utiliza o modelo de Erlang-B em que a chegada de chamadas é descrita por um processo de Poisson e a sua duração é exponencialmente distribuída com média de 50 segundos. Sendo assim, quando, chega uma chamada de voz, o sistema verifica a existência de recursos; isto é verifica se há algum dos canais partilhados que não esteja a servir uma chamada de voz. O primeiro canal que se encontre nestas condições é então ocupado e qualquer chamada de dados que estivesse a decorrer nesse canal tem de ser reatribuída. Se todos os canais partilhados já estiverem a ser utilizados por chamadas de voz a nova chamada é bloqueada. Quando uma chamada de voz termina o canal é libertado.

Para a transferência de dados o algoritmo funciona de forma diferente, dado que um canal livre pode transportar até oito chamadas de dados, enquanto que para a voz uma chamada ocupa um canal.

Considera-se pacotes IP de 536bytes em que a sua chegada é descrita por um processo de Poisson. Quando chega uma chamada de dados o sistema verifica a existência de recursos. Se houver um ou mais canais não totalmente preenchidos, a chamada é atribuída e posta em fila de espera para transmissão. Caso contrário, a chamada é posta na fila de espera para atribuição de recursos. A atribuição de recursos é feita de forma diferente para as chamadas de dados e consiste em duas etapas. Primeiro a escolha da frequência da célula, que vai ser aquela que tiver mais canais de tráfego livres. Se estiverem todos ocupados é escolhida aquela que estiver menos sobrecarregada. A segunda etapa é a escolha do canal de tráfego, que é feita de forma análoga à anterior, escolhendo o menos sobrecarregado.

Quando os recursos são atribuídos é feita a simulação da transferência de dados. No caso em que surge uma chamada de voz e esta ocupa um canal onde estejam a decorrer chamadas de dados, estas são interrompidas, postas na fila de espera de interrupção e é imediatamente tentada uma nova atribuição de canal para essas chamadas.

Se uma chamada de dados já não tiver pacotes para transmitir é tirada da fila de transmissão e os recursos libertados. Quando qualquer recurso é libertado é sempre tentada a atribuição do mesmo a chamadas que possam estar na fila de espera de interrupção.

Para uma melhor compreensão do algoritmo HRRA apresentamos na Figura 2.18 um esquema para o modelo simulado em [KeLi99].

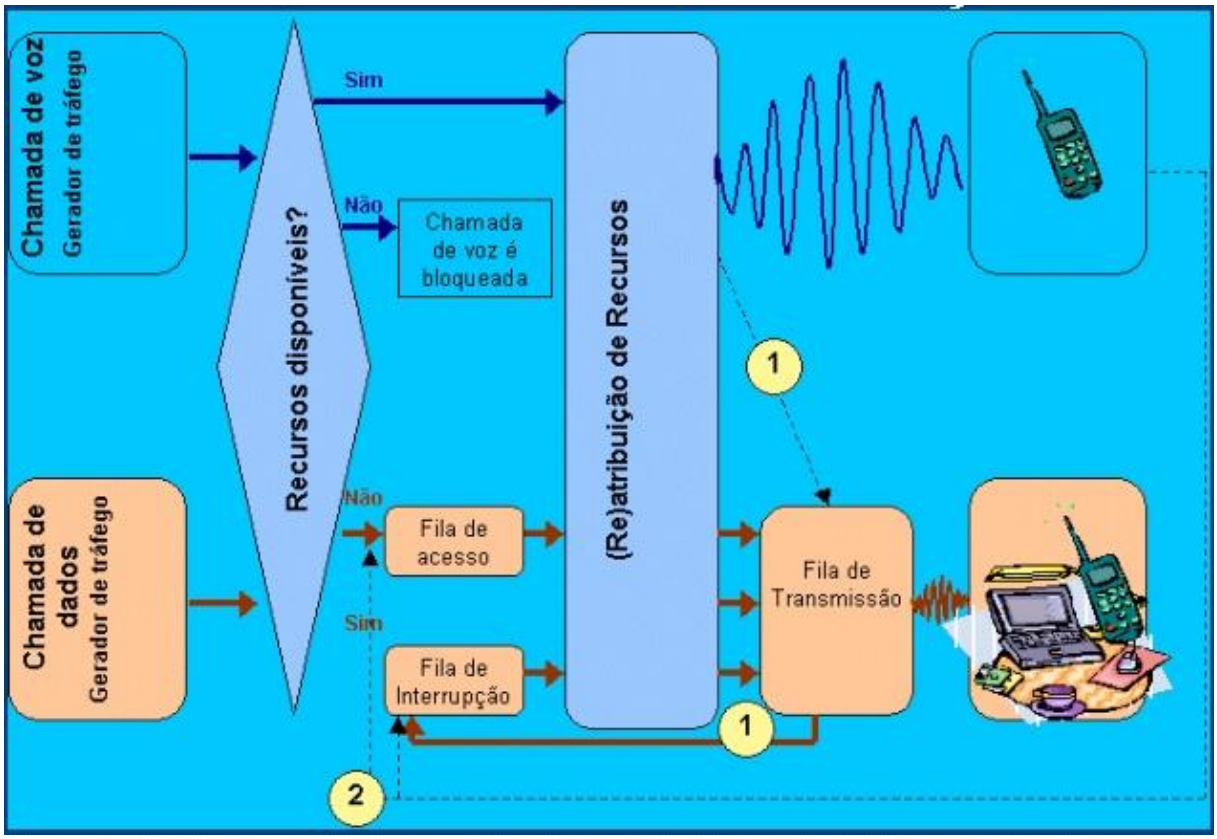


Figura 2.18 – Representação esquemática do algoritmo HRRA para GPRS.

Considere-se o seguinte estudo teórico para o qual retiramos de [KeLi99] o seguinte resultado, Fig.2.19.

$F = 1$

$n_{controlo} = 1$

$n_{tráfego} = 7$

$A_{voz} = 1.88 Erl$

Pode-se concluir que o aumento de canais dedicados a GPRS conduz a um ligeiro aumento dos recursos disponíveis para chamadas de dados, assim como do *throughput* do sistema e a uma diminuição dos tempos de atraso. Este pequeno ganho implicará uma redução acentuada da Pb para as chamadas de voz.

Daqui em diante todo o nosso trabalho vai incidir sobre este algoritmo, sobretudo a parte de aferição do simulador onde, vamos usar como parâmetros os valores do estudo teórico acima indicado.

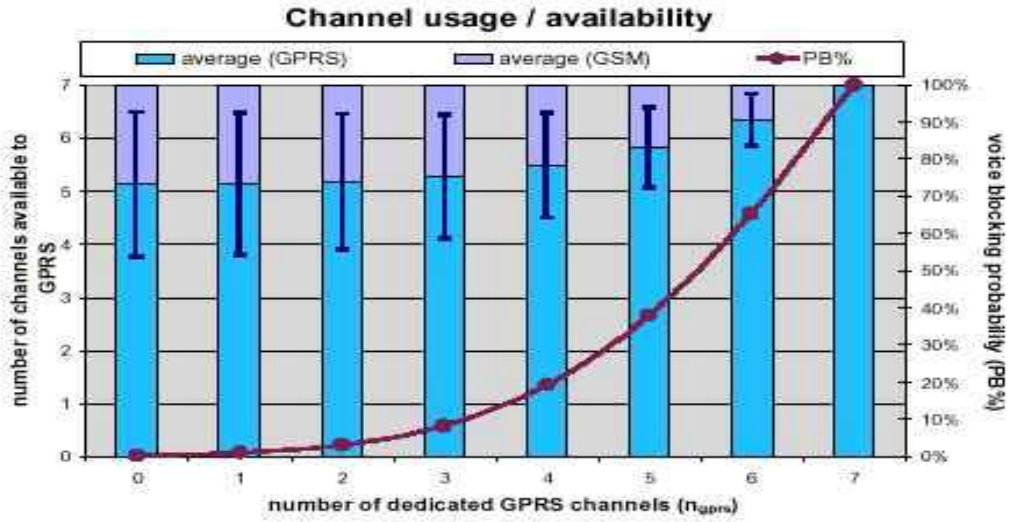


Figura 2.19 – utilização de canais em função de n_{gprs} (extraído de [KeLi99]).

3. Estudo do Algoritmo

3.1. Introdução

Depois de estudado o algoritmo para o modelo HRRA (*Hybrid Radio Resource Allocation*) procedeu-se à sua implementação, de modo a obter resultados para a probabilidade de bloqueio das chamadas de voz, bem como para o atraso dos pacotes de dados no sistema. Para tal efectuaram-se algumas simplificações ao algoritmo:

- chegada de dados sobre a forma de pacotes IP típicos;
- todos os pacotes são independentes e com um tamanho fixo de 536 bytes;
- cada pacote IP é transmitido por inteiro;
- é utilizado o esquema de codificação CS-1 com 9,05 Kb/s por canal;
- cada pacote a transmitir usa apenas um canal em tramas consecutivas;
- não se consideram perdas, interrupções ou retransmissões de pacotes;

Para a execução do simulador utilizou-se o programa MATLAB [Matl96] e numa primeira fase analisámos quais seriam os parâmetros de entrada e de saída que iriam ser necessários para o nosso estudo, Fig. 3.1:

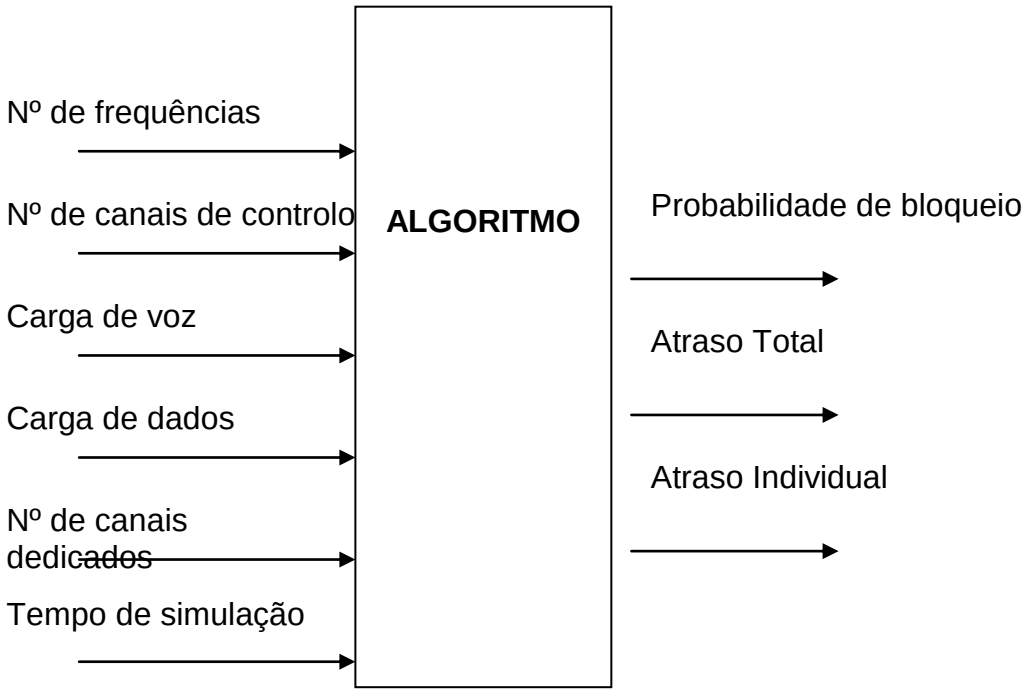


Figura 3.1 - Parâmetros de entrada e saída do algoritmo.

A construção do algoritmo propriamente dito foi facilitada pela sua divisão em blocos, Fig. 3.2:

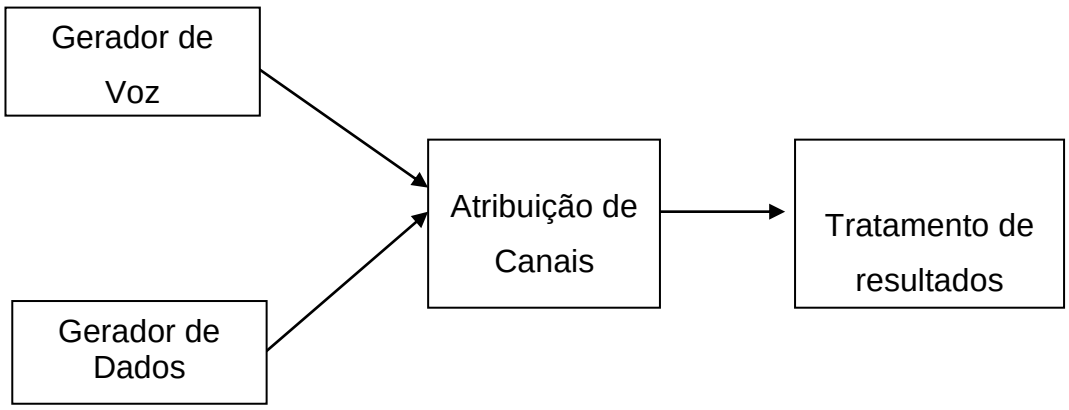


Figura 3.2 - Diagrama de blocos do algoritmo.

Os módulos geradores são responsáveis pela geração das chamadas tanto de voz como de dados, e recebem como parâmetros de entrada a carga de voz, a carga de dados e o tempo a simular. O bloco de atribuição é o responsável pela execução do algoritmo e pode ser esquematizado da forma representada na Fig. 3.3.

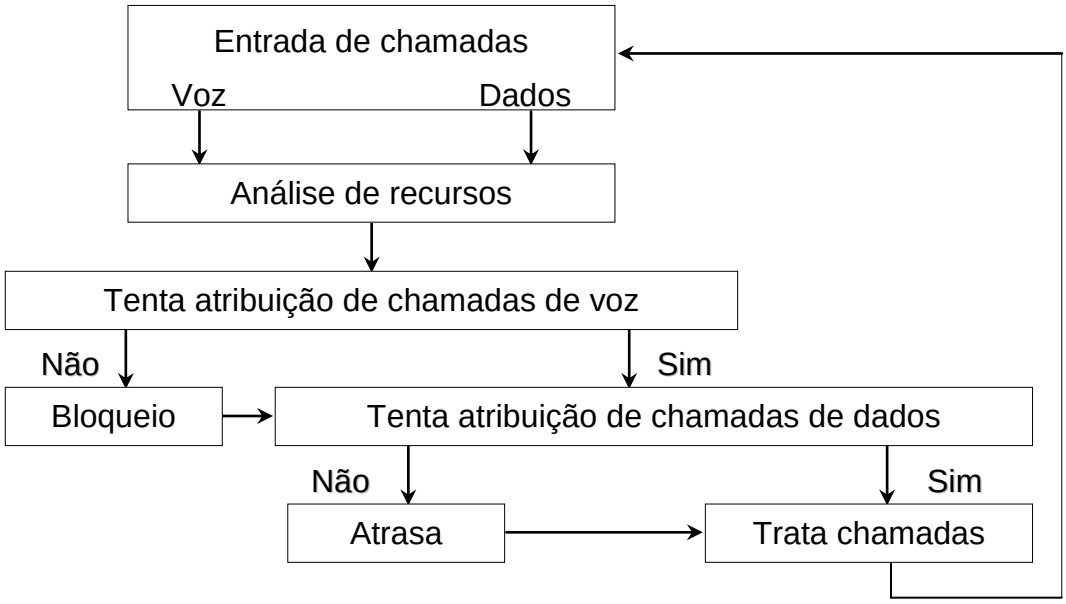


Figura 3.3 - Esquema do bloco de atribuição do algoritmo.

O módulo de atribuição utiliza os parâmetros de entrada relativos ao número de frequências, número de canais reservados para controlo e sinalização e número de canais dedicados a GPRS, Cgprs. O módulo de análise de resultados é aquele que vai permitir tirar

conclusões sobre o desempenho do sistema, utilizando para isso dados sobre o número de chamadas bloqueadas, assim como o atraso individual de cada pacote e o atraso total dos pacotes.

Estando, assim, sumariamente descrito o funcionamento do simulador, passamos então a desenvolver um pouco mais cada bloco e apresentar os respectivos resultados.

3.2. Estudo do Gerador

A geração das chamadas aleatórias tem duas componentes: uma primeira fase, em que é gerada a chegada da chamada, ou seja, o instante em que ela é gerada, e uma segunda fase correspondente à duração das chamadas. No caso das chamadas de voz, a sua duração é descrita por uma distribuição exponencial. Como já foi referido anteriormente, tanto a geração aleatória das chamadas de voz como as de dados são descritas por um processo de Poisson.
Para a geração utilizou-se a função *randomize* do MATLAB, que gera números aleatórios com distribuição uniforme, sendo necessário sobrepor às amostras assim obtidas a função de distribuição de Poisson, de modo a obtermos os instantes de chegada de chamadas. À semelhança do que foi feito no algoritmo HRRA [KeLi99], escolhemos realizar uma simulação de três horas de tráfego com 7 canais e 1.88Erl. Obteve-se um tempo médio entre chegada de chamadas de 26,59 s, o que implica, para 3 horas de simulação, aproximadamente 410 chamadas geradas. Este número de amostras não é o ideal para estabilizar o gerador, como se pode observar na Fig. 3.4, onde curva correpondente à probabilidade de ocorrência, resultante do gerador, apresenta algum erro quando comparada com a curva teórica. Para uma melhor observação da estabilização do gerador está representada na Fig. 3.5 a curva resultante do gerador e a curva teórica para um número de amostras superior. Pode-se observar que o erro é muito menor e as curvas quase se sobrepõem. A diferença entre os dois casos anteriores é evidente mas para a quantificarmos apresenta-se na Tab.3.1 o erro médio e o desvio padrão do erro para ambos os casos.

Nº de amostras	410	2000
Erro médio	7.80E-04	3.43E-04
Desvio padrão do erro	1.45E+03	6.43E-04

Tabela 3.1 - Erro médio e desvio padrão do erro para a distribuição de Poisson.

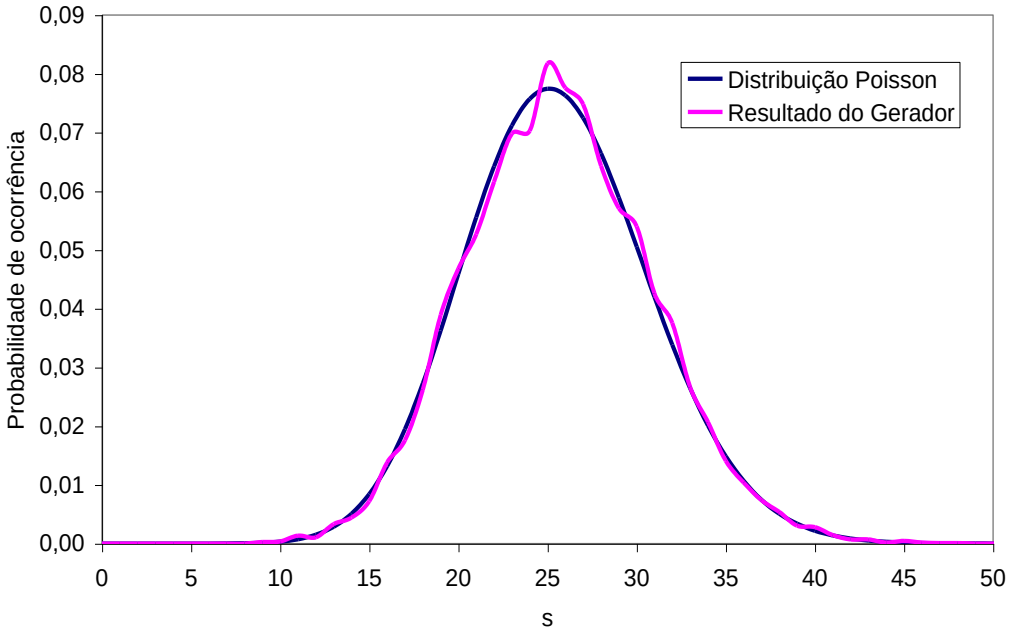


Figura 3.4 - Gerador da chegada de chamadas com N=410 amostras.

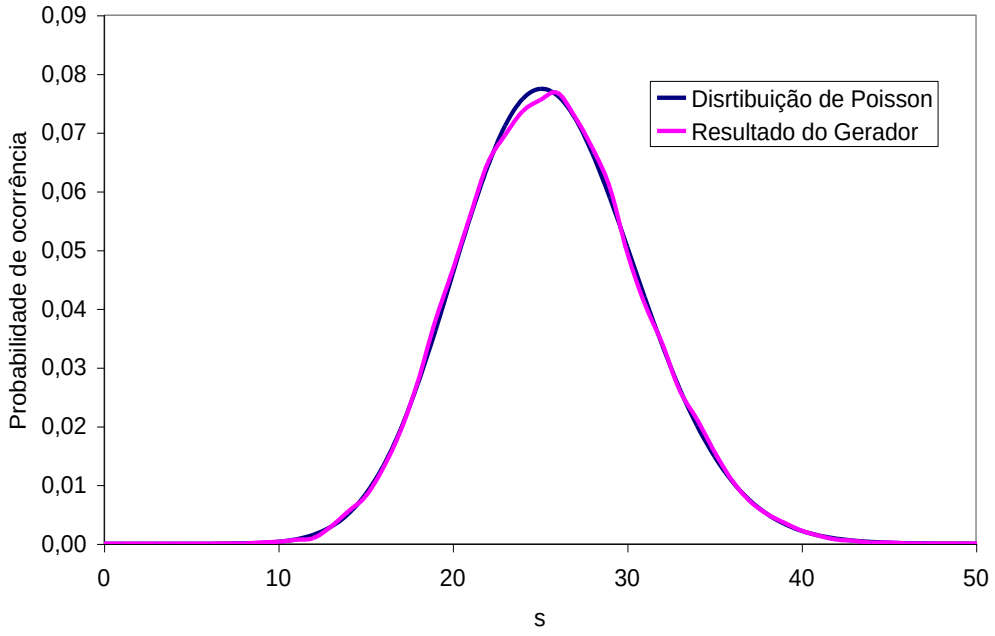


Figura 3.5 - Gerador da chegada de chamadas com N=2000 amostras.

Com seria de esperar podemos observar que, relativamente à situação com 410 amostras, tanto o erro com o seu desvio padrão diminuíram na situação com 2000 amostras, o que indica a tendência de aproximação da curva teórica com o aumento das amostras.

Note-se que todos os resultados apresentados são uma média de 30 diferentes simulações efectuadas, que, não sendo um valor ideal, foi o considerado aceitável para obtenção de resultados fiáveis, sendo equivalente a simular um período de 30x3 horas, ou seja, 12000 amostras.

Como foi referido a geração das chamadas aleatórias tem duas componentes: o instante de chegada e o tempo de duração da chamada. As chamadas de voz têm a sua duração descrita por uma distribuição exponencial. De forma análoga à chegada das chamadas, a duração destas foi obtida sobrepondo à função *randomize* do MATLAB a função de distribuição exponencial, e, tal como no caso em que tínhamos a função de Poisson, verificamos que o número de amostras correspondente ao tempo de simulação não é o adequado para estabilizar o gerador, como podemos ver pela Fig. 3.6, em que há um erro visível entre a saída do gerador e a curva ideal.

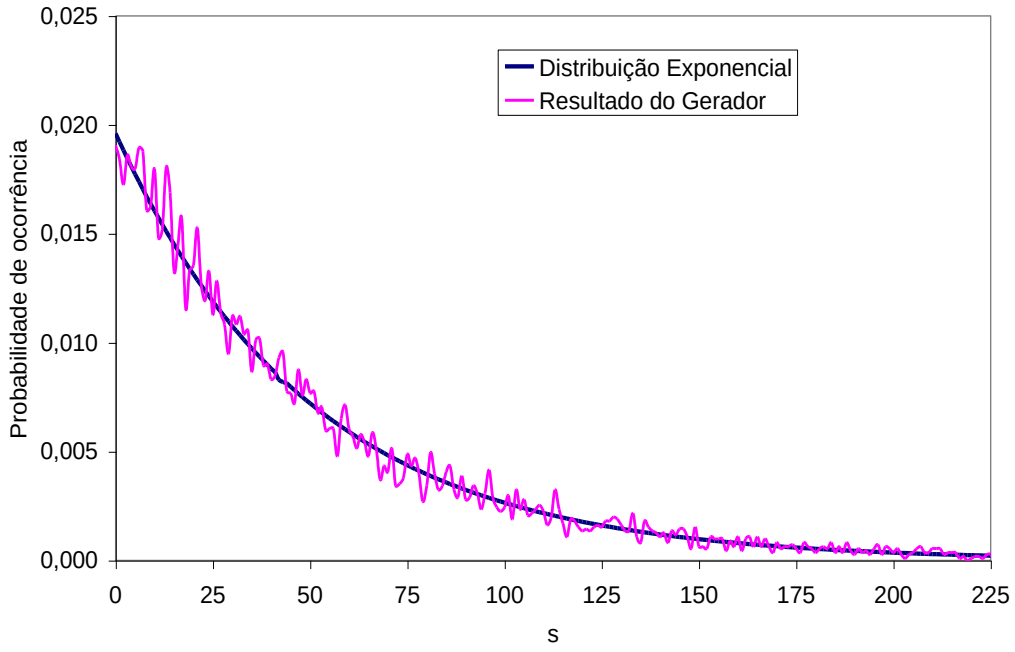


Figura 3.6 - Gerador da duração das chamadas de voz com N=410 amostras.

Com vista a observar a estabilização do gerador da duração das chamadas de voz está representada na Fig. 3.7 a mesma situação para um número de amostras maior. Tal como para a chegada das chamadas, calculou-se o erro médio e o desvio padrão do erro para a duração das chamadas de voz e obteve-se os resultados da Tab.3.2.

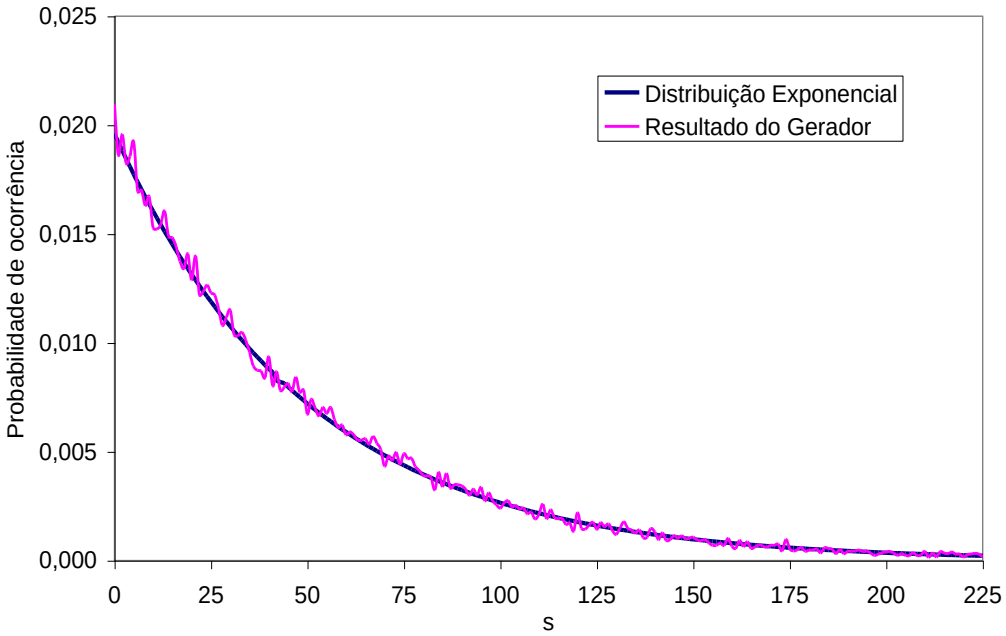


Figura 3.7 - Gerador da duração das chamadas de voz com N=2000 amostras.

Nº de amostras	410	2000
Erro médio	4.07E-04	1.56E-04
Desvio padrão do erro	6.17E-04	2.57E-04

Tabela 3.2 - Erro médio e desvio padrão do erro para a distribuição exponencial.

Do ponto de vista das chamadas de dados não faz sentido falar na duração da chamada visto termos assumido que todas as chamadas de dados correspondem a um pacote IP de tamanho fixo. Como a duração dos pacotes IP é constante e os pacotes são transmitidos por inteiro e ao mesmo ritmo pode-se concluir que o tempo para a transmissão dos pacotes é fixo. Assim, temos para a duração de cada pacote:

$$t = \frac{\text{número de bits}}{\text{débito binário}} = {536 \times 8}/{9050} = 0.474\text{s} \qquad (3.1)$$

O ritmo de chegada dos pacotes vai determinar a carga de dados do sistema que vai ser expressa como a percentagem da capacidade máxima de transmissão do sistema.

Num sistema GSM, como o estudado no algoritmo HRRA, com uma única portadora por célula têm-se 8 *timeslots* disponíveis para canais de comunicação. No entanto, 1 desses

canais tem funções de sinalização e controlo restando assim ao utilizador um máximo de 7 canais para transmissão. Para calcular o volume de dados a introduzir no sistema efectuou-se um calculo tendo em conta o uso do *coding scheme-1*, a que corresponde um ritmo de 9.05 kb/s, e os 7 canais de tráfego. O ritmo multiplicado pelo número de canais irá corresponder a 100% da capacidade do sistema. Como os pacotes têm dimensão fixa 536 bytes, utilizando o débito binário consoante a percentagem, obtemos um ritmo para a chegada de pacotes dado por,

$$\lambda = \frac{\text{nº de bits de um pacote}}{\text{débito binário (por \%)} * \text{nº de canais}} \tag{3.2}$$

Os pacotes que chegam num segundo são obtidos invertendo o ritmo de chegadas. Na Tab. 3.3 estão representados o número de pacotes a introduzir no simulador conforme a percentagem de volume de dados.

% Carga de Dados	**Carga de dados [Kbs]**	**Pacotes IP/s**	**Ritmo de Chegadas**
10%	6.3	1.5	0.677
20%	12.7	3.0	0.338
30%	19.0	4.4	0.226
40%	25.3	5.9	0.169
50%	31.7	7.4	0.135
60%	38.0	8.9	0.113
70%	44.3	10.3	0.097
80%	50.7	11.8	0.085
90%	57.0	13.3	0.075
100%	63.4	14.8	0.068

Tabela 3.3 – Carga de dados para 7 canais de tráfego.

3.3. Chamadas de voz

Com o gerador testado, o passo seguinte é a ligação deste ao módulo que faz a gestão dos recursos, onde o tráfego de voz assume sempre um estatuto prioritário sobre as transmissões de dados. Deste modo, o passo seguinte no desenvolvimento foi fazer a gestão das chamadas de voz sem ter em conta as chamadas de dados, mas tendo presente que os canais disponíveis para atribuição das chamadas serão limitados pelos canais dedicados a chamadas de dados. Depois de implementarmos a gestão das chamadas de voz procedemos à sua verificação, comparando a saída do nosso algoritmo no que respeita a valores da probabilidade de bloqueio, com a curva teórica de Erlang-B, visto que se trata de tráfego de voz com chegadas com distribuição de Poisson e duração exponencialmente distribuída. Para 7 canais de voz e um tráfego de 1.88 Erl, valores que são os usados no algoritmo HRRA e que vão permitir aferir o simulador, obtivemos para a probabilidade de bloqueio a Fig. 3.8.

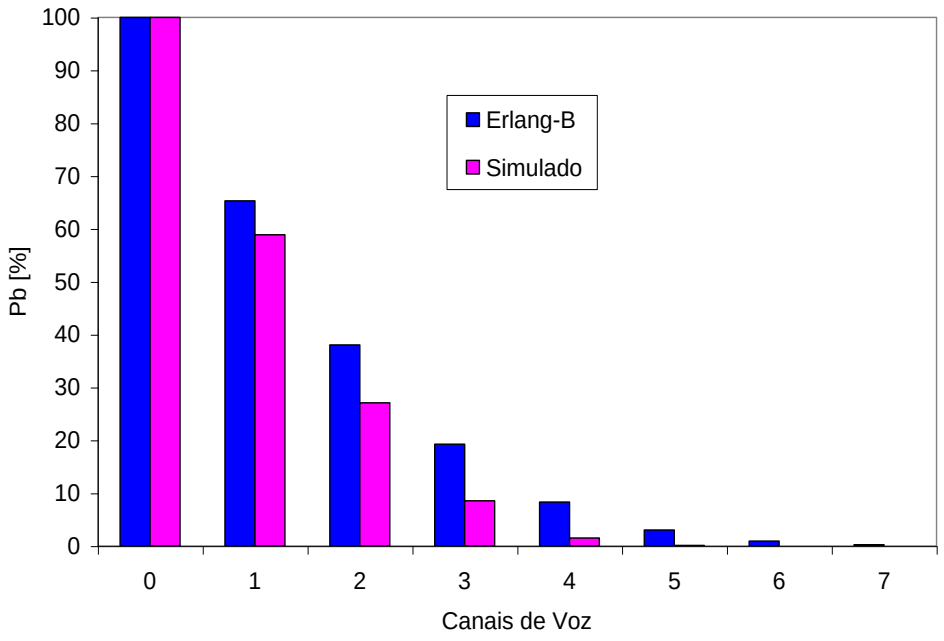


Figura 3.8 - Probabilidade de bloqueio para 7 canais de tráfego e 1.88 Erl.

Pode-se observar que existe uma diferença considerável entre as duas curvas, que se deve por um lado ao facto de o modelo de Erlang-B não ser muito preciso para valores de tráfego e de canais baixos, e por outro aos resultados do gerador não serem perfeitos. Para uma melhor visualização desta situação aumentamos o número de canais para 30 e o valor do

tráfego de voz para 20 Erl, Fig.3.9 e foram calculados os respectivos erro médio e desvio padrão do erro para os dois casos anteriores, Tab.3.4.

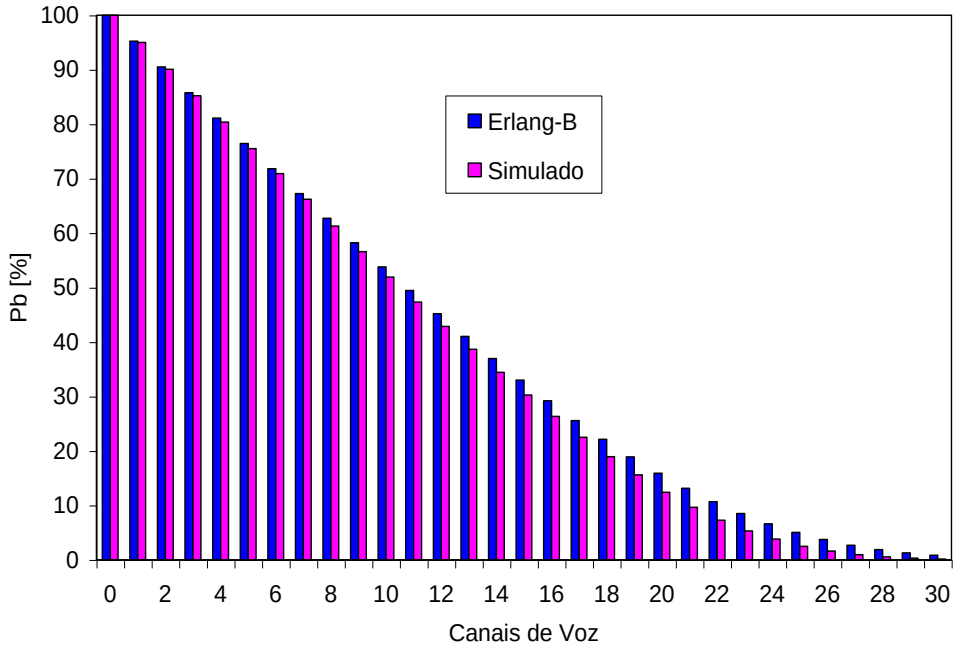


Figura 3.9 - Probabilidade de bloqueio para 30 canais de tráfego e 8 Erl.

Nº de canais	7	30
Erro médio	4.8684	1.9393
Desvio padrão do erro	4.4894	1.0811

Tabela 3.4 - Erro médio e desvio padrão do erro para probabilidade de bloqueio.

Como podemos verificar o comportamento do simulador para a parte de voz está muito mais próximo do esperado, ou seja, do modelo de Erlang-B para o caso em que o número de canais e o tráfego aumenta. Ainda assim apresenta algum erro, sendo o valor da probabilidade de bloqueio sempre inferior à curva teórica. Tendo testado e avaliado a confiança no módulo responsável pela voz, vai-se em seguida estudar o desempenho da parte referente às chamadas de dados.

3.4. Aferição da implementação do modelo HRRA

3.4.1. Condições de simulação

Após a aferição da fiabilidade e exactidão do gerador e da parte do algoritmo que simula a gestão do tráfego de voz, há que analisar o comportamento do simulador quando sujeito ao tráfego misto de voz e dados. A maneira mais fácil de verificar esse comportamento é usar os resultados fornecidos em [KeLi99]. Para tal há no entanto que submeter o nosso simulador aos mesmos parâmetros de entrada que os utilizados no artigo, Tab. 4.2:

Capacidade de célula	$Canais_{tráfego} = 7$ $Canais_{gprs} \in \{0,1,2,3,4\}$
Tráfego de voz oferecido à célula	1,88 Erlang ($T = 50s$, $\lambda = 1/26,57s$)
Tráfego de dados oferecido à célula	mínimo: 10% = 6,3kbps máximo: 70% = 44,3kbps
Período a simular	3 horas
Probabilidade de erro de bloco	BLER=0%

Tabela 3.5 – Suposições efectuados para o estudo do HRRA em [KeLi99].

Como se pode constatar, o artigo [KeLi99] apenas trata da situação em que existe uma única portadora por célula com 7 canais disponíveis para atender a um tráfego de voz de 1,88 Erl. Desses 7 canais, um número variável, entre 0 e 4, são usados como canais dedicados a dados, Cgprs. O tráfego de voz considerado no artigo vai ser constante ao longo da simulação, com chamadas de duração média 50 s e tempo médio entre chegadas de 26 s. Para tráfego de dados a quantidade de pacotes introduzida pelo gerador no simulador varia entre 10% e 70% da capacidade máxima de transmissão de dados do sistema. Sendo a capacidade máxima de transmissão definida como:

$$\text{Carga Maxima} = \#\,\text{Máximo de Canais Tráfego} * \text{Débito Binário Máximo}/\text{Canal} \tag{3.3}$$

Tanto no artigo [KeLi99] como no nosso estudo foi considerado o uso do Coding Scheme-1, CS-1, para a codificação dos pacotes de dados. Esse esquema de codificação

permite um ritmo máximo de 9,05Kbps, o que nos dá um ritmo máximo de 63,35 Kbps para os 7 canais considerados.

Como foi já apresentado, o número de simulações de 3 horas de tráfego considerado como suficiente para a obtenção de resultado fiáveis é aproximadamente de 30. Os dados que se apresentam daqui em diante serão referentes a 30 simulações realizadas usando o *software* MATLAB. Em cada simulação foram analisadas combinações de 7 cargas de dados e 5 números diferentes de Cgprs, num total de 35 ciclos, sendo que, em cada ciclo, um período de 3 horas é simulado. Tudo isto implica que, em cada simulação, há 105 horas de tráfego de voz e dados a simular.

3.4.2. Chamadas de voz

O tráfego de voz assume sempre um estatuto prioritário sobre as transmissões de dados. A probabilidade de bloqueio de chamadas de voz reflecte a eficácia do algoritmo implementado em relação às chamadas de voz. Para se calcular, contaram-se quantas chamadas geradas no nosso simulador foram rejeitadas. De modo a aferir a qualidade dos resultados obtidos, e do simulador, há que os comparar com dados de confiança obtidos de outras fontes. Essa comparação é apresentada na Fig. 3.10:

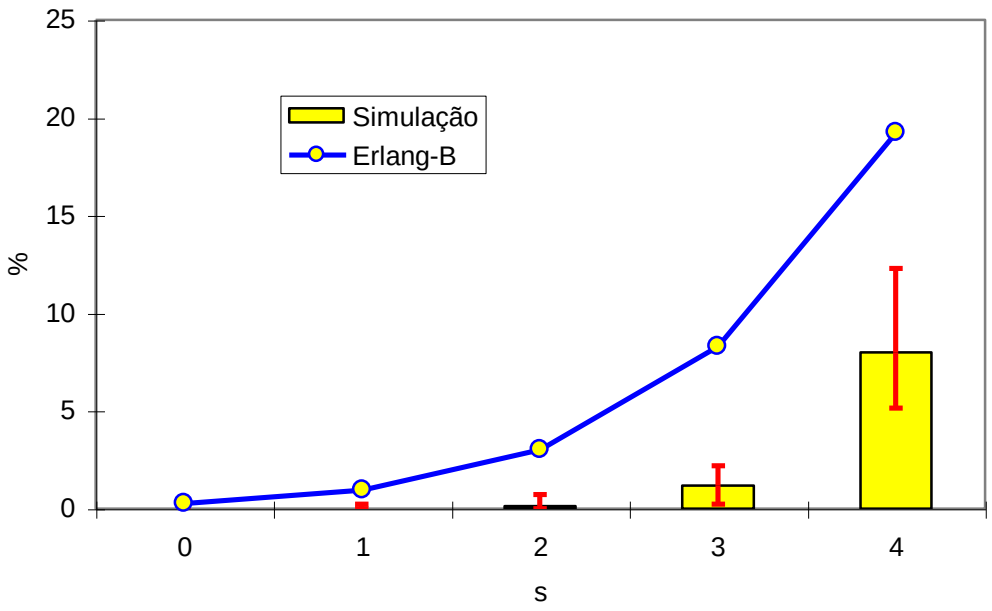


Figura 3.10 – Probabilidade de bloqueio de chamadas de voz para A=1,88 Erlang.

No nosso caso, e tratando-se de tráfego de voz com chegadas de Poisson e duração exponencial foram usados valores teóricos fornecidos pelo modelo de Erlang-B.

Duas ideias sobressaem claramente da análise da figura: a não sobreposição exacta dos resultados obtidos com o previsto pelo modelo de Erlang-B e a grande amplitude de resultados máximos e mínimos do simulador para a probabilidade de bloqueio. A explicação para a diferença dos valores teóricos e simulados pode ser considerada aceitável visto que para valores de tráfego baixo, 1,88 Erl, o modelo de Erlang-B é pouco exacto. A grande disparidade entre as probabilidades de bloqueio mínimas e máximas registadas nas 31 simulações vem de encontro ao previsto aquando do estudo da exactidão do gerador. O gerador apresenta, para 3 horas de amostras, uma grande amplitude de resultados que evidentemente se reflecte ao longo de toda o simulação.

3.4.3 Chamadas de dados

A transmissão de dados, estando sempre dependente do tráfego de voz requer um maior esforço na obtenção e análise de resultados, não dependendo exclusivamente dos parâmetros intrínsecos a tráfego dos pacotes. Assim, ao contrário do tratamento da voz em que só nos interessa a intensidade de tráfego, há que considerar no tratamento de dados a carga de dados, o número de canais dedicados a GPRS (Cgprs) e o número de canais partilhados (*N-Cgprs)* deixados livres para transmissão de dados.

A primeira medida a realizar no que aos dados diz respeito é o número de atrasos, i.e., o número de vezes em que, por falta de recursos, um pacote é posto em fila de espera. Para tal, são contabilizados durante a simulação o número total e instante de atraso de todos os pacotes introduzidos no sistema. Para obtermos o número total de atrasos somou-se o número de atrasos que cada pacote sofre. Como os resultados são dependentes do período simulado, a Fig. 3.11 vale mais para uma análise qualitativa do que quantitativa da evolução do atraso total dos pacotes.

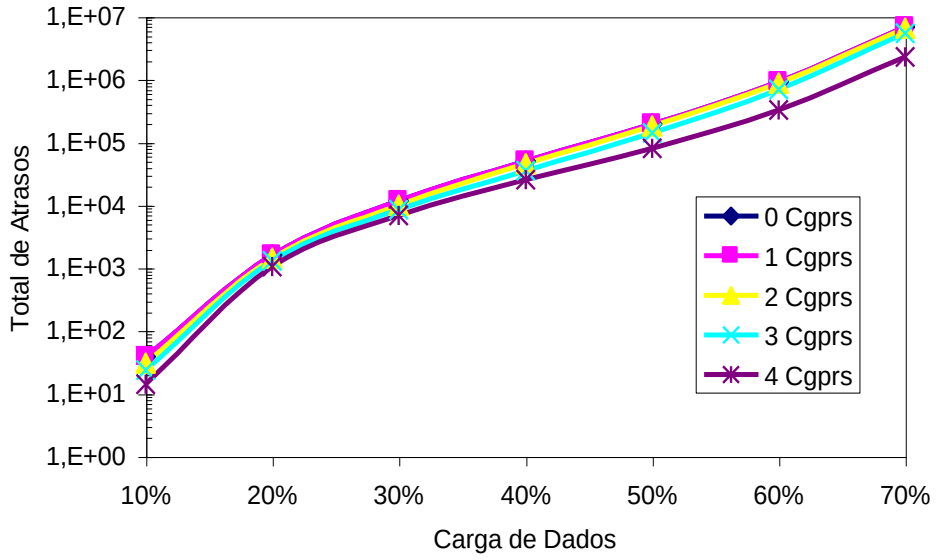


Figura 3.11 – Total de atraso em função da carga de dados.

Na Fig. 3.11 está representado o crescimento do número total de atrasos à medida que é introduzido no sistema uma carga de dados maior. O número de pacotes atrasados diminui à medida que se introduzem mais canais dedicados exclusivamente para dados, revelando assim que a reserva de *timeslots* para a transmissão de dados, apesar de aumentar a probabilidade de bloqueio de voz, reduz o número de atrasos.

No entanto, o facto mais importante a registar da figura prende-se com a sobreposição das curvas relativas a 0 e 1 canais dedicados a GPRS. Essa igualdade de resultados resulta do valor demasiado pequeno usado para a intensidade de tráfego. Sendo pequeno o número de chamadas de voz não se regista melhoria na existência de apenas 1 canal dedicado a GPRS. Essa conclusão pode ser confirmada com a análise da Fig. 3.12, onde se regista a diminuição dos atrasos com o aumento do número de canais dedicados a GPRS.

Uma medida muito mais interessante, quer qualitativa quer quantitativamente, prende-se com o tempo que em média cada pacote necessita para ser transmitido, que é calculado fazendo uma média do tempo de atraso que cada pacote, individualmente sofre. O andamento das curvas representadas na Fig. 3.13 permite-nos concluir que o aumento do número de canais reservados a GPRS apenas melhora significativamente a transmissão de dados para grandes cargas de dados, sendo quase inútil para pequenas cargas.

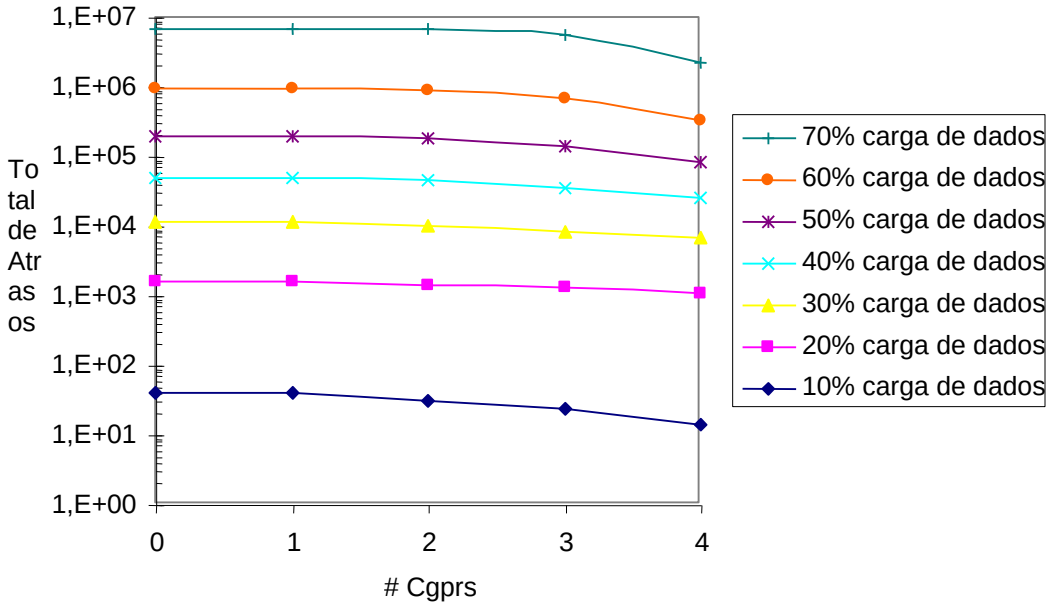


Figura 3.12 – Total de atraso em função do número de canais dedicados a GPRS.

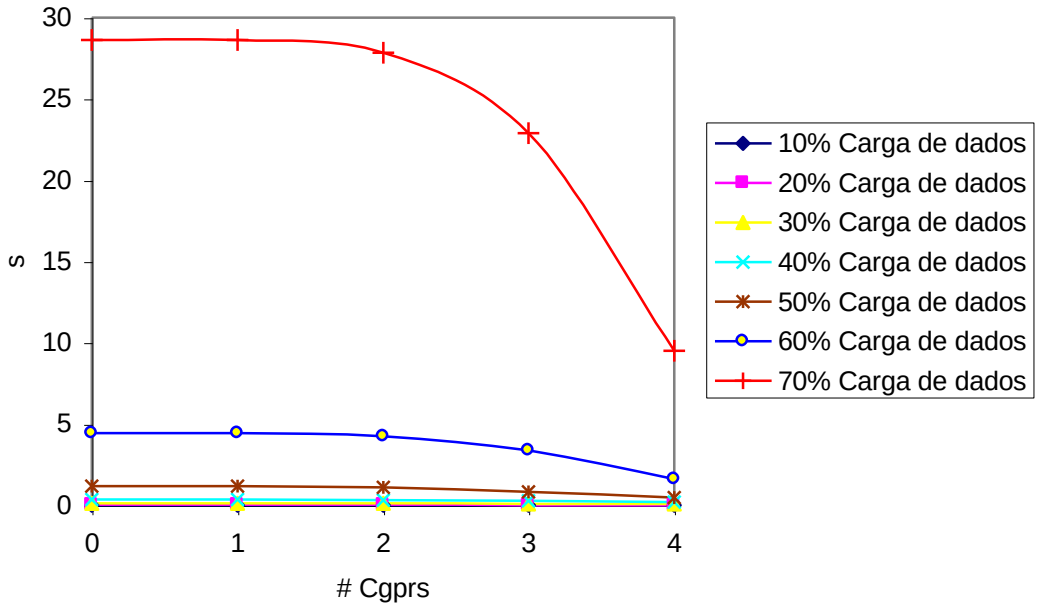


Figura 3.13 – Atraso médio por pacote de dados em função de Cgprs.

Esta conclusão pode ser facilmente compreendida se analisarmos os valores de tráfego envolvidos. Como foi enunciado no início do capítulo, o tráfego de voz é 1,88 Erl e o número de canais disponíveis na única célula considerada é 7, um valor típico, se considerarmos 1 portadora por célula com apenas 1 canal para controlo e sinalização. Uma intensidade de tráfego de 1,88 Erl é equivalente a 1,88 canais de voz permanentemente ocupados por uma

unidade de tempo, usualmente 1 hora, restando assim 5,22 Erl disponíveis para atender as chamadas de dados nesse período de tempo.

A capacidade máxima de transmissão, corresponde a carga de dados=100%, verifica-se quando temos todos os 7 canais a transmitir dados num dado intervalo de tempo. Sabendo que a carga de dados máxima utilizada é 70% da capacidade máxima, resulta uma ocupação média de 4,9 canais com chamadas de dados. Facilmente se verifica que, em média, apenas 0,32 canais estão desocupados, i.e., o sistema está quase na sua máxima ocupação. Com uma escassez de recursos tão acentuada é natural existir uma melhoria da qualidade de serviço prestado às chamadas de dados se se reservar previamente canais dedicados a GPRS e como será de esperar as chamadas de voz ficam prejudicadas com essa reserva. Para baixas taxas de ocupação de ambos os tipos de chamadas não existe melhoria ou prejuízo resultante da reserva de canais exclusivamente para transmissão de dados.

O atraso médio em função da evolução do carga de dados pode ser visto na Fig. 3.14:

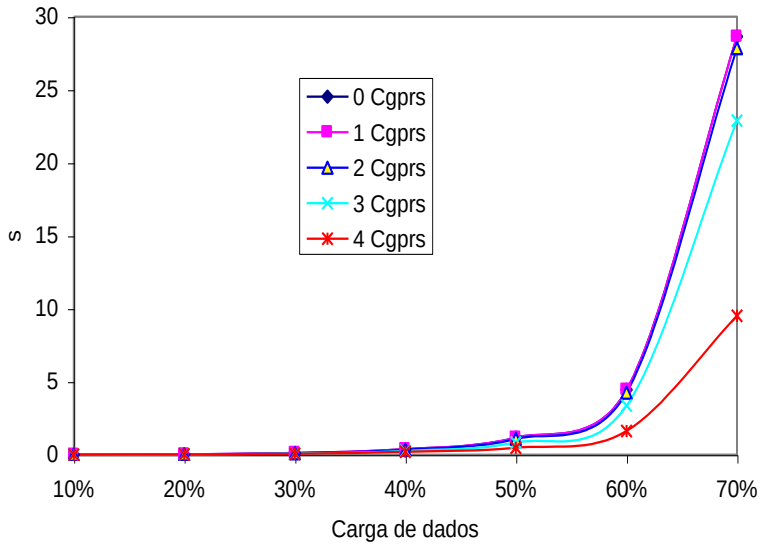


Figura 3.14 – Atraso médio por pacote de dados em função da data load.

Dos dados obtido para o atraso médio, resultou o cálculo da função distribuição de probabilidade de atraso dos pacotes de dados. O caso em que a carga do sistema é maior, carga de dados = 70%, está representado na Fig. 3.15:

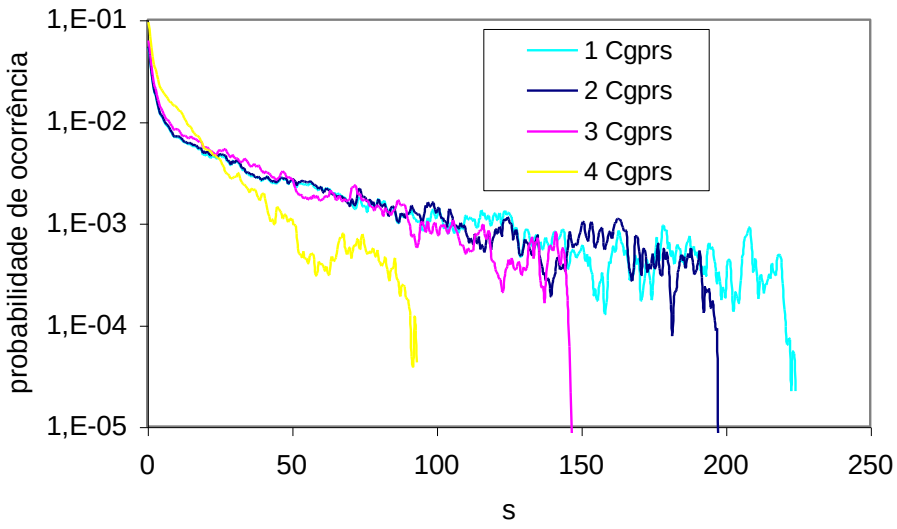


Figura 3.15 – Função de distribuição de probabilidade do atraso para 70% carga de dados.

Na Fig. 3.15 estão representadas as curvas das distribuições de probabilidade do atraso para diferentes números de canais dedicados a GPRS: pelo explicado anteriormente compreende-se o porquê do decréscimo da probabilidade de atraso com o aumento de canais reservados a dados. Uma análise mais detalhada verifica que as simulações com 4 Cgprs apresentam a maior probabilidade de ter pacotes sem atrasos ou com menores atrasos.

Na Fig. 3.16 apresentamos novamente a função de distribuição de probabilidade do atraso de pacotes, mas considerando diferentes carga de dados com o 1 Cgprs. Pode-se observar claramente da Fig. 3.16 a tendência apresentada pelas curvas de probabilidade em estabilizar, depois de um decréscimo inicial acentuado. Um exercício estatístico interessante seria a obtenção por regressão de uma equação que definisse o andamento da distribuição de probabilidade. Para o caso da Fig. 3.16 mais interessante, *70% de* carga de dados, estão representadas na Fig. 3.17 as duas curvas, e respectivas equações, que melhor se ajustam aos dados simulados.

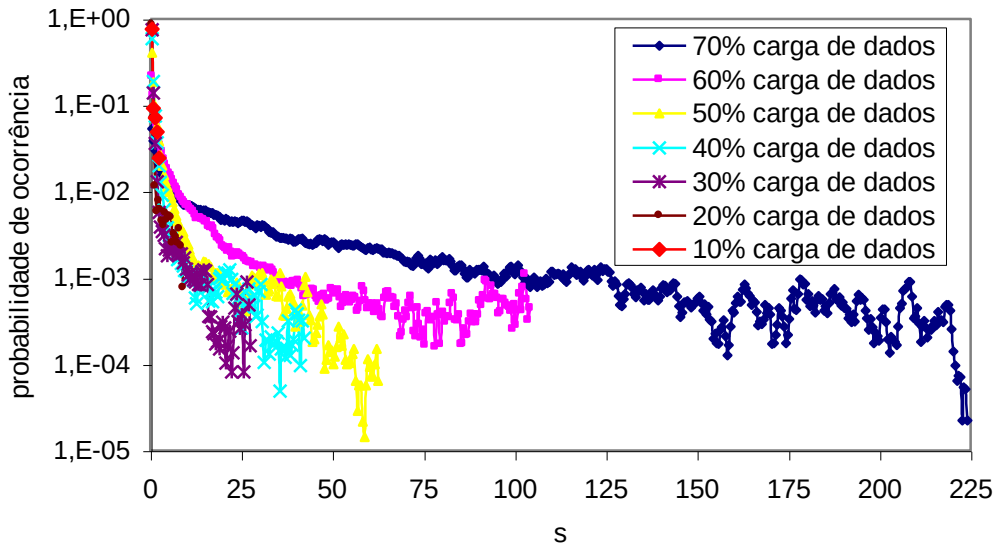


Figura 3.16 – Distribuição de probabilidade do atraso de pacotes em função do carga de dados.

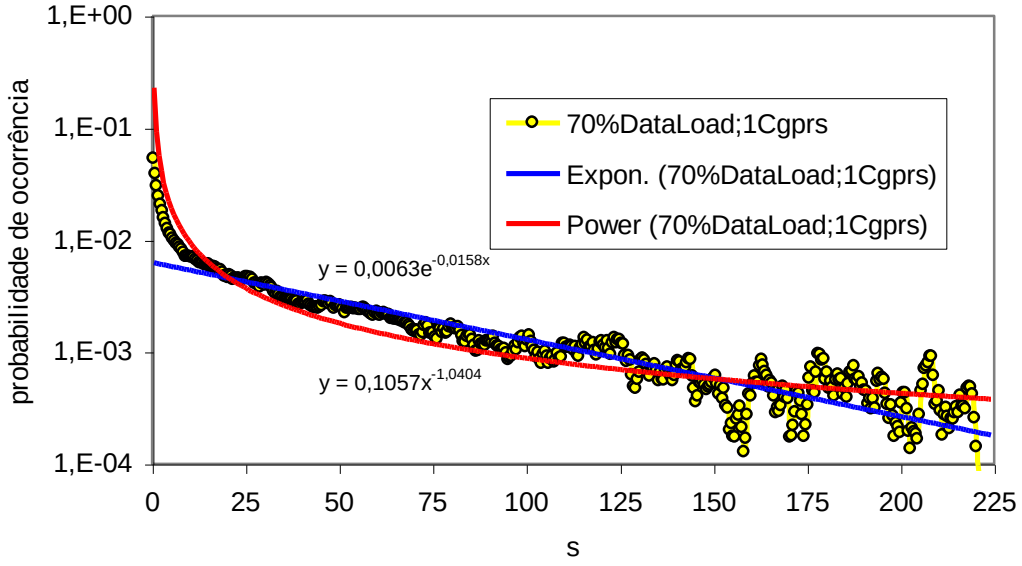


Figura 3.17 – Curvas das regressões da distribuição de probabilidade do atraso de pacotes.

Da análise da Fig. 3.17 sobressai a melhor adaptação da curva obtida utilizando a regressão cuja equação recorre à potência do tempo. No entanto, a regressão exponencial apresenta uma boa aproximação. O coeficiente R^2 é uma medida da confiança que nos dá a proporção da variância dos *Y* atribuível à variância dos *X*, e é definida como:

$$r = \frac{n(\Sigma XY) - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{\sqrt{\left[n\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2\right]\left[n\Sigma Y^2 - (\Sigma Y)^2\right]}} \tag{3.4}$$

onde *n* é o número de pontos da nossa função. Aplicando então esta fórmula ao caso apresentado na Fig. 3.17 temos R^2=0,82 para curva exponencial e R^2=0,84 para a curva da potência de *X*. Estes valores mostram que ambas as curvas são bem ajustadas aos valores obtidos, e são portanto uma boa aproximação à função densidade de probabilidade.

3.4 Comparação com HRRA

Tendo sido efectuada a simulação para 7 canais com 1.88 Erl de tráfego de voz, duração de chamadas de T=50 s e variando a carga de dados de 10% a 70%, serão comparados os resultados obtidos com os extraídos de [KeLi99], dado os parâmetros de entrada serem os mesmos para ambas as simulações, com o objectivo de aferir o simulador.

O primeiro resultado a ser analisado é a probabilidade de bloqueio. Apresenta-se na Tab. 3.6 os resultados obtidos e os extraídos do algoritmo HRRA, bem como os do modelo teórico de Erlang-B.

Cgprs	Erlang-B [%]	Pb HRRA [%]	Pb simul.[%]
0	0.25	0.25	0
1	0.94	0.9	0.02
2	3.03	2	0.13
3	8.29	7	1.17
4	19.24	18	8

Tabela 3.6 - Comparação da probabilidade de bloqueio com o resultado do algoritmo HRRA

Pode-se observar que a diferença entre o obtido na simulação e o resultado do HRRA é bastante significativa, o que de certa forma seria de esperar visto termos verificado a diferença do nosso resultado e a curva de Erlang-B, que seria o resultado a atingir. Apesar da grande diferença entre estes resultados, podemos afirmar que o algoritmo está bem efectuado dado

termos observado que, para um maior número de canais e tráfego mais elevado, o erro era muito menor. Refira-se também que tanto para o nosso simulador como para o estudo em [KeLi99] a probabilidade de bloqueio se encontra abaixo da teórica esperada.

Outro aspecto que pode ser comparado é o atraso médio dos pacotes. Na Tab. 3.7 estão representadas, para o algoritmo HRRA e para o nosso simulador, os atrasos médios para todas as percentagens de carga de dados e para todos os Cgprs considerados.

	Cgprs=0		Cgprs=1		Cgprs=2		Cgprs=3		Cgprs=4	
carga [%]	HRRA	Simul.	HRRA	Simul.	HRRA	Simul.	HRRA	Simul.	HRRA	Simul.
70	16.9	28.6	16.3	28.6	15	27.8	11.8	22.9	6.2	9.5
60	6.8	4.5	6.1	4.5	5	4.3	3.8	3.4	1	1.6
50	3.2	1.2	3	1.2	2	1.1	1	0.8	0.5	0.5
40	1.8	0.36	1.6	0.36	1	0.33	0.5	0.26	0.2	0.18
30	0.9	0.1	0.7	0.1	0.5	0.09	0.2	0.083	0.1	0.068
20	0.2	0.024	0.2	0.024	0.18	0.021	0.17	0.019	0.1	0.015
10	0.1	0.01	0.1	0.01	0.1	0.01	0.1	0.01	0.05	0

Tabela 3.7 - Comparação do atraso médio com o resultado do algoritmo HRRA.

Pode-se observar que o valor do atraso médio para o simulador é menor que o do HRRA, excepto para 70% de carga de dados. Este erro entre as duas simulações não é muito significativo, visto o seu valor ser pequeno e ambas as simulações apresentarem o mesmo tipo de comportamento. Refira-se ainda que para 10%,20%,30%, e mesmo para 40% de carga de dados o atraso médio é praticamente imperceptível aos olhos de um utilizador, sendo as diferenças de valores entre os dois casos muito menores. No que respeita à situação de 70% de carga o nosso simulador não se comporta da forma esperada e introduz um maior atraso que o algoritmo HRRA. Esta situação deve-se ao facto, já referido, de o simulador, para 70% de carga, estar próximo da utilização total dos recursos e não conseguir servir os pacotes em fila de espera.

4. Resultados

4.1. Introdução

Tendo sido aferido o algoritmo para uma frequência, pretende-se verificar o desempenho do simulador para mais que uma frequência, considerando apenas uma célula. Para tal, contou-se com a colaboração da operadora Telecel, disponibilizando informação real sobre os tempos médios de permanência de uma chamada numa célula e sobre o tráfego da mesma. O tempo de permanência em células rurais e urbanas está indicado na Tab. 4.1.

Célula	Rural	Urbana
Tempo de permanência	50s	25s

Tabela 4.1 - Tempos de permanência.

Note-se que, como o sistema só tem uma célula, o tempo de permanência equivale ao tempo médio de uma chamada de voz. Este será um dos parâmetros a variar nas simulações, de modo a observar o diferente comportamento do sistema para diferentes tempos médios de duração das chamadas de voz.

O tráfego de voz por portadora na *busy hour* encontra-se indicado na Tab. 4.2

Nº de portadoras	Tráfego por portadora [Erl]	
	Minímo	Máximo
1	0	2.4
2	1	3.6
3	1.2	4.4
4	1.4	5.0

Tabela 4.2 - Tráfego de voz na célula consoante a portadora.

Devido à longa duração do processo de simulação não foi possível analisar todas as situações. Optou-se então por, numa primeira fase, simular a situação em que se tem 4 frequências com um tráfego total de 20.0 Erl, para os dois tempos de duração das chamadas. Esta situação é a mais distinta da estudada no capítulo 3 (1 só frequência) e é também mais interessante porque o sistema está mais carregado em termos de volume de tráfego. Numa segunda fase, simulou-se também para 4 frequências mas variando o tráfego entre o valor

mínimo, médio e máximo, mantendo constante o ritmo de chegadas de chamadas de voz λ, obtendo-se diferentes tempos de duração média para as mesmas atendendo à relação,

$$T = A*\lambda \tag{4.1}$$

Na Tab. 4.3 apresentam-se os tempos utilizados.

Tráfego para 4 portadoras	5,6	14,4	20
Ritmo de chegadas	2.5	2.5	2.5
Duração das chamadas	14	36	50

Tabela 4.3 - Tempos de duração média das chamadas de voz.

Para calcular o volume de dados a introduzir no sistema efectuou-se um cálculo idêntico ao utilizado na simulação para uma frequência, onde se considerou o uso do *coding scheme-1* a que corresponde um ritmo de 9.05 kb/s e 30 canais (8 canais por frequência – 2 canais para controlo) para tráfego. O ritmo multiplicado pelo número de canais irá corresponder a 100% da capacidade do sistema. Na Tab. 4.4 estão representados o número de pacotes a introduzir no simulador conforme a percentagem de volume de dados.

% de capacidade	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Pacotes IP/s	6,3	12,7	19,0	25,3	31,7	38,0
Ritmo de Chegada	0,158	0,079	0,053	0,039	0,032	0,026
Total Chegadas/hora	22794	136763	205145	273526	341908	410289

Tabela 4.4 - Número de pacotes a introduzir no sistema.

O volume de dados pode ser de tal ordem que sature o sistema, o que corresponde à situação em que o sistema não consegue esvaziar a fila de espera porque o ritmo de transmissão de pacotes é demasiado elevado (note-se que se está a considerar que a fila de espera é infinita). Como estamos a usar 20 Erl para o tráfego de voz, isto equivale, estatisticamente falando, a dizer que estão ocupados em média 20 canais para voz, ficando livres 10 (33%). Significa que, se usarmos uma carga de dados de 30% estaremos próximo da utilização total dos recursos disponíveis. Na nossa simulação, devido à longa duração da mesma, só se variou o volume de dados entre 10%, 20% e 30%.

No primeiro cenário a simular temos dois casos distintos, T=25 s e T=50 s, ambos para 30 canais e 20 Erl. O ritmo de chegada de chamadas (λ) será, consequentemente, diferente para cada caso. Como se simularam 3 horas de chamadas, o número de amostras a gerar será também diferente para cada caso. Apresenta-se na Tab. 4.5 o número de chamadas de voz geradas para os dois tempos e consoante o tráfego.

Tráfego [Erl]	Nº de chamadas para T=25 s	Nº de chamadas para T=50 s
0	0	0
5	2160	1080
10	4320	2160
15	6480	3240
20	8640	4320

Tabela 4.5 - Número de chamadas de voz geradas consoante o tráfego

Este número é calculado dividindo o tempo de simulação (em segundos) pelo ritmo de chegadas das chamadas. Pode-se observar que, como o tempo de duração das chamadas na célula urbana é metade da rural, o número de chamadas a gerar, para as 3 horas de simulação nessa célula, vai ser o dobro. Na nossa primeira situação de simulação (20 Erl) vamos ter de gerar até 8640 e 4320 chamadas de voz para T=25 s e T=50 s respectivamente.

O número de canais dedicados a GPRS, outro parâmetro importante a utilizar nas simulações, optou-se por o fazer variar entre 0, 4, 8 e 12 canais de entre os 30 disponíveis.

Note-se que, para cada caso de simulação, todos os resultados resultam de uma média de 30 simulações que, não sendo um valor ideal, foi considerado aceitável, para a obtenção de resultados fiáveis.

4.3. Chamadas de voz

Tendo simulado para 30 canais com 20 Erl e tempos de duração das chamadas de voz de T=25 s e T=50 s obtiveram-se, para a probabilidade de bloqueio, os resultados apresentados

nas Fig. 4.1 (T=25 s) e Fig. 4.2 (T=50 s). Representando-se também o valor máximo e o mínimo obtido nas 30 simulações efectuadas.

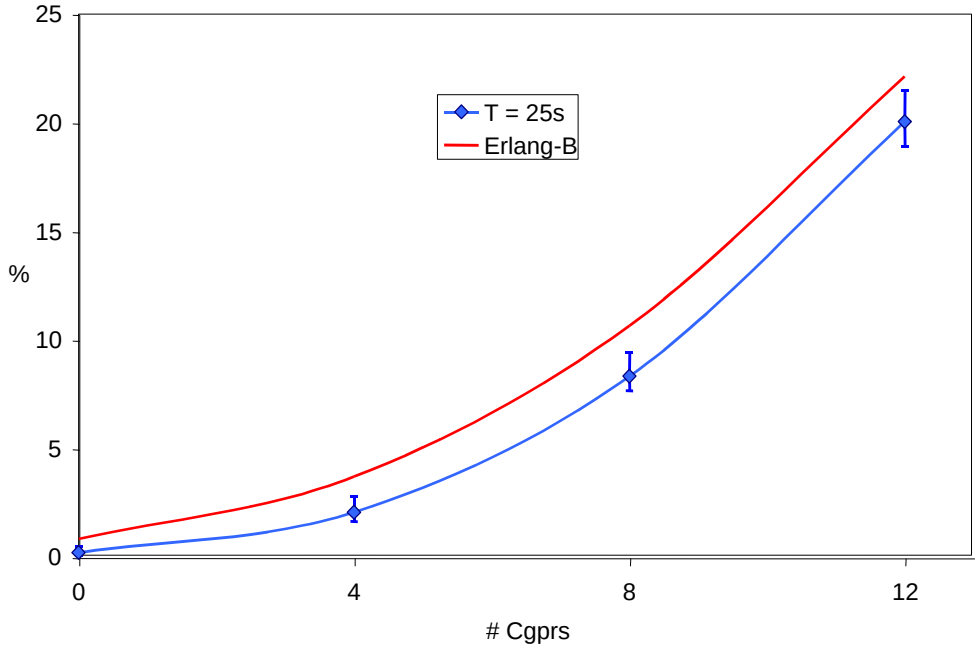


Figura 4.1 - Probabilidade de bloqueio para T=25 s.

Como se pode observar, a probabilidade de bloqueio apresenta valores menores que o modelo de Erlang-B para ambos os casos, o que de certa forma é o resultado esperado dado o gerador não ser perfeito e não conseguir estabilizar devido ao reduzido número de amostras.

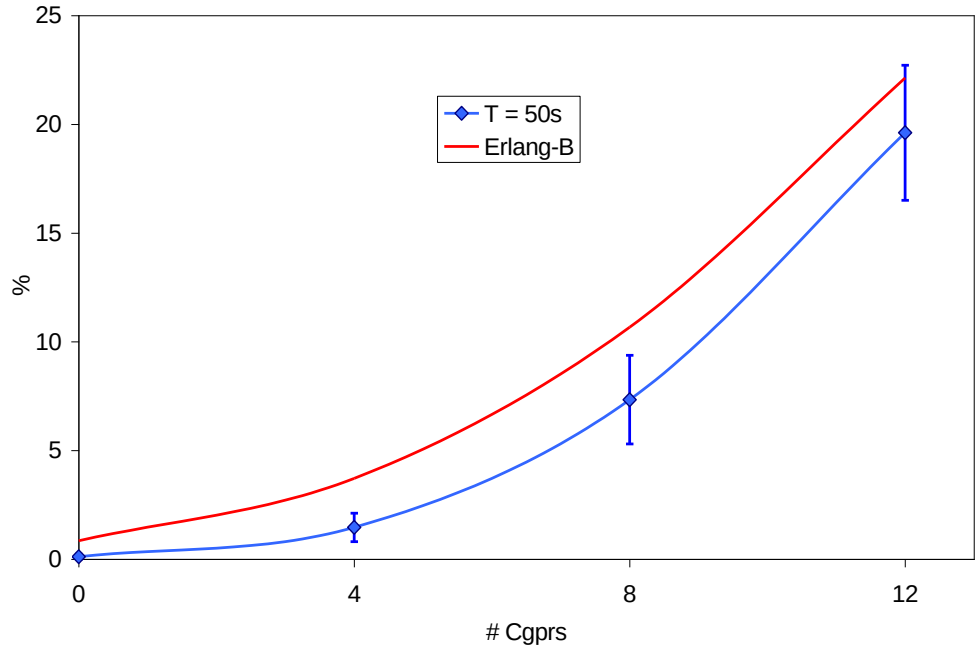


Figura 4.2 - Probabilidade de bloqueio para T=50 s.

Na Fig. 4.3 está representada a comparação da probabilidade de bloqueio simulada para os dois tempos. Pode-se verificar que o resultado para T=25 s está mais próximo do teórico e que a diferença entre o valor máximo e mínimo obtido nesse caso é menor. Isto deve-se ao número de amostras geradas. Como analisámos anteriormente, o gerador vai gerar o dobro das chamadas de voz para T=25 s, o que resulta numa maior estabilidade do gerador, e numa maior aproximação com o modelo de Erlang-B. Outro aspecto a reter dos gráficos anteriores é o aumento considerável da probabilidade de bloqueio quando se aumenta o número de canais dedicados a GPRS.

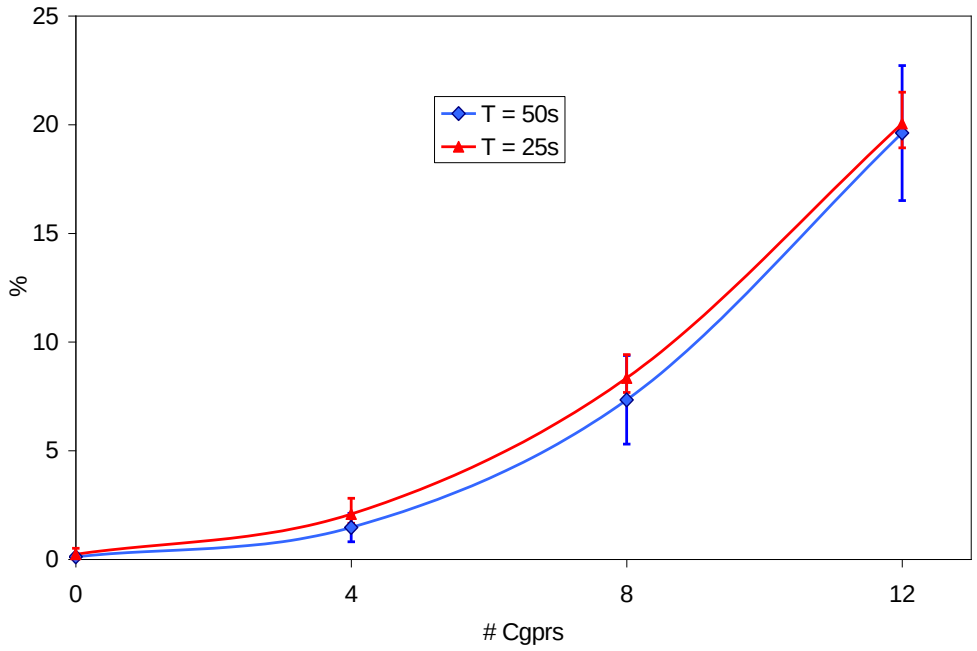


Figura 4.3 - Comparação entre as Probabilidade de bloqueio para T=25 s e T=50 s.

4.4. Transmissão de dados

No que respeita aos pacotes de dados, apresentamos na Fig. 4.4 o atraso médio de pacote para T=25 s consoante o volume de dados introduzido e para os vários canais dedicados a GPRS. Observa-se que o aumento do tempo de atraso, quando se aumenta a carga de dados, tem um comportamento quase linear no gráfico em escala logarítmica, ou seja, tem um comportamento exponencial, donde se conclui que o aumento do volume de dados implica um grande aumento do tempo médio de atraso que culminará na saturação do sistema. O atraso aumenta também com a diminuição dos canais dedicados a GPRS.

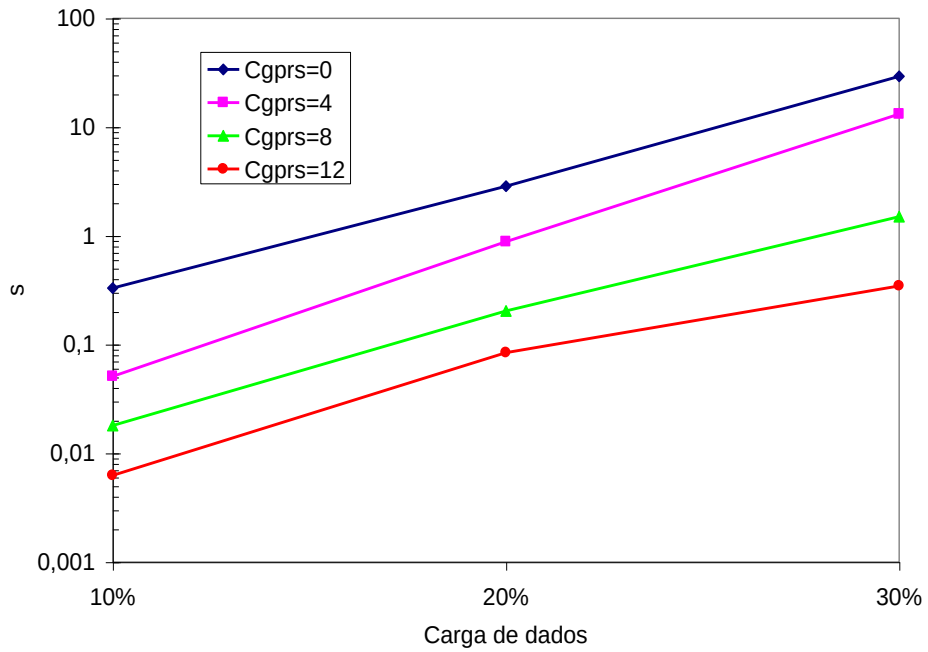


Figura 4.4 – Atraso médio de pacotes no caso T=25 em função da carga de dados

Na Fig. 4.5 está representado também o atraso médio de pacote para T=25 s, em função dos canais dedicados e para as várias percentagens de volume de dados. Observa-se, como era previsto, que o atraso aumenta para cargas de dados maiores, e que diminui à medida que se aumenta número de canais dedicados a dados. Refira-se, por exemplo, que quantitativamente, para 20% de carga de dados, o uso de 0 canais dedicados implica um atraso médio de 3 s, enquanto para 4 Cgprs o atraso é de 1 s. Se se utilizar 12 canais dedicados, o atraso diminui para 0,1 s, o que significa que a maior parte dos pacotes não sofre atraso.

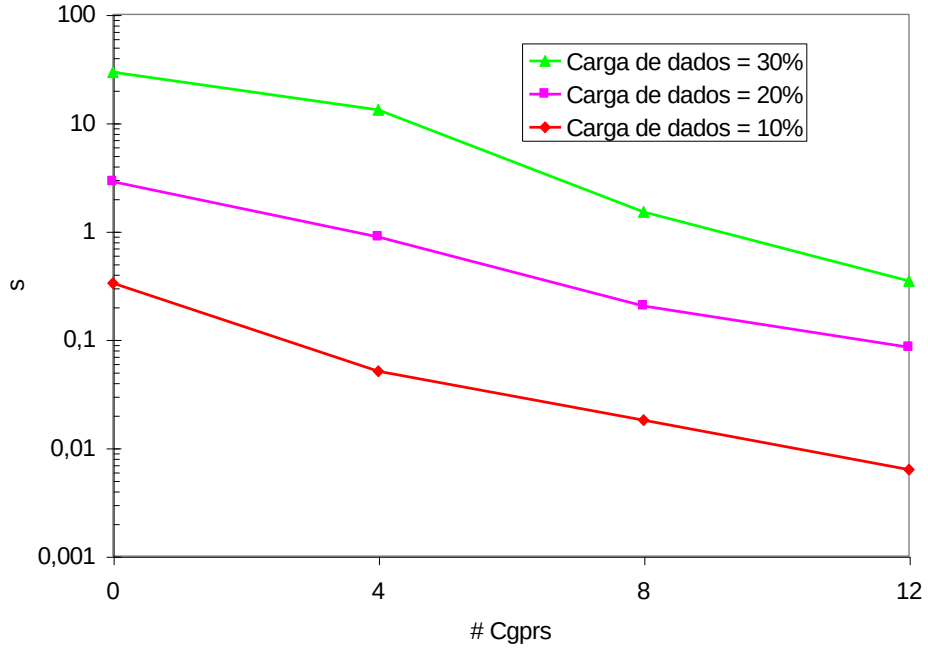


Figura 4.5 – Atraso médio de pacotes no caso T=25 em função do #Cgprs

Para T=50 s observa-se o mesmo tipo de comportamento, ou seja, um crescimento do atraso médio de pacote com o aumento da carga de dados e com a diminuição dos canais dedicados. Estas situações estão representadas nas Fig. 4.6 e Fig. 4.7. A principal diferença entre este caso e o anterior está no valor do atraso médio, que para chamadas de voz com duração média mais elevada (50 s) aumenta. Isto significa que o sistema comporta-se melhor, em termos de atraso, se as chamadas de voz forem mais curtas (T=25 s) não ocupando tanto tempo o sistema, apesar de serem, em número, o dobro das chamadas que são realizadas para T=50. Como já foi referido anteriormente, o número total de chamadas bloqueadas é maior para T=25 s o que implica uma maior largura de banda disponível para a transferência de pacotes.

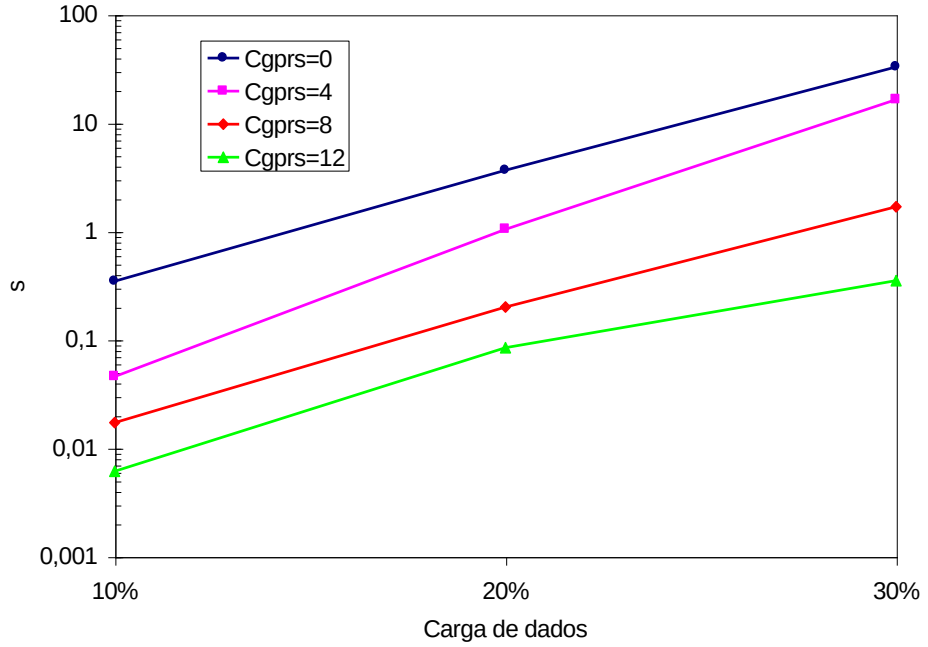


Figura 4.6 – Atraso médio de pacotes no caso T=50 em função da carga de dados

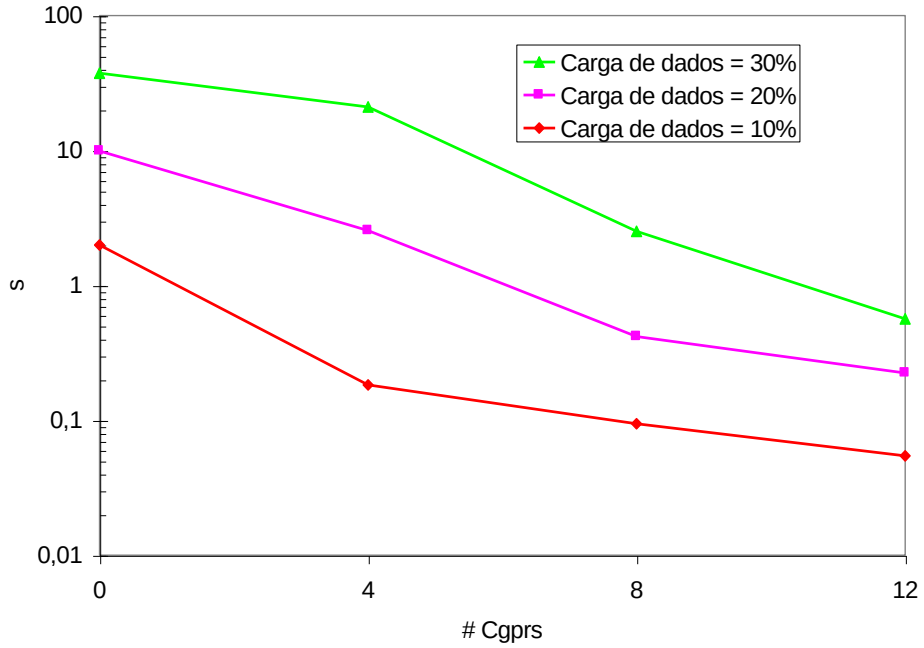


Figura 4.7 – Atraso médio de pacotes no caso T=50 em função do # Cgprs

Na Fig. 4.8 são representadas as curvas de comparação entre os dois casos (T=25 s e T=50) variando a carga de dados e para os vários Cgprs. Pode-se observar claramente que o atraso médio é sempre superior para T=50 s, com um mesmo número de canais dedicados, para qualquer carga de dados.

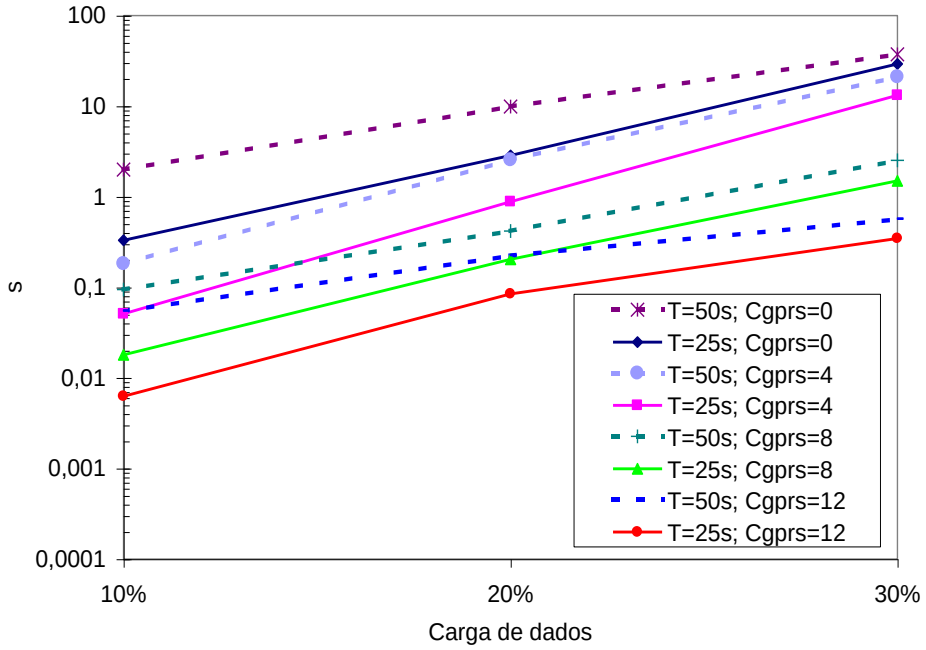


Figura 4.8 – Comparação do atraso médio de pacotes em função da carga de dados

Note-se que o aumento de canais dedicados a dados nem sempre compensa o aumento da duração das chamadas de voz. Por exemplo para 12 Cgprs com T=50 s o sistema comporta-se pior, para 10%e 20%, do que para 8 Cgprs e T=25 s.

Na Fig. 4.9 temos a comparação dos dois casos, com a variação do número de canais dedicados e para as várias cargas de dados. Atente-se ao facto das diferenças entre as curvas correspondentes a um mesmo valor de carga de dados diminuírem, em termos percentuais, à medida que a carga de dados aumenta, ou seja, quando o volume de dados for suficiente para saturar o sistema o atraso médio vai tender para um mesmo valor, independentemente de se usar T=25 s ou T=50 s.

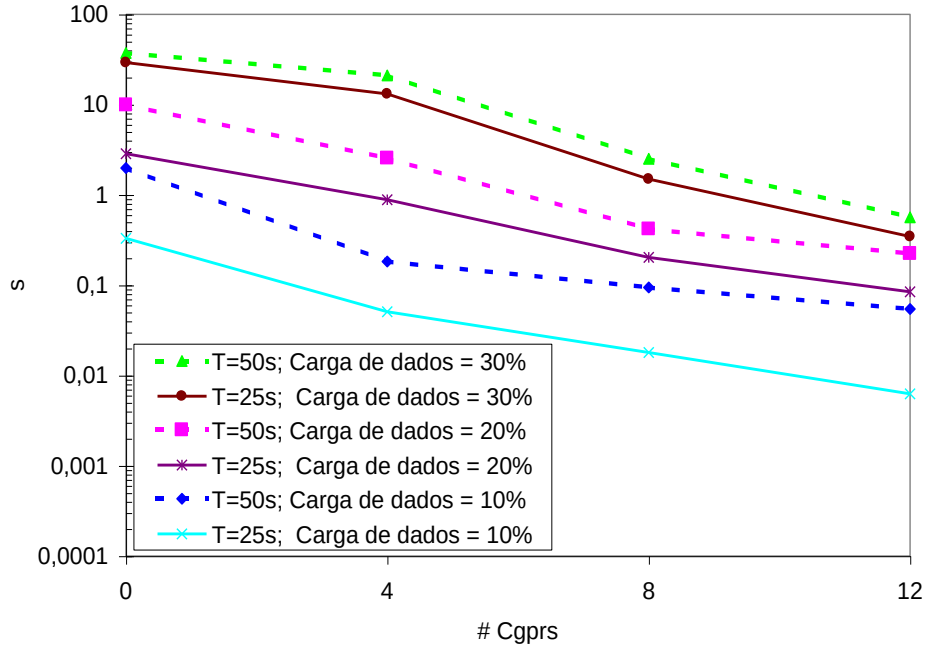


Figura 4.9 – Comparação do atraso médio de pacotes em função do # Cgprs

A probabilidade de ocorrência de atraso é outro resultado com interesse para analisar visto ser uma indicação, em termos percentuais, de quantos pacotes sofreram um dado atraso. Na Fig. 4.10 está representada a probabilidade de ocorrência para T=25 s e 30% de carga de dados para os vários canais dedicados.

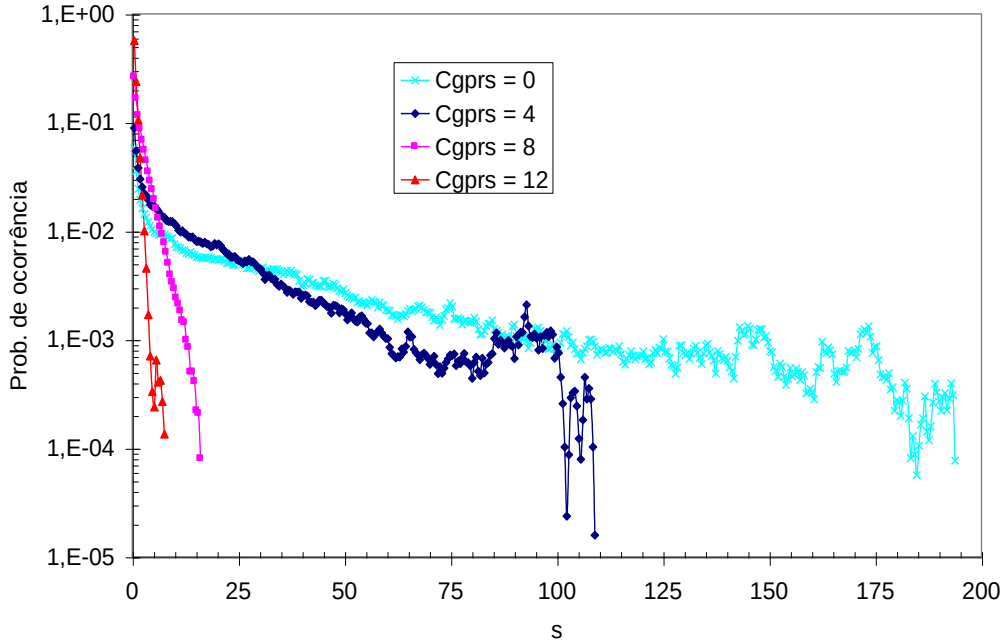


Figura 4.10 - Distribuição de probabilidade para 30% de carga de dados e T=25 s.

Podemos observar que, quanto maior for o número de canais dedicados, maior será o número de pacotes a serem servidos com menor tempo de atraso. Como o número de pacotes a ser servido é o mesmo para todos os Cgprs, implica que os pacotes são servidos mais rapidamente para o caso em que Cgprs=12. Para Cgprs igual 0 ou 4 o número de pacotes a ser servido nos primeiros 5 segundos decresce significativamente em relação aos outros casos, observando-se claramente que o atraso se vai prolongar por muito mais tempo. Nestas duas últimas curvas, mas especialmente para 0 Cgprs, o declive da mesma não é muito grande o que indica que o sistema se está a aproximar da saturação e não consegue processar em tempo útil os pacotes.

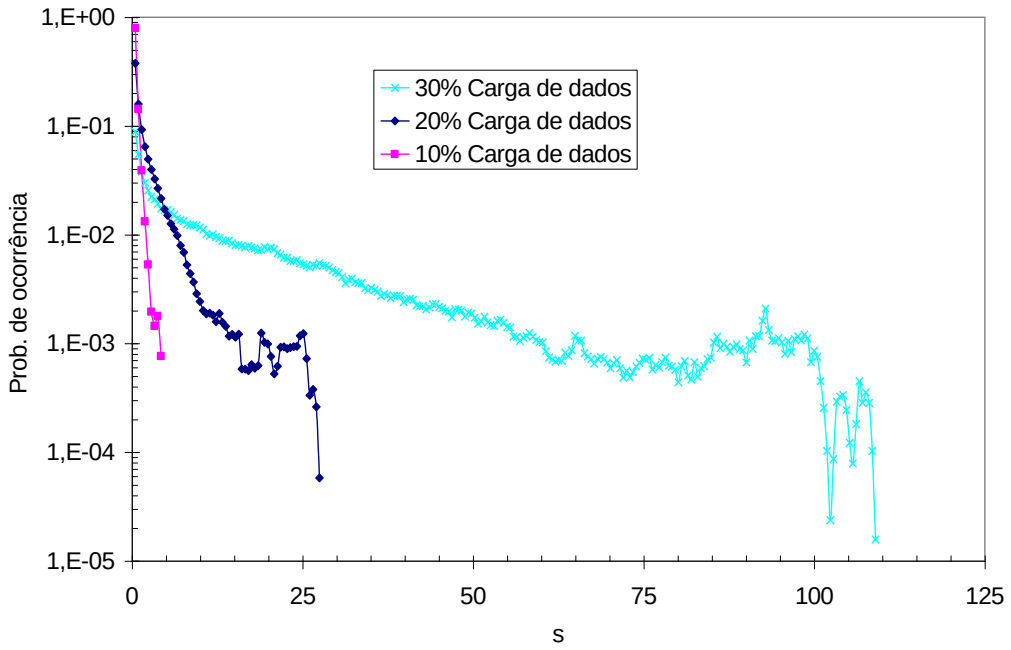


Figura 4.11 - Distribuição de probabilidade para 4 Cgprs e T=25 s.

Na Fig. 4.11 está representada a probabilidade de ocorrência para T=25 s e 4 Cgprs para todas as cargas de dados estudadas. Observa-se que para 10% de carga de dados, o sistema consegue servir rapidamente todos os pacotes. À medida que a percentagem aumenta o sistema vai ficando sobrecarregado, devido ao aumento do número de pacotes, e o atraso aumenta. É de destacar a diferença enorme entre a curva de 20% e a de 30%, que demonstra bem a evolução do sistema quando caminha para a total utilização dos recursos. Note-se que o final das curvas das duas figuras anteriores é instável, o que se deve a não haver nessa região um tão grande número de amostras e o atraso não estabilizar.

Para T=50 s apresenta-se os resultados para a probabilidade de ocorrência de atraso, no anexo B.2.3 em que verificamos o mesmo tipo de andamento, embora com outros valores.

Em termos comparativos apresentamos na Fig. 4.12, para 30% de carga e para 4 e 8 canais dedicados, as curvas referentes à probabilidade de ocorrência, para os dois tempos. Confirma-se que as curvas têm o mesmo tipo de andamento, mas para T=50 s o sistema demora mais tempo a processar os pacotes, pelo que o atraso médio é maior nesta situação, como foi visto anteriormente (Fig.4.8).

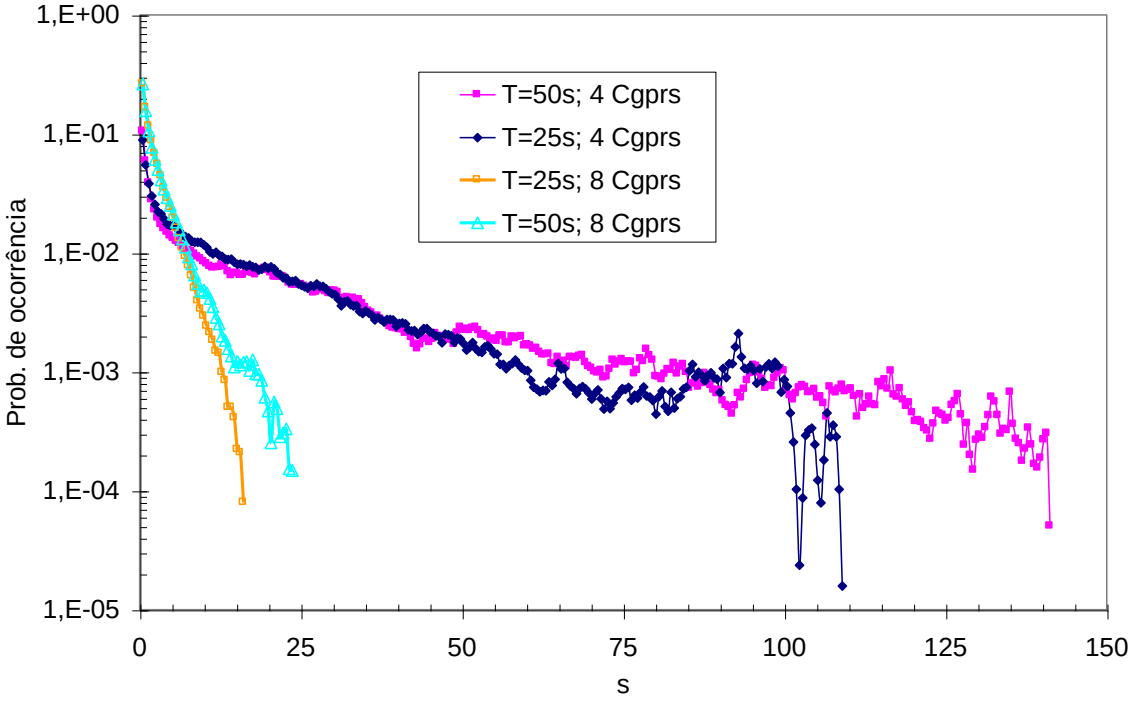


Figura 4.12 - Comparação da distribuição de probabilidade para 30% de carga de dados.

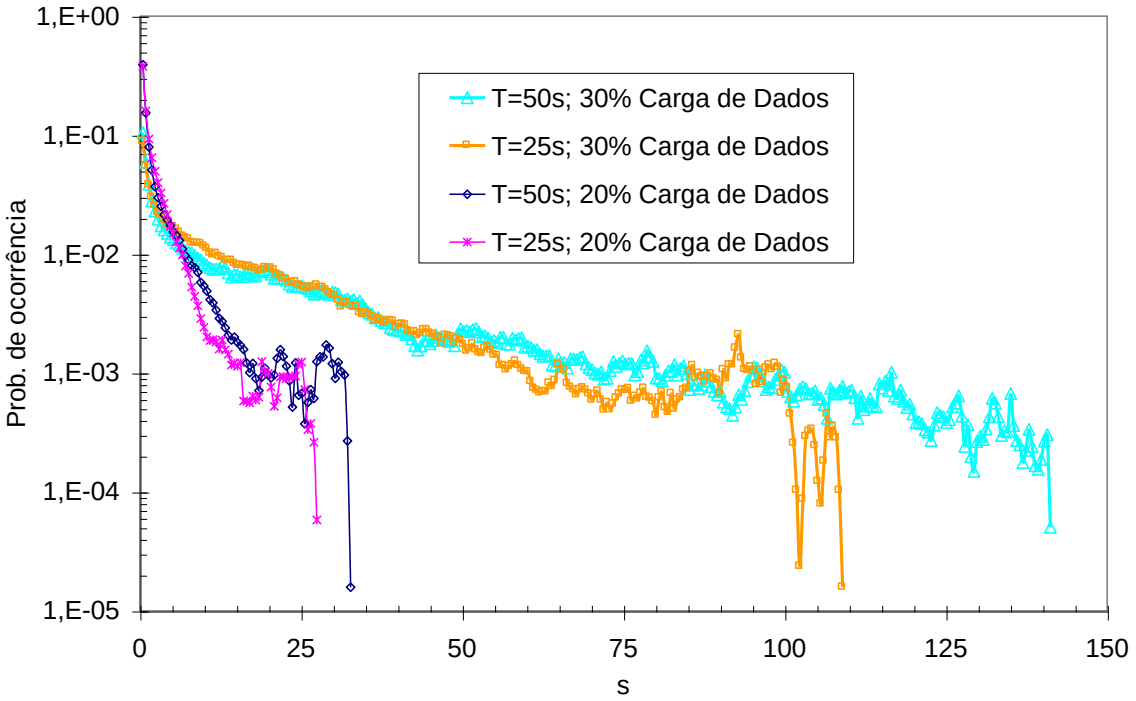


Figura 4.13 – Comparação da distribuição de probabilidade para 4 Cgprs.

Na Fig. 4.13 temos de novo uma comparação, mas para 4 Cgprs e para 20% e 30% de carga de dados. Também aqui se observa que para T=50 s o atraso se prolonga por mais tempo do que para T=25 s. Outras comparações estão realizadas no anexo B.2.4

O atraso máximo é uma medida que pode ser também interessante de analisar. Na Fig. 4.14 está representado esse valor, consoante a carga de dados e para os vários Cgprs, para a situação de T=25 s. Observa-se que o atraso máximo cresce com o aumento da carga e com a diminuição do Cgprs, o que vai de encontro aos resultados já apresentados.

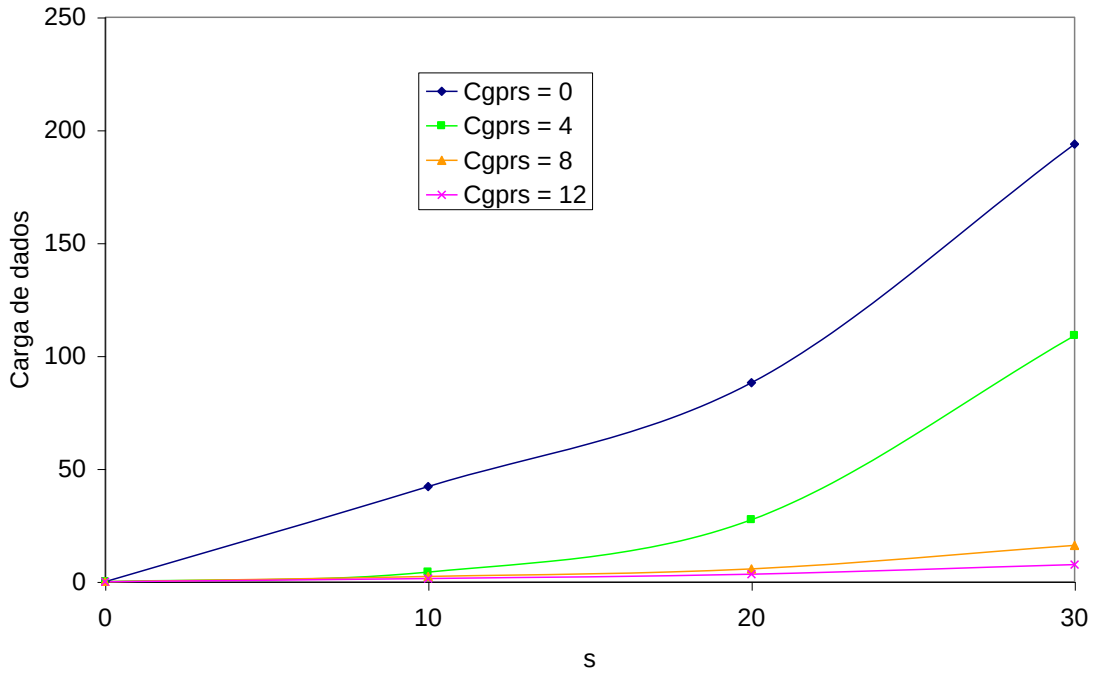


Figura 4.14– Atraso máximo para T=25 s em função da carga de dados.

Na Fig. 4.15 temos o atraso máximo para T=25 s, mas em função de Cgprs e para todos as cargas de dados. Novamente se observa o comportamento esperado, pelo que importa destacar os valores quantitativos desses atrasos. Das curvas apresentadas destaca-se a curva dos 30% de carga que tem um crescimento muito mais acentuado com o aumento dos canais dedicados. Esta situação é devida ao sistema estar próximo da utilização total dos recursos disponíveis, ou seja, mais perto da saturação. Por essa razão o valor do atraso máximo, no pior caso (0 Cgprs) quase atinge os 200 s. Para as outras percentagens os valores não são tão elevados e, se se usar pelo menos 4 canais dedicados, o atraso máximo reduz-se para um valor próximo dos 25 s para 20% e 5 s para 10% de carga.

Para duração de chamadas de voz de 50 s os gráficos são apresentados no anexo B.3, verificando-se o mesmo comportamento que o caso anterior.

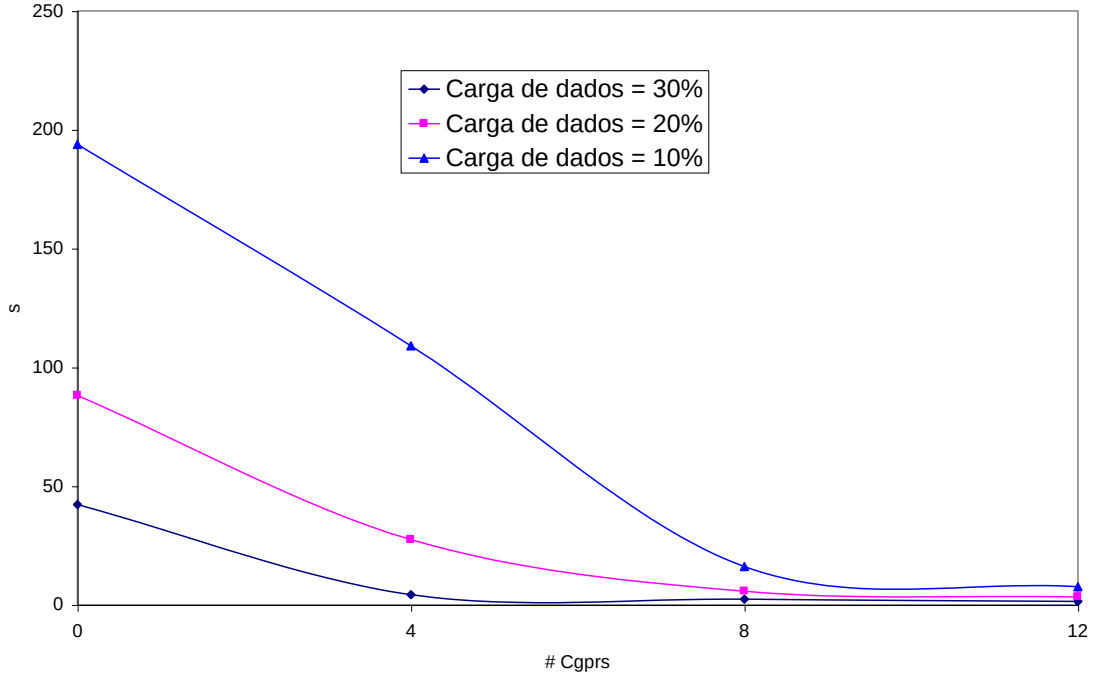


Figura 4.15 – Atraso máximo para T=25s em função do # Cgprs.

Interessa talvez mostrar a comparação para alguns casos entre as duas situações estudas. Escolhemos mostrar a comparação do atraso máximo de 4 e 8 Cgprs consoante as cargas de dados, Fig. 4.16.

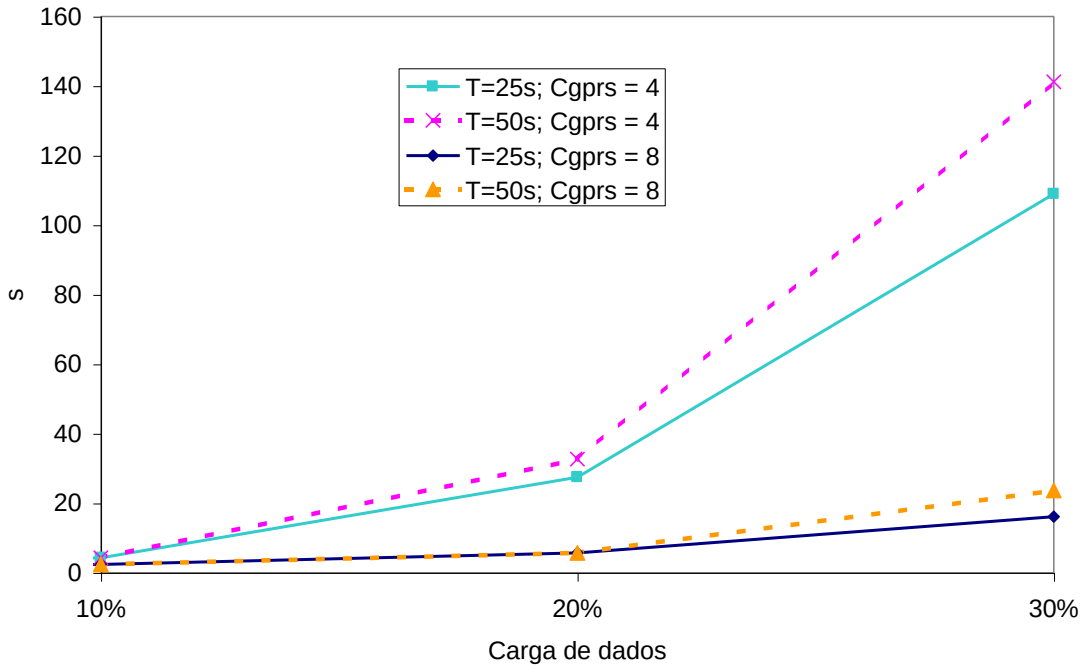


Figura 4.16 – Comparação do atraso máximo para T=25s e 50s em função da carga de dados.

Como se pode ver para o uso de 8 (ou mais) canais dedicados o atraso diminui bastante mesmo para 30% de carga. Para 4 Cgprs o atraso aumenta substancialmente para 30% de carga de dados.

Na Fig. 4.17 temos a comparação para 20% e 30% de carga consoante os vários canais dedicados. Nesta situação nota-se ainda mais o crescimento do atraso máximo para 30%, T=50 s e 0 Cgprs, que chega a ultrapassar os 300 s, valor bem significativo da próximidade da saturação do sistema quando comparado com o mesmo valor para 20% de carga, menos de 200s.

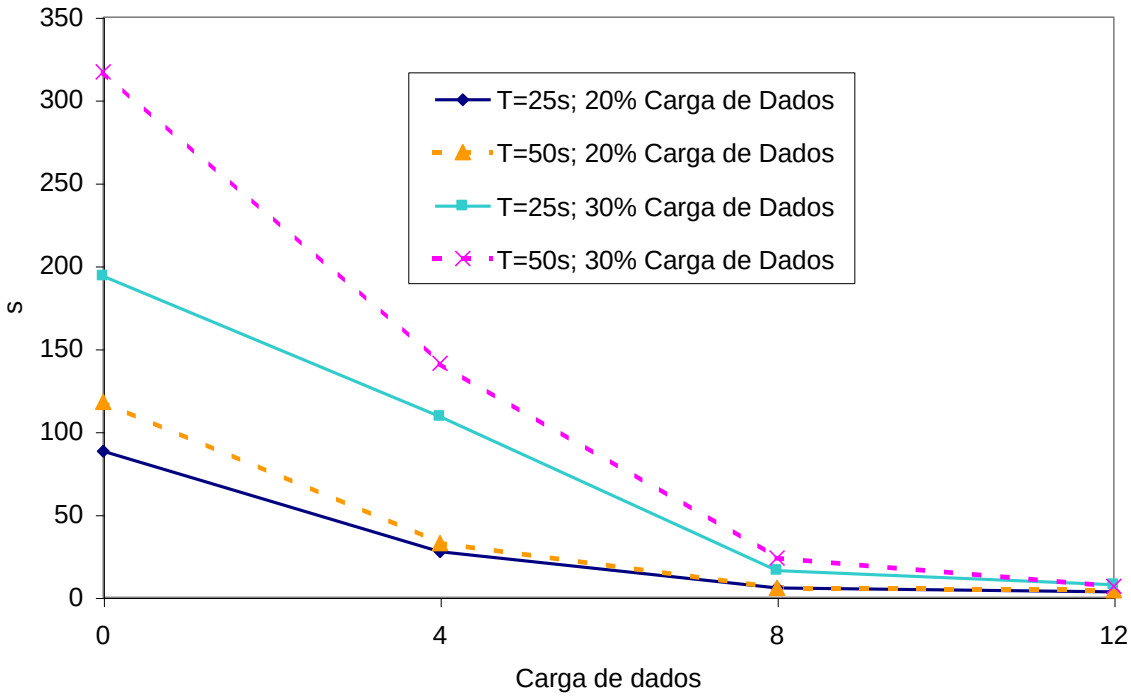


Figura 4.17 – Comparação do atraso máximo para T=25s e T=50s em função do Cgprs.

4.5 Variação do Tráfego

Nesta 2ª simulação o objectivo é verificar o comportamento do sistema quando se varia o tráfego de voz, parâmetro que na 1ª simulação era constante. Temos as seguintes condições de simulação: 4 frequências, variação do tráfego entre o valor mínimo, médio e máximo dos valores fornecidos pela operadora Telecel, o ritmo de chegadas de voz mantendo-se constante (λ=2,5), obtendo os tempos de duração de chamadas de voz da Tab. 4.3. Devido ao pouco tempo disponível apenas se simulou um só caso, para 8 Cgprs e 30% de carga de dados.

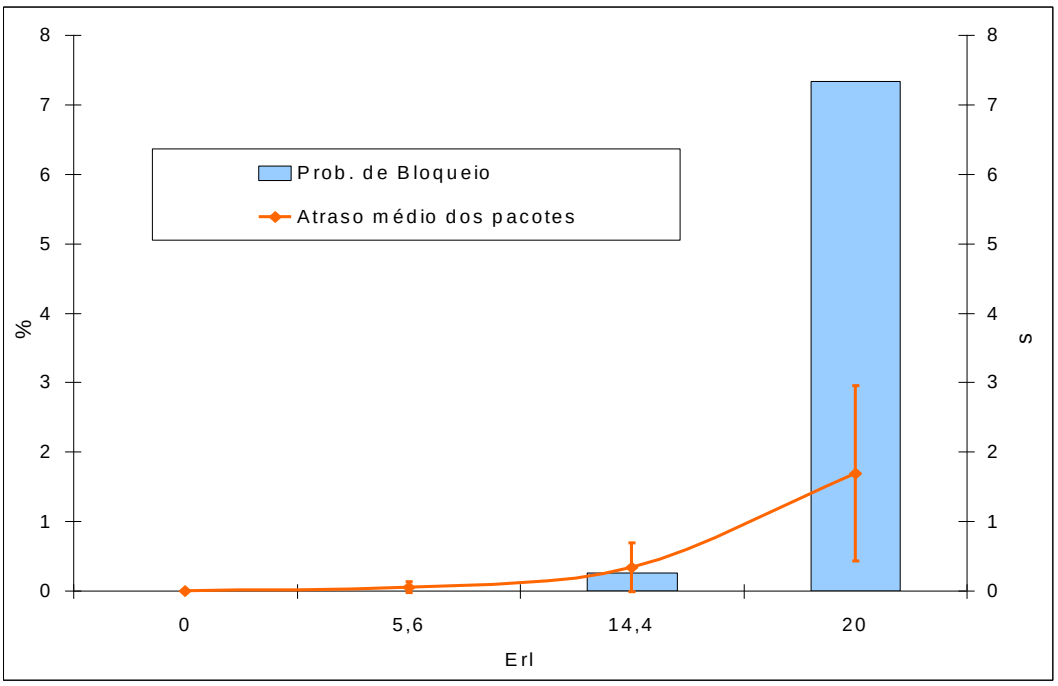


Figura 4.18 – Probabilidade de bloqueio e atraso médio de pacotes para λ = 2,5, 30% carga de dados e 8 Cgprs.

Na Fig. 4.18 está representada a probabilidade de bloqueio e o atraso médio de pacotes. Pode-se observar que a probabilidade de bloqueio aumenta à medida que o tráfego de voz aumenta, o que é natural visto o tempo médio das chamadas de voz aumentar. O crescimento do atraso médio dos pacotes será também reflexo do aumento do tráfego de voz, visto os recursos estarem mais tempo ocupados com chamadas de voz e consequentemente os pacotes serem atrasados mais vezes. Para o atraso médio apresenta-se também os valores máximos e mínimos obtidos nas 30 simulações para os diferentes casos.

+Na Fig. 4.19 representa-se a probabilidade de ocorrência para os três valores de tráfego estudados. Vê-se claramente, através da evolução dos atrasos, que para 20 Erl o sistema começa a ficar mais carregado e o atraso prolonga-se mais no tempo. Refira-se que para 5,6 Erl e 14,4 Erl o tráfego de voz ocupa, estatisticamente falando, respectivamente 5,6 e 14,4 canais numa unidade de tempo (usualmente 1 hora). Como 30% de carga de dados ocupam 9, canais na unidade de tempo, ficam respectivamente 15,4 e 6,6 canais por utilizar, daí, nestes dois casos, o atraso ser muito menor. Esta situação também se vai reflectir no valor do atraso máximo que é muito menor para esses dois casos quando comparado com a situação de 20 Erl, ver Fig. 4.20.

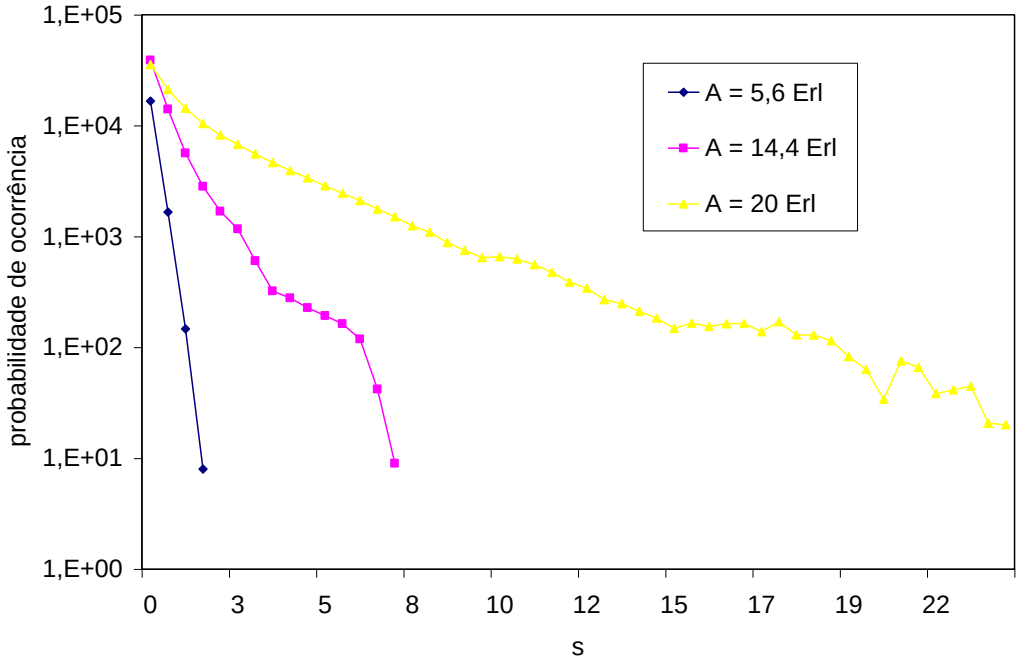


Figura 4.19 - Distribuição de probabilidade para 8 Cgprs e 30% de carga de dados, para tráfegos diferentes.

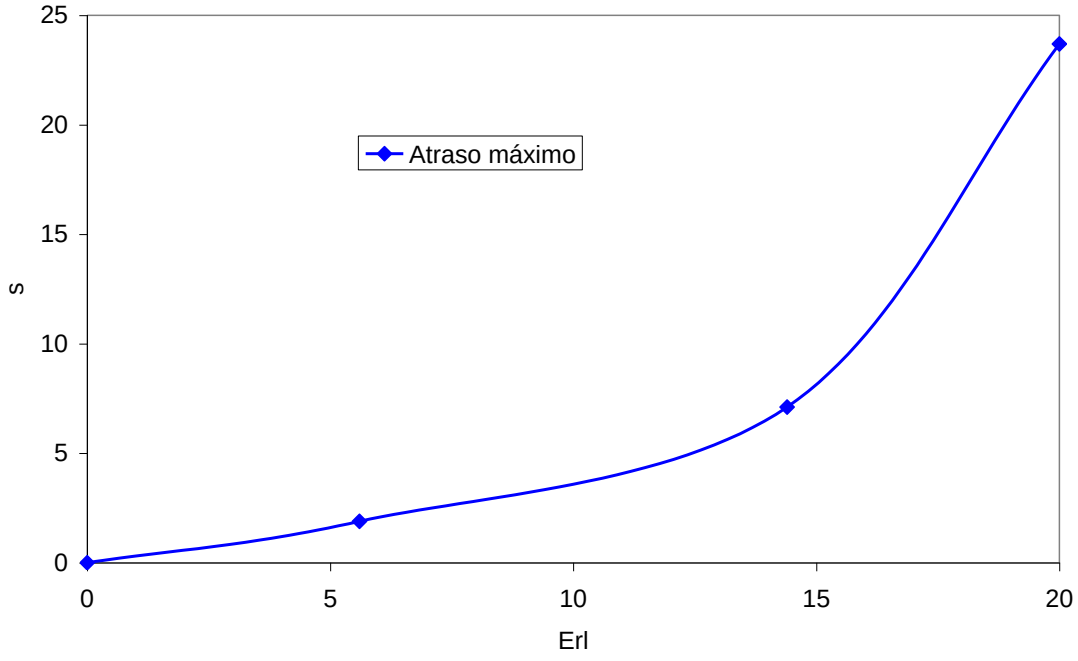


Figura 4.20 – Atraso máximo para 8 Cgprs e 30% de carga de dados, para tráfegos diferentes.

5. Conclusões e Trabalho Futuro

5.1. Intodução

O objectivo que nos propúnhamos alcançar era o estudo do comportamento da rede GSM actual, com a introdução da capacidade de transmitir pacotes associada ao GPRS. Partindo do estudo de modelos de tráfego mais usados em comunicações móveis e do algoritmo *HRRA* apresentado em [KeLi99] desenvolveu-se um simulador que nos permitiu alargar o leque de resultados já conhecidos para o desempenho do algoritmo HRRA. Sendo a principal limitação dos resultados conhecidos a inexistência de dados para sistemas com mais de uma frequência, optou-se por centrar todas as atenções nesse aspecto.

5.2 Conclusões

As principais conclusões obtidas durante a procura de um modelo misto de voz dados foram:

- Presentemente ainda não foi desenvolvido um modelo consensual para a modelação de tráfego misto, voz e dados, em redes de comunicação, apresentado-se como a melhor solução o recurso a modelos bem estudados separados para voz e dados.
- A evolução que as redes de pacotes e em particular a Internet têm tido, fazem com que o tipo tráfego de dados tenda a ser aleatório, levantando problemas na definição correcta de modelos destinados à transmissão de dados.
- Para o aumento da largura de banda necessária e do número e tipo de fontes nas redes de dados actuais, os modelos de tráfego mais antigos são inadequados.
- Os modelos de voz mais antigos, como é o caso do Erlang-B, apesar de serem apenas razoavelmente bons encontram-se largamente estudados e são por isso frequentemente usados para modelação pouco exigente de sistemas de voz.

Depois de verificarmos a inexistência de um modelo suficientemente bom para cumprir o objectivo do trabalho, decidiu-se recorrer à simulação para a obtenção dos resultados pretendidos. O modelo *HRRA* revelou ser a única opção de fácil execução apresentada para o algoritmo do simulador.

Houve, no entanto, que aferir a nossa implementação do algoritmo, tal como foi apresentado no capitulo 3, revelando-se esta aceitável, considerando as aproximações feitas a longo do seu desenvolvimento. Essas aproximações efectuadas foram para encurtar, tanto quanto possível, os períodos de simulação, tentando sempre não sacrificar a exactidão dos resultados. O mais sério limite à obtenção de resultados e respostas revelou ser o tempo despendido, quer no desenvolvimento, quer na execução do simulador.

Ao longo do trabalho, houve lugar, também, à decisão de quais os casos a simular, tendo-se optado por estudar os casos mais próximos da realidade. Para tal, estudou-se a resposta do algoritmo quando é considerado um sistema GSM no qual apenas existe uma única célula com 4 portadoras, tendo-se tipicamente nesse caso 32 canais lógicos, dos quais apenas 30 são usados para tráfego de voz. A estatística do tráfego de voz foi estudada e considerada aproximadamente Erlang-B, tendo os parâmetros dessa estatística sido disponibilizados pela operadora Telecel.

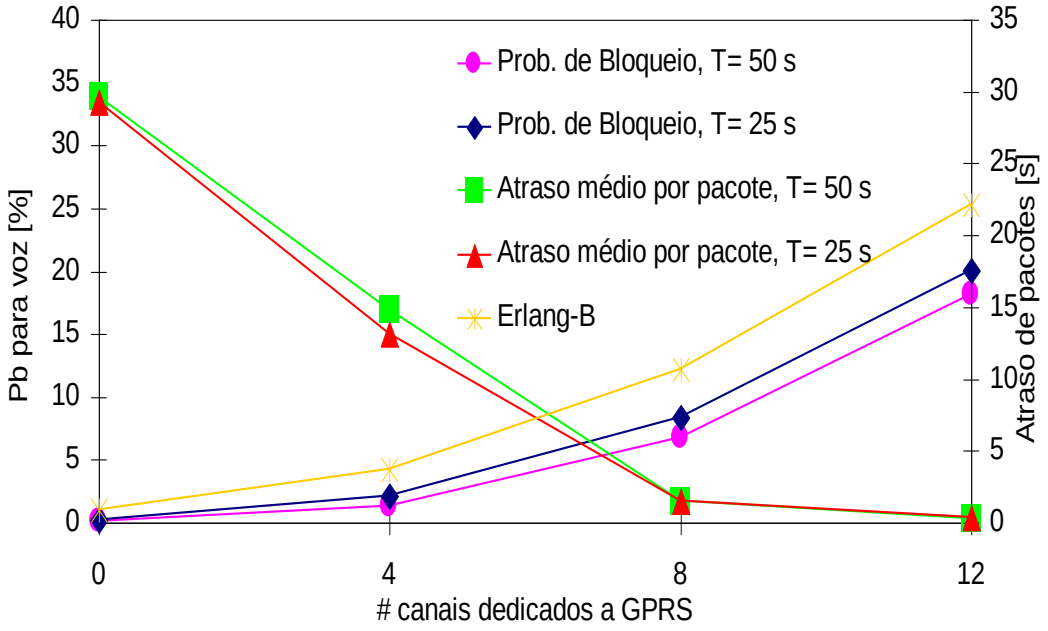
Dos resultado da simulação, podemos concluir que a probabilidade de bloqueio das chamadas de voz aumenta, seguindo a curva de Erlang-B, com o aumento do número de canais dedicados à transmissão de pacotes. As transmissões de dados são, no entanto, pouco afectadas pelo número de canais dedicados a dados para situações em que a carga do sistema é baixa. Assim, para sistemas pouco carregados, a existência de canais dedicados exclusivamente a dados apresenta poucos benefícios para o desempenho nas transmissões de pacotes.

Com o aumentar da carga imposta ao sistema, a dimensão da fila de espera dos pacotes que aguardam transmissão tende a aumentar, levando a que o número de pacotes atrasados e o seu atraso seja maior.

Para o caso em que não são atribuídos canais dedicados exclusivamente a dados, as chamadas de voz não são afectadas pela carga de dados imposta ao sistema. À medida que se aumenta o número de canais reservados a dados, a probabilidade de bloqueio vai aumentando também. Este aumento pode ser observado na Fig. 5.1 onde estão representadas a curvas da probabilidade de bloqueio, da curva teórica de Erlang-B e do atraso médio de pacotes em função do número de canais reservados para o tráfego de dados GPRS. Os resultados

apresentados referem-se a chamadas de voz com tempos de duração diferentes e foram obtidos para 30 canais de tráfego, 20 Erl para o tráfego de voz e uma carga de dados igual a 30% da capacidade total de transmissão.

Figura 5.1 – Probabilidade de bloqueio e atraso médio de pacotes em função do número de canais reservados à transmissão de pacotes.



Podemos concluir que o recurso a canais reservados à transmissão de dados desempenha um papel importante na qualidade de serviço oferecida aos utilizadores quando o sistema está bastante carregado. Nos casos em que o sistema apresenta níveis de ocupação de recursos baixos, o uso de canais dedicados não acarreta uma melhoria de serviço para o utilizador de dados mas prejudica claramente a probabilidade de bloqueio para as chamadas de voz.

5.3. Trabalho futuro

Ao longo do nosso trabalho foram tomadas decisões que nos conduziram num determinado sentido deixando em aberto, e por explorar, muitas outras possibilidades e opções. As decisões foram tomadas conscientemente e tendo em conta o enquadramento, as condicionantes e o objectivo final do trabalho proposto. Ainda assim, alguns desses caminhos

alternativos não explorados merecem ser referidos como opções válidas estudo em futuros trabalhos.

O estudo para mais frequências deve ser explorado, bem como outras combinações relativas ao número de canais reservados para dados e percentagens de carga. Nesse estudo seria interessante utilizar períodos diferentes de tempo, procurando analisar o tempo que o sistema leva a estabilizar. A introdução de um novo gerador com capacidade de simular aleatoriamente a geração de fontes de tráfego diferentes, i.e., simular vários tipos de serviço, seria uma boa opção tendo em vista o desenvolvimento futuro dos sistemas GPRS e UMTS acompanhando assim ,de certo modo, os desenvolvimentos em termos de serviços fornecidos aos utilizadores.

Anexo A – Aferição do algoritmo do modelo HRRA, outras figuras.

A.1 – Introdução

Neste anexo estão incluídas todas as figuras para a função de distribuição de probabilidade de atraso de pacotes, que por uma questão de espaço não foram ser integradas no relatório, essas figuras representam simulações exatamente com as mesmas condições daquelas apresentadas no capitulo 3.

A.2 - Distribuição de prob. em função da carga de dados

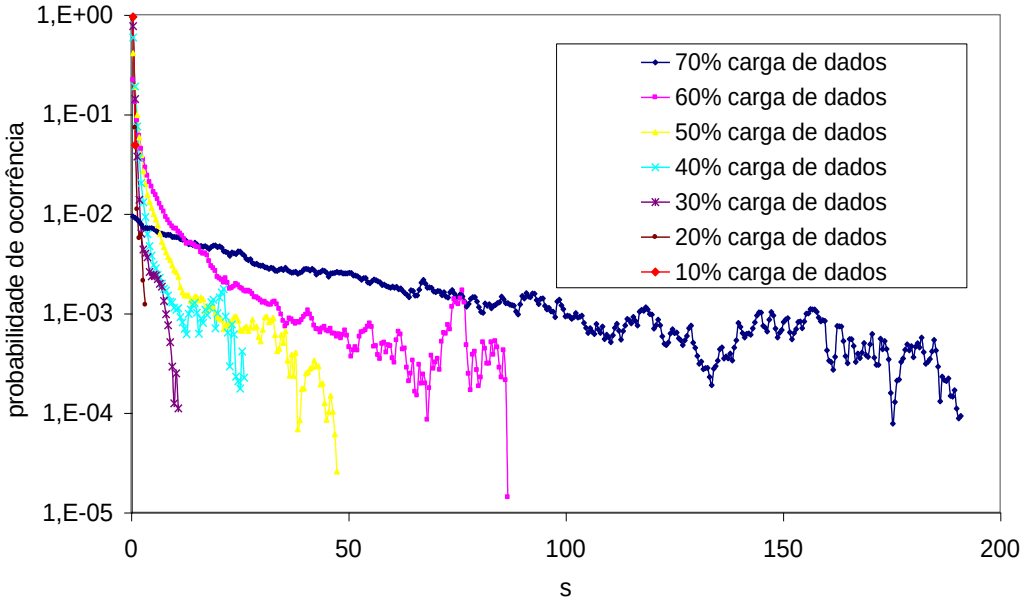


Figura A.1 – Distribuição de probabilidade de atraso de pacotes para 4 Cgprs.

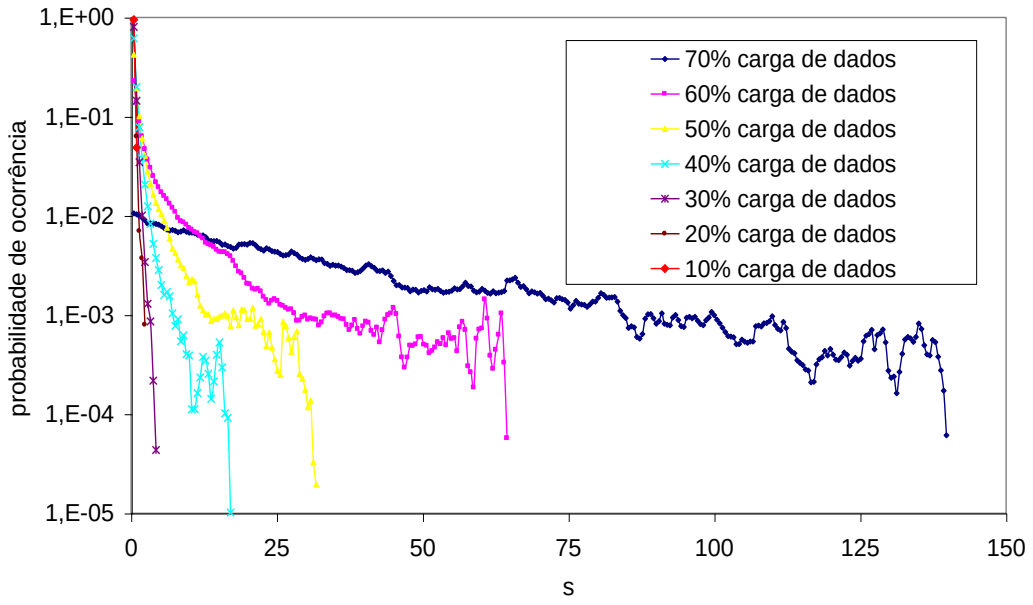


Figura A.2 – Distribuição de probabilidade de atraso de pacotes para 3 Cgprs.

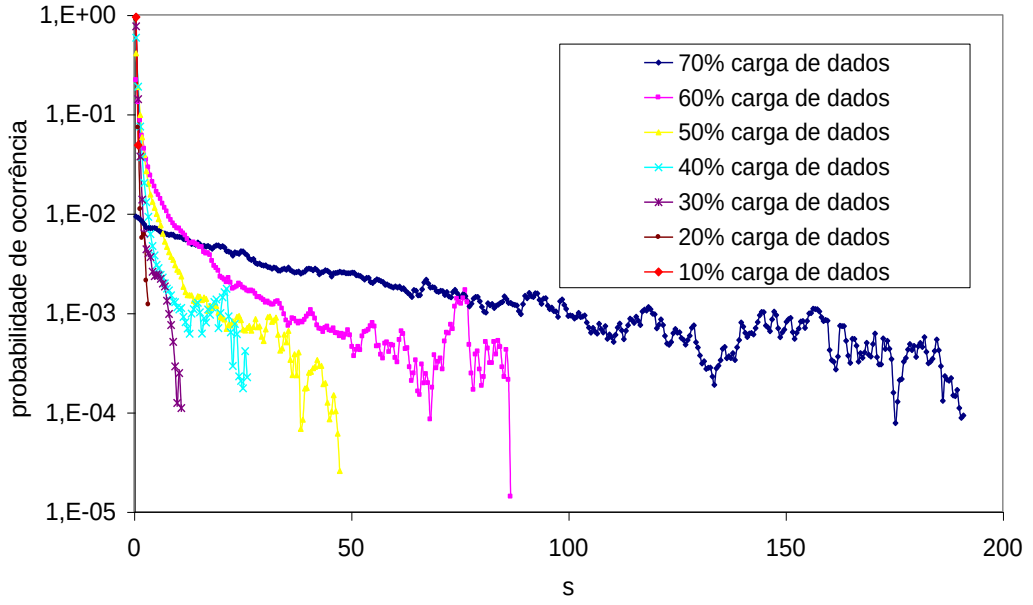


Figura A.3 – Distribuição de probabilidade de atraso de pacotes para 2 Cgprs.

A.3 Carga de dados

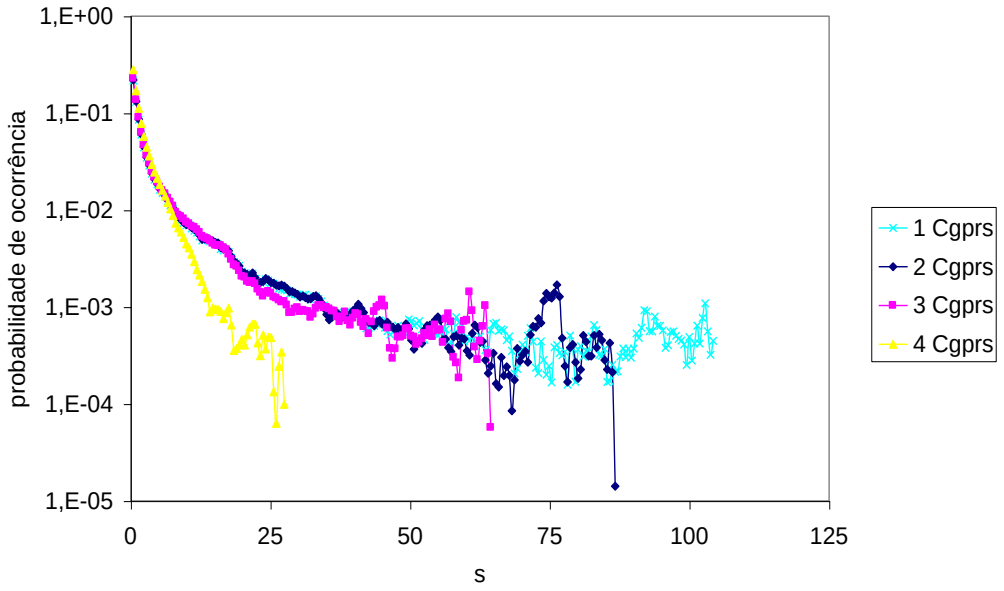


Figura A.4 – Distribuição de probabilidade de atraso de pacotes para 60% de carga de dados.

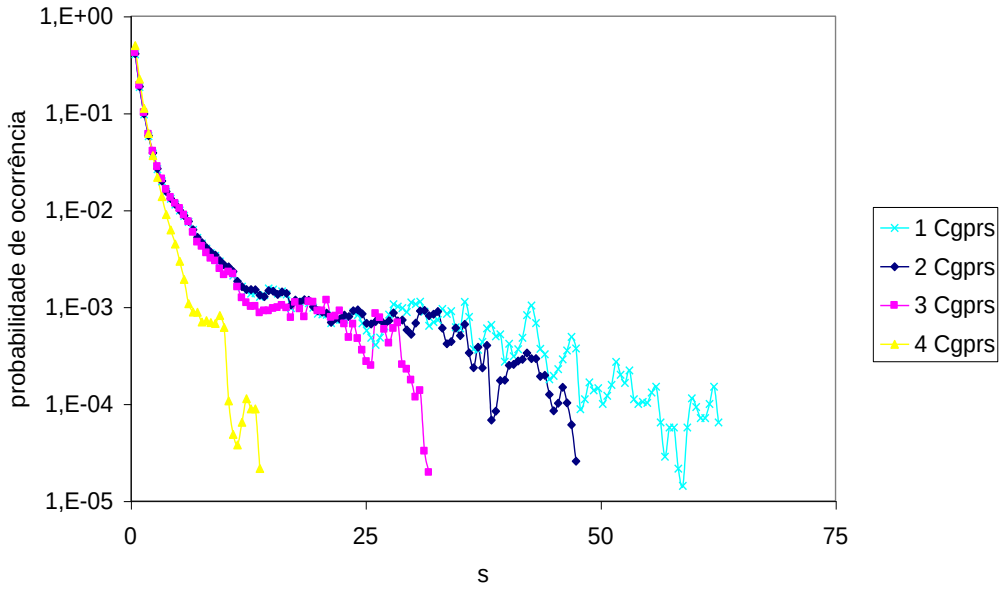


Figura A.5 – Distribuição de probabilidade de atraso de pacotes para 50% de carga de dados.

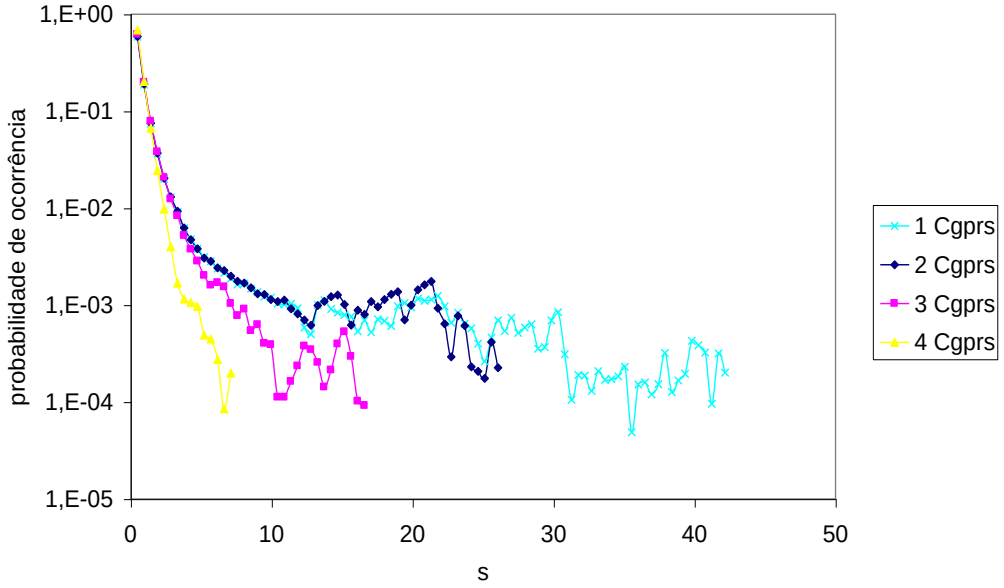


Figura A.6 – Distribuição de probabilidade de atraso de pacotes para 40% de carga de dados.

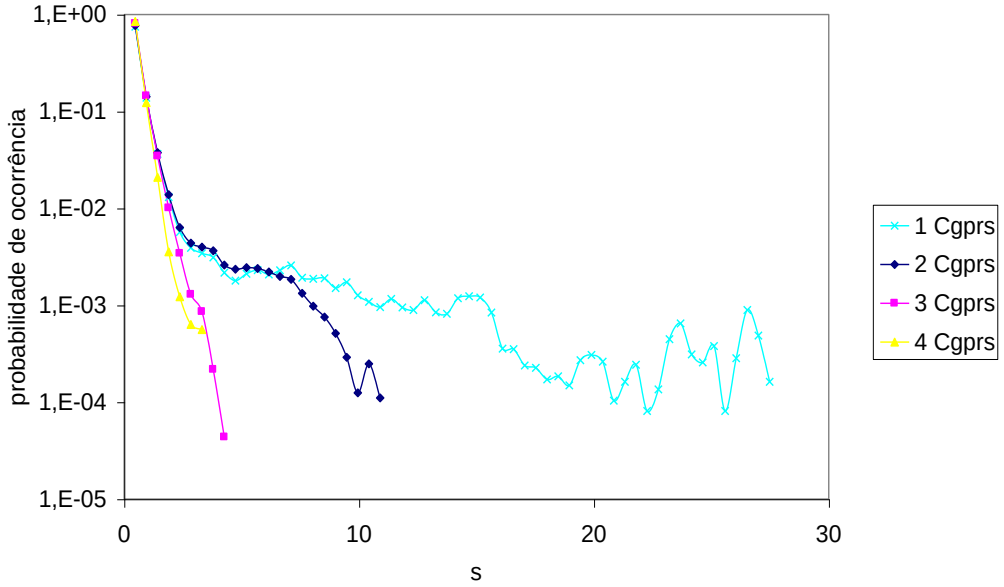


Figura A.7 – Distribuição de probabilidade de atraso de pacotes para 30% de carga de dados.

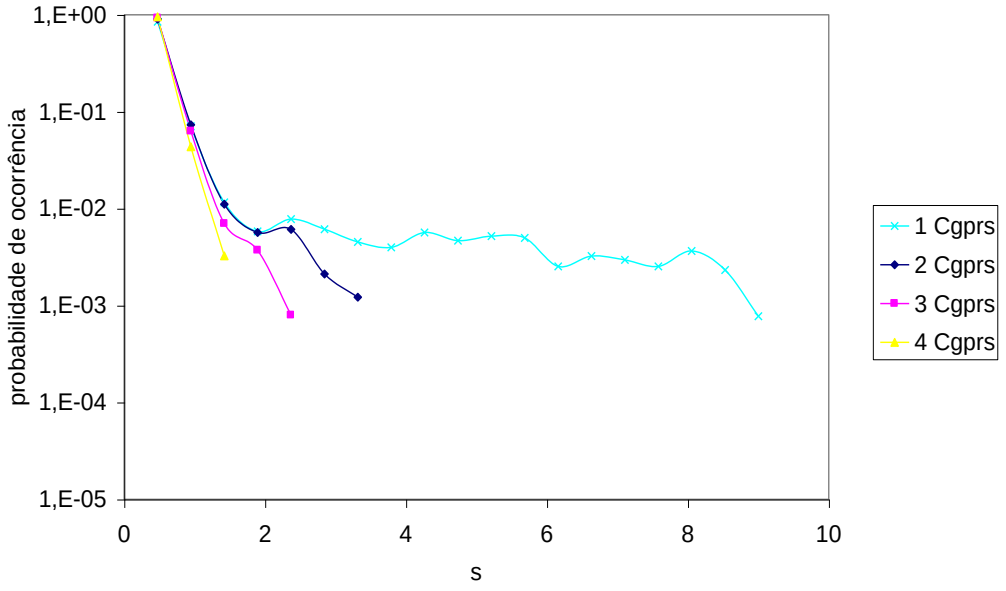


Figura A.8 – Distribuição de probabilidade de atraso de pacotes para 20% de carga de dados.

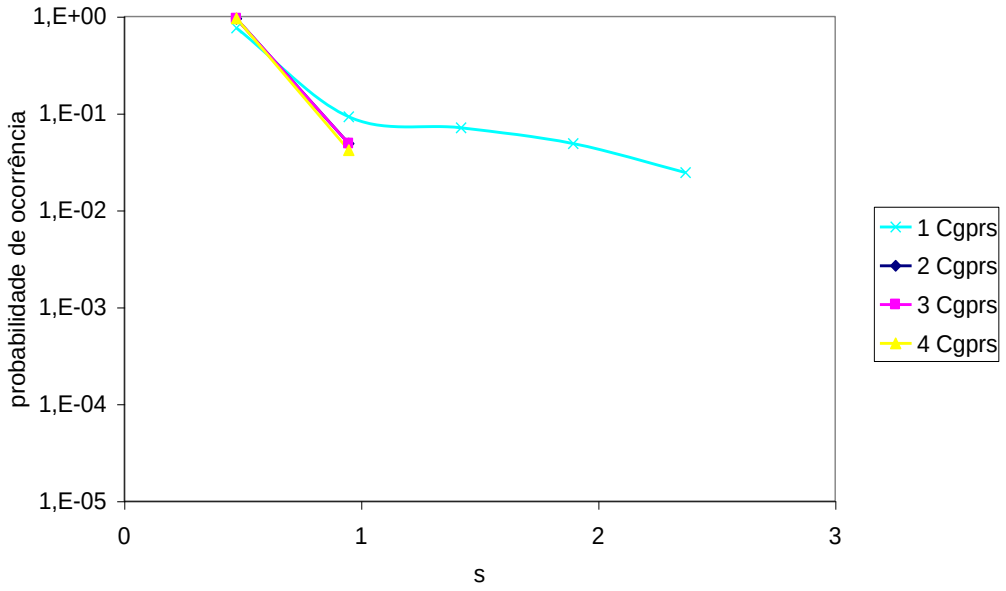


Figura A.9 – Distribuição de probabilidade de atraso de pacotes para 10% de carga de dados.

Anexo B – Distribuição estatística da probabilidade de atraso e atraso máximo de pacotes de dados.

B.1. Introdução

Neste anexo apresentamos os gráficos obtidos para todos os casos simulados nas condições apresentadas no capitulo 4 e que por uma questão de espaço foram colocadas neste anexo.

Na primeira metade deste anexo apresentaremos os resultados para a função de distribuição de probabilidade do atraso de pacotes. Na segunda metade apresentaremos os resultados relativos aos atrasos máximos registados.

Os dados apresentados neste anexo resultam da recolha ao longo de toda a simulação do instante e número de atraso de cada pacote individualmente.

B.2. Função de distribuição de probabilidade de atraso de pacotes

B.2.1 Introdução

Nas figuras seguintes serão apresentadas as figuras para a função de distribuição de probabilidade de atraso que não foram apresentados no capitulo 4 do relatório. Primeiro serão apresentadas todas as figuras relativas a simulações com T = 25 s e só depois as simulações para T = 50 s, na ultima parte mostraremos algumas figuras onde se compara casos semelhantes entre as duas partes anteriores.

B.2.2 Figuras para uma duração de chamadas de voz igual a 25 s

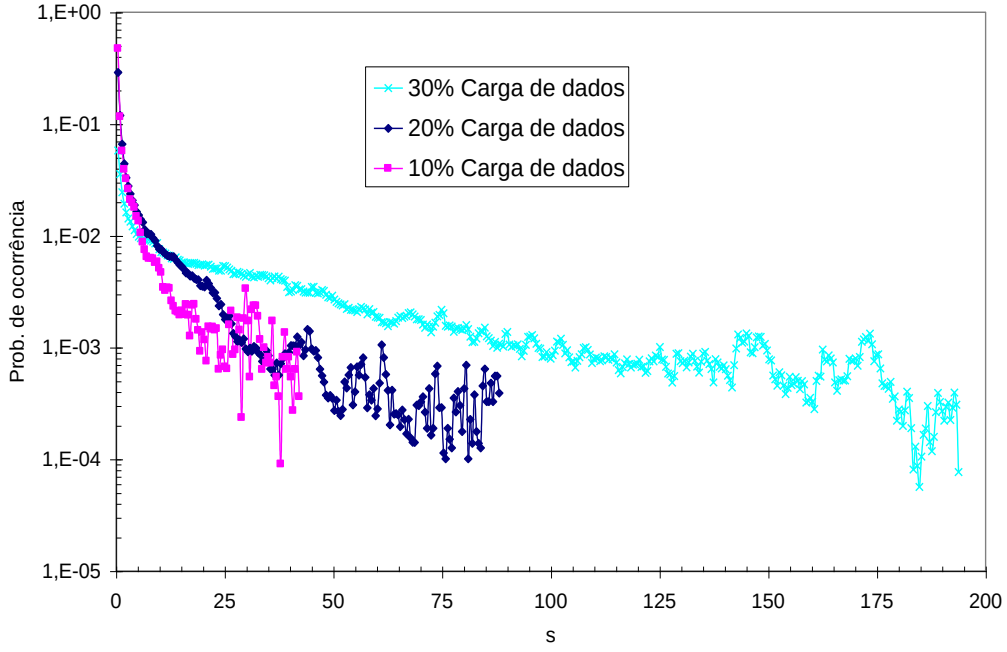


Figura B.1 – Função de distribuição do atraso de pacotes para 0 Cgprs.

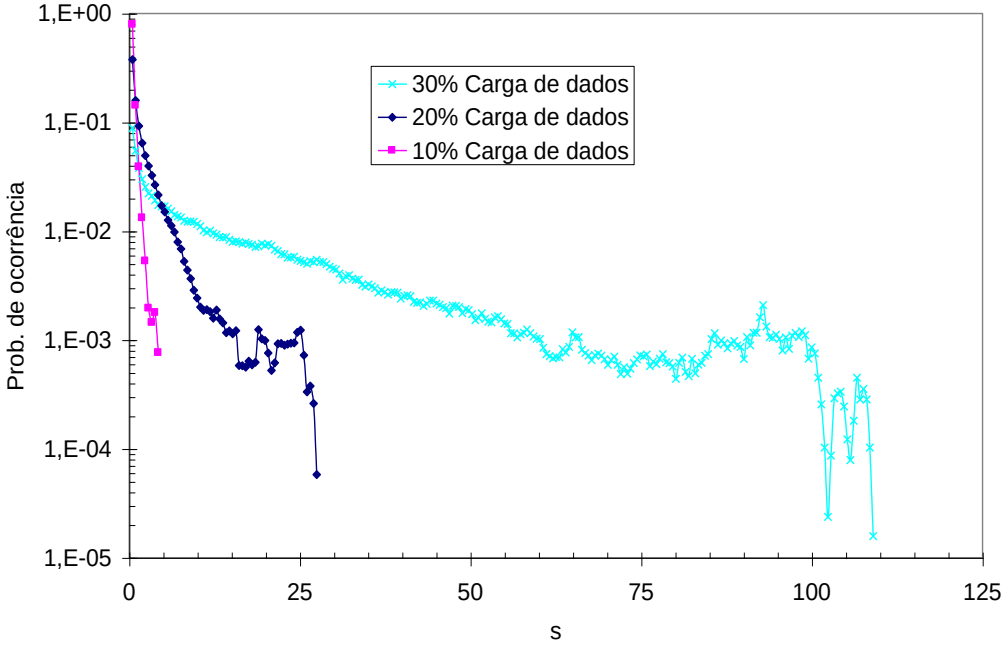


Figura B.2– Função de distribuição do atraso de pacotes para 4 Cgprs.

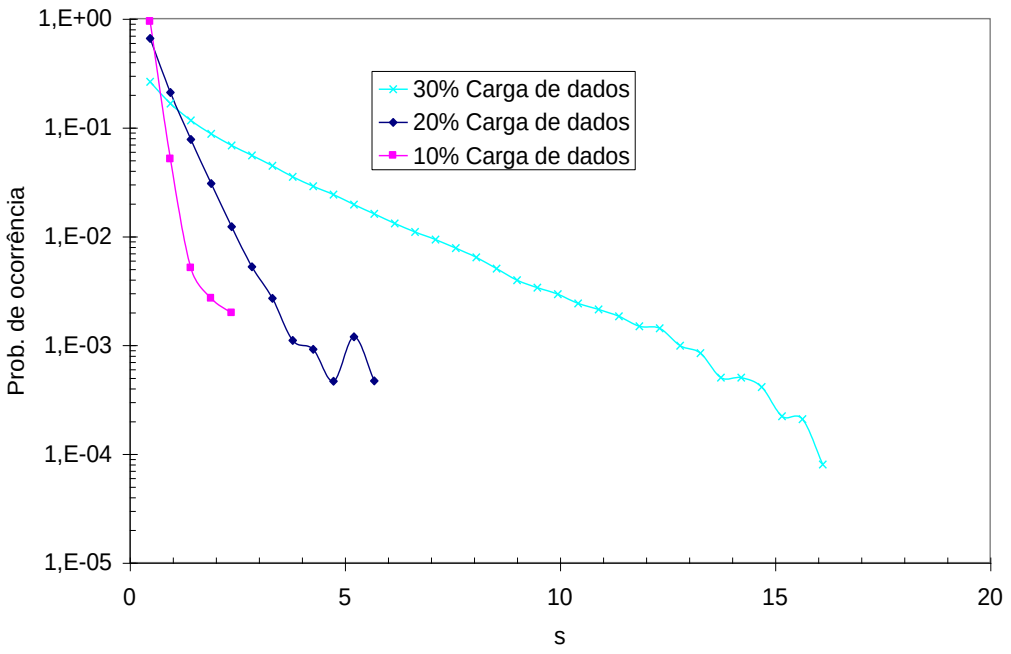


Figura B.3 – Função de distribuição do atraso de pacotes para 8 Cgprs.

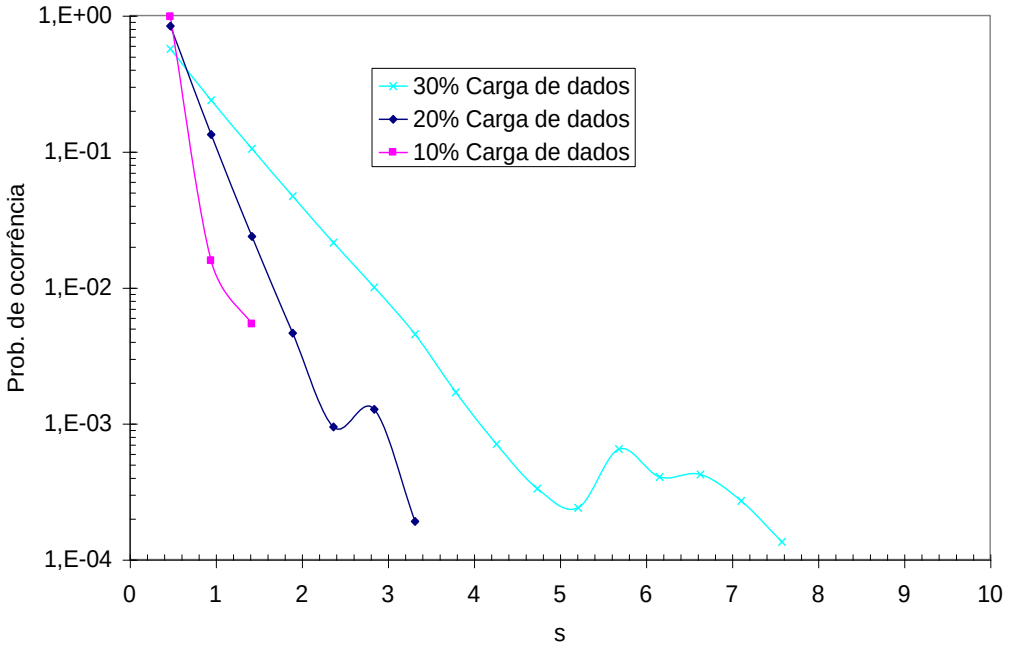


Figura B.4 – Função de distribuição do atraso de pacotes para 12 Cgprs.

B.2.3 Figuras para uma duração de chamadas de voz igual a 50s

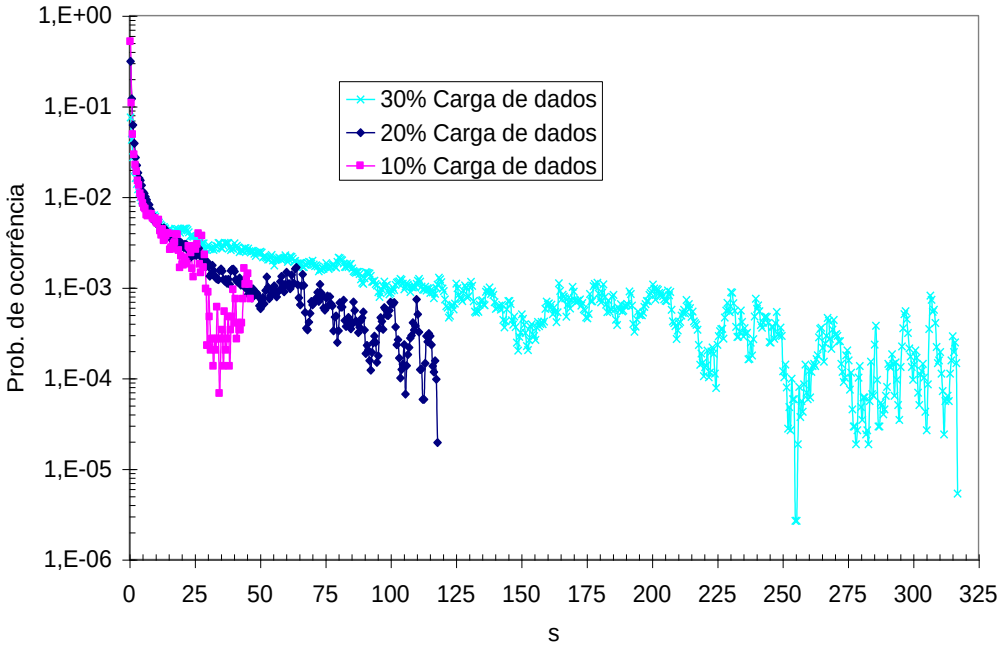


Figura B.5 – Função de distribuição do atraso de pacotes para 0 Cgprs.

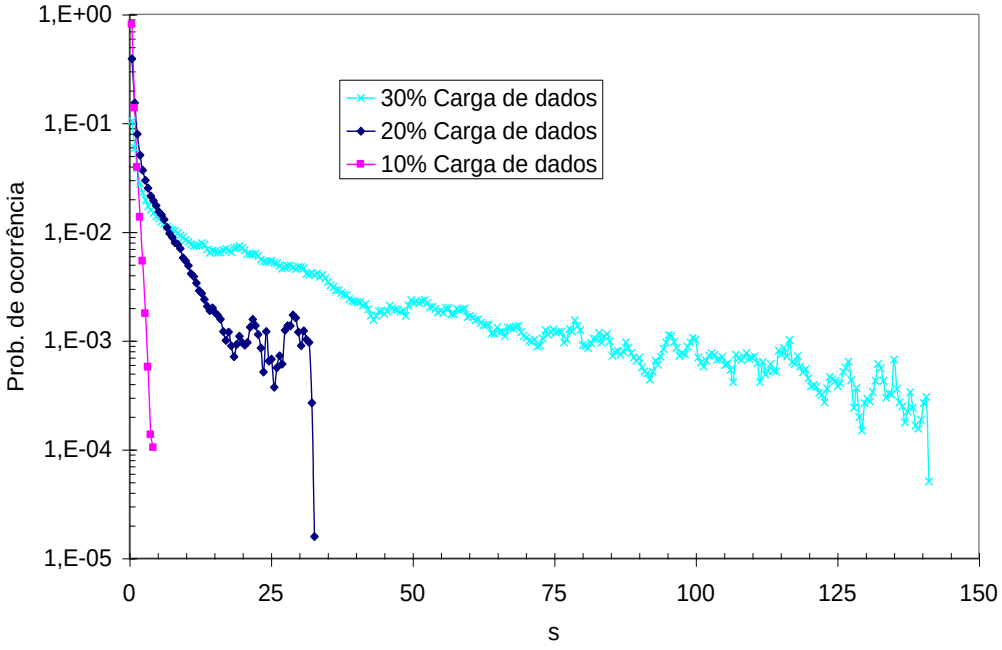


Figura B.6 – Função de distribuição do atraso de pacotes para 4 Cgprs.

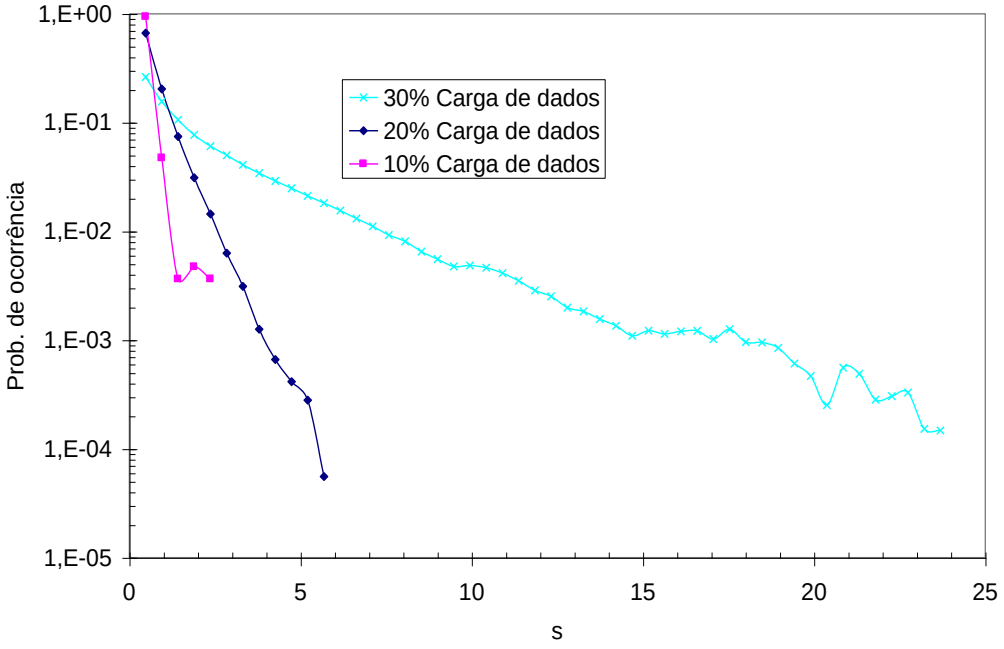


Figura B.7 – Função de distribuição do atraso de pacotes para 8 Cgprs.

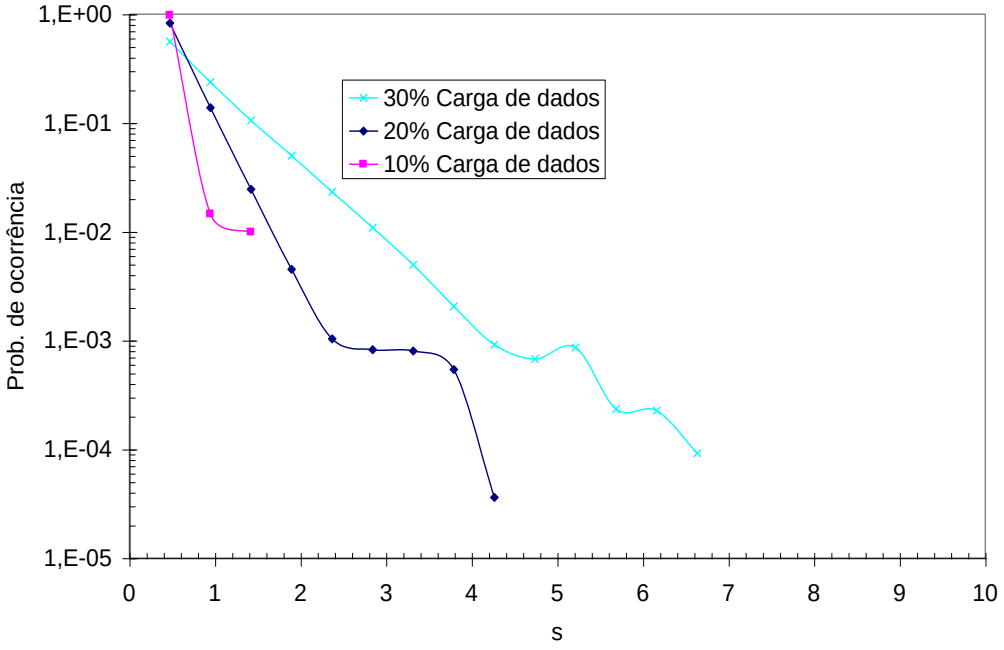


Figura B.8 – Função de distribuição do atraso de pacotes para 12 Cgprs.

B.2.4 Comparação da distribuição de atraso de pacotes para T=25 e T=50

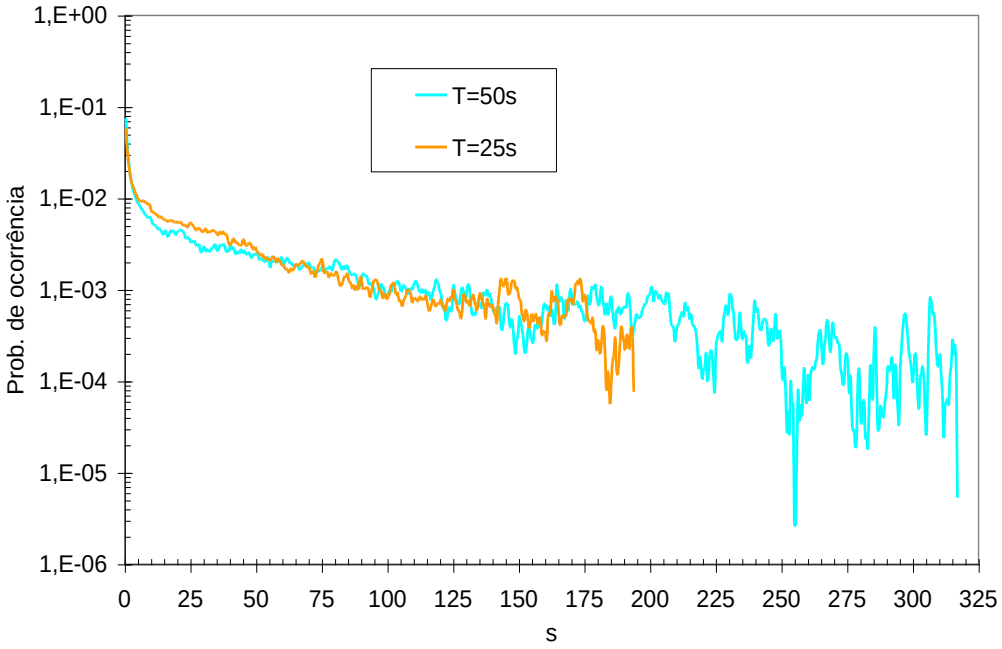


Figura B.9 – Função de distribuição de probabilidade para 0 Cgprs e 30 % de carga de dados

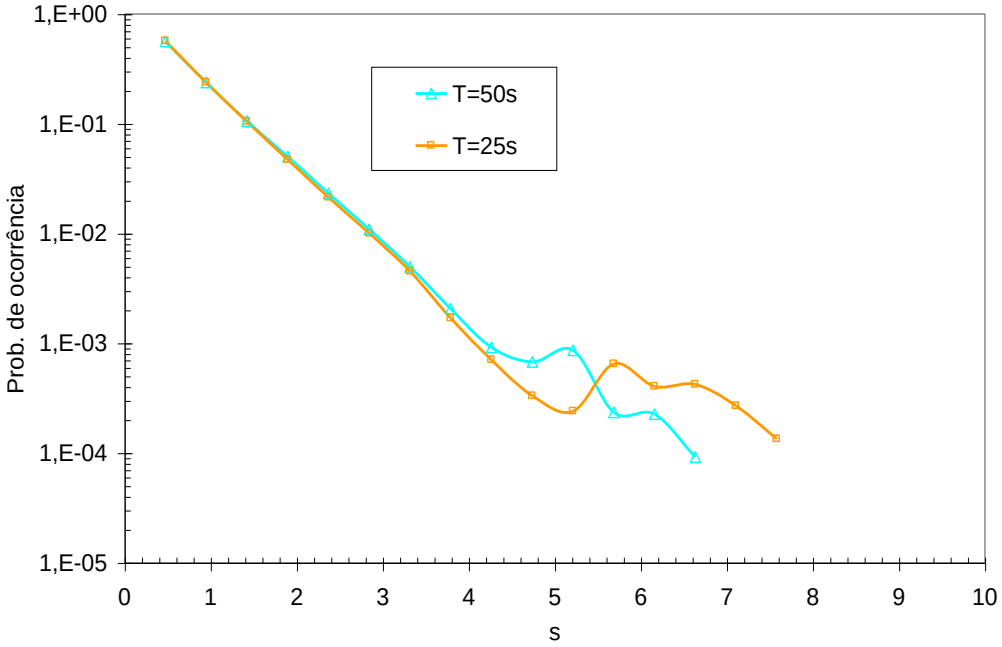


Figura B.10 – Função de distribuição de probabilidade para 12 Cgprs e 30 % de carga de dados

B.3 Atraso máximo médio de pacotes

B.3.1 Introdução

Nesta metade do anexo apresentaremos os valores para o atraso máximo registado por um pacote em cada uma das simulações que realizamos. O atraso máximo é obtido analisando qual o pacote que registou o maior número de atrasos. Primeiro apresentaremos os resultados para T = 25 s, seguidos dos resultados para T = 50 s, para terminar apresenta-se uma comparação entre as duas situações anteriores.

B.3.2 Figuras para uma duração de chamadas de voz igual a 25s

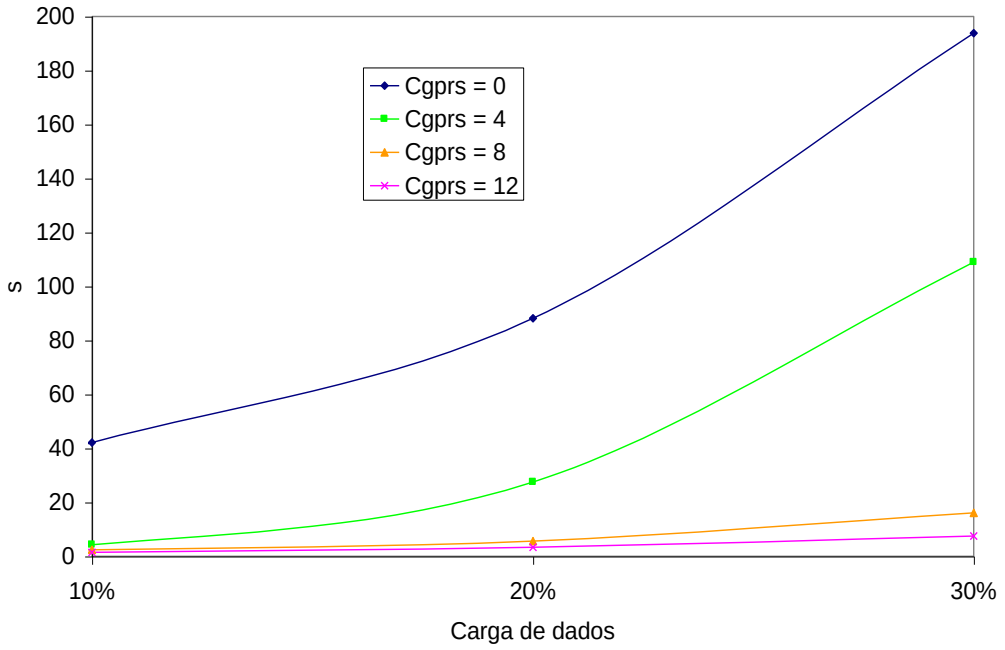


Figura B.11 – Evolução do atraso máximo com a variação da carga de dados.

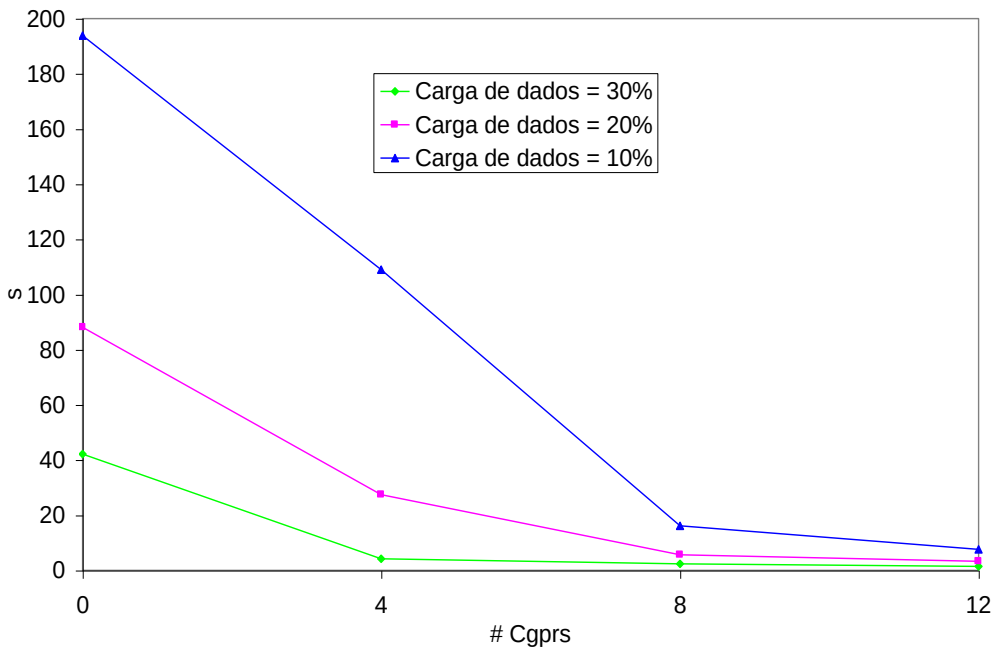


Figura B.12 – Evolução do atraso máximo com o número de Cgprs.

B.3.3 Figuras para chamadas de voz com duração igual a 50s

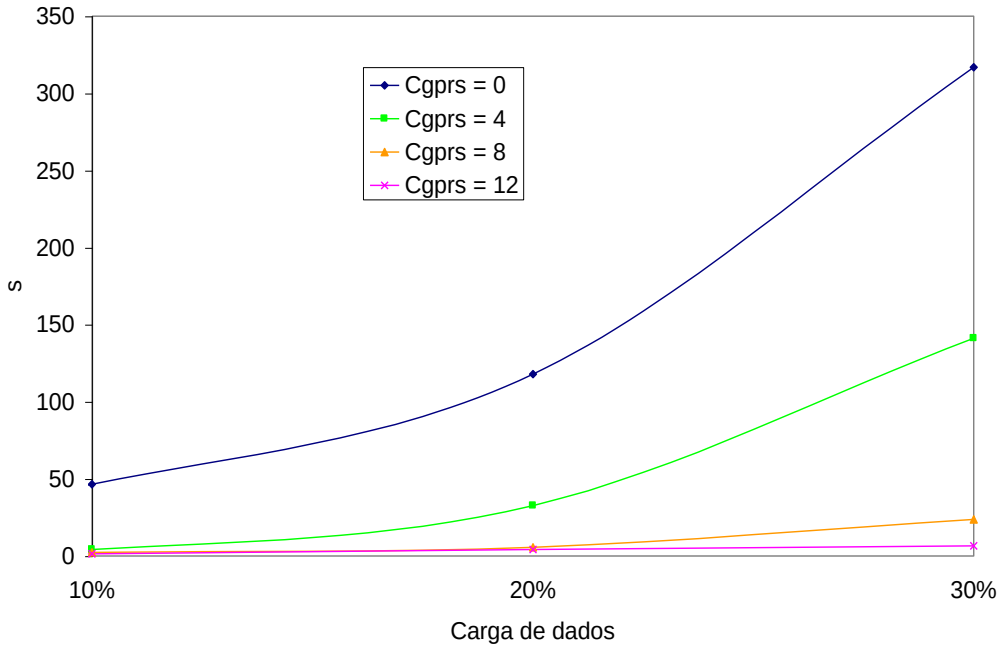


Figura B.13 – Evolução do atraso máximo com a variação da carga de dados.

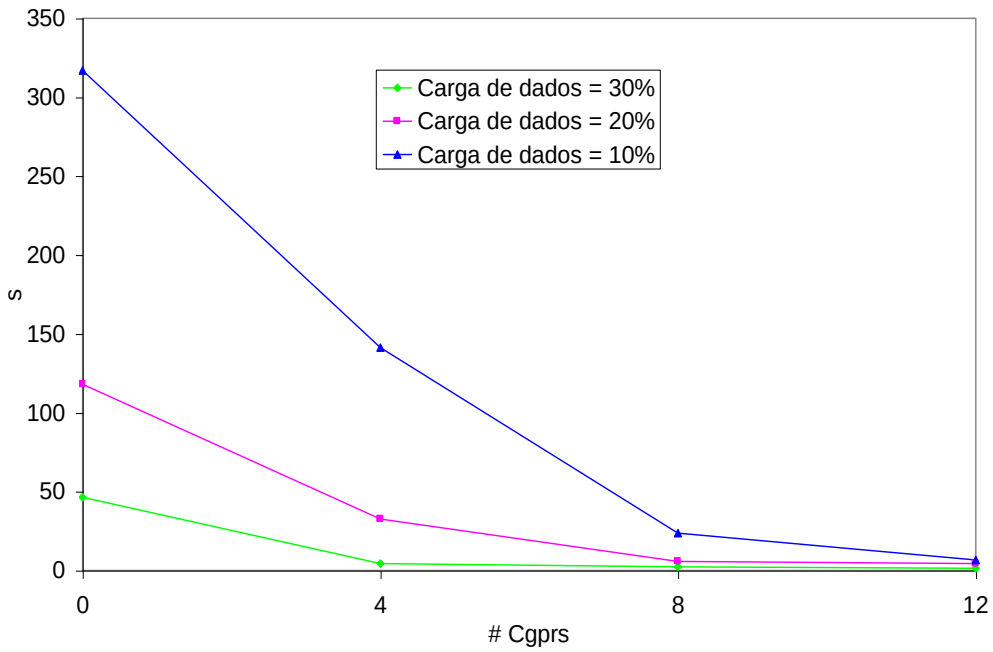


Figura B.14 – Evolução do atraso máximo dos pacotes com o número de Cgprs.

B.3.4 Comparação entre os dois casos anteriores

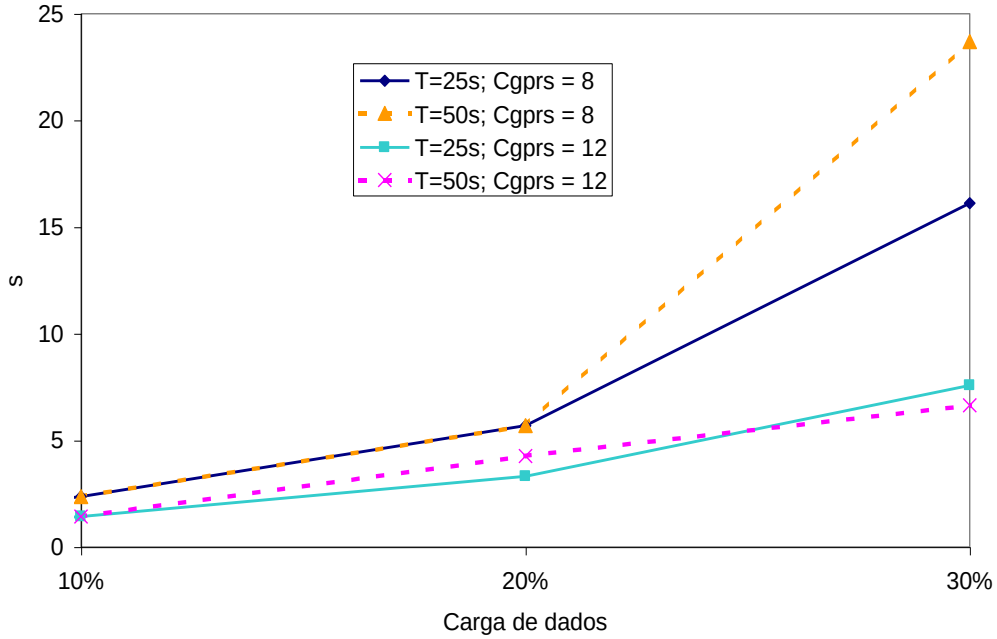


Figura B.15 – Atraso máximo para 8 e 12 canais dedicados a dados.

Anexo C – Tempos de simulação

Uma das grandes limitações de qualquer simulador é o tempo de processamento necessário à obtenção de resultados fiáveis; como tal, desde o princípio, foi necessário contabilizar o tempo de simulação necessário aos diversos componentes do simulador para executarem o que lhes era pedido. O estudo dos tempos de processamento permite optimizar o simulador e o algoritmo, bem como prever a capacidade do simulador e da máquina onde este corre. Apresentamos na Fig. C.1 os tempos médios de simulação em função da carga de dados produzida pelo gerador de chamadas.

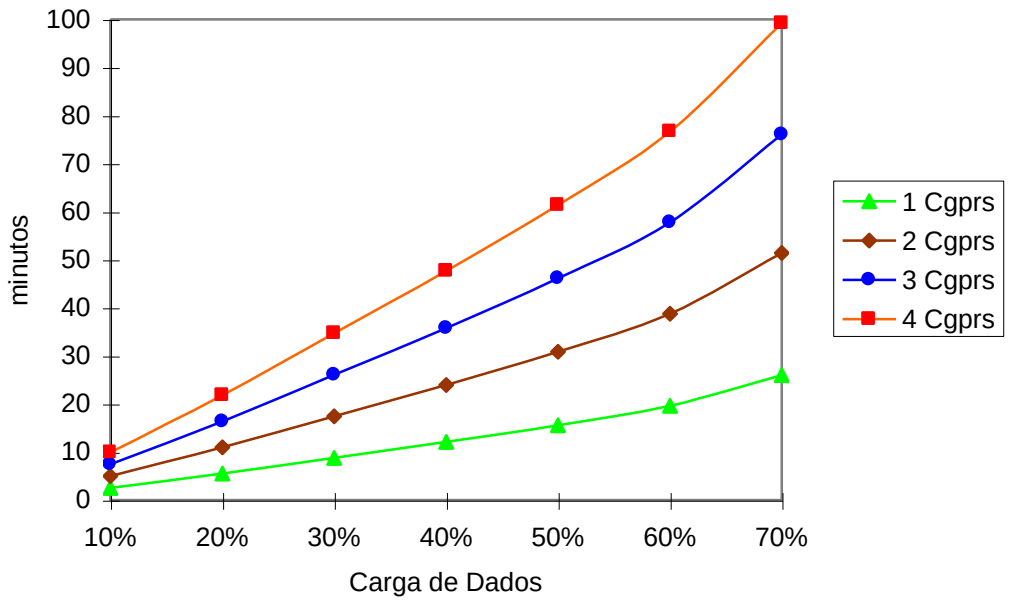


Figura C.1 – Tempo médio de simulação em função da carga de dados.

Como já foi referido anteriormente estes dados referem-se à média de 30 simulações, realizadas numa máquina com processador a 700MHz e 128MB de memória. O tempo necessário, como seria de prever, cresce quer em função da carga de dados, quer do número de canais dedicados a GPRS. O algoritmo foi implementado de maneira a percorrer sequencialmente para cada Cgprs diferentes carga de dados É visível na figura C.2 a evolução do tempo de processamento para cada um dos casos de Cgprs simulados.

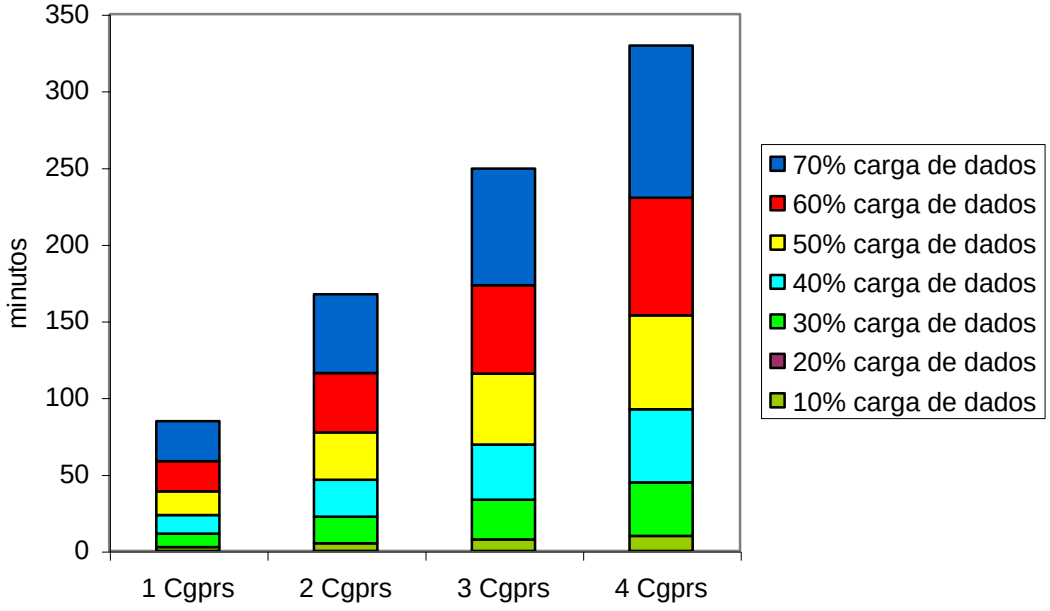


Figura C.2 – Tempo médio de simulação em função de Cgprs

Referências

[AdZN98] R.G. Addie, M. Zukerman and T.D. Neame, "Broadband Traffic Modelling: Simple Solutions to Hard Problems", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 36, No. 8, Aug. 1998, pp. 88-95.

[BrBe97] G. Brasche and B. Walke, “Concepts, Services, and Protocols of the new GSM Phase 2+ General Packet Radio Service”, in *IEEE Communications Magazine*, Vol. 35, No. 8, Aug. 1997, pp. 94-104.

[CaGo97] J. Cai and D.J. Goodman, “General Packet Radio Service in GSM”, in *IEEE Communications Magazine*, Vol. 35, No. 10, Oct. 1997, pp. 122-131.

[DuSm94] J. Dunlop and D.G. Smith, *Telecommunications Engineering*, Chapman and Hall, London, UK, 1994.

[FrMe94] V.S. Frost and B. Melamed, "Traffic Modeling For Telecommunications Networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 32, No. 3, Mar. 1994, pp. 70-81.

[GSCL98] D. Grillo, R.A. Skoog, S. Chia, and K.K. Leung, “Teletraffic Engineering for Mobile Personal Communications in ITU-T Work: The Need to Match pratice and Theory”, *IEEE Personal Communications Magazine,*Vol.3 , No.6 , Dec. 1998, pp. 38-58.

[HoMS98] S. Hoff, M. Meyer, and A. Schieder, “A performance evaluation of Internet acess via the General Packet Radio Service of GSM”, in Proc. of VTC’98, Ottawa, Canada, May 1998.

[Jabb96] B. Jabbari, "Teletraffic Aspects of Evolving and Next-Generation Wireless Communication Networks", *IEEE Personal Communications Magazine*, Vol. 3, No. 6, Dec. 1996, pp. 4-9.

[KeLi99] K. Kennedy and R. Litjens, "Performance Evaluation Of A Hybrid Radio Resource Allocation Algorithm In A GSM/GPRS Network", in *Proc. of PIMRC'99 – The 10th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, Osaka, Japan, Sep. 1999.

[MATL96] MATLAB version 5.0.0.4069, The MathWorks, Inc., Nov. 1996, Natick, Massachusetts.

[VeCo98] F.J.Velez and L.M.Correia, "New Callls Traffic Performance in Micro-cellular Mobile Broadband Systems with High Mobility Handover", in *Proc. of ConfTele99-II Conference Telecommunications Magazine*, Vol. 36, No 8, Aug. 1998, pp. 88-95.

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