

Dimensionamento de Enlace sem Fio com Integração de Voz e de Dados

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Marcelo de Oliveira Marques

Graduado, em 1993, em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional de Telecomunicações

Orientador:

Prof. Dr. Ivanil Sebastião Bonatti

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivanil Sebastião Bonatti (presidente)
Prof. Dr. Jorge Moreira de Souza
Prof. Dr. Paulo Cardieri
Prof. Dr. Shusaburo Motoyama

FEEC – Unicamp
FITEC e PUC Campinas
FEEC – Unicamp
FEEC – Unicamp

Fevereiro de 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M348d Marques, Marcelo de Oliveira
Dimensionamento de enlace sem fio com integração de voz e de dados. / --Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Ivanil Sebastião Bonatti
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Telefonia Celular – Simulação (computadores). 3. Desempenho. 4. Rede digital de serviços integrados. I. Bonatti, Ivanil Sebastião. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Titulo em Inglês: Dimensioning of wirelles link with voice and data integration.

Palavras-chave em Inglês: Wireless communication systems, Mobile telephone– Simulation (Computer), Performance e Integrated services digital network

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Jorge Moreira de Souza, Paulo Cardieri, Shusaburo Motoyama.

Data da defesa: 16/02/2005

Resumo

O dimensionamento de enlace sem fio das redes de telecomunicação com integração de voz e de dados é abordado nesse trabalho. Foram desenvolvidos procedimentos de análise e síntese para os dois modelos de filas considerados: modelos markovianos; e modelos com prioridade, sem e com preempção. Esquemas com ou sem compartilhamento de recursos e com *buffer* finito e infinito foram considerados. Comparações numéricas foram feitas para os modelos utilizados, bem como, os resultados obtidos no dimensionamento do enlace foram submetidos a condições de sobrecarga do tráfego de voz e de dados de forma a analisar o comportamento dos parâmetros de qualidade de serviço especificados.

Abstract

The dimensioning of telecommunications network wireless link, with voice and data integration, is presented in this paper. Analysis and synthesis procedures were developed considering Markovian and priority models (with or without preemption). Schemes with or without resources sharing and finite and infinite buffer were considered. The selected models were numerically compared and the results of the dimensioning were submitted to simulations of traffic overload conditions in order to analyze the quality of service parameters behavior.

para Luciane e Paola

Agradecimentos

- Ao professor Ivanil Sebastião Bonatti, pela dedicação e apoio dispendido nas atividades de orientação, bem como pela amizade e pelo comprometimento com a minha formação acadêmica;
- Ao engenheiro Luís Renato Bercho e ao professor Pedro Peres pela disponibilização dos modelos de documentos \LaTeX , utilizados durante os trabalhos;
- À minha esposa Luciane e à minha filha Paola, pelo carinho, pelo apoio e pelo encorajamento em todos os momentos da execução deste trabalho;
- Aos meus pais, pelo amor incondicional que se manifesta em todos os momentos de minha vida.
- À Deus, sem o qual nada disso seria possível;
- Ao Instituto Nacional de Telecomunicações, pelo apoio financeiro;

Acrônimos e Siglas

ARQ	Automatic Repeat Request
ATM	Asynchronous Transfer Mode
cc	Com compartilhamento.
CS-2	Coding Scheme 2
Erl	Erlang
FIFO	First-in, First-out
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communication
IP	Internet Protocol
PDCH	Packet Data Channel
PDU	Protocol Data Unit
QoS	Quality of Service
sc	Sem compartilhamento.
TBF	Temporary Block Flow
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol

Glossário de Símbolos

- b Número máximo de pacotes de dados no sistema.
- C Capacidade de transmissão expressa em número de canais alocados exclusivamente para o serviço de dados (Capítulos 2 e 3); Capacidade adicional alocada ao sistema para atendimento aos parâmetros de qualidade de serviço (Capítulo 4).
- C_v Número de canais exclusivos para o serviço de voz (Capítulo 2); Número de canais compartilhados entre os serviços de voz e de dados (Capítulo 3); Capacidade mínima do sistema (Capítulo 4).
- d Número de pacotes de dados no sistema.
- $E\{L\}$ Número médio de pacotes em espera.
- $E\{L_i\}$ Número médio de pacotes da classe i em espera.
- $E\{Z\}$ $E\{Z_d\}$ Tamanho médio do pacote de dados.
- $E\{Z_v\}$ Tamanho médio do pacote de voz.
- $E\{W\}$ Tempo médio de espera dos pacotes.
- $E\{W_i\}$ Tempo médio de espera dos pacotes da classe i .
- $E\{T\}$ Tempo médio de transferência dos pacotes.
- $E\{T_p\}$ Tempo médio de transferência do pacote com prioridade p .
- $E\{N\}$ Número médio de pacotes no sistema.
- $E\{N/x\}$ Número médio condicional de pacotes no sistema.
- $E\{R^2\}$ Momento de segunda ordem do tempo de serviço.
- $E\{R_i^2\}$ Momento de segunda ordem do tempo de serviço da classe i .
- $E\{R_v^2\}$ Momento de segunda ordem do tempo de serviço de voz.
- $E\{R_d^2\}$ Momento de segunda ordem do tempo de serviço de dados.
- $E\{R_0\}$ Tempo médio residual de serviço.
- $E\{R_0(p)\}$ Tempo médio residual de serviço considerando as p primeiras classes.
- L Número de pacotes na fila.
- N Número de classes de tráfego (Capítulo 4).
- n Número mínimo de canais para atender o tráfego poissoniano de intensidade ρ_v com probabilidade de bloqueio menor que ϵ_v .
- n_I Limite inferior para o número de canais no algoritmo de bissecção.
- n_S Limite superior para o número de canais no algoritmo de bissecção.
- P Probabilidade de descarte de pacotes.

P_n	Probabilidade de descarte de pacotes normalizada em relação a ϵ .
P_v	Probabilidade de bloqueio dos canais de voz.
p	Classe de prioridade.
$p_{d,v}(d, v)$	Probabilidade conjunta do número de canais de voz ocupados e do número de pacotes no sistema.
$p(d)$	Probabilidade marginal de dados.
$p(d/v)$ $p(d/x)$	Probabilidade condicional de dados.
$p_v(v)$	Probabilidade marginal de voz.
Q	Matriz de transição de estados.
$q_v(x)$	Probabilidade de haver x canais de voz desocupados.
R_i	Tempo de serviço do pacote da classe i .
R'_i	Tempo de serviço do pacote com prioridade maior que p .
R_0	Tempo residual de serviço.
r	Fator de carga do tráfego de dados normalizado por canal.
r_{limiar}	Limiar do fator de carga de dados normalizado por canal.
T_n T_{dn}	Tempo de transferência de pacotes normalizado em relação a Δ .
T_{vn}	Tempo de transferência de pacotes de voz normalizado em relação a Δ_v .
V v	Número de canais tomados por chamadas telefônicas.
X x	Número de canais não tomados por chamadas telefônicas.
W	Tempo de espera.
δ	Tempo médio de transmissão de um pacote por um canal.
Δ Δ_d	Tempo médio de transferência de pacotes de dados especificado como parâmetro de qualidade de serviço.
Δ_v	Tempo médio de transferência de pacotes de voz especificado como parâmetro de qualidade de serviço.
ϵ	Probabilidade de descarte de pacotes especificada como parâmetro de qualidade de serviço.
ϵ_v	Probabilidade de bloqueio dos canais de voz especificada como parâmetro de qualidade de serviço.
η	Dimensão da matriz quadrada de transição de estados.
γ	Taxa de transmissão de um canal.
κ	Índice da matriz de transição de estados.
λ	Taxa média total de chegada de pacotes.
λ_i	Taxa média de chegada de pacotes da classe i .
λ_v	Taxa média total de chamadas de voz.
λ_d	Taxa média total de chegada de pacotes de dados.
μ	Taxa de transmissão de pacotes.
μ_i	Taxa de transmissão de pacotes da classe de serviço i .
μ_v	Taxa de fim de serviço de voz.
ν	Taxa de transmissão de pacotes por canal.
π	Vetor linha de probabilidades conjunta de dados e de voz.
ρ	Fator de carga do tráfego de pacotes.
ρ_i	Fator de carga do tráfego de pacotes da classe de serviço i .
ρ_v	Fator de carga do tráfego de voz.
σ_p	Soma do fator de carga das primeiras p classes.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Redes de Comunicação sem Fio com Integração de Serviços	1
1.2	Dimensionamento de Enlace com Integração de Voz e de Dados	3
1.3	Apresentação	4
2	Dimensionamento de Enlace sem Compartilhamento de Canais	5
2.1	Descrição do Sistema	5
2.2	Dimensionamento dos Canais de Voz	6
2.3	Dimensionamento dos Canais de Dados	7
2.4	Conclusões	10
3	Dimensionamento de Enlace com Compartilhamento de Canais	12
3.1	Introdução	12
3.2	Modelo Markoviano Bidimensional	13
3.3	Modelo Condicional	16
3.4	Comparação Numérica	17
3.5	Dimensionamento do Enlace sem Fio	19
3.6	Conclusões	25
4	Dimensionamento de Enlace com Prioridade	26
4.1	Introdução	26
4.2	Sistema Multiusuários	27
4.3	Dimensionamento do Enlace sem Fio	30
4.4	Conclusões	36
5	Conclusões	40

Capítulo 1

Introdução

1.1 Redes de Comunicação sem Fio com Integração de Serviços

O sucesso da telefonia móvel e o crescimento dos serviços oferecidos pela Internet aliados aos conceitos de comunicação em *qualquer lugar* e a *qualquer instante* têm direcionado os esforços dos pesquisadores para o desenvolvimento de *tecnologias* que permitam a integração de serviços de voz e de dados em uma única rede de comunicação sem fio.

A integração desses serviços traz novos desafios quanto à utilização eficiente dos recursos rádio, uma vez que requisitos distintos e muitas vezes conflitantes de qualidade de serviço, como probabilidade de bloqueio e tempo de transferência, devem ser atendidos para as classes de tráfego que serão integradas.

Com o desenvolvimento dos sistemas de telefonia móvel de segunda geração, ainda na década de 80, os primeiros sistemas com integração dos serviços de voz e de dados começaram a ser implantados, porém os serviços de dados oferecidos inicialmente possuíam taxas de transmissão muito baixas, com limites restritos para o comprimento das mensagens e com um tempo para estabelecimento da conexão muito alto [9]. Esses sistemas, concebidos em um ambiente no qual os serviços de voz eram predominantes sobre os demais, utilizavam a comutação de circuitos para a alocação dos recursos rádio, tanto para o tráfego de voz como para o tráfego de dados, alocando os recursos durante toda a duração da conexão. Embora adequada ao serviço de voz, quando aplicada ao serviço de dados, a comutação de circuitos impedia que o sistema aproveitasse a característica de intermitência do tráfego de dados para o compartilhamento dos recursos rádio entre outros usuários do serviço de dados.

Essa restrição impulsionou a indústria a desenvolver e as operadoras dos serviços telefonia móvel a oferecerem serviços de dados em sistemas sem fio que permitissem o estabelecimento de uma conexão fim-a-fim com comutação de pacotes. Entre os sistemas de telefonia móvel de segunda geração, o padrão GSM (*Global System for Mobile Communications*) [4] tem-se destacado por sua grande aceitação no mercado mundial. No início da década de 90, com o objetivo de oferecer sobre a infra-estrutura existente da rede GSM um serviço de dados com comutação de pacotes, iniciaram-se os estudos que resultaram na padronização do GPRS (*General Packet Radio Service*)[2]. Esse serviço, oferecido sobre a rede GSM, tem como objetivo atender de forma eficiente, quanto à utilização dos recursos

rádio e requisitos de qualidade de serviço, serviços de dados que apresentem uma ou mais das características abaixo citadas [2],

- i) Transmissão de dados intermitente e não periódica, na qual o tempo entre transmissões sucessivas supera o atraso de transferência;
- ii) Transmissões freqüentes de pequenas quantidades de dados (por exemplo, menos de 500 bytes, várias vezes por minuto);
- iii) Transmissões esporádicas de grandes volumes de dados (por exemplo, vários *kilobytes*, várias vezes por hora).

Com a técnica de comutação de pacotes implementada no GPRS consegue-se uma maior eficiência na utilização dos recursos rádio da rede GSM, possibilitando que os recursos sejam alocados apenas quando necessário e imediatamente liberados após a transmissão dos pacotes de dados. Conhecido como alocação sob demanda, este princípio possibilita o compartilhamento de um mesmo recurso rádio por diversos usuários [1].

1.1.1 A alocação dos recursos rádio

A alocação de recursos rádio para enlaces sem fio com integração de serviços de voz e dados deve atender aos diferentes parâmetros de QoS (*Quality of Service*) associados a cada uma das classes de tráfego consideradas, bem como atenuar o impacto de uma classe de tráfego sobre as demais. A alocação de recursos pode ser classificada quanto à forma como os recursos são alocados - comutação por circuitos, comutação por pacotes ou comutação híbrida [20]:

- Na *Comutação por Circuito*, o recurso rádio é dedicado ao usuário de voz ou de dados durante toda a duração da conexão, independente se está havendo períodos de fala, no caso do serviço de voz, ou pacotes para transmitir, no caso dos serviços de dados;
- Na *Comutação por Pacotes*, o recurso rádio é alocado apenas durante os períodos de fala para os serviços de voz; e quando existirem pacotes a serem transmitidos, no serviço de dados;
- Na *Comutação Híbrida*, a comutação por circuito e a comutação por pacotes coexistem no mesmo sistema.

As três formas de alocação de recursos citadas podem ainda ser classificadas em três esquemas de compartilhamento de recursos distintos [10]:

- No *Compartilhamento Fixo*, os recursos rádio são divididos entre os serviços que serão integrados, não havendo remanejamento de recursos entre os serviços. Essa forma de alocação de recursos garante, às classes de tráfego, o atendimento aos requisitos de qualidade de serviço que foram especificados no dimensionamento do sistema. Entretanto, pode se tornar ineficiente quando os recursos não totalmente utilizados por uma das classes, não são usados para melhoria de desempenho das demais classes;

- No *Compartilhamento Parcial*, por exemplo, uma parcela dos recursos são destinados exclusivamente ao serviço de dados, enquanto o restante pode ser compartilhado entre os serviços de voz e de dados;
- No *Compartilhamento Completo*, todos os recursos são disponibilizados para os dois tipos de serviços. Nesse esquema, os serviços competem por todos os recursos da rede, e mecanismos de controle devem ser inseridos de forma a evitar que determinada classe, em detrimento à outra, monopolize os recursos da rede.

A forma de alocação de recursos, o esquema de compartilhamento e a utilização ou não de *buffer* são questões que devem ser analisadas em função dos requisitos de QoS mínimos de cada classe de tráfego que será integrada. Para o serviço de voz, os pacotes devem ser entregues como um feixe contínuo em tempo real e, mais importante, o atraso deve ser mantido o mais constante possível durante a duração de cada período de fala. A probabilidade de descarte de pacotes de voz também deve ser limitada. Para o tráfego de dados, a entrega dos pacotes em tempo real e a variação do atraso não são requisitos críticos, mas o tempo máximo de espera no *buffer* ou de transferência e a probabilidade de descarte tornam-se fundamentais para garantir a entrega adequada do serviço.

1.2 Dimensionamento de Enlace com Integração de Voz e de Dados

A integração entre voz e dados pode ser feita sobre comutação de pacotes de uma maneira assíncrona, sendo os pacotes de voz tratados da mesma maneira que os pacotes de dados, com exceção da prioridade dos primeiros sobre os segundos, para garantir um tempo de atraso máximo para o serviço de voz. Os protocolos de múltiplo acesso com reserva permitem alocar aos sinais naturalmente síncronos, canais que se repetem ciclicamente na cadência apropriada, e usar a capacidade adicional do sistema para enviar os sinais de dados, sensíveis a perdas, mas não aos atrasos. A combinação do protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*) para os dados com o protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) para a voz, realizam esta integração de forma complementar [29], [14] e [16].

Chen et al [5] analisaram o compartilhamento com prioridade para o serviço de voz e a utilização de fila para pacotes de dados que sofreram, ou não, preempção. *Meo et al* [24] investigaram uma estratégia de compartilhamento dinâmico usando a informação da ocupação da fila como referência para alocação de canais exclusivos para pacotes de dados. *Neame et al* [25] propuseram o dimensionamento de enlaces para usuários com fontes de tráfego descritas por um modelo *On-Off* (taxas média e de pico) aproximando o tráfego total por uma fonte equivalente gaussiana. O modelo resultante é simples, mas depende de um parâmetro de projeto que deve ser estimado em função do tamanho do buffer utilizado. Além disso, o número de usuários do sistema deve ser conhecido deterministicamente, o que não é realista sob o ponto de vista de dimensionamento. *De Oliveira et al* [27] propuseram um algoritmo baseado no conceito de banda efetiva para dimensionamento de enlaces em redes ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). O método proposto é bastante eficiente se a disciplina de atendimento é do tipo *round-robin* e cada conexão tem *buffer*

próprio. Entretanto, o cálculo de banda efetiva é feito a partir dos parâmetros do contrato de tráfego, que não necessariamente existe nos sistemas não ATM, o que quase sempre implica superestimar a banda necessária.

Marques e Bonatti [23] propuseram o dimensionamento de enlace usando comutação de circuito para voz e de pacotes para dados, considerando que cada PDU (*Protocol Data Unit*) era atendida por um único canal PDCH (*Packet Data Channel*), canal da rede GSM/GPRS; e em [21], consideraram que apenas um TBF (*Temporary Block Flow*), circuito virtual que define a conexão entre a estação móvel e a estação rádio-base, era estabelecido, sendo que os blocos-rádio de todos os PDCHs disponíveis são alocados para esse TBF. O dimensionamento do enlace sem fio foi obtido usando uma técnica de aproximação, que permite a decomposição de uma cadeia de Markov bidimensional, em duas unidimensionais [11] e [26]. Em [22], uma análise da precisão das aproximações consideradas nos dois trabalhos anteriores foi apresentada.

1.3 Apresentação

O dimensionamento de enlace sem fio com integração de serviços é objeto dessa dissertação.

Os resultados básicos para dimensionamento de um servidor por comutação de circuito ou por comutação de pacotes são apresentados no Capítulo 2, *Dimensionamento de Enlace sem Compartilhamento de Canais*, definindo parâmetros de referência para os capítulos 3 e 4. O Capítulo 3, *Dimensionamento de Enlace com Compartilhamento de Canais*, apresenta os modelos de dimensionamento para enlaces sem fio com integração de serviços, baseados em modelos markovianos, com compartilhamento de recursos. A primeira parte do capítulo apresenta um sistema com integração de duas classes de tráfego, voz e dados, representado por uma cadeia de *Markov* bidimensional. A segunda parte apresenta um modelo aproximado [11] e [26], baseado em uma técnica de decomposição e agregação [7], que permite a decomposição de uma cadeia de *Markov* bidimensional em duas cadeias unidimensionais. A terceira parte compara os resultados obtidos com a cadeia bidimensional de *Markov* e o modelo aproximado. A quarta parte apresenta o dimensionamento de enlaces sem fio com integração de serviços de voz e de dados, na qual o número total de canais necessários para atendimento aos requisitos mínimos de qualidade de serviço especificados para as duas classes de serviço, é determinado para cada modelo markoviano considerado.

O Capítulo 4, *Dimensionamento de Enlace com Prioridade*, apresenta o modelo com prioridade, sem e com preempção, para o dimensionamento do enlace sem fio com integração de serviços de voz e de dados. Nesse modelo os serviços de voz e de dados são comutados por pacotes. São apresentadas as hipóteses de dimensionamento e o número total de canais necessários para atendimento aos requisitos mínimos de qualidade de serviço especificados, para as duas classes de serviço, é determinado.

O Capítulo de *Conclusões* encerra a dissertação.

Capítulo 2

Dimensionamento de Enlace sem Compartilhamento de Canais

2.1 Descrição do Sistema

O sistema utiliza a comutação por circuito para o serviço de voz, na qual o recurso rádio é dedicado ao usuário de voz durante toda a conexão, independente se está havendo períodos de fala ou não, e utiliza a comutação por pacotes para o serviço de dados, ocupando os recursos rádio apenas durante a transmissão do pacote. Os recursos rádio disponibilizados ao serviço de dados são alocados de forma dinâmica e sob demanda aos usuários.

O sistema emprega o esquema de alocação de canais sem compartilhamento, no qual C canais são reservados exclusivamente para transmissão de pacotes de dados e os demais canais do sistema, C_v canais, são dedicados ao serviço de voz, conforme mostrado na Figura 2.1.

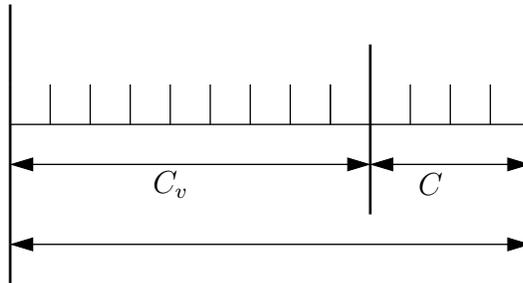


Figura 2.1: Esquema de alocação dos canais.

A taxa de transmissão para os pacotes de dados é $C\gamma$, sendo γ a taxa de transmissão por canal.

Cada estação tem um *buffer* para armazenar os pacotes quando o acesso é negado, sendo b o limite para o número máximo de pacotes de dados presentes no sistema. Se um novo pacote de dados é gerado e b pacotes já estiverem presentes no sistema, o pacote é bloqueado e eliminado do sistema.

As estações móveis geram pacotes com distribuição de Poisson, sendo λ a taxa total média de pacotes gerada pelas estações presentes no sistema. O comprimento dos pacotes tem distribuição exponencial com tamanho médio $E\{Z\}$ e com tempo médio de serviço

$1/\mu$. As retransmissões devido ao esquema ARQ (*Automatic Repeat Request*) de proteção contra erros no meio de transmissão aumentam o tamanho efetivo médio dos pacotes de dados e o parâmetro $1/\mu$ leva em conta essas retransmissões.

O fator de carga do tráfego de dados, ρ , pode ser escrito como

$$\rho = \lambda \frac{1}{\mu} = \lambda \frac{E\{Z\}}{C\gamma} = \frac{r}{C} \quad (2.1)$$

com r , fator de carga normalizado por canal, definido por

$$r = \frac{\lambda E\{Z\}}{\gamma} \quad (2.2)$$

A taxa de transmissão de pacotes μ pode ser escrita como

$$\mu = \frac{C\gamma}{E\{Z\}} = \frac{C}{\delta} \quad (2.3)$$

com δ , tempo médio de transmissão de um pacote por um canal de dados, definido por

$$\delta = \frac{E\{Z\}}{\gamma} = \frac{1}{\nu} \quad (2.4)$$

sendo ν a taxa de transmissão de pacotes por canal.

As estações móveis geram chamadas de voz com distribuição poissoniana e com taxa total média λ_v . O tempo médio de retenção é $1/\mu_v$ e a distribuição é exponencial. As chamadas de voz bloqueadas são eliminadas do sistema.

O fator de carga do tráfego de voz, ρ_v , pode ser escrito como

$$\rho_v = \frac{\lambda_v}{\mu_v} \quad (2.5)$$

Nas seções a seguir o dimensionamento dos canais de voz e de dados são determinados em separado supondo-se que os pacotes de dados não utilizam os canais de voz.

Dois são os objetivos desta abordagem: primeiro, a definição de valores de referência que permitam avaliar a redução da capacidade do sistema devido ao compartilhamento, que são determinados nos Capítulos 3 e 4; segundo, a determinação da sensibilidade do dimensionamento aos parâmetros básicos do sistema (os valores especificados de tempo de transferência e de probabilidade de bloqueio e de descarte, e o tamanho do buffer).

2.2 Dimensionamento dos Canais de Voz

O número de canais de voz do sistema é igual ao número mínimo de canais, C_v , que garante que a probabilidade de bloqueio, P_v , é menor que o valor especificado como parâmetro de qualidade de serviço, ϵ_v . A determinação de C_v implica o cálculo repetitivo da fórmula de *Erlang*.

A fórmula de *Erlang* determina a probabilidade de bloqueio de um tráfego poissoniano de intensidade ρ_v oferecido a um enlace com C_v canais. Um método iterativo é usado no cômputo da função *Erlang*, devido à complexidade para o seu cálculo [3].

$$E(\rho_v, k + 1) = \frac{\rho_v E(\rho_v, k)}{(k + 1) + \rho_v E(\rho_v, k)} ; \quad k = 0, \dots, C_v ; \quad E(\rho_v, 0) = 1 \quad (2.6)$$

No dimensionamento de um enlace necessita-se da inversa da função de *Erlang*, $n(\rho_v, \epsilon_v)$, que fornece o número mínimo de canais para atender o tráfego poissoniano de intensidade ρ_v com probabilidade de bloqueio menor que ϵ_v .

Métodos numéricos têm sido usados para obter a função inversa devido às dificuldades inerentes à fórmula de *Erlang*, dos quais destaca-se o método de bissecção [18]. Limites analíticos inferior e superior da função $n(\rho_v, \epsilon_v)$ são conhecidos e facilitam a aplicação do método de bissecção.

O limite superior de $n(\rho_v, \epsilon_v)$ é dado por [3]

$$n_S = \rho_v \cdot (1 - \epsilon_v) + \frac{1}{\epsilon_v} \quad (2.7)$$

e o limite inferior é dado pelo tráfego escoado [3]

$$n_I = \rho_v \cdot (1 - \epsilon_v) \quad (2.8)$$

O algoritmo 1 determina o número de canais, C_v , para uma probabilidade de bloqueio especificada, ϵ_v . A Tabela 2.1 apresenta o número de canais C_v para $\epsilon_v = 0.01$. Os resultados ilustram o ganho de escala da fórmula de *Erlang*, isto é, a relação entre o número de canais e o tráfego diminui à medida que o tráfego aumenta.

Algoritmo 1 - Cálculo da capacidade C_v

```

 $n_I \leftarrow (1 - \epsilon_v)\rho_v$ 
 $n_S \leftarrow (1 - \epsilon_v)\rho_v + \frac{1}{\epsilon_v}$ 
while  $n_S > n_I + 1$  do

   $n \leftarrow \left\lceil \frac{n_S + n_I}{2} \right\rceil$ 

  if  $E(\rho_v, n) < \epsilon_v$  then
     $n_S \leftarrow n$ 
  else
     $n_I \leftarrow n$ 
  end if
end while
 $C_v \leftarrow n_S$ 

```

2.3 Dimensionamento dos Canais de Dados

O dimensionamento do sistema para atendimento ao serviço de dados deve atender a dois parâmetros especificados para a qualidade de serviço: probabilidade de descarte de pacotes, ϵ ; e tempo de transferência, Δ .

Tabela 2.1: Resultados obtidos para o dimensionamento dos canais de voz

Tráfego em Erlang	Capacidade $\epsilon = 0.01$	Ganho de escala
ρ_v	C_v	C_v/ρ_v
1	5	5
5	11	2.2
10	18	1.8
15	24	1.6
20	30	1.5
25	36	1.44
30	42	1.4
35	47	1.34
40	53	1.32
45	58	1.29
50	64	1.28

A capacidade C , expressa em número de canais, tendo cada um taxa γ , é inicialmente determinada a partir do modelo M/M/1, utilizando-se como índice de desempenho apenas o tempo de transferência. A seguir, usando-se o modelo M/M/1/b, avalia-se o resultado da solução obtida com o modelo M/M/1, no tempo de transferência e na probabilidade de descarte. O número de canais C é então obtido pelo máximo do resultado de duas equações, uma resultante da fila M/M/1 e outra de uma aproximação da fila M/M/1/b.

2.3.1 Fila M/M/1

O tempo de espera dos pacotes no *buffer* é dado por [12]

$$E\{W\} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (2.9)$$

e o tempo de médio de transferência por

$$E\{T\} = E\{W\} + \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1}{1 - \rho} = \frac{\delta}{C - r} \quad (2.10)$$

A capacidade C que garante que o tempo médio de transferência seja menor ou, no máximo, igual a Δ é dada por

$$C = r + \frac{\delta}{\Delta} \quad (2.11)$$

e o número médio de pacotes no sistema, $E\{N\}$, é dado por

$$E\{N\} = \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{r}{C - r} = \frac{\Delta}{\delta} r \quad (2.12)$$

Como resultado do dimensionamento obtido na Equação (2.11), o número médio de pacotes cresce linearmente com o tráfego de dados e considerando-se que o *buffer* do sis-

tema não é de fato infinito, é possível que a probabilidade de descarte de pacotes cresça indesejavelmente para altos valores de tráfego.

A seção seguinte analisa o impacto da solução proposta na Equação (2.11) em um sistema com *buffer* finito.

2.3.2 Fila M/M/1/b

A probabilidade de descarte de pacotes devido à ocupação do *buffer* é dada por [12]

$$P = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{b+1}} \rho^b \quad (2.13)$$

onde b é o número máximo de pacotes no sistema (o *buffer* de espera tem capacidade $b-1$).

O número médio de pacotes no sistema, $E\{N\}$, é dado por

$$E\{N\} = \frac{1}{1 - \rho} - \frac{1 + b\rho^{b+1}}{1 - \rho^{b+1}} \quad (2.14)$$

e o tempo de médio de transferência por

$$E\{T\} = \frac{E\{N\}}{\lambda(1 - P)} \quad (2.15)$$

com

$$\lambda = \frac{r}{\delta} \quad (2.16)$$

A probabilidade de descarte, P , em função do tráfego de pacotes, r , é mostrada na Figura 2.2 para $b = 50$ e capacidade C definida conforme Equação (2.11) com $\Delta = 1$ s e $\delta/\Delta = 1$. A Figura 2.2 também mostra o desempenho do tempo médio de transferência e do número médio de pacotes no sistema. O tempo de transferência satisfaz as restrições para toda a faixa de tráfego, mas a probabilidade de descarte cresceu significativamente com o aumento de tráfego indicando que a capacidade definida pela Equação (2.11) pode não ser suficiente para atender as especificação de probabilidade de descarte.

Uma forma simples de garantir o atendimento da especificação de uma probabilidade de descarte, ϵ , pode ser obtida por uma aproximação da Equação (2.13), dada por

$$P \approx \rho^b \leq \epsilon \quad (2.17)$$

determinando que o número de canais satisfaça a relação

$$C = \epsilon^{-\frac{1}{b}} r \quad (2.18)$$

Observe que na condição dessa equação o valor de ρ é constante e dado por

$$\rho = \epsilon^{\frac{1}{b}} \quad (2.19)$$

que implica valores constantes para a probabilidade de descarte e número médio de pacotes no sistema.

A Figura 2.3 mostra o desempenho do sistema quando a capacidade é o máximo entre os valores obtidos pela Equação (2.11) e pela Equação (2.18). A especificação da probabilidade de descarte é $\epsilon = 0.0001$ e as demais condições são as mesmas que da Figura 2.2.

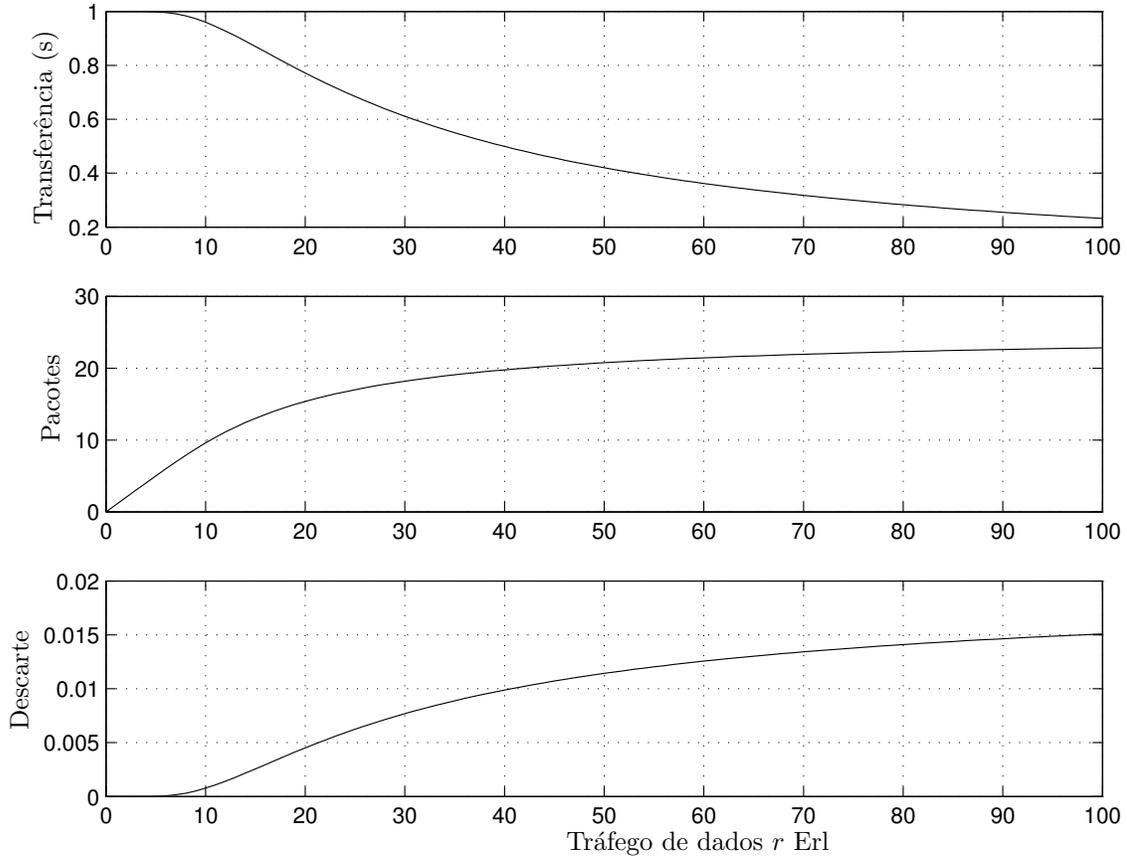


Figura 2.2: Desempenho da fila M/M/1/b com capacidade dada pela Equação (2.11)

Observe na Figura 2.3 que o comportamento das curvas altera-se a partir de aproximadamente 5 *Erl*, pois a capacidade é determinada para tráfego de baixa intensidade pela Equação (2.11) e para alto tráfego pela Equação (2.18), sendo o valor de limiar dado por

$$r_{limiar} = \frac{\delta}{\Delta} (\epsilon^{-\frac{1}{b}} - 1)^{-1} \quad (2.20)$$

As Equações (2.11) e (2.18) destacam a simplicidade com que os parâmetros do sistema afetam a capacidade aproximada para atender às especificações de tempo de transferência e de probabilidade de descarte.

Se o objetivo fosse de fato determinar a mínima capacidade necessária, as Equações (2.15) e (2.13) deveriam ser resolvidas para atender às especificações Δ e ϵ conforme proposto por [8].

2.4 Conclusões

O tempo médio de transferência e a probabilidade de descarte de pacotes de dados foram descritos usando os modelos M/M/1 e M/M/1/b, o que permitiu obter a capacidade de transmissão em função explícita dos parâmetros de qualidade de serviço. A introdução do conceito de limiar de tráfego permitiu a análise da relação entre os parâmetros de qualidade

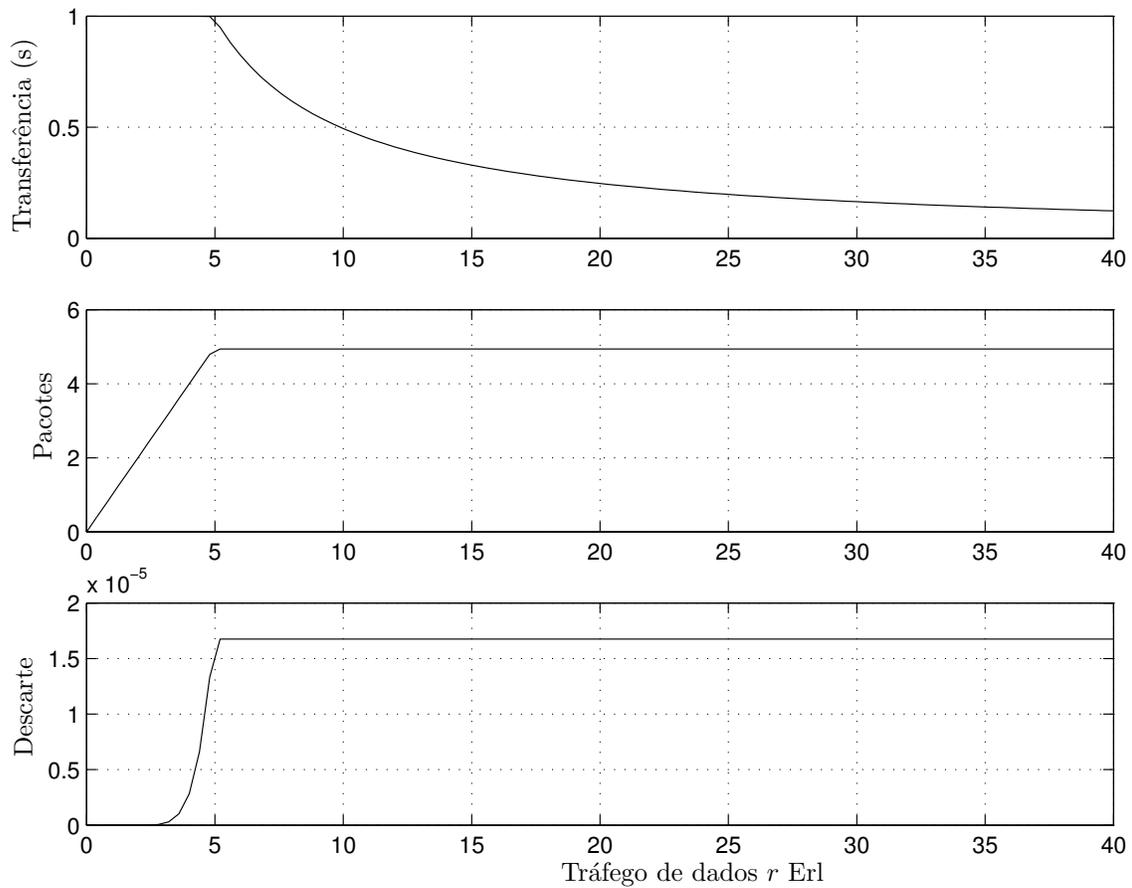


Figura 2.3: Desempenho da fila $M/M/1/b$ com capacidade dada pelo máximo entre os valores obtidos pela Equação (2.11) e pela Equação (2.18)

de serviço, a intensidade do tráfego, o tamanho do *buffer* e o tempo médio de transmissão de um pacote por um canal de dados δ .

Usando o algoritmo de bissecção e a fórmula de *Erlang*, o número de canais para atender o tráfego de voz foi obtido.

Capítulo 3

Dimensionamento de Enlace com Compartilhamento de Canais

3.1 Introdução

O sistema utiliza a comutação por circuito para o serviço de voz e utiliza a comutação por pacotes para o serviço de dados, e emprega o esquema de alocação de canais com compartilhamento parcial, no qual C canais são reservados exclusivamente para transmissão de pacotes de dados e os demais canais do sistema, C_v canais, são compartilhados entre os serviços de voz e os serviços de dados.

O esquema de alocação dos canais entre o serviço de voz e o serviço de dados é mostrado na Figura 3.1, na qual a variável aleatória V descreve o número de canais tomados pelas chamadas telefônicas bem sucedidas ($0 \leq v < C_v$) e X , a variável aleatória que representa o número de canais não tomados pela chamadas telefônicas ($0 \leq x < C_v$).

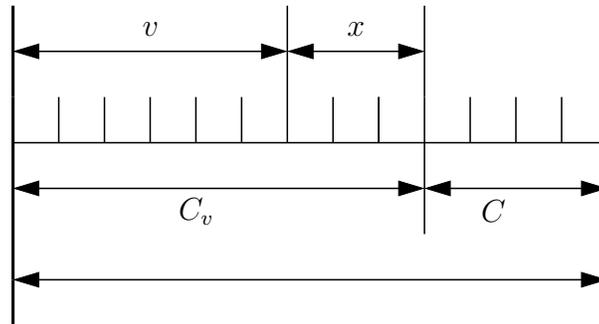


Figura 3.1: Esquema de alocação dos canais.

O número de canais disponíveis para o tráfego de dados é igual a $(C + x)$, resultando em uma taxa de transmissão igual a $(C + x)\gamma$, sendo γ a taxa de transmissão por canal.

Dentre os C_v canais, o serviço de voz é prioritário em relação ao serviço de dados e os pacotes de dados podem sofrer preempção pela chegada de uma chamada de voz. Neste caso, o restante do pacote de dados é armazenado e é prioritariamente (em relação aos demais pacotes de dados no *buffer*) enviado em um próximo acesso bem sucedido. Cada estação tem um *buffer* para armazenar os pacotes quando o acesso é negado, sendo b o limite para o número máximo de pacotes de dados presentes no sistema. Se um novo pacote de

dados é gerado e b pacotes já estiverem presentes no sistema, o pacote é bloqueado e eliminado do sistema.

As estações móveis geram pacotes com distribuição de Poisson, sendo λ a taxa total média de pacotes gerada pelas estações presentes no sistema. O comprimento dos pacotes tem distribuição exponencial com tamanho médio $E\{Z\}$ e com tempo médio de serviço $1/\mu$.

O serviço de dados usa toda a capacidade disponível no sistema, $(C + x)$ canais, para a transmissão do pacote de dados. Assim, o tempo de retenção do canal é resultado da divisão do tamanho do pacote pela taxa de transmissão do canal, $(C + x)\gamma$. As retransmissões devido ao esquema ARQ de proteção contra erros no meio de transmissão aumentam o tamanho efetivo médio dos pacotes de dados e o parâmetro $1/\mu$ leva em conta essas retransmissões.

O fator de carga do tráfego de dados ρ pode ser escrito como

$$\rho = \lambda \frac{1}{\mu} = \lambda \frac{E\{Z\}}{(C + x)\gamma} = \frac{r}{(C + x)} \quad (3.1)$$

com r , fator de carga normalizado por canal, definido por

$$r = \frac{\lambda E\{Z\}}{\gamma} \quad (3.2)$$

A taxa de transmissão de pacotes μ pode ser escrita como

$$\mu = \frac{(C + x)\gamma}{E\{Z\}} = \frac{(C + x)}{\delta} \quad (3.3)$$

com δ , tempo médio de transmissão de um pacote por um canal de dados, definido por

$$\delta = \frac{E\{Z\}}{\gamma} = \frac{1}{\nu} \quad (3.4)$$

sendo ν a taxa de transmissão de pacotes por canal.

As estações móveis geram chamadas de voz com distribuição poissoniana e com taxa total média λ_v . O tempo médio de retenção é $1/\mu_v$ e a distribuição é exponencial. As chamadas de voz bloqueadas são eliminadas do sistema.

O fator de carga do tráfego de voz ρ_v pode ser escrito como

$$\rho_v = \frac{\lambda_v}{\mu_v} \quad (3.5)$$

3.2 Modelo Markoviano Bidimensional

A probabilidade conjunta $p_{d,v}(d, v)$ do número de canais de voz ocupados e do número de pacotes de dados no sistema pode ser obtida pela resolução das equações de equilíbrio da cadeia markoviana do sistema, cujo exemplo para $C_v = 2$, $C = 1$ e $b = 3$ é mostrado na Figura 3.2. As transições verticais mostram chegadas e finais de transmissão de pacotes (PDU), e as horizontais, início e fim de ocupação dos canais telefônicos. A taxa 3ν , na coluna da esquerda, indica que a capacidade dos três canais ($C_v + C$) está sendo usada para transmitir um pacote. No estado $(3, 0)$ um pacote está sendo transmitido e dois estão na fila de espera. No estado $(3, 1)$, um pacote está sendo transmitido usando a capacidade de dois

canais, e um canal está transmitindo voz. As transições tracejadas indicam a chegada de um canal de voz que causa a preempção de um dos canais usados na transmissão do pacote. Observe que o estado alcançado tem capacidade de transmissão de pacote diminuída de uma unidade.

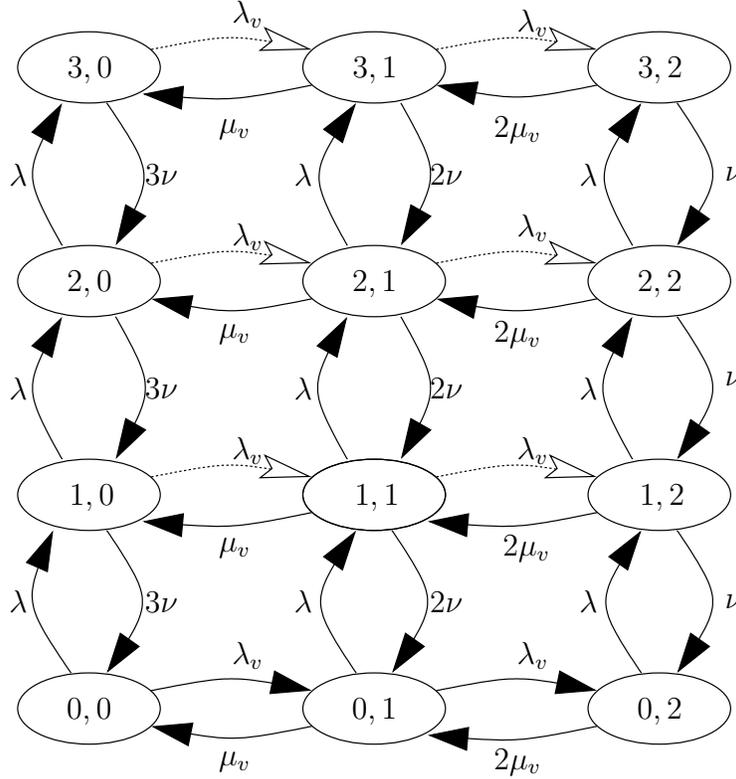


Figura 3.2: Cadeia de *Markov* para $C_v = 2$, $C = 1$ e $b = 3$ (Os ramos tracejados indicam preempção).

As equações de equilíbrio para a cadeia de *Markov* bidimensional em questão podem ser escritas como

$$\pi Q = 0 \quad ; \quad \sum_{\kappa=1}^{\eta} \pi(\kappa) = 1 \quad ; \quad \eta = (b+1)(C_v+1) \quad (3.6)$$

sendo Q a matriz de transição de estados e π o vetor linha de probabilidades, solução das equações de equilíbrio.

As equações de equilíbrio são

$$\begin{aligned} q(\kappa_{d,v}, \kappa_{d,v+1}) &= \lambda_v & ; & \quad v = 0, \dots, (C_v - 1) & ; & \quad d = 0, \dots, b \\ q(\kappa_{d,v}, \kappa_{d,v-1}) &= v\mu_v & ; & \quad v = 1, \dots, C_v & ; & \quad d = 0, \dots, b \\ q(\kappa_{d,v}, \kappa_{d+1,v}) &= \lambda & ; & \quad v = 0, \dots, C_v & ; & \quad d = 0, \dots, (b-1) \\ q(\kappa_{d,v}, \kappa_{d-1,v}) &= (C + C_v - v)\nu & ; & \quad v = 0, \dots, C_v & ; & \quad d = 1, \dots, b \end{aligned} \quad (3.7)$$

com o índice $\kappa_{d,v}$ dado por

$$\kappa_{d,v} = d + (b + 1)v + 1 \quad (3.8)$$

A probabilidade conjunta de voz e de dados é dada por

$$p_{d,v}(d, v) = \pi(\kappa_{d,v}) \quad (3.9)$$

A Figura 3.3 mostra a cadeia de *Markov* para um sistema com $C_v = 1$, $b = 2$ e C canais de dados.

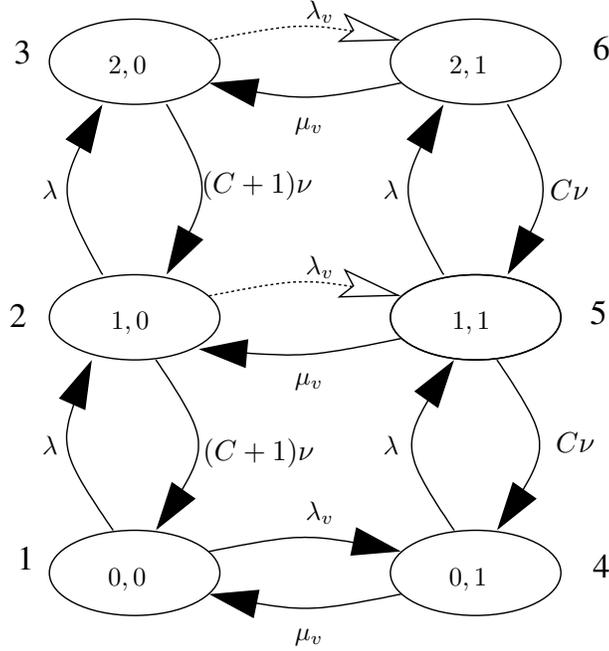


Figura 3.3: Cadeia de *Markov* para $C_v = 1$, $b = 2$ e C canais de dados. Os ramos tracejados indicam preempção.

Sendo a matriz de transição de estados Q (observe que a soma das colunas é nula em todas as linhas da matriz Q) dada por

$$\begin{bmatrix} (\lambda + \lambda_v) & -\lambda & 0 & -\lambda_v & 0 & 0 \\ -(C+1)\nu & \lambda + \lambda_v + (C+1)\nu & -\lambda & 0 & -\lambda_v & 0 \\ 0 & -(C+1)\nu & \lambda_v + (C+1)\nu & 0 & 0 & -\lambda_v \\ -\mu_v & 0 & 0 & \lambda + \mu_v & -\lambda & 0 \\ 0 & -\mu_v & 0 & -C\nu & \lambda + \mu_v + C\nu & -\lambda \\ 0 & 0 & -\mu_v & 0 & -C\nu & C\nu + \mu_v \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

A probabilidade marginal de dados é dada por

$$p(d) = \sum_{v=0}^{C_v} p_{d,v}(d, v) \quad (3.11)$$

O número médio de pacotes no sistema é dado por

$$E\{N\} = \sum_{d=0}^b dp(d) \quad (3.12)$$

e o tempo médio de transferência de pacotes é obtido pelo teorema de *Little*

$$E\{T\} = \frac{E\{N\}}{\lambda \cdot (1 - p(b))}. \quad (3.13)$$

A probabilidade marginal de voz é dada por

$$p_v(v) = \sum_{d=0}^b p_{d,v}(d, v) \quad (3.14)$$

3.3 Modelo Condicional

Observe, nas Equações (3.7), que as taxas de transição de estados envolvendo mudança na ocupação de um canal de voz não dependem do número de pacotes de dados no sistema (as taxas associadas às transições horizontais na Figura 3.2 não dependem da linha considerada, isto é, não dependem do número de pacotes no sistema). Por outro lado, as taxas de transição de estado envolvendo a mudança de um pacote no sistema dependem do número de canais ocupados por voz.

Desta forma, o número de canais tomados por voz é descrito por uma fila M/M/ C_v / C_v [19], e a probabilidade marginal é dada por

$$p_v(v) = \frac{\frac{\rho_v^v}{v!}}{\sum_{k=0}^{C_v} \frac{\rho_v^k}{k!}} ; \quad v = 0, 1, \dots, C_v \quad (3.15)$$

Portanto, a probabilidade de bloqueio do serviço de voz é dada pela fórmula de *Erlang*, computada conforme 2.6

$$p_v(C_v) = E(\rho_v, C_v) \quad (3.16)$$

É importante destacar que a probabilidade de ocupação dos canais telefônicos foi obtida sem a necessidade de resolver explicitamente as equações de equilíbrio da cadeia markoviana bidimensional. Entretanto, o cálculo da probabilidade do número de pacotes presentes no sistema necessitaria, *a priori*, da resolução das equações de equilíbrio.

A complexidade da cadeia cresce significativamente com o tamanho do *buffer* e com o número de canais do sistema, de fato, ela é proporcional ao produto $(C_v + 1)(b + 1)$. A determinação explícita da probabilidade $p_v(v)$ permite o desenvolvimento de um modelo aproximado de qualidade muito boa. Para desenvolvimento dessa aproximação, considere a probabilidade de estado descrita como

$$p_{d,v}(d, v) = p(d/v)p_v(v) \quad (3.17)$$

A probabilidade condicional $p(d/v)$ pode ser determinada aproximando o número de pacotes no sistema por uma fila M/M/1/b, na qual o servidor tem uma taxa de transmissão igual a $(C+x)\gamma$, com $x = C_v - v$.

Desta forma, tem-se

$$p(d) = \sum_v p_{d,v}(d, v) = \sum_{x=0}^{C_v} p(d/x)q_v(x) \quad (3.18)$$

sendo $q_v(x)$ a probabilidade de haver x canais de voz desocupados, que é dada por

$$q_v(x) = \frac{\rho_v^{C_v-x}}{(C_v-x)!} \frac{1}{\sum_{k=0}^{C_v} \frac{\rho_v^k}{k!}} ; \quad x = 0, 1, \dots, C_v \quad (3.19)$$

A probabilidade condicional de pacotes no sistema, modelada pela fila M/M/1/b é dada por [12]

$$p(d/x) = \frac{1-\rho}{1-\rho^{b+1}} \rho^d \quad (3.20)$$

e a dependência de ρ com x é dada pela Equação (3.1).

O número médio condicional de pacotes no sistema é dado por

$$E\{N/x\} = \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{\rho(b\rho^b+1)}{1-\rho^{b+1}} + 1 - p(0/x) \quad (3.21)$$

e o número médio de pacotes no sistema é dado por

$$E\{N\} = \sum_{x=0}^{C_v} E\{N/x\}q_v(x) \quad (3.22)$$

O tempo médio de transferência de um pacote é dado pelo teorema de *Little*

$$E\{T\} = \frac{E\{N\}}{\lambda(1-p(b))} \quad (3.23)$$

A seção seguinte destaca a qualidade do modelo aproximado, comparando-o com a resolução das equações de equilíbrio da cadeia markoviana. É importante enfatizar que a aproximação foi inspirada no trabalho de *Ghani* e *Schwartz* [11] que mostraram que uma cadeia bidimensional pode ser aproximada por duas cadeias unidimensionais quando os tempos de retenção dos dois serviços são bastantes distintos. Em geral, os canais de voz têm tempo de retenção significativamente maiores do que o tempo de transmissão de um pacote, o que justifica, *a priori*, a aproximação considerada.

3.4 Comparação Numérica

A distribuição de probabilidade de ocupação do *buffer* foi computada usando as equações de equilíbrio da cadeia bidimensional, Equação (3.7), e com o modelo condicional, Equação

(3.18), para diversos valores de parâmetros e tráfegos com o intuito de validar a qualidade do modelo condicional.

A Figura 3.4 mostra as probabilidades de ocupação do *buffer* para: $\rho_v = 10$ Erl ($\mu_v^{-1} = 180$ s), $r = 10$ Erl ($\mu^{-1} = 1$ s), $C_v = 18$, $C = 11$ e $b = 50$ (condições nominais, vide Tabela 3.1). A figura ilustra a adequação do modelo condicional para dimensionamento nas condições nominais. A Figura 3.5 mostra a probabilidade de ocupação dos canais de voz. Observe que a probabilidade de bloqueio é da ordem de 1%.

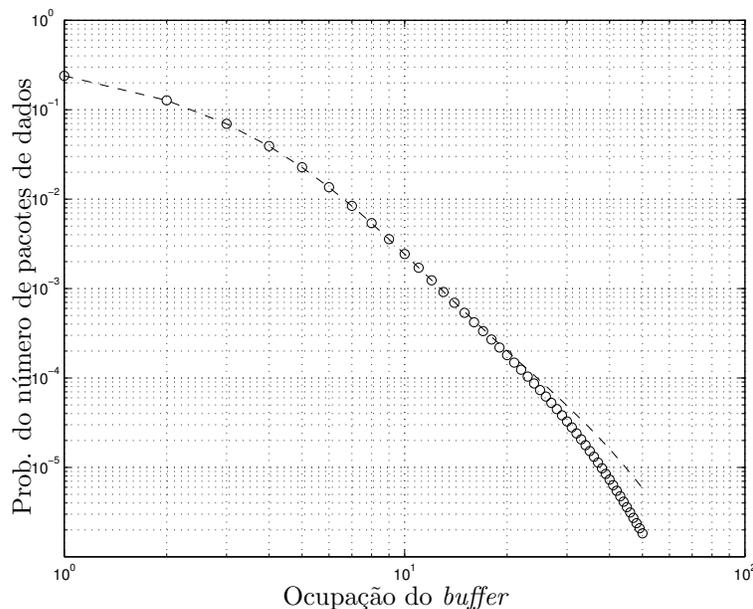


Figura 3.4: Distribuição da probabilidade do número de pacotes de dados para: $\rho_v = 10$ Erl, $r = 10$ Erl, $C_v = 18$, $C = 11$ e $b = 50$. Modelo condicional (curva contínua) e Cadeia bidimensional (círculos).

A Figura 3.6 apresenta a probabilidade de ocupação do buffer para um aumento de 30% nos tráfegos de voz e de dados em relação aos valores nominais usados no cômputo da Figura 3.4. Apesar da discrepância entre os resultados dos dois modelos, é importante destacar que o modelo condicional é conservador nos cálculos da probabilidade de descarte de pacotes e do tempo médio de transferência. A Figura 3.7 mostra que a probabilidade de bloqueio dos canais de voz é maior que 4%, evidenciando que trata-se de uma sobrecarga bastante significativa.

A qualidade da aproximação depende da relação entre o tempo médio do serviço de voz e de dados [11]. A Figura 3.8 ilustra a qualidade da aproximação para diversos valores da relação ν/μ_v . Observe que as diferenças de desempenho diminuem a medida que a relação entre os tempos médios de serviço aumentam. A taxa de preempção dos pacotes de dados é tanto menor quanto menor for a taxa de chamadas de voz e, portanto, quanto maior for o tempo de retenção do serviço de voz, para um dado valor de tráfego de voz. O modelo condicional não considera as preempções no tráfego de dados e, portanto, é tanto melhor quanto menor for o tempo de retenção de voz para um mesmo valor de tráfego.

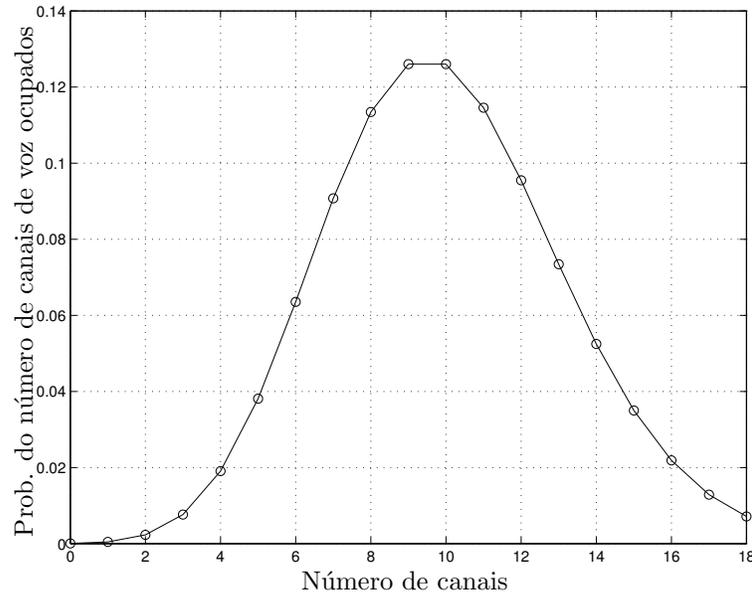


Figura 3.5: Distribuição da probabilidade do número de canais de voz ocupados para: $\rho_v = 10$ Erl, $r = 10$ Erl, $C_v = 18$, $C = 11$ e $b = 50$. Modelo condicional (curva contínua) e Cadeia bidimensional (círculos).

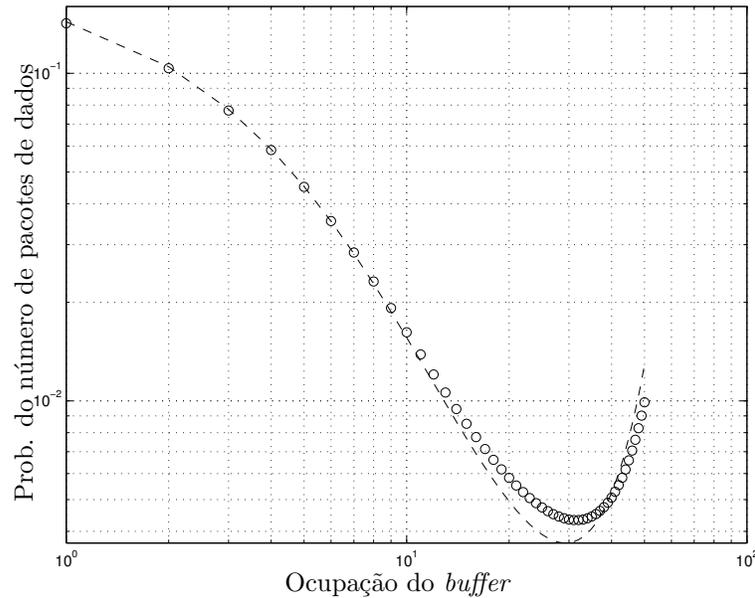


Figura 3.6: Distribuição da probabilidade do número de pacotes de dados para: $\rho_v = 13$ Erl, $r = 13$ Erl, $C_v = 18$, $C = 11$ e $b = 50$. Modelo condicional (curva contínua) e Cadeia bidimensional (círculos).

3.5 Dimensionamento do Enlace sem Fio

O modelo condicional é usado para dimensionamento dos canais de voz e de dados devido a sua qualidade e simplicidade.

O número de canais de voz, C_v , é computado para uma probabilidade de bloqueio

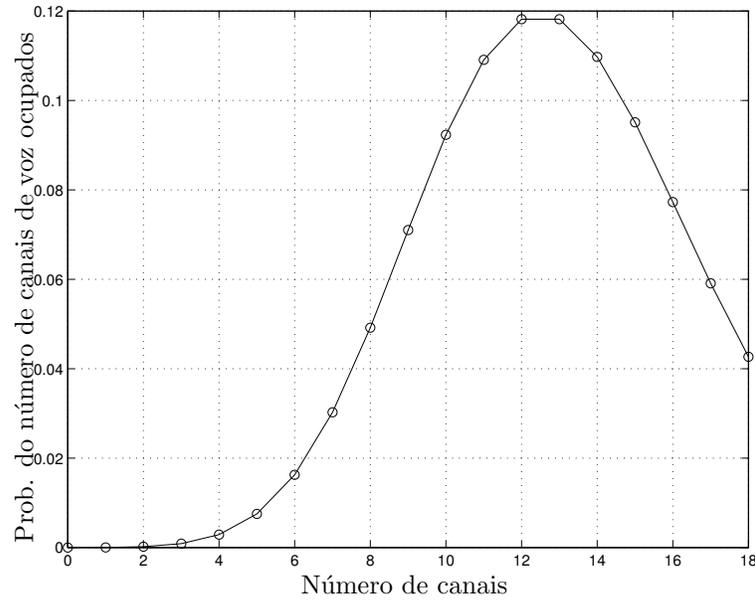


Figura 3.7: Distribuição da probabilidade do número de canais de voz ocupados para: $\rho_v = 13$ Erl, $r = 13$ Erl, $C_v = 18$, $C = 11$ e $b = 50$. Modelo condicional (curva contínua) e Cadeia bidimensional (círculos).

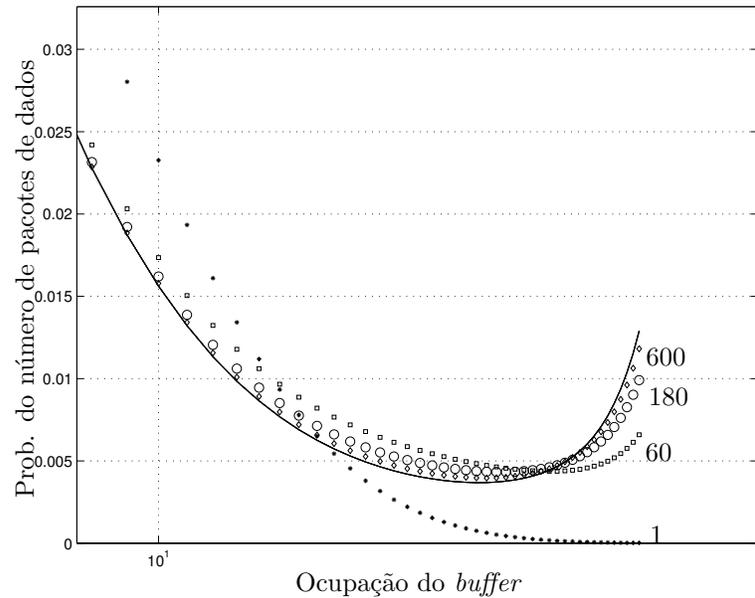


Figura 3.8: Distribuição da probabilidade do número de pacotes de dados para: $\rho_v = 13$ Erl, $r = 13$ Erl, $C_v = 18$, $C = 11$ e $b = 50$. Modelo condicional (curva contínua) e Cadeia bidimensional (outras curvas para diversos valores da relação ν/μ_v).

especificada, ϵ_v , segundo o Algoritmo 1 e o número de canais de dados, pelo Algoritmo 2 que determina o número de canais, C , para um probabilidade de descarte de pacotes especificada, ϵ , e para um tempo de transferência de pacotes especificado, Δ .

Algoritmo 2 - Cálculo do número de canais C

```

{ $E\{T\}$  dado pela Eq. 3.23 e  $p(b)$  dado pela Eq. 3.18}

 $C \leftarrow 0$ 
if  $E\{T\} > \Delta$  ou  $p(b) > \epsilon$  then
   $C \leftarrow 1$ 
  while  $E\{T\} > \Delta$  ou  $p(b) > \epsilon$  do
     $C \leftarrow 2C$ 
  end while
   $n_I \leftarrow C/2$ 
   $n_S \leftarrow C$ 
  while  $n_S > n_I + 1$  do

     $C \leftarrow \left\lceil \frac{n_S + n_I}{2} \right\rceil$ 
    if  $E\{T\} > \Delta$  ou  $p(b) > \epsilon$  then
       $n_I \leftarrow C$ 
    else
       $n_S \leftarrow C$ 
    end if
  end while
   $C \leftarrow n_S$ 
end if

```

3.5.1 Resultados para o Modelo Condicional

O cenário para teste dos algoritmos de dimensionamento considera que os pacotes de dados tem tamanho médio $E\{Z\} = 13.4 \text{ kbits}$, e que o canal GSM/GPRS usa codificação CS-2 com 13.4 kbps resultando em um tempo médio de transmissão de pacote por canal igual a $\delta = 1 \text{ s}$ [4].

As especificações de qualidade de serviço são:

- probabilidade de bloqueio para pedido de conexão de voz, $\epsilon_v = 0.01$;
- probabilidade de descarte de pacote de dados, $\epsilon = 0.0001$;
- tempo médio de transferência de pacotes, $\Delta = 1 \text{ s}$.

As capacidades C_v e C resultantes da aplicação dos algoritmos de dimensionamento para diferentes valores de tráfego de voz e de dados, e de tamanho de *buffer* são mostrados na Tabela 3.1, nas colunas *cc*. Os valores resultantes do tempo de transferência e da probabilidade de descarte de pacotes são também mostrados normalizados em relação aos valores especificados, T_n e P_n respectivamente.

O número de canais obtidos sem compartilhamento, usando as Equações (2.13) e (2.15), são apresentados nas colunas *sc*.

O compartilhamento de canais resultou em uma pequena diminuição do número de canais de dados para praticamente todos os casos analisados. A redução é maior quando o *buffer* é pequeno.

Tabela 3.1: Capacidades obtidas pelo modelo condicional para $\delta/\Delta = 1$; $\epsilon = 0.0001$ e $\epsilon_v = 0.01$.

Tráfego em Erlang		$\epsilon_v = 0.01$	$b = 100$				$b = 50$				$b = 10$			
ρ_v	r		C_v	<i>sc</i>	<i>cc</i>			<i>sc</i>	<i>cc</i>			<i>sc</i>	<i>cc</i>	
			C	C	P_n	T_n	C	C	P_n	T_n	C	C	P_n	T_n
1	1	5	2	1	0.32	0.43	2	1	0.6	0.35	3	2	0.02	0.21
10	1	18	2	1	0.70	0.51	2	2	3e-14	0.13	3	2	0.04	0.13
30	1	42	2	1	0.73	0.48	2	2	3e-14	0.10	3	2	0.04	0.10
1	10	5	11	10	0.30	0.29	12	10	0.73	0.28	24	21	0.69	0.07
10	10	18	11	10	0.70	0.19	12	11	0.06	0.13	24	18	0.92	0.06
30	10	42	11	10	0.73	0.15	12	11	0.06	0.10	24	17	0.85	0.06
1	30	5	32	30	0.57	0.28	35	32	0.54	0.17	72	68	0.93	0.02
10	30	18	32	30	0.89	0.16	35	32	0.37	0.11	72	64	0.99	0.02
30	30	42	32	30	0.88	0.12	35	32	0.32	0.09	72	62	0.88	0.02

Os limiares de tráfego, computados sem compartilhamento conforme Equação (2.20) são: 10.4 Erl para $b = 100$; 4.94 Erl para $b = 50$ e 0.66 Erl para $b = 10$. O número de canais de dados deve satisfazer duas restrições: probabilidade de descarte e tempo de transferência. Para diferentes valores de tráfego e de tamanho de *buffer* uma dessas duas restrições isoladamente determina o número de canais. Para o caso com compartilhamento, a probabilidade ϵ foi o fator determinante do número de canais de dados para tráfego de dados de 30 Erl, em todos os casos de tamanho de *buffer*; e foi para $b = 10$, em todos os casos de tráfego. O efeito de limiar não é claramente distinguível para os demais casos, provavelmente devido ao compartilhamento de canais.

Sobrecarga de Tráfego

A sensibilidade dos algoritmos de dimensionamento às variações de tráfego foram analisadas através de simulação, usando o modelo condicional. Devido ao mecanismo de preempção, a probabilidade de bloqueio de voz é invariante com o tráfego de dados e, portanto, não foi simulada. Também, não foi simulado o comportamento da probabilidade de bloqueio de voz com a variação do tráfego de voz, pois deriva diretamente da fórmula de *Erlang* e é amplamente conhecido na literatura.

A probabilidade de descarte de pacotes de dados e o tempo médio de transferência de pacotes, em função da variação do tráfego de voz para $b = 100$, são mostrados nas Figuras 3.9 e 3.10. A abscissa está normalizada em relação ao valor nominal do tráfego de voz, usado para o dimensionamento, isto é, o tráfego de voz varia de 0 a 60 Erl para a curva associada ao tráfego $\rho_v = 30$ Erl, varia de 0 a 20 Erl para a curva associada ao tráfego $\rho_v = 10$ Erl, e varia de 0 a 2 Erl para a curva associada ao tráfego $\rho_v = 1$ Erl. A probabilidade de descarte e tempo médio de transferência de pacotes são bastante sensíveis à sobrecarga de tráfego de voz. Entretanto, observe que os valores absolutos da probabilidade de bloqueio e do tempo médio de transferência são aceitáveis para o desempenho do sistema.

A probabilidade de descarte de pacotes é mais sensível ao aumento do tráfego de voz quanto maior o tráfego nominal de voz. Esse comportamento pode ser explicado, pelo fato

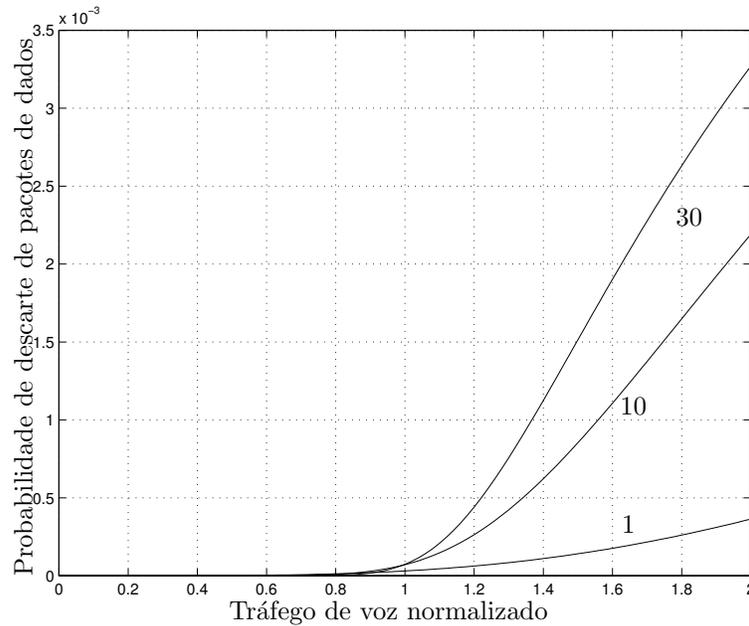


Figura 3.9: Probabilidades de descarte de pacotes de dados para $b = 100$ e $r = 10$ Erl parametrizadas em função do tráfego nominal de voz.

de que no dimensionamento do número de canais de voz, devido ao comportamento de ganho de escala da fórmula de *Erlang*, a ocupação média dos canais é tanto maior quanto maior o tráfego de voz, em particular de 20%, 55% e 72% para os tráfegos de 1, 10 e 30 Erl, respectivamente.

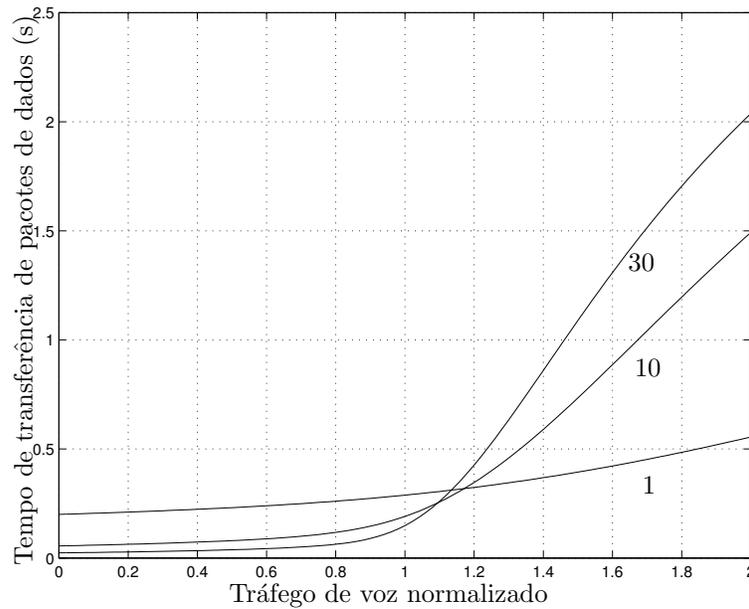


Figura 3.10: Tempos médios de transferência de pacotes para $b = 100$ e $r = 10$ Erl parametrizados em função do tráfego nominal de voz.

O tempo médio de transferência de pacotes, também, é mais sensível ao aumento do tráfego de voz quanto maior o tráfego nominal de voz. Entretanto, a sensibilidade relativa

é muito menor que no caso do descarte de pacotes.

A probabilidade de descarte de pacotes de dados e o tempo médio de transferência de pacotes, em função da variação do tráfego de dados para $b = 100$, são mostrados nas Figuras 3.11 e 3.12. A abscissa está normalizada em relação ao valor nominal do tráfego de dados, usado para o dimensionamento, isto é, o tráfego de dados varia de 0 a 20 Erl para as três curvas.

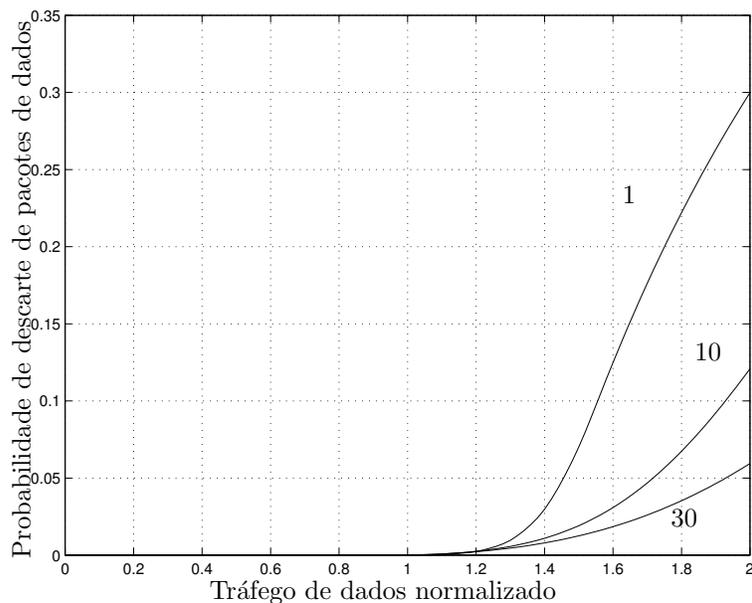


Figura 3.11: Probabilidades de descarte de pacotes de dados para $b = 100$ e $r = 10$ Erl parametrizadas em função do tráfego nominal de voz.

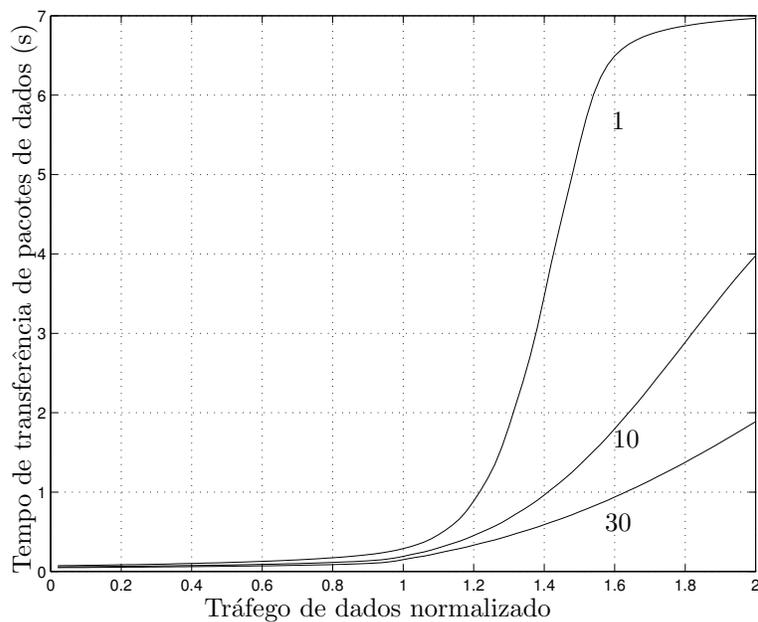


Figura 3.12: Tempos médios de transferência de pacotes para $b = 100$ e $r = 10$ Erl parametrizados em função do tráfego nominal de voz.

A probabilidade de descarte de pacotes e o tempo médio de transferência são muito sensíveis ao aumento do tráfego de dados, e a sensibilidade é tanto maior quanto menor o tráfego nominal de voz. Esse comportamento pode ser explicado pelo número médio de canais de voz não ocupados pelo tráfego de voz, que é tanto maior quanto maior o tráfego nominal de voz, sendo aproximadamente 4, 8 e 12 para os tráfegos de 1, 10 e 30 Erl, respectivamente. A sensibilidade à sobrecarga pode também ser explicada pelo fator de carga nominal do tráfego de dados, que é igual a $\{0.71, 0.55, 0.45\}$ para os casos considerados.

3.6 Conclusões

O dimensionamento do sistema com compartilhamento parcial de canais garante que o serviço de voz não ocupa todos os canais do sistema, degradando o serviço de dados além dos valores máximos especificados como parâmetros de qualidade de serviço. Os pacotes de dados são transmitidos por um único servidor cuja capacidade é resultante do número de canais dedicados exclusivamente ao tráfego de dados mais o número de canais não ocupados por voz. A adoção de prioridade com preempção do serviço de voz sobre o de dados garante que os canais de voz estão sempre disponíveis para as chamadas telefônicas, mesmo em situações de sobrecarga do tráfego de dados. Estas duas condições, compartilhamento parcial dos canais e prioridade com preempção dos serviços de voz sobre o de dados, estabelecem a solução de compromisso para atendimento às duas classes de serviço.

A eficiência do compartilhamento de recursos está diretamente relacionada aos parâmetros de projeto do sistema, como o número máximo de pacotes presentes no sistema, o tráfego nominal de voz e o tráfego nominal de dados. Para todos os tamanhos de *buffer* analisados, o compartilhamento de recursos resultou em uma pequena diminuição no número de canais de dados, com exceção dos casos onde o tráfego de dados é muito pequeno, no quais, reduções de até metade da capacidade foram obtidas. O ganho com o compartilhamento ficou mais evidente nos casos onde o tráfego de voz é alto, uma vez que um número maior de canais de voz estão no sistema para serem compartilhados com o serviço de dados.

A probabilidade de descarte e o tempo médio de transferência de pacotes é muito sensível à sobrecarga do tráfego de dados, devido ao alto fator de carga resultante do dimensionamento. A variação do tráfego de voz, também, influencia bastante a probabilidade de descarte e o tempo de transferência de pacotes, mas, contrariamente ao obtido com a variação do tráfego de dados, a sensibilidade é tanto maior quanto maior for o tráfego nominal de voz.

Capítulo 4

Dimensionamento de Enlace com Prioridade

4.1 Introdução

A transmissão de voz usando comutação por pacotes é atualmente muito bem desenvolvida, existindo diversos protocolos e correspondentes *codecs* com taxas bem reduzidas [15] e [17]. O compartilhamento dos canais do sistema pode ser feito usando comutação de pacotes para voz e dados, dando prioridade aos pacotes de voz.

A estratégia de designar níveis de prioridade para atendimento a diferentes classes de tráfego possibilita que serviços com requisitos de qualidade de serviço distintos, como o caso dos serviços de voz e de dados, sejam tratados de forma diferenciada, permitindo uma maior flexibilidade na utilização dos recursos da rede.

Nas redes de comunicação com prioridade, os pacotes da classe de tráfego com mais alta prioridade são atendidos antes que os pacotes da classe de tráfego com menor prioridade. Entre usuários com a mesma prioridade, o atendimento é realizado com base na disciplina FIFO (*First-in, First-out*)[28]. A disciplina de atendimento com prioridade pode ser com ou sem preempção. No caso de prioridade com preempção, é permitido ao pacote da classe de tráfego com prioridade mais alta, ao chegar ao sistema, interromper imediatamente o serviço do pacote da classe com menor prioridade que estiver sendo servido. O serviço interrompido é retomado apenas após todos os pacotes com mais alta prioridade terem sido servidos.

Um caso apropriado para uso de prioridade ocorre quando duas classes de tráfego que concorrem aos recursos da rede de comunicação possuem tempos de serviço muito diferentes. Se o esquema de prioridade não é usado, o serviço da classe com tempo de serviço pequeno experimenta um tempo de espera muito grande se ao chegar ao sistema encontrar diversos pacotes da classe com tempo de serviço grande. Se, por outro lado, a classe com pequeno tempo de serviço for prioritária, apresentará pequeno atraso médio e não provocará degradação sensível na classe com tempo de serviço grande.

4.2 Sistema Multiusuários

Os principais resultados obtidos na literatura para o tempo médio de espera nos sistemas com várias classes de tráfego e fila infinita são apresentados nessa seção.

4.2.1 Sem Prioridade

O comportamento do sistema multiusuário sem prioridade, apresentado na Figura 4.1, pode ser modelado como uma fila M/G/1 [13]. As taxas médias de chegada e de serviço são dadas por

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad , \quad \frac{1}{\mu} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\lambda} \frac{1}{\mu_i} \quad (4.1)$$

Sendo, λ_i a taxa média do processo poissoniano de chegada de pacotes e μ_i a taxa média do serviço, $i = 1, \dots, N$, das classes de tráfego.

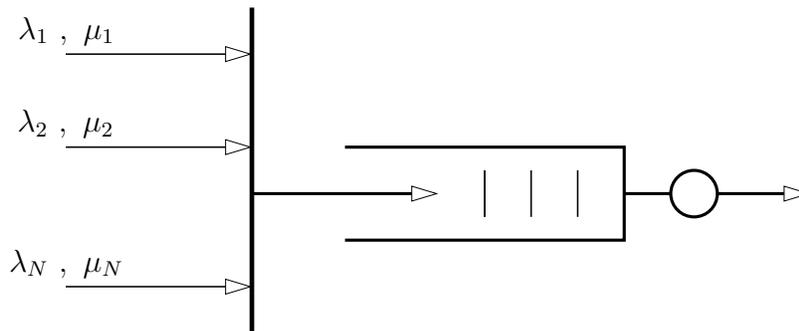


Figura 4.1: Sistema multiusuário.

O tráfego oferecido ao sistema é dado por

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\mu_i} = \frac{\lambda}{\mu} \quad (4.2)$$

O momento de segunda ordem do tempo de serviço é dado por

$$E\{R^2\} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\lambda} E\{R_i^2\} \quad (4.3)$$

sendo $E\{R_i^2\}$ o momento de segunda ordem da i ésima classe de tráfego.

O tempo de espera de um pacote possui duas contribuições: tempo de serviço residual do pacote sendo servido e o tempo de serviço dos pacotes que já estavam esperando na fila. Assim,

$$W = R_0 + \sum_{i=1}^N R_i \quad (4.4)$$

O tempo médio residual do serviço em andamento é dado por

$$E\{R_0/\text{servidor ocupado}\} = \frac{1}{2} \frac{E\{R^2\}}{1/\mu} \quad (4.5)$$

Em um processo de chegada poissoniano, a probabilidade de um pacote, ao chegar no sistema, encontrar um outro pacote sendo servido é igual a ρ . Assim, a contribuição do tempo médio de serviço residual de uma classe de tráfego em serviço, para o tempo médio de espera dos pacotes, é dada por

$$E\{R_0\} = (1 - \rho) \cdot 0 + \rho E\{R_0/\text{servidor ocupado}\} = \frac{\lambda}{2} E\{R^2\} \quad (4.6)$$

A contribuição para o tempo médio de espera, dos pacotes que estavam na fila no momento da chegada de um novo pacote, é dada pelo teorema de *Little*

$$E\{L\} = \lambda E\{W\} \quad (4.7)$$

sendo $E\{L\}$ o número médio de pacotes que estavam na fila quando da chegada de um novo pacote. Assim,

$$\sum_{i=1}^N E\{R_i\} = E\{L\} \frac{1}{\mu} = \rho E\{W\} \quad (4.8)$$

Portanto, o tempo médio de espera na fila para um pacote de uma classe de serviço qualquer é dado por

$$E\{W\} = \frac{E\{R_0\}}{1 - \rho} \quad (4.9)$$

4.2.2 Com Prioridade e Sem Preempção

Em um sistema com prioridade e sem preempção, o tempo de espera de um pacote com prioridade p (a classe p é prioritária em relação às classes $p + 1$, $p + 2$, etc.), possui três contribuições [13], [6] e [28]:

- i) O tempo de serviço residual, R_0 , do pacote sendo servido;
- ii) O tempo de serviço, R_i , dos pacotes com prioridade maior ou igual a p que já estavam na fila;
- iii) O tempo de serviço, R'_i , dos pacotes com mais alta prioridade que chegam ao sistema durante o tempo de espera W_p .

Assim, o tempo de espera para uma classe de serviço p é

$$W_p = R_0 + \sum_{i=1}^p R_i + \sum_{i=1}^{p-1} R'_i \quad (4.10)$$

O tempo médio de serviço $E\{R_i\}$ é dado pelo número médio de pacotes, $E\{L_i\}$, com prioridade $i \leq p$, que estavam esperando na fila vezes o tempo médio de serviço $1/\mu_i$. Assim,

$$E\{R_i\} = E\{L_i\} \frac{1}{\mu_i} \quad (4.11)$$

e, pela fórmula de *Little*, pode ser relacionado com o tempo médio de espera $E\{W_i\}$,

$$E\{R_i\} = E\{L_i\} \frac{1}{\mu_i} = \lambda_i E\{W_i\} \frac{1}{\mu_i} = \rho_i E\{W_i\} \quad (4.12)$$

O tempo médio de serviço $E\{R'_i\}$ depende do número médio de pacotes, $E\{L'_i\}$, com mais alta prioridade, $i < p$, que chegam ao sistema durante o tempo médio de espera $E\{W_p\}$ e é dado por

$$E\{R'_i\} = E\{L'_i\} \frac{1}{\mu_i} = \lambda_i E\{W_p\} \frac{1}{\mu_i} = \rho_i E\{W_p\} \quad (4.13)$$

Então, o tempo médio de espera é dado por

$$E\{W_p\} = E\{R_0\} + \sum_{i=1}^p \rho_i E\{W_i\} + \sum_{i=1}^{p-1} \rho_i E\{W_p\} \quad (4.14)$$

sendo o tempo médio residual de serviço dado por

$$E\{R_0\} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{2} E\{R_i^2\} \quad (4.15)$$

O tempo médio de espera, para cada uma das N classes, é obtido resolvendo o sistema linear de equações descrito em (4.14), e é dado por

$$E\{W_p\} = \frac{E\{R_0\}}{\{1 - \sigma_{p-1}\}\{1 - \sigma_p\}} \quad (4.16)$$

com

$$\sigma_p = \sum_{i=1}^p \rho_i \quad ; \quad \sigma_0 = 0 \quad ; \quad p = 1, \dots, N \quad (4.17)$$

e tempo médio de transferência

$$E\{T_p\} = E\{W_p\} + \frac{1}{\mu_p} \quad (4.18)$$

4.2.3 Com Prioridade e com Preempção

Em um sistema com prioridade e com preempção, a transmissão de um pacote é interrompida pela chegada de um pacote de uma classe de serviço com mais alta prioridade. A transmissão do pacote interrompido é continuada após o pacote de mais alta prioridade ter sido servido.

O tempo de espera, W_p , de uma classe de tráfego com prioridade p possui duas contribuições [13]:

- i) O tempo de serviço dos pacotes com prioridade maior ou igual a p que já estavam no sistema, R_i ;
- ii) O tempo de serviço, R'_i , dos pacotes com prioridade maior que p que chegam ao sistema durante o tempo de espera, W_p , ou durante o tempo de serviço, $1/\mu_p$.

Assim

$$E\{W_p\} = \sum_{i=1}^p E\{R_i\} + \sum_{i=1}^{p-1} E\{R'_i\} \quad (4.19)$$

O tempo médio de serviço, dos pacotes com prioridade maior ou igual a p que já estavam no sistema, pode ser calculado como sendo o tempo médio de espera de um pacote em um sistema sem prioridade, onde existem apenas as p primeiras classes de tráfego

$$\sum_{i=1}^p E\{R_i\} = \frac{E\{R_0(p)\}}{1 - \sigma_p} \quad (4.20)$$

sendo

$$E\{R_0(p)\} = \sum_{i=1}^p \frac{\lambda_i}{2} E\{R_i^2\} \quad (4.21)$$

O tempo médio de serviço dos pacotes com maior prioridade que chegam ao sistema durante a espera ou serviço do pacote de prioridade p é dado por

$$\sum_{i=1}^{p-1} E\{R'_i\} = \sum_{i=1}^{p-1} \lambda_i \left(E\{W_p\} + \frac{1}{\mu_p} \right) \frac{1}{\mu_i} = \left(E\{W_p\} + \frac{1}{\mu_p} \right) \sigma_{p-1} \quad (4.22)$$

Assim,

$$E\{W_p\} = \frac{E\{R_0(p)\}}{1 - \sigma_p} + \left(E\{W_p\} + \frac{1}{\mu_p} \right) \sigma_{p-1} \quad (4.23)$$

Resultando em

$$E\{W_p\} = \frac{E\{R_0(p)\}}{(1 - \sigma_p)(1 - \sigma_{p-1})} + \frac{\sigma_{p-1}}{(1 - \sigma_{p-1})} \frac{1}{\mu_p} \quad (4.24)$$

e tempo médio de transferência

$$E\{T_p\} = E\{W_p\} + \frac{1}{\mu_p} \quad (4.25)$$

4.3 Dimensionamento do Enlace sem Fio

O cenário para análise do dimensionamento do sistema com o modelo de prioridade implementado considera os casos com e sem preempção. São consideradas duas classes de serviço, voz e dados, onde o serviço de voz é prioritário em relação ao serviço de dados.

O serviço de voz e o serviço de dados são comutados por pacotes e compartilham um servidor com capacidade igual a $C + C_v$ canais, com taxa de transmissão igual a $(C + C_v)\gamma$ ($\gamma = 13.4 \text{ kbps}$, nos exemplos numéricos) e *buffer* de tamanho infinito.

Amostras de 20 ms de voz são processadas pelos *codecs* dos sistemas GSM. Para aplicação no contexto GSM/GPRS, foi suposto que esse seria o tempo de transmissão δ_v de um pacote de voz por um canal GPRS, cuja taxa γ de bits do canal PDCH, usando codificação CS-2 do sistema GPRS, é igual a 13.4 *kbps*. O tamanho dos pacotes de voz, $E\{Z_v\}$, conseqüentemente, é igual a 268 *bits*. Genericamente, o tempo de transmissão de um pacote de voz por um canal é dado por

$$\delta_v = E\{Z_v\}/\gamma \quad (4.26)$$

É importante realçar que as questões relativas ao tipo de *codec* usado para implementar esse sistema não foi objeto de estudo deste trabalho. A comutação de voz por pacotes pode ser feita por diferentes taxas usando diferentes *codecs* especificado em vários protocolos existentes na literatura.

Assim, o tempo de transmissão de um pacote de voz, quando $C + C_v$ canais são utilizados, é dado por

$$\frac{1}{\mu_v} = \delta_v/(C + C_v) \quad (4.27)$$

Os pacotes de voz são supostos de tamanho constante, ou seja, com variância nula, resultando no momento de segunda ordem, do tempo de retenção do canal de voz, dado por

$$E\{R_v^2\} = \frac{1}{(\mu_v)^2} \quad (4.28)$$

A taxa média de pacotes de uma conexão de voz foi suposta igual a 50 pps, implicando que um canal de voz gera 13.4 *kbps*. A ocorrência dos pacotes de voz foi suposta poissoniana. A taxa efetiva de ingresso de pacote de voz no sistema é alterada pelo bloqueio das conexões, isto é, o número máximo de conexões estabelecidas é sempre limitado por C_v . Assim, a taxa de pacotes de voz no sistema foi considerada igual à taxa produzida pelo número médio de conexões estabelecidas, que é igual a $\lambda_v(1 - E(\rho_v, C_v))$.

O tamanho dos pacotes de dados tem distribuição exponencial, com taxa de serviço dada por

$$\mu_d = \nu(C + C_v) \quad (4.29)$$

sendo ν a taxa de transmissão de pacotes de dados por canal

$$\nu = \frac{E\{Z_d\}}{\gamma} \quad (4.30)$$

A relação entre a taxa média de pacotes no sistema e o tráfego de dados em Erlangs é dada por

$$\lambda_d = \nu r \quad (4.31)$$

Nos exemplos numéricos, $E\{Z_d\}$ é igual a 13.4 *kbits*.

O momento de segunda ordem é dado por

$$E\{R_d^2\} = \frac{2}{(\mu_d)^2} \quad (4.32)$$

O número total de canais ($C + C_v$) deve satisfazer às especificações de qualidade de serviço para voz e dados, cujos parâmetros são:

- probabilidade de bloqueio para pedido de conexão de voz, $\epsilon_v = 0.01$;
- tempo médio de transferência de pacotes de dados, $\Delta_d = 1$ s;
- tempo médio de transferência de pacotes de voz, $\Delta_v = 20$ ms.

O número de canais de voz, C_v , é dimensionado da mesma forma que na Seção 2.2 e o número de canais de dados, C , é determinado pelo algoritmo 3.

Algoritmo 3 - Cálculo do número de canais C

$\{E\{T_p\}$ dado pela Eq. (4.18) para o caso sem preempção e dado pela Eq. (4.25) para o caso com preempção}

```

C ← 0
N
if  $\bigcup_{p=1} E\{T_p\} > \Delta_p$  then
  C ← 1
  N
  while  $\bigcup_{p=1} E\{T_p\} > \Delta_p$  do
    C ← 2C
  end while
   $n_I \leftarrow C/2$ 
   $n_S \leftarrow C$ 
  while  $n_S > n_I + 1$  do
    C ←  $\left\lceil \frac{n_S + n_I}{2} \right\rceil$ 
    N
    if  $\bigcup_{p=1} E\{T_p\} > \Delta_p$  then
       $n_I \leftarrow C$ 
    else
       $n_S \leftarrow C$ 
    end if
  end while
  C ←  $n_S$ 
end if

```

O número de canais C deve garantir que a capacidade total do sistema, $C + C_v$, seja suficiente para assegurar que os parâmetros de qualidade de serviço não sejam comprometidos: tempo de transferência para os pacotes de dados, Δ_d , e tempo de transferência para os pacotes de voz, Δ_v .

As capacidades C e C_v resultantes do dimensionamento para sistemas com prioridade, sem e com preempção, são mostrados na Tabela 4.1. Os valores normalizados, em relação aos requisitos de qualidade de serviço especificados, para os tempos de transferência de dados e de voz, T_{dn} e T_{vn} , respectivamente, também são apresentados.

Tabela 4.1: Capacidades obtidas com os modelos de prioridade ($\Delta_d = 1$ s e $\Delta_v = 20$ ms)

Tráfego em Erlang		$\epsilon_v = 0.01$	sem preempção			com preempção		
ρ_v	r	C_v	C	T_{vn}	T_{dn}	C	T_{vn}	T_{dn}
1	1	5	4	0.81	0.13	0	0.22	0.33
10	1	18	0	0.42	0.07	0	0.08	0.14
30	1	42	0	0.14	0.03	0	0.05	0.08
1	10	5	19	0.95	0.07	7	0.08	0.97
10	10	18	11	0.93	0.09	3	0.06	0.74
30	10	42	1	0.92	0.26	0	0.05	0.33
1	30	5	35	0.99	0.11	27	0.03	0.97
10	30	18	27	0.97	0.18	23	0.03	0.74
30	30	42	19	0.81	0.81	18	0.02	0.91

O número de canais, C_v , obtidos para atender a especificação de bloqueio de voz foi suficiente para acomodar, também, o tráfego de dados em vários experimentos, quando o tráfego de dados é pequeno. Além disso, a capacidade determinada não usando preempção foi quase sempre maior que aquela quando a preempção foi utilizada. A especificação de tempo de transferência que determinou a capacidade C foi a de voz, para o modelo sem preempção, e a de dados para o modelo com preempção. É possível inferir que, se a especificação de atraso de voz fosse relaxada, por exemplo $\Delta_v = 200$ ms, o número de canais nos modelos com e sem preempção seriam praticamente os mesmos.

Observe que quanto maior o número de canais C_v , menor é o número de canais C para um dado tráfego de dados.

Sobrecarga de Tráfego

A sensibilidade do sistema dimensionado às variações de tráfego foram analisadas através de simulação, na qual a soma do tráfego de dados e do tráfego efetivo de voz são limitadas pela capacidade do sistema devido à hipótese de *buffer* infinito, isto é

$$\rho_v(1 - E(\rho_v, C_v)) + r < C + C_v \quad (4.33)$$

Nas curvas de sobrecarga, as abscissas estão normalizadas em relação ao valor nominal do tráfego de voz ou do tráfego de dados usados para o dimensionamento.

Voz

Devido à prioridade com preempção, da voz sobre os dados, o tempo de transferência dos pacotes de voz é invariante com o tráfego de dados. No sistema com prioridade e sem preempção, o tempo de transferência dos pacotes de voz é bastante sensível à variação do tráfego de voz e de dados. Entretanto, as Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 mostram que os valores absolutos do tempo de transferência de voz são aceitáveis para o desempenho do sistema, em todos os casos analisados. A Figura 4.4 mostra que a degradação é linear com o tráfego de dados.

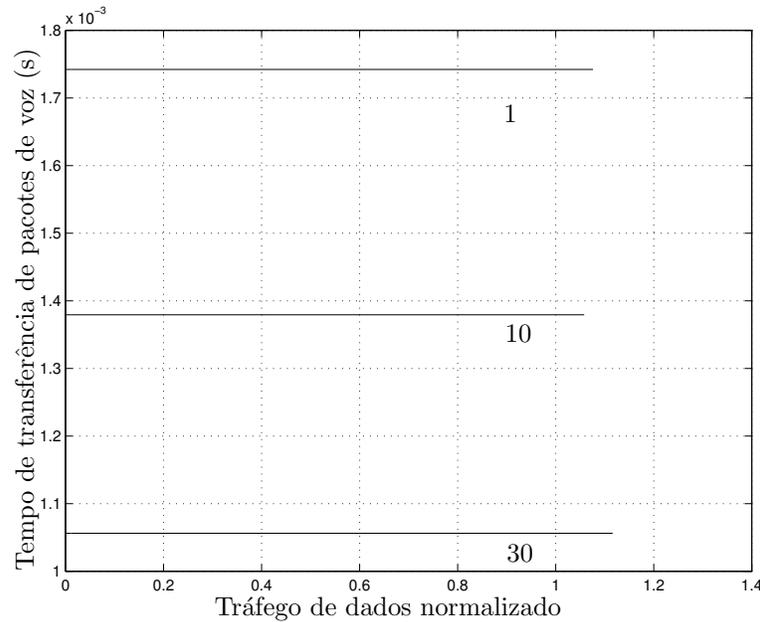


Figura 4.2: Tempos médios de transferência de pacotes de voz, com preempção, para $r = 10$ Erl, parametrizados em função do tráfego nominal de voz.

Dados sem preempção

A degradação do tempo médio de transferência dos pacotes de dados com a sobrecarga do tráfego de voz ou de dados é bastante severa devido à prioridade associada ao tráfego de voz. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram que a degradação é tanto maior quanto maior é o tráfego nominal de voz.

Dados com preempção

A preempção aumenta ainda mais a degradação do tempo médio de transferência dos pacotes de dados com a sobrecarga do tráfego de voz ou de dados. A Figura 4.8 mostra que a degradação, com a variação do tráfego de dados, é mais acentuada quanto menor é o tráfego nominal de voz, e a Figura 4.9 mostra que a degradação, com a variação do tráfego de voz, é mais acentuada quanto maior o tráfego nominal de voz.

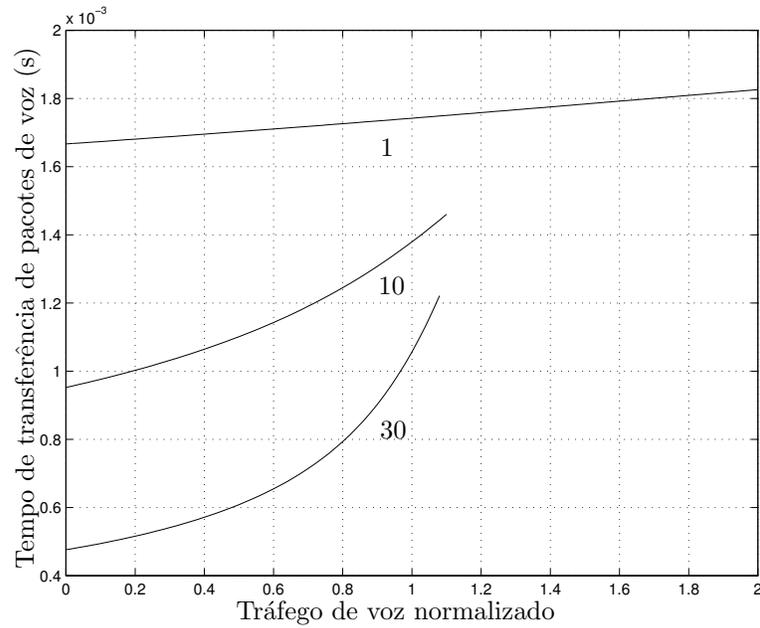


Figura 4.3: Tempos médios de transferência de pacotes de voz, com preempção, para $r = 10$ Erl, parametrizados em função do tráfego nominal de voz.

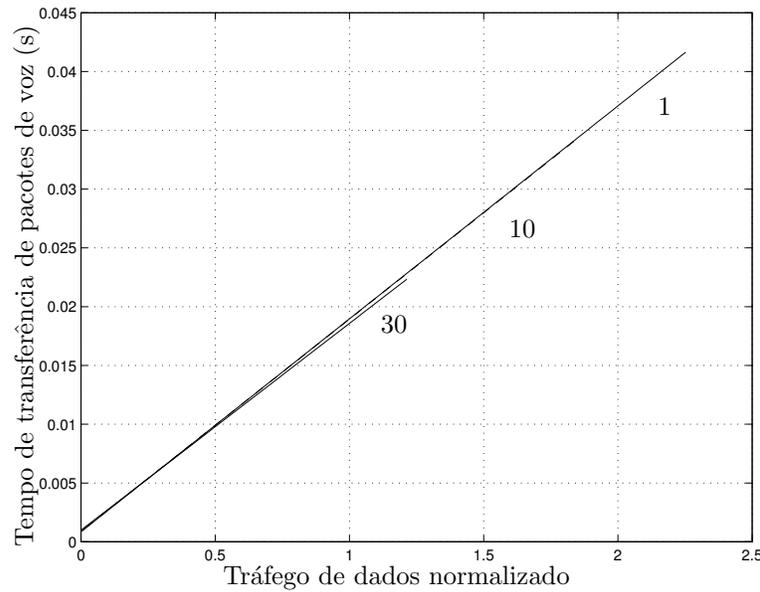


Figura 4.4: Tempos médios de transferência de pacotes de voz, sem preempção, para $r = 10$ Erl, parametrizados em função do tráfego nominal de voz.

Dados com ou sem preempção

O número de canais C é significativamente menor quando se usa preempção (vide Tabela 4.1). Entretanto a sensibilidade à sobrecarga fica bastante degradada conforme mostram as Figuras 4.10 e 4.11.

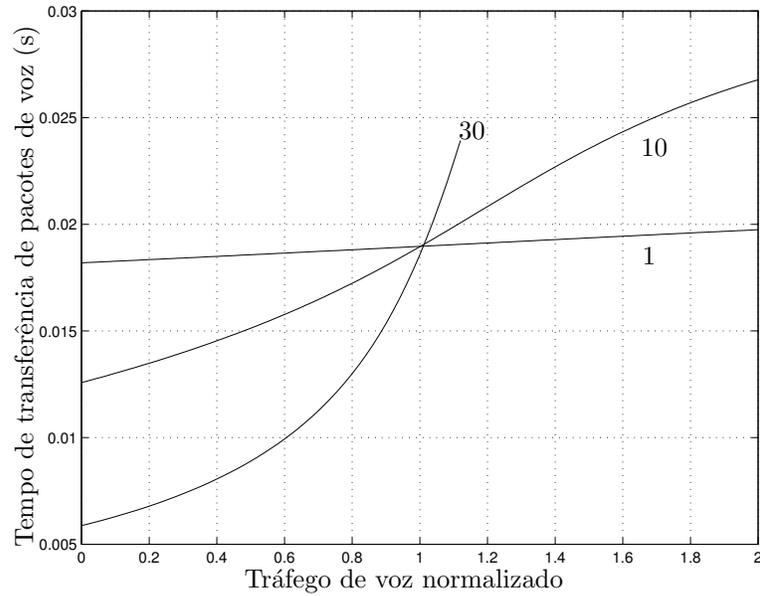


Figura 4.5: Tempos médios de transferência de pacotes de voz, sem preempção, para $r = 10$ Erl, parametrizados em função do tráfego nominal de voz.

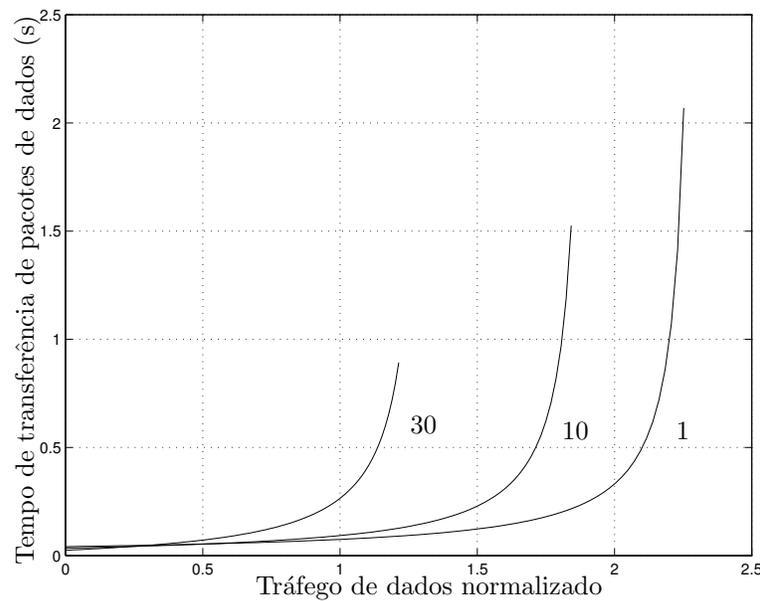


Figura 4.6: Tempos médios de transferência de pacotes de dados, sem preempção, para $r = 10$ Erl, parametrizados em função do tráfego nominal de voz.

4.4 Conclusões

O dimensionamento do enlace sem fio usando prioridade dos pacotes de voz sobre os de dados foi obtido neste capítulo.

A utilização da preempção possibilitou uma redução na capacidade do sistema, se comparada aos resultados obtidos para o caso sem preempção. Essa redução é tanto maior quanto menor for o fator de carga do tráfego de dados normalizado por canal, uma vez que

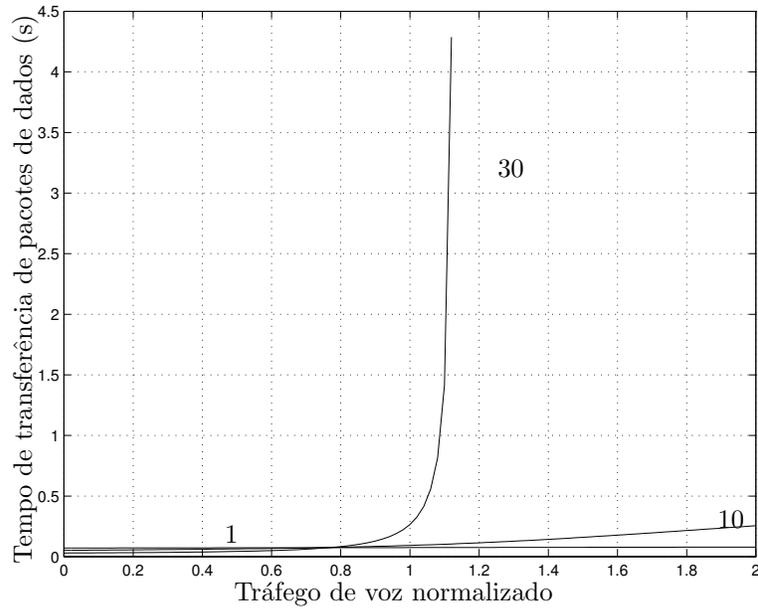


Figura 4.7: Tempos médios de transferência de pacotes de dados, sem preempção, para $r = 10$ Erl, parametrizados em função do tráfego nominal de voz.

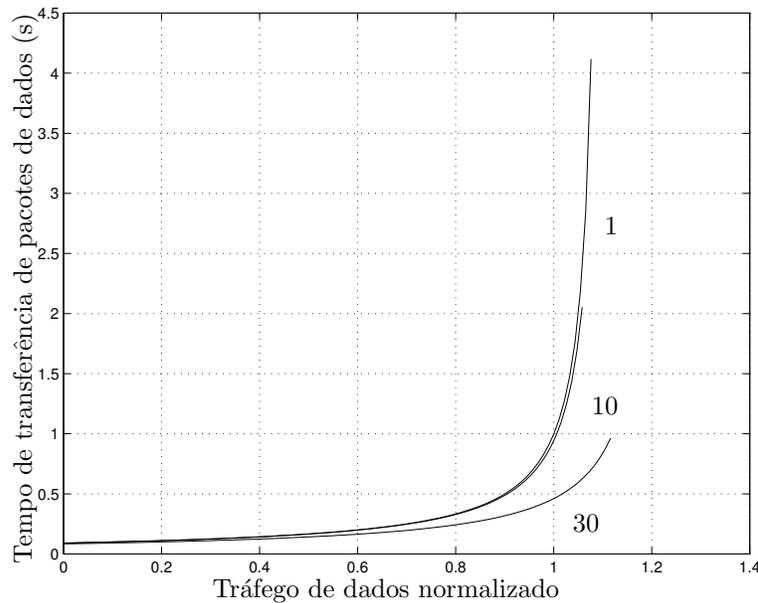


Figura 4.8: Tempos médios de transferência de pacotes de dados, com preempção, para $r = 10$ Erl, parametrizados em função do tráfego nominal de voz.

um número menor de pacotes de dados sofrem preempção e permanecem no *buffer*, implicando uma menor capacidade do sistema para o atendimento ao tempo de transferência de pacotes de dados.

Para o caso sem preempção, o tempo de transferência de pacotes de voz foi o limitante para o dimensionamento do sistema. Com a utilização da preempção, o tempo de transferência de dados passou a ser o limitante do sistema.

Apesar da menor capacidade do sistema, resultante do dimensionamento usando pri-

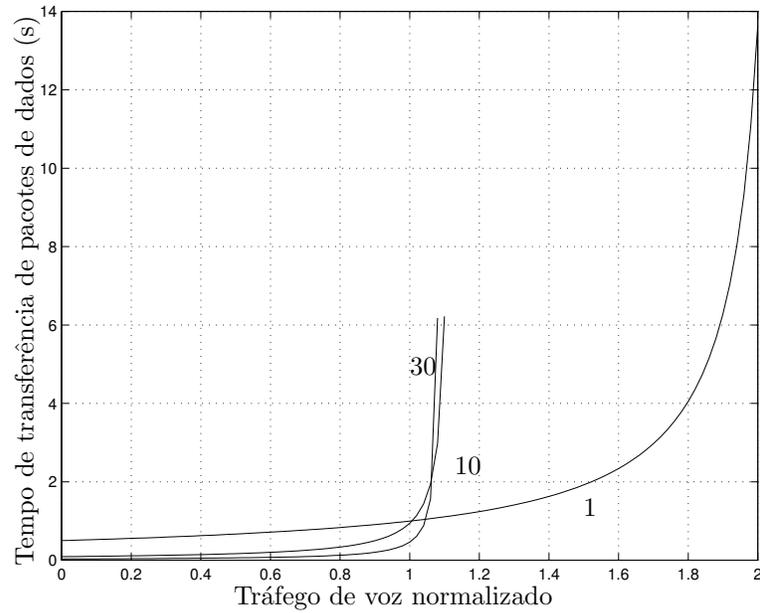


Figura 4.9: Tempos médios de transferência de pacotes de dados, com preempção, para $r = 10$ Erl, parametrizados em função do tráfego nominal de voz.

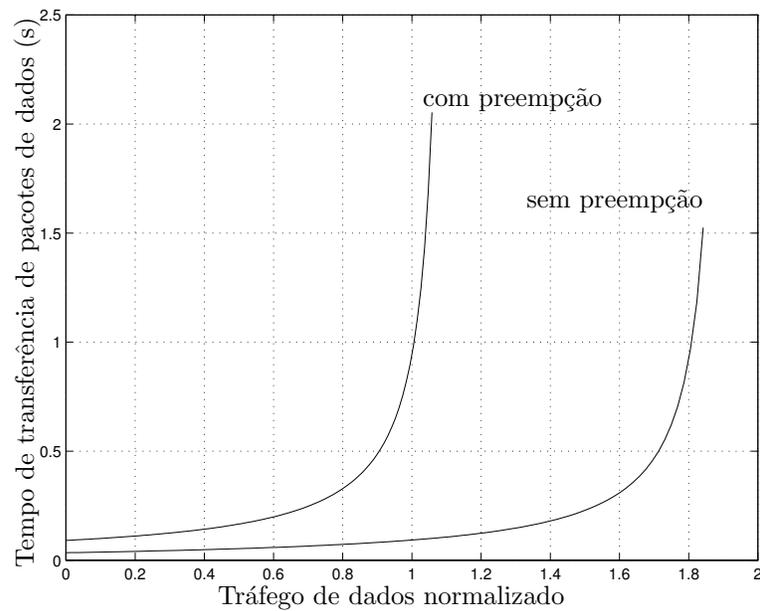


Figura 4.10: Tempos médios de transferência de pacotes de dados, com e sem preempção, para $r = 10$ Erl e $\rho_v = 10$ Erl.

oridade com preempção, essa estratégia não é apropriada devido à pequena robustez do sistema à sobrecarga de tráfego. Desta forma, o modelo de prioridade sem preempção apresenta melhor resultado.

Para uma dada intensidade do tráfego de dados, a capacidade adicional, C , para atendimento aos requisitos de qualidade de serviço, é tanto menor quanto maior for o tráfego de voz.

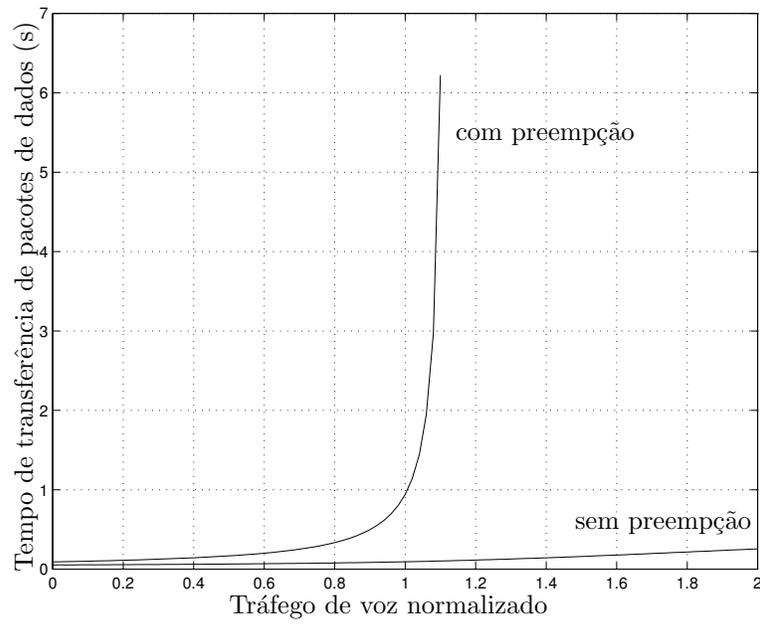


Figura 4.11: Tempos médios de transferência de pacotes de dados, com e sem preempção, para $r = 10$ Erl e $\rho_v = 10$ Erl.

Capítulo 5

Conclusões

O dimensionamento de um enlace sem fio com integração de serviços de voz e de dados foi abordado nesse trabalho. Duas estratégias foram consideradas: a primeira usa comutação de circuito para voz e de pacotes para dados, o enlace foi dimensionado considerando que os pacotes de dados usam um sub-conjunto exclusivo de canais e compartilham os demais canais com o serviço de voz; a segunda usa comutação de pacotes para voz e dados, atribuindo prioridade ao serviço de voz. O uso de prioridade com preempção foi analisado. A probabilidade de bloqueio dos usuários de voz, na comutação de circuito, e a probabilidade de descarte e o tempo médio de transferência dos pacotes, na comutação de pacotes, foram especificados como requisitos de qualidade de serviço na determinação do número mínimo de canais.

Apesar do menor número de canais C resultante do dimensionamento usando prioridade com preempção, essa estratégia não é apropriada devido à pequena robustez do sistema à sobrecarga de tráfego. Desta forma, o modelo de prioridade sem preempção apresenta melhor resultado. Comparando-se a coluna de capacidade C da Tabela 3.1, para $b = 100$ com a correspondente coluna da Tabela 4.1 para prioridade sem preempção, pode-se constatar que a técnica de prioridade é vantajosa quando o tráfego de voz é muito maior do que o tráfego de dados, e que o esquema com compartilhamento é vantajoso nos casos em que o tráfego de dados é muito maior do que o de voz.

Os comentários a seguir são resultantes dos vários experimentos numéricos realizados durante a execução desse trabalho.

- A definição de um valor de tráfego de dados limiar, abaixo do qual a capacidade é aproximadamente calculada em função da especificação do tempo médio de transferência; e, acima do qual, a capacidade é calculada em função do tamanho do *buffer* e da probabilidade de descarte de pacotes, permitiu uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos no dimensionamento.
- O número de canais, usados prioritariamente para voz, foi determinado através do algoritmo clássico de bissecção, e os valores obtidos evidenciam o ganho de escala associado à fórmula de *Erlang*, isto é, a relação entre o tráfego e o número de canais decresce à medida que o tráfego aumenta. Uma consequência importante do ganho de escala é que a sensibilidade à sobrecarga é maior para alto tráfego.
- O dimensionamento usando compartilhamento de canais, comutação de circuitos para

voz e de pacotes para dados, proporciona uma diminuição do número de canais exclusivamente usados para dados, quando comparado com o dimensionamento sem compartilhamento.

- A diminuição é tanto mais significativa quanto menor o tamanho de *buffer* usado.
 - O modelo condicional é numericamente simples e com precisão adequada para o dimensionamento e mesmo para análise de sobrecarga.
 - A especificação determinante no cálculo das capacidades é a probabilidade de descarte de pacotes quando o *buffer* é pequeno ou quando o tráfego é grande (muito maior que o limiar determinado sem compartilhamento).
 - Devido à capacidade alocada exclusivamente para o tráfego de dados, o tempo médio de transferência e a probabilidade de descarte de pacotes de dados são bastante sensíveis à sobrecarga do tráfego de voz, sendo a sensibilidade tanto menor quanto menor for o tráfego nominal de voz. Entretanto, os valores absolutos da probabilidade de bloqueio e do tempo médio de transferência são aceitáveis para o desempenho do sistema.
 - O tempo médio de transferência e a probabilidade de descarte de pacotes do tráfego de dados é bastante sensível à sobrecarga do tráfego de dados, e a sensibilidade é tanto maior quanto menor o tráfego nominal de voz. Esse comportamento é devido ao número médio de canais não ocupados pelo tráfego de voz.
- O dimensionamento usando prioridade resultou, em geral, em um número de canais menor do que o correspondente determinado pelo modelo de compartilhamento.
 - O número de canais de voz obtidos para atender à especificação de bloqueio de voz foi suficiente para acomodar, também, o tráfego de dados em vários experimentos, notadamente quando o tráfego de dados é pequeno.
 - O número de canais determinados usando preempção é, em geral, menor do que o determinado sem preempção. Entretanto, a sensibilidade à sobrecarga de voz ou de dados da prioridade com preempção é muito maior do que aquela sem preempção.
 - A sensibilidade à sobrecarga de voz ou dados da prioridade sem preempção é menor do que a resultante do modelo com compartilhamento.
 - O número de canais determinados sem preempção é menor do que aquele obtido usando o esquema com compartilhamento, quando o tráfego de voz é muito maior do que o tráfego de dados; e é maior quando o tráfego de voz é muito menor.

O dimensionamento da capacidade de um enlace com integração de serviços deve garantir o compromisso entre a menor capacidade do sistema, que atenda aos requisitos de qualidade de serviço, e o comportamento do sistema às condições de sobrecarga do tráfego das classes de serviço que serão integradas. Apesar do comportamento do tráfego de voz ser mais facilmente estimado, possibilitando estabelecer um padrão de tráfego mais preciso para o cálculo do dimensionamento, o comportamento do tráfego de dados é de difícil

predição. Assim, o dimensionamento do sistema baseado apenas no número mínimo de canais necessários para atendimento aos parâmetros de qualidade de serviço pode impor ao sistema condições de degradação muito severas quando da variação do tráfego.

Referências Bibliográficas

- [1] 3rdGPP. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Overall Description of the GPRS radio interface; Stage 2 (Release 5). Technical Specification 3GPP TS 43.064 v6.0.0, 3rd Generation Partnership Project, April 2002.
- [2] 3rdGPP. General Packet Radio Service (GPRS); Service Description; Stage 1. Technical Specification 3GPP TS 22.060 V6.0.0, 3rd Generation Partnership Project, March 2003.
- [3] S. A. Berezner, A. E. Krzesinski, and P. G. Taylor. On the inverse of Erlang's function. *Journal of Applied Probability*, 35:246 – 252, 1998.
- [4] A. Brand and H. Aghvami. *Multiple Access Protocols for Mobile Communications - GPRS, UMTS and Beyond*. John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [5] W. Chen, J. C. Wu, and H. Liu. Performance analysis of radio resource allocation in GSM/GPRS networks. In *Proceedings of IEEE 56th Vehicular Technology Conference, VTC'02-Fall*, volume 3, pages 1461 – 1465, September 2002.
- [6] A. Cobham. Priority assignment in waiting line problems. *Operations Research*, 2:70 – 76, 1954.
- [7] P. J. Courtois and P. Semal. Bounds for the positive eigenvectors of nonnegative matrices and for their approximations by decomposition. *J. Assoc. Comput. Machinery*, 31(4):804 – 825, October 1994.
- [8] René Souza da Mata. Dimensionamento de enlaces em redes com integração de serviços. Master's thesis, FEEC - Unicamp, Campinas, SP, Brasil, Abril 2002.
- [9] S. Faccin, L. Hsu, R. Koodli, K. Le, and R. Punardi. GPRS and IS-136 integration for flexible network and services evolution. *IEEE Personal Communications*, 6(3):48 – 54, June 1999.
- [10] X. Fang and D. Ghosal. Performance modeling and QoS evaluation of MAC/RLC layer in GSM/GPRS networks. In *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC'03*, volume 1, pages 271 – 275, 11-15 May 2003 2003.
- [11] S. Ghani and M. Schwartz. A decomposition approximation for the analysis of voice/data integration. *IEEE Transactions on Communications*, 42(7):2441 – 2452, July 1994.

-
- [12] D. Gross and C. M. Harris. *Queueing Theory*. John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [13] Editor V.B. Iversen. *Teletraffic Engineering Handbook*. International Telecommunication Union, 2003.
- [14] R. Kalden, I. Meirick, and M. Meyer. Wireless internet access based on GPRS. *IEEE Personal Communications*, 7(2):08 – 18, April 2000.
- [15] T.J. Kostas, M.S. Borella, I. Sidhu, G.M. Schuster, J. Grabiec, and J. Mahler. Real-time voice over packet switched networks. *IEEE Network*, 12(1):18 – 27, Jan./Feb. 1998.
- [16] Y.K. Kwok and V.K.N. Lau. Performance evaluation of multiple access control schemes for wireless multimedia services. *IEEE Proceedings Communications*, 148(2):86 – 94, April 2001.
- [17] A. Lakaniemi and J. Parantainen. On voice quality of IP Voice over GPRS. In *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME'00*, volume 2, pages 751 – 754, Jul./Aug. 2000.
- [18] L. S. Lasdon. *Optimization Theory for Large Systems*. Macmillan Series in Operations Research, 1970.
- [19] H. Liu, J.C. Wu, and W. Hsieh. Delay analysis of integrated voice and data service for GPRS. *IEEE Communications Letters*, 6(8):319 – 321, August 2002.
- [20] M. Mahdavi and R. Tafazolli. Analysis of integrated voice and data for GPRS. In *Proceedings of IEE 3G First International Conference on Mobile Communication Technologies, 2000*, pages 436 – 440, March 2000.
- [21] M. O. Marques and I. S. Bonatti. Circuit-switched voice and packet-switched data wireless link dimensioning. In *Proceedings of International Workshop on Telecommunications, IWT'04*, volume 1, pages 1 – 5, August 2004.
- [22] M. O. Marques and I. S. Bonatti. Dimensionamento de enlaces sem fio com compartilhamento de voz e de dados. In *Proceedings of XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, SBT'04*, Setembro 2004.
- [23] M. O. Marques and I. S. Bonatti. Dimensioning of wireless links sharing voice and data. In *Proceedings of International Conference on Telecommunications, ICT'04*, volume LNCS 3124, pages 82 – 87, August 2004.
- [24] M. Meo, M. Marsan, and C. Batetta. Resource management policies in GPRS wireless internet access systems. In *Proceedings of International Conference on Dependable Systems and Networks, 2002*, pages 707 – 716, June 2002.
- [25] T. Neame, M. Zukerman, and N. F. Maxemchuk. On link dimensioning based on estimating the mean rate by the sustainable rate. *IEEE Communications Letters*, 5(2):73 – 75, 2001.

-
- [26] S. Ni and S. Haggman. GPRS performance estimation in GSM circuit switched services and GPRS shared resource systems. In *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC'99*, volume 3, pages 1417 – 1421, September 1999.
- [27] J. C. De Oliveira, I. S. Bonatti, P. L. D. Peres, and A. K. Budri. Cell level performance approach for link dimensioning of atm networks. In *Proceedings of SBT/IEEE International Telecommunications Symposium, ITS'98*, volume 1, pages 189 – 194, August 1998.
- [28] M. Scharz. *Telecommunication Networks: Protocols, Modeling and Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company, 1987.
- [29] A. Zahedi and K. Pahlavan. Capacity of a wireless LAN with voice and data services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48(7):1160 – 1170, July 2000.