

ROBERTO MENEZES RODRIGUES

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE SERVIÇO
EM REDES GSM/GPRS ATRAVÉS DE
ESQUEMAS DE COMPARTILHAMENTO
DE RECURSOS**

BELÉM

2004

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE SERVIÇO
EM REDES GSM/GPRS ATRAVÉS DE
ESQUEMAS DE COMPARTILHAMENTO
DE RECURSOS**

**Dissertação submetida à
Universidade Federal do Pará
como parte dos requisitos para a obtenção
do grau de mestre em Engenharia Elétrica**

ROBERTO MENEZES RODRIGUES

Belém, março de 2004

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE SERVIÇO EM REDES
GSM/GPRS ATRAVÉS DE ESQUEMAS DE
COMPARTILHAMENTO DE RECURSOS**

Roberto Menezes Rodrigues

“Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Telecomunicações, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará.”

João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa, *Doutor* (UFPA)

Orientador

Roberto Célio Limão, *Doutor* (UFPA)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Banca Examinadora:

Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Jr., *Doutor* (UFPA)

Antônio Marcos de Lima Araújo, *Doutor* (IESAM)

Antônio Jorge Gomes Abelém, *Doutor* (UFPA)

Carlos Renato Lisboa Frânces, *Doutor* (UFPA)

AGRADECIMENTOS

À minha esposa e filha, pelo seu amor incondicional, carinho e, principalmente, companheirismo.

À minha família de um modo geral (pai, mãe, tias, irmãs, etc.), pois sem ela não seria o que hoje sou.

Ao grande companheiro e, sobretudo amigo, Gláucio, sempre pronto a ajudar e dividir seus conhecimentos com todos, sendo um grande exemplo de abnegação e perseverança.

Ao Professor João Crisóstomo, sempre dedicado e pronto a oferecer todos os meios necessários ao desenvolvimento intelectual e moral de todos os seus alunos e orientados.

Ao Professor Renato Francês, grande colaborador em todos os momentos desta caminhada.

E a todos os colegas e professores que de alguma forma ajudaram-me a completar mais este ciclo em minha vida.

Resumo da Dissertação apresentada à UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE SERVIÇO EM REDES
GSM/GPRS ATRAVÉS DE ESQUEMAS DE
COMPARTILHAMENTO DE RECURSOS**

Roberto Menezes Rodrigues

Março/2004

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa, *Doutor*.

Área de Concentração: Telecomunicações.

Palavras-chave: Alocação de Recursos, GPRS, Qualidade de Serviço, Simulação.

Número de Páginas: 72.

RESUMO: Com a implantação do GPRS sobre a estrutura GSM, a interface aérea irá transportar tanto ligações telefônicas GSM quanto transmissões de dados GPRS. Por esse fato, há a necessidade de uma política de compartilhamento de recursos dentro da estrutura conjugada GSM/GPRS. Tal política é chamada de comutação híbrida. Decorrente disso, o presente trabalho tem como objetivo o estudo comparativo via simulação de alguns métodos de implementação da comutação híbrida, no intuito de descobrir o método mais eficaz na obtenção de um nível de qualidade de serviço desejado para a rede. As muitas técnicas de avaliação de desempenho de sistemas podem ser separadas em dois grandes grupos: experimentação e modelagem. A modelagem faz experimentos com um modelo do sistema. Basicamente, há duas formas de abordar a modelagem de sistemas: através dos métodos analíticos e da simulação. A simulação envolve a geração de uma história artificial do sistema e o uso dessa história para fazer inferências a respeito das características do sistema em estudo. O sistema modelado foi a rede GSM/GPRS, mais especificamente o subsistema MS/BSS, de acordo com 3 esquemas de implementação da comutação híbrida. Através das análises, pode-se concluir que o esquema 2 é, dentre todos, aquele com maior capacidade de prover valores estáveis para os parâmetros de Qos para a rede.

Abstract of Dissertation presented to UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

**QUALITY OF SERVICE ANALYSIS ON GSM/GPRS
NETWORKS THROUGH TECHNIQUES OF SHARING
RESOURCES**

Roberto Menezes Rodrigues

March/2004

Advisor: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa, *Doctor*.

Area of Concentration: Telecommunications.

Keywords: GPRS, Quality of Service, Resource Allocation, Simulation.

Number of pages: 72.

ABSTRACT: With the implantation of the GPRS over the GSM structure, the air interface will carry both GSM calls and GPRS data transmissions. Hence, it is necessary a resource sharing policy in the GSM/GPRS network. Such a policy is called hybrid switching. Due to it, the current work plans the comparative study via simulation of some methods of hybrid switching, with the aim of discovering the best method to obtain a certain degree of desired quality of service to network. The techniques of performance evaluation of systems may be grouped in two great sets: experimentation e modelling. The modelling make experiments with a model of system. Basically, there are two approaches on modelling systems: analytical methods and simulation. The simulation holds the generation of a artificial history of the system and use of this history to make inferences about the features of the system been studied. The modelled system was the GSM/GPRS network, specially the MS/BSS subsystem, according to three hybrid switching schemes. According to the analysis, it follows that the scheme 2 is, among all, that one with the major capacity on providing stable values to the Qos parameters of network.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	A 2 ^a Geração (2G)	2
1.2	Serviços de dados sobre a estrutura celular	4
1.3	Escopo e organização do trabalho	5
1.4	Revisão bibliográfica	6
2	A REDE GSM/GPRS	8
2.1	Características gerais do GPRS	8
2.1.1	Comutação por pacotes	8
2.1.2	Serviços de transporte e suplementares	8
2.1.3	Esquemas de codificação de canal	9
2.1.4	Qualidade de serviço (QoS)	10
2.2	Arquitetura do Sistema	11
2.2.1	A arquitetura do GSM	11
2.2.2	A arquitetura do GPRS	13
2.3	A interface aérea	15
2.4	Canais lógicos	18
2.5	A pilha de protocolos	19
3	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	24
3.1	Simulação	27
3.1.1	Terminologia associada aos modelos de simulação	29
3.1.2	Tipos de modelos de simulação	31
3.1.3	Linguagem de programação associada à simulação	32
3.1.4	Análise dos resultados da simulação	33

3.2	Simulação a eventos discretos	34
3.2.1	Mecanismos de avanço do tempo	37
4	SIMULAÇÃO DA REDE GSM/GPRS	40
4.1	Tipos de alocação de recursos	40
4.2	Descrição do sistema a ser simulado	41
4.3	Descrição dos esquemas de implementação da comutação híbrida a serem analisados	42
4.3.1	Esquema 1	42
4.3.2	Esquema 2	42
4.3.3	Esquema 3	43
4.4	Medidas de desempenho analisadas	43
4.5	Considerações e parâmetros de entrada dos modelos de simulação . .	45
4.6	Validação dos modelos de simulação	46
4.7	Resultados e análise	47
4.7.1	Análise do aumento do tráfego oferecido GSM/GPRS	47
4.7.2	Análise do aumento do tráfego oferecido GSM	48
4.7.3	Análise do aumento do tráfego oferecido GPRS	50
5	CONCLUSÃO	61
5.1	Conclusões finais	61
5.2	Trabalhos futuros	63

Lista de Símbolos

AMPS	Advanced Mobile Phone Service
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ARFCN	Absolute Radio Frequency Channel Number
ARQ	Automatic Repeat Request
AuC	Authentication Center
BCCH	Broadcast Control Cannel
BCS	Block Check Sequence
BSC	Base Station Controller
BSS	Base Station Subsystem
BSSGP	Base Station Subsystem GPRS Protocol
BTS	Base Transceiver Station
CEPT	Conférence Européenne des Administrations des Postes er des Télécommunications
CPU	Central Processing Unit
CS	Coding Scheme
Diffserv	Differentiated services
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EIR	Equipment Identity Register
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
FDMA	Frequency Division Medium Access
FTP	File Transfer Protocol

GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSC	Gateway Mobile Switching Center
GPRS	General Packet Radio Service
GPSS	General Purpose Simulation System
GSM	Global System for Mobile communications
GSN	GPRS Support Node
GTP	GPRS Tunnel Protocol
HDLC	High Level Data Link Control
HLR	Home Location Register
HRRA	Hybrid radio resource allocation
Interserv	Integrated services
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Standards Organization
ITU - T	International Telecommunication Union - Telecommunications Standardization Sector
Kbps	Kilobits por segundo
KHz	Kilohertz
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MS	Mobile Station
ms	milisegundo
MSC	Mobile Switching Center
MT	Mobile Terminal
NSS	Network Switching Subsystem
OSI	Open System Interconnection
PACCH	Packet Associated Control Channel
PAGCH	Packet Access Grant Channel
PBCCH	Broadcast Control Channel

PCCCH	Packet Common Control Channel
PCU	Packet Control Unit
PDCH	Packet Data Channel
PDN	Packet Data Network
PDTCH	Packet Data Traffic Channel
PDU	Packet Data Unit
PLL	Physical Link Layer
PLMN	Public Land Mobile Network
PMT	Point-to-Multipoint
PNCH	Packet Notification Channel
PPCH	Packet Paging Channel
PRACH	Packet Random Access Channel
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTCH	Packet Timing Advance Control Channel
PTP	Point-to-Point
QoS	Quality of Service
RFL	Radio Frequency Layer
RLC	Radio Link Control
SGSN	Serving GPRS Support Node
SMG	Special Mobile Group
SMP	Serviço Móvel Pessoal
SMPL	Simulation Programming Language
SNDCP	Subnetwork Dependent Convergence Protocol
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TE	Terminal Equipament
UDP	User Datagram Protocol

VLR Visitor Location Register

μ s microsegundo

Lista de Figuras

2.1	Estrutura da rede GSM	12
2.2	Estrutura da rede GPRS	14
2.3	Técnicas de acesso ao meio utilizadas pelo GSM	16
2.4	Transmissão e recepção de um usuário fictício	17
2.5	Estrutura da rajada normal	17
2.6	Canais lógicos do GPRS	19
2.7	Pilha de protocolos do plano de transmissão do GPRS	21
2.8	Segmentação dos quadros LLC em blocos RLC	23
3.1	Estrutura de fluxo básica de um modelo de SED	36
3.2	Exemplo de avanço de tempo dirigido por evento	38
3.3	Exemplo de avanço de tempo dirigido por incrementos fixos	39
4.1	Representação do esquema de alocação de recursos 1	42
4.2	Representação do esquema de alocação de recursos 2	43
4.3	Representação do esquema de alocação de recursos 3	44
4.4	Probabilidade de bloqueio das chamadas GSM <i>versus</i> tráfego oferecido GSM/GPRS	48
4.5	Probabilidade de bloqueio de pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GSM/GPRS	49
4.6	Probabilidade de preempção dos pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GSM/GPRS	50
4.7	Probabilidade de descarte dos pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GSM/GPRS	51
4.8	Vazão dos pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GSM/GPRS	51

4.9	Tempo médio de espera no <i>buffer</i> dos pacotes GRPS <i>versus</i> tráfego oferecido GSM/GPRS	52
4.10	Tempo médio de espera no <i>buffer</i> das chamadas GSM <i>versus</i> tráfego oferecido GSM/GPRS	53
4.11	Probabilidade de bloqueio das chamadas GSM <i>versus</i> tráfego oferecido GSM	54
4.12	Probabilidade de bloqueio de pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GSM	54
4.13	Probabilidade de preempção dos pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GSM	55
4.14	Probabilidade de descarte dos pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GSM	55
4.15	Vazão dos pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GSM	56
4.16	Tempo médio de espera no <i>buffer</i> dos pacotes GRPS <i>versus</i> tráfego oferecido GSM	56
4.17	Tempo médio de espera no <i>buffer</i> das chamadas GSM <i>versus</i> tráfego oferecido GSM	57
4.18	Probabilidade de bloqueio das chamadas GSM <i>versus</i> tráfego oferecido GPRS	57
4.19	Probabilidade de bloqueio de pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GPRS	58
4.20	Probabilidade de preempção dos pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GPRS	58
4.21	Probabilidade de descarte dos pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GPRS	59
4.22	Vazão dos pacotes GPRS <i>versus</i> tráfego oferecido GPRS	59
4.23	Tempo médio de espera no <i>buffer</i> dos pacotes GRPS <i>versus</i> tráfego oferecido GPRS	60
4.24	Tempo médio de espera no <i>buffer</i> das chamadas GSM <i>versus</i> tráfego oferecido GPRS	60

Lista de Tabelas

2.1	Esquemas de codificação de canal do GPRS	10
2.2	Modificações exigidas pelo GPRS	15
3.1	Exemplos de elementos de modelos de sistemas	31
4.1	Resultados obtidos através de método analítico e simulação para o esquema 1 com tráfego oferecido GSM/GPRS de 15 Erlang	46
4.2	Resultados obtidos através de método analítico e simulação para o esquema 2 com tráfego oferecido GSM/GPRS de 15 Erlang	46
4.3	Resultados obtidos através de método analítico e simulação para o esquema 3 com tráfego oferecido GSM/GPRS de 15 Erlang	47

Capítulo 1

INTRODUÇÃO



As comunicações móveis, em especial a telefonia móvel celular, são, sem dúvida alguma, tecnologias vencedoras; totalmente incorporadas ao cotidiano de milhões de pessoas ao redor do mundo, sendo o aparelho celular um dos símbolos da vida moderna. Fontes estimam que há mais de 1 bilhão de celulares operando num mundo de 6 bilhões de pessoas.

Apesar de já ter um mercado consumidor mundial consolidado, a telefonia celular ainda se mostra como um dos campos mais promissores das telecomunicações, incentivando investimentos vultosos por parte das empresas no intuito de arrebanhar cada vez mais assinantes, nos quatro cantos do mundo.

A 1ª Geração (1G) dos sistemas móveis celulares utiliza a tecnologia analógica. Dentre os padrões existentes, o que alcançou maior notabilidade mundial foi o padrão americano Serviço Avançado de Telefonia Móvel (*Advanced Mobile Phone Service* - AMPS). Com popularização dos aparelhos celulares pelo mundo, os sistemas analógicos começaram a mostrar sua incapacidade em lidar com o explosivo crescimento na demanda, devido a dois importantes fatores:

- Os sistemas analógicos utilizam, como tecnologia de acesso, o Acesso ao Meio por Divisão de Frequência (*Frequency Division Medium Access* - FDMA), ou seja, todo espectro de frequências disponível é dividido em bandas de frequência (portadoras), onde cada uma dessas bandas de frequência é utilizada por somente um usuário. Tal fato condiciona a expansão da capacidade

do sistema unicamente à utilização de outros espectros de frequência – o que estava fora de questão;

- O custo elevado para implantação de novos serviços auxiliares, além do serviço telefônico convencional; custo este que, inevitavelmente, seria repassado ao consumidor final através de tarifas e aparelhos celulares mais caros.

Havia, ainda, outro problema: a grande quantidade de padrões nacionais existentes. Uma verdadeira “colcha de retalhos” de padrões analógicos, utilizando espectros de frequência e protocolos de sinalização diferentes, cobria o mundo. Isso inviabilizava completamente a interoperabilidade entre eles[1].

Diante desse quadro, começaram a surgir esforços, sobretudo na Europa, com a intenção de solucionar tais problemas. O resultado desses esforços coordenados foi o advento do 1º sistema celular totalmente digital: o Sistema Global para Comunicações Móveis (*Global System for Mobile communication* - GSM).

1.1 A 2ª Geração (2G)

Além das limitações dos sistemas analógicos, alguns outros aspectos do cenário europeu contribuíram para o desenvolvimento do GSM, o qual foi primeiramente chamado “sistema celular digital pan-europeu”:

- Unificação da comunidade européia em aspectos políticos, sociais e econômicos;
- Desregulamentação da telefonia móvel: ao menos duas operadoras deveriam competir em cada país;
- Incentivo aos fabricantes de equipamentos europeus para desenvolvimento e produção de nova infra-estrutura e aparelhos celulares para um mercado muito maior que os pequenos mercados nacionais, de forma que não seria favorecida nenhuma instituição ou indústria regional;
- Intenção de exportar tecnologia e produtos para países fora do continente europeu[1].

Tudo começou em 1981, com um estudo conjunto franco-germânico voltado à possibilidade de criação de um sistema pan-europeu. Em 1982, um comitê de tra-

balho especial, o *Groupe Spécial Mobile* (GSM), foi criado na *Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications* (CEPT) para analisar e continuar o estudo franco-germânico. Em 1986, o comitê de trabalho deu um passo à frente com o estabelecimento de um núcleo permanente de pessoas designadas para a continuação do trabalho e a criação de normas para um sistema digital do futuro. Aproximadamente um ano depois, o “memorando de entendimento” foi assinado por mais de 18 países. Esse memorando declarava que os signatários participariam do sistema pan-europeu e o colocariam em operação até 1991. Em 1989, o sistema passou a ser responsabilidade do Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações (*European Telecommunications Standard Institute* - ETSI). Uma vez sob o controle do ETSI, o sistema pan-europeu teve o seu nome alterado para *Global System for Mobile communications*. O comitê de trabalho também teve seu nome mudado de GSM para SMG (*Special Mobile Group*, ou Grupo Móvel Especial). Essas mudanças foram feitas para evitar confusão entre o novo nome do sistema (GSM) e o grupo de pessoas que trabalham nas especificações (SMG), e também para colocar os nomes no idioma de trabalho oficial do ETSI: o inglês[34].

O padrão GSM foi pensado para acompanhar as evoluções e tendências. Por isso, adotou-se uma especificação dividida em fases. Dessa forma, foi lançado um subconjunto básico das características da rede – chamado de GSM fase 1 –, sendo as próximas fases suplementos adicionais que completariam a implementação de todos os serviços e características da rede planejados para o padrão[1].

No que tange ao apelo comercial, um dos seus carros-chefes do padrão GSM tem sido a tão alardeada “tecnologia digital”. No entanto, a proposta de utilizar a tecnologia digital no sistema pan-europeu surgiu somente no decorrer da sua especificação e não, como muitos pensam, no ato de sua concepção. A verdade é que a tecnologia digital permite aos sistemas celulares desfrutar de todas as benesses que a tecnologia analógica proporcionava de uma forma mais simples, menos dispendiosa, com um nível de confiabilidade e segurança superiores, e, principalmente, com um melhor aproveitamento dos escassos recursos de rádio. Além disso, a tecnologia digital foi escolhida por possibilitar a interoperabilidade entre a rede celular e outras redes digitais, como a Rede Digital de Serviços Integrados (*Integrated Services Digital Network* - ISDN); prova disso é que alguns protocolos utilizados pelo GSM são

versões adaptadas de protocolos da ISDN.

1.2 Serviços de dados sobre a estrutura celular

Paralelo a isso, o advento da rede mundial de computadores, a Internet, revolucionou a comunicação entre as pessoas e o acesso delas à informação. A partir dessa “democratização” da informação surgiu uma crescente necessidade pela “democratização” do tipo de acesso utilizado para se obter tais informações, ou seja, o usuário não estaria mais limitado a acessar as informações de que necessita via computador, mas de qualquer dispositivo capaz de se conectar à grande rede – como um aparelho celular, por exemplo.

Foi dentro desse ambiente que surgiram os primeiros serviços de transmissão de dados sobre a estrutura GSM. No entanto, logo ficou evidente a inabilidade da estrutura GSM em lidar de forma satisfatória – sobretudo do ponto de vista do usuário – com tal tipo de tráfego. Essa inabilidade tem origem no tipo esquema de alocação de recursos utilizado pelo GSM: a comutação por circuitos, que reserva um canal para cada assinante, pelo tempo que durar a chamada telefônica, independente do recurso estar sendo utilizado ou não. Outros fatores que corroboram contra a utilização do GSM na transmissão de dados são: o longo tempo para se fixar uma conexão; a tarifação desse tipo de serviço ser igual ao do serviço telefônico tradicional (tempo de alocação do canal, ao invés de ser pela quantidade de informação transmitida); e a baixa taxa de transmissão.

Para superar esse novo desafio, era necessário uma tecnologia que “soubesse” lidar de forma satisfatória com as peculiaridades do tráfego de dados, com a menor mudança possível na infra-estrutura existente: a ordem do dia era agregar (serviços de qualidade) sem mudar (o que já havia sido implantado a um custo elevado).

Em 1997, a ETSI concluiu a padronização do que viria a ser chamado Serviço Geral de Pacotes via Rádio (*General Packet Radio Service* - GPRS), dentro da fase 2+ do GSM. O GPRS é um serviço de transporte com uma estrutura suplementar à rede GSM, permitindo o acesso *Wireless* às redes de dados baseadas tanto no protocolo da Internet (*Internet Protocol* - IP) quanto no protocolo X.25, alcançando taxas de até 171,2 *Kilobits* por segundo (Kbps).

1.3 Escopo e organização do trabalho

É possível perceber que, com a implantação do GPRS sobre a estrutura GSM, a interface aérea – o grande “gargalo” do sistema – irá transportar tanto ligações telefônicas GSM quanto transmissões de dados GPRS, cada uma com as suas peculiaridades. Por esse fato, há a necessidade de uma política de compartilhamento de recursos dentro da estrutura conjugada GSM/GPRS. Tal política é chamada de **comutação híbrida**. A comutação híbrida tem sido alvo de muitos estudos ao longo dos últimos anos, visto que é um dos pontos mais importantes na implantação do GPRS. Procurar o método mais apropriado de implementação da comutação híbrida significa obter a menor interferência possível nos serviços telefônicos, com a melhor eficiência possível na transmissão de dados confiável. Isso toma uma importância ainda maior quando sabe-se que nas especificações dos GPRS são descritas alternativas a serem implementadas na rede-núcleo (*core network*) para garantir a Qualidade de Serviço¹ (QoS), como por exemplo os serviços diferenciados (*differentiated services* - diffServ), não definindo, no entanto, nenhuma técnica a ser aplicada na interface aérea². Ou seja, falar na melhor forma de compartilhar os canais significa também a garantia, em um certo grau, de um nível de QoS desejado para a rede, uma vez que a QoS é um parâmetro fim-a-fim.

O presente trabalho nasceu como parte de uma proposta de tese de doutorado na qual são propostos modelos de esquema de alocação de recursos através a especificação formal *Statecharts*, e tem como objetivo o estudo comparativo via simulação de alguns métodos de implementação da comutação híbrida utilizados nas redes GSM/GPRS, enfatizando os seus pontos positivos e negativos, no intuito de descobrir o método mais eficaz para a manutenção de um nível de qualidade de serviço desejado para a rede.

O fato do presente trabalho tratar exclusivamente das redes GSM/GPRS ao invés de ter um tom mais generalista, tratando das redes móveis celulares em geral, é justificado por dois fatores, a saber:

¹ver seção 2.1.4

²A interface aérea só será contemplada com o advento do *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE), onde espera-se obter uma taxa de transmissão acima de 384 Kbps, através de modificações na modulação, codificação e nos esquemas de acesso ao meio.

1. Há uma extensa e confiável literatura – tanto sob a forma de livros quanto de artigos e tutoriais – sobre esse padrão tecnológico;
2. Em 2001, começou a operar no Brasil o Serviço Móvel Pessoal (SMP), tendo a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) escolhido como o padrão brasileiro justamente o GSM.

Tais fatores tornam relevante o estudo da tecnologia GSM/GPRS, levando em consideração, sobretudo, a realidade atual brasileira.

O trabalho está organizado como segue: o capítulo 2 fornece as informações básicas sobre a rede GSM/GPRS. O capítulo 3 descreve as bases da avaliação de desempenho de sistemas e as técnicas utilizadas para esse fim. O capítulo 4 expõem a metodologia utilizada na simulação da rede GSM/GPRS, bem como os resultados e análise dos mesmos. Encerrando o trabalho, o capítulo 5 apresenta as conclusões e as considerações finais.

1.4 Revisão bibliográfica

A simulação, cada vez mais, tem facilitado as tarefas cotidianas de analistas e projetistas de sistemas, pois fornece um “ambiente” favorável (e muitas vezes amigável) para testar hipóteses e configurações sem ter de recorrer ao sistema sob estudo. A literatura sobre esse tema é bem rica e, na maioria dos casos, de excelente qualidade. Para uma introdução à simulação, com alguns conceitos sobre teoria de filas, pode-se recorrer a [7] e [8]. Os dois melhores exemplares sobre o assunto são, sem dúvida alguma, [3] e [4], fornecendo uma explanação minuciosa não só da simulação, mas de todo o processo de análise de sistemas na qual a simulação está inserida; não sendo indicados, no entanto, como material de apoio para um primeiro contato com o assunto, dado a quantidade de informações disponibilizada. Em [9] toda a metodologia de modelagem e simulação de sistemas é descrita de uma maneira prática e agradável, sem um formalismo rigoroso, sendo uma boa indicação àqueles que não quiserem recorrer, num primeiro momento, à profusão de informações de [3] e [4].

Sobre o GSM/GPRS, pode-se citar: [1], que fornece toda a informação necessária ao entendimento do padrão GSM; [2] que tem um caráter mais generalista, abor-

dando toda a tecnologia *wireless*; e os artigos [11] e [12], que descrevem a tecnologia GPRS com muita propriedade, sendo principalmente [11] um excelente ponto de partida para se conhecer essa tecnologia.

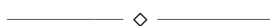
Sobre a integração GSM/GPRS, em especial a análise da alocação de recursos na rede, que é o foco de interesse do presente trabalho, pode-se citar os seguintes trabalhos dentre os vários encontrados na literatura: [17] e [20].

[17] faz uma análise da integração GSM/GPRS através do modelo de tráfego chamado “algoritmo de alocação híbrida de recursos de rádio” (*Hybrid Radio Resource Allocation algorithm* - HRRA). No HRRA são dedicados canais exclusivos para o serviço GPRS. As chamadas GSM têm prioridade preemptiva sobre os pacotes de dados GPRS, a exceção dos canais dedicados para ao GPRS. É constatado que o número de canais dedicados ao serviço GPRS tem impacto direto na probabilidade de bloqueio das chamadas GSM, ou seja, quanto maior o número de canais dedicados ao GPRS, maior será a degradação na qualidade do serviço telefônico.

[20] analisa as fontes de atraso dos pacotes de dados na rede GSM/GPRS através da implementação de três formas de alocação de recursos (chamado nesse trabalho de “esquemas de compartilhamento de canais”): **compartilhamento fixo**, onde todos os canais disponíveis são repartidos estaticamente em dois conjuntos; um para voz outro para dados; **compartilhamento parcial**, onde um certo número de canais são dedicados ao serviço GPRS enquanto o restante é compartilhado entre voz e dados, sendo que as chamadas GSM tem prioridade preemptiva sobre os pacotes de dados GPRS (esse esquema foi anteriormente descrito em [17] com o nome de HRRA); e o **compartilhamento completo**, onde todos os canais são compartilhados entre voz e dados, sendo que as chamadas GSM continuam a ter prioridade preemptiva sobre os pacotes de dados GPRS.

Capítulo 2

A REDE GSM/GPRS



2.1 Características gerais do GPRS

O GPRS, sendo uma estrutura adicional à rede GSM já existente, impõe várias mudanças de paradigmas aos usuários[11]. As subseções a seguir tratam disso.

2.1.1 Comutação por pacotes

O GPRS introduz o conceito de comutação por pacotes: os canais de rádio são utilizados somente quando os usuários estão recebendo ou transmitindo informações (pacotes de dados); não havendo o que transmitir ou receber, o canal é liberado. Isso possibilita a utilização racional e eficiente dos limitados recursos de rádio.

2.1.2 Serviços de transporte e suplementares

Os serviços de transporte do GPRS oferecem a transferência de dados fim-a-fim, comutados por pacotes. As especificações do GPRS definem dois tipos: Serviços Ponto-a-Ponto (PTP) e os serviços Ponto-a-Multiponto (PTM)[11].

O serviço Ponto-a-Ponto (PTP) oferece a transferência de pacotes entre dois usuários. Há dois tipos de serviços PTP:

- Serviço de rede não orientado à conexão (*Connectionless Network Service* - PTP-CLNS), onde os pacotes de dados são independentes uns dos outros e

tomam caminhos diferentes ao longo da rede. Este serviço requer o protocolo IP e provavelmente será o serviço dominante;

- Serviço de rede orientado à conexão (*Connection Network Service* - PTP-CONS), onde os pacotes de dados seguem um caminho determinado. Requer o protocolo X.25[31].

O serviço Ponto-a-Multiponto (PTM) oferece transferência de pacotes de dados de um usuário para vários outros, ou seja, envolve um transmissor de dados e vários receptores. Três serviços PTM são definidos:

- *PTM-Multicast* (PTM-M): os pacotes são disseminados em uma certa área geográfica. Um identificador de grupo indica se os pacotes são para todos os usuários ou para um grupo em particular;
- *PTM-Group call* (PTM-G): os pacotes são enviados diretamente para a área geográfica onde o grupo de usuários está atualmente localizado. Tal área geográfica é limitada;
- *IP-multicast* (IP-M): é usado para alcançar um grupo de assinantes que estão dispersos ao longo de toda a Internet. Ao invés de enviar pacotes para cada assinante separadamente, os mesmos são duplicados nos roteadores ao longo do caminho[31][11].

São possíveis, ainda, outros tipos de serviços não padronizados através do GPRS. Alguns exemplos são: envio de fotografias e cartões postais, *chat*, acesso remoto à rede local (*Local Area Network* - LAN), etc.[31]

2.1.3 Esquemas de codificação de canal

A codificação de canal (*Coding Scheme* - CS) é utilizada para proteger de eventuais erros os pacotes de dados transmitidos[11]. Quatro esquemas de codificação de canal são definidos no GPRS: CS-1, CS-2, CS-3 e CS-4.

Considerando que a capacidade do canal é fixa, há uma relação inversa entre a quantidade *bits* de informação transmitidos e a quantidade de *bits* responsáveis pela integridade dos primeiros. Os diferentes procedimentos de codificação de canal formam blocos de rádio de vários tamanhos, os quais, produzem quatro taxas de

dados de acordo com a Tabela 2.1. As taxas de dados apresentadas nessa tabela são válidas apenas para a camada de rádio; as taxas de dados na camada de aplicação serão um pouco menores devido ao *overhead* dos pacotes¹.

Tabela 2.1: Esquemas de codificação de canal do GPRS

esquema de codificação de canal	<i>bits</i> de dados no bloco de rádio	taxa por janela temporal (Kbps)	Máxima taxa para um quadro TDMA (Kbps)
CS-1	181	9,05	72,4
CS-2	268	13,4	107,2
CS-3	312	15,6	124,8
CS-4	428	21,4	171,2

Quanto maior a taxa de dados, maior é a relação sinal-ruído (*Sinal-Noise Ratio* - SNR) necessária. Em um canal com boas condições de transmissão, ou seja, uma alta SNR, qualquer um dos quatro esquemas de codificação apresentados pode ser utilizado. Nesse caso, o esquema de codificação com menor proteção de canal (CS-4) proporcionará a maior taxa de transmissão. Em condições adversas (SNR baixa), o esquema de codificação de canal com a maior proteção (CS-1) proporcionará a maior taxa de transmissão, devido a sua extensiva codificação de erros que causa poucas retransmissões. Como o esquema de codificação CS-4 não apresenta proteção contra erros, sua utilização é viável apenas para meios onde a SNR é alta.

2.1.4 Qualidade de serviço (QoS)

A Qualidade de Serviço (QoS) é definida pela União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union - Telecommunications Standardization Sector* – ITU - T) na recomendação I.350 como:

“O efeito coletivo produzido pelo desempenho do serviço que determina o grau de satisfação do usuário desse serviço.”

¹para maiores detalhes sobre a formação dos blocos de rádio e sobre as camadas, ver seção 2.5

A exigência de QoS das aplicações dados em rede móveis são muito distintas. Dar suporte a diferentes classes de QoS é, portanto, uma característica importante. O GPRS permite a definição de perfis de QoS baseados nos seguintes parâmetros:

- **Precedência de serviço:** é a importância relativa (prioridade) de um serviço sobre outro que deve ser mantida diante circunstâncias críticas, ou seja, momentos de congestionamento na rede. Existem três tipos de níveis de prioridade: alto, normal e baixo;
- **Confiabilidade:** indica as características de transmissão requisitadas por uma aplicação. Três classes de confiabilidade são definidas, garantindo o máximo valor para: probabilidade de perda de pacotes, probabilidade de duplicação de pacotes, probabilidade dos pacotes estarem fora de seqüência e probabilidade de corrompimento (um erro não detectado) de pacotes;
- **Atraso:** o atraso é definido como o tempo de transferência fim-a-fim entre dois usuários móveis ou entre um usuário móvel e a interface Gi para uma rede de pacotes de dados externa. Isso inclui todos os atrasos dentro da rede GPRS. Atrasos ocorridos nas redes externas à rede GPRS não são levados em consideração. Neste parâmetro são definidos os valores máximos para o atraso médio e o atraso *95-percentile*. O atraso *95-percentile* é o máximo atraso garantido em 95% de todas as transferências;
- **Vazão:** especifica a taxa máxima e média de *bits* transmitidos[11].

Utilizando esses parâmetros, os perfis de QoS podem ser negociados entre o usuário móvel e a rede para cada sessão, levando em conta a demanda de QoS e os recursos disponíveis[11].

2.2 Arquitetura do Sistema

2.2.1 A arquitetura do GSM

A figura 2.1 mostra a Rede Pública Móvel Local do GSM (*Public Land Mobile Network* - PLMN) com seus componentes básicos. A PLMN está dividida em dois grandes subsistemas: o Subsistema da Estação Base (*Base Station Subsystem* -

BSS) e o Subsistema de Comutação de Rede (*Network Switching Subsystem* - NSS).

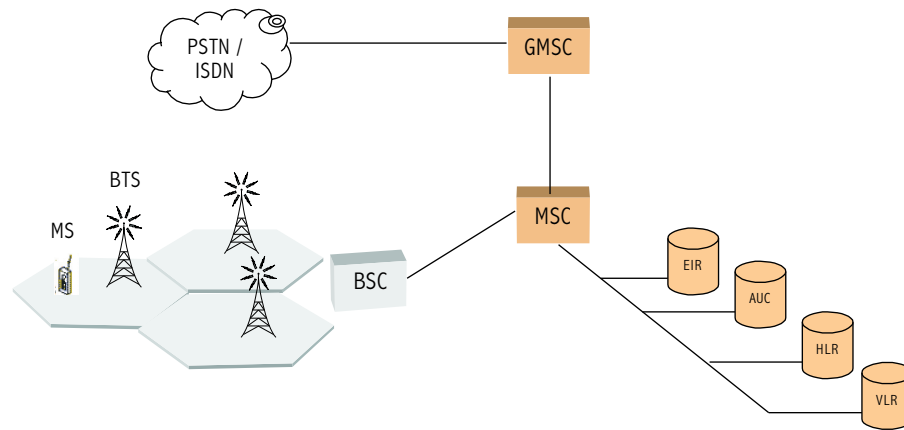


Figura 2.1: Estrutura da rede GSM

O BSS conecta a Estação Móvel (*Mobile Station* - MS) ao NSS, desempenhando as funções de rádio. É constituído por dois elementos:

- **Estação Base (*Base Transceiver Station* - BTS):** corresponde aos transceptores e antenas usadas em cada célula da rede. A potência de transmissão da BTS define o tamanho da célula;
- **Controladora de Estação base (*Base Station Controller* - BSC):** monitora e controla várias BTSs. Suas principais funções estão relacionadas ao *handover*, salto de frequência e controle dos níveis de potência das BTSs[1].

O principal papel do NSS é gerenciar as comunicações entre os assinantes e outros usuários, os quais podem ser tanto da própria rede móvel quanto de outras redes externas, como da ISDN e da Rede Pública de Telefonia Comutada (*Public Switched Telephony Network* - PSTN). O NSS é constituído pelos seguintes elementos:

- **Central de Comutação e Controle (*Mobile Switching Center* - MSC):** é o elemento central do NSS. O MSC realiza a comutação interna da rede móvel celular;
- **Portal Central de Comutação e Controle (*Gateway Mobile Switching Center* - GMSC):** é a interface entre a rede móvel celular e as redes externas;

- **Registro de Localização de Unidade Móvel Local (*Home Local Register* - **HLR**):** é a base de dados que guarda informações dos assinantes pertencentes a área de atuação de um GMSC;
- **Registro de Localização de Visitante (*Visited Local Register* - **VLR**):** contém os dados relevantes de todos os usuários móveis sob jurisdição de um (G)MSC. Enquanto o HLR provê informações necessárias dos usuários móveis ao GMSC quando uma chamada vem da rede externa, o VLR provê informações dos usuários móveis ao MSC quando a chamada vem de um outro assinante móvel;
- **Central de Autenticação (*Authentication Center* - **AuC**):** é um registrador usado para funções de segurança. Ele fornece um conjunto de parâmetros para as funções de autenticação e criptografia. Esses parâmetros ajudam a verificar a identidade do usuário;
- **Registro de Identidade do Equipamento (*Equipment Identity Register* - **EIR**):** é usado também para funções de segurança. É um registrador que armazena informações sobre as estações móveis.

2.2.2 A arquitetura do GPRS

A MS, no GPRS, é uma combinação do Terminal Móvel (*Mobile Terminal* - MT) e do Equipamento Terminal (*Terminal Equipment* - TE):

- O equipamento terminal é um terminal de computador que envia e recebe pacotes de dados. Do ponto de vista do TE, o terminal móvel funciona como um modem, conectando o TE às redes de dados;
- O terminal móvel é o aparelho celular propriamente dito. Se comunica com o TE através de cabos ou tecnologias *Wireless*, e com a BTS através da interface aérea.

É importante frisar que o MT e o TE podem tanto fazer parte de um mesmo aparelho, como um *smartphone*, quanto serem aparelhos separados, como um telefone móvel capaz de suportar o GPRS conectado a um *laptop*[31].

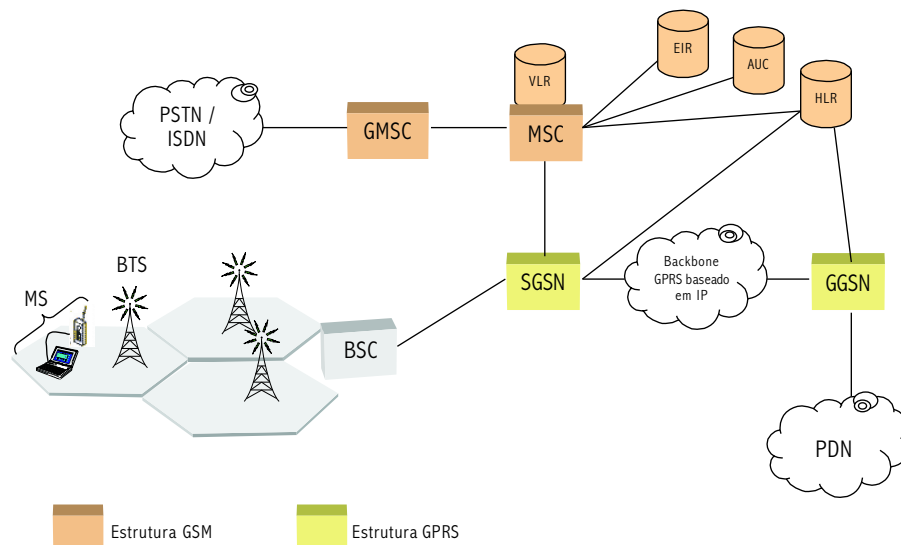


Figura 2.2: Estrutura da rede GPRS

Os elementos da arquitetura GSM só utilizam a comutação por circuitos. Desta forma, para integrar o GPRS à rede GSM existente, foi introduzido uma nova classe de nós, chamado de **Nó de Suporte ao GPRS** (*GPRS Support Node* - GSN). Os GSNs são responsáveis pela entrega e roteamento dos pacotes de dados (*Packet Data Unit* - PDU) entre as estações móveis e as redes de pacotes (*Packet Data Network* - PDN)[11].

O Servidor GSN (*Serving GPRS Support Node* - SGSN) é responsável pela entrega de pacotes dentro de sua área de jurisdição. Suas tarefas incluem o roteamento e a transferência de pacotes, gerenciamento de mobilidade, gerenciamento de enlace lógico, autenticação, etc.;

O Portal GSN (*Gateway GPRS Support Node* - GGSN) age como uma interface entre a rede móvel que suporta o GPRS e as redes de dados externas.

Todos os GSNs são conectados por um *backbone* GPRS baseado em IP. Dentro desse *backbone*, os GSNs encapsulam os pacotes de dados e transmitem-nos usando o Protocolo de Tunelamento do GPRS (*GPRS Tunnel Protocol* - GTP²)[11].

Além da implantação dos GSNs, alguns elementos da rede GSM devem ser adaptados para dar suporte ao GPRS. A tabela 2.2 resume os elementos afetados e as alterações necessárias.

²ver seção 2.5

Tabela 2.2: Modificações exigidas pelo GPRS

Elemento da rede GSM	Modificação ou <i>upgrade</i> exigida pelo GPRS
BTS	<i>upgrade</i> no <i>software</i> .
BSC	<i>upgrade</i> no <i>software</i> bem como a instalação de um novo <i>hardware</i> chamado Unidade de Controle de Pacote (<i>Packet Control Unit</i> - PCU). A PCU será a responsável pelo direcionamento dos pacotes de dados para a rede GPRS.
Bases de dados (HLR, VLR, etc.)	<i>upgrade</i> no <i>software</i> para lidar com as novas funcionalidades introduzidas pelo GPRS.

2.3 A interface aérea

O GSM utiliza duas bandas de frequências de 25 Megahertz (MHz), separadas por 45 MHz: 890 a 915 MHz, utilizada para transmissões das estações móveis – chamada de *uplink* –, e 935 a 960 MHz para transmissões da BTS – chamada de *downlink*³. Como os sistemas analógicos, o GSM utiliza a técnica FDMA. Assim, cada banda de frequência é dividida em 125 canais de rádio, cada um de 200 Kilohertz (KHz). Esses canais são numerados de 0 a 124, denominados **Número Absoluto de Canal de Radiofrequência** (*Absolute Radio Frequency Channel Number* - ARFCN). No entanto, somente os canais de 1 a 124 são usados: o canal número 0 é usado como banda de guarda entre o GSM e os outros serviços vizinhos.

O GSM também utiliza a técnica Acesso ao Meio por Divisão no Tempo (*Time Division Medium Access* - TDMA), sendo possível, portanto, o compartilhamento de cada canal de radiofrequência (ARFCN) por 8 usuários. Cada usuário utiliza o

³Esses parâmetros fazem referência ao GSM 900. O *Digital* (DCS) 1800 utiliza duas bandas de frequência de 75 MHz cada, sendo 1710 a 1785 MHz para o *uplink* e 1805 a 1880 MHz para o *downlink*.

canal de rádio durante um tempo fixo e determinado – chamado **janela temporal** (*Timeslot*) –, e em seguida, aguarda a sua vez de usá-lo novamente. As janelas temporais são numeradas de 0 a 7. A recorrência de uma janela temporal define um canal físico – o canal físico destinado ao tráfego GPRS é chamado de *Packet Data Channel* (PDCH). A figura 2.3 mostra a técnica híbrida de acesso ao meio (FDMA/TDMA) utilizada pelo GSM.

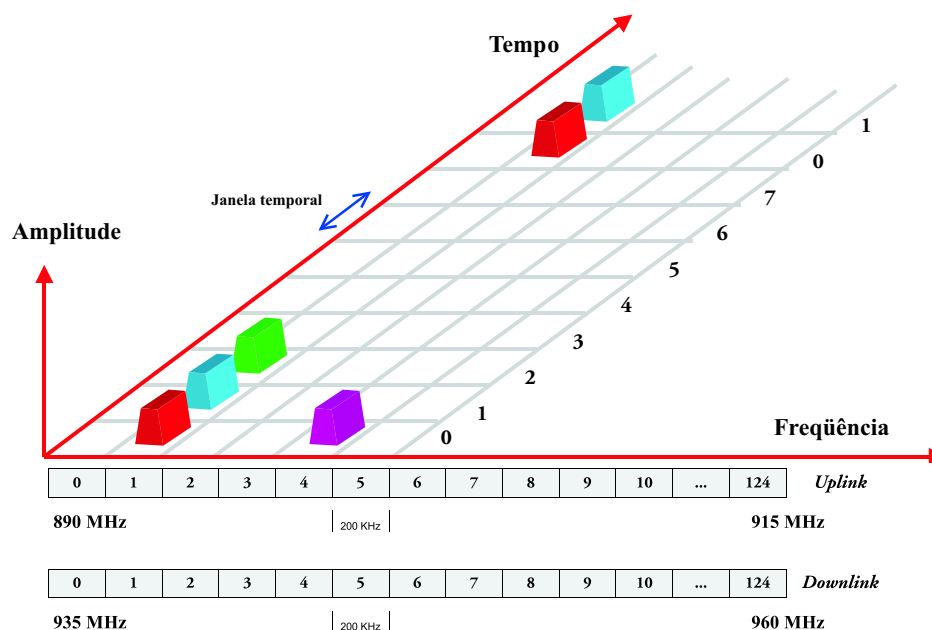


Figura 2.3: Técnicas de acesso ao meio utilizadas pelo GSM

A duração de uma janela temporal é de 577 microsegundos (μs). O conjunto de 8 janelas temporais é denominado **quadro TDMA**. Conseqüentemente, um quadro TDMA tem a duração de 4,615 milissegundos (ms) ($8 \times 577 \mu s$) e cada usuário utiliza o canal de rádio por $577 \mu s$, a cada 4,615 ms.

Além disso, o GSM utiliza o *Time Division Duplex* (TDD), fazendo-se necessário, desta forma, uma defasagem temporal entre o *uplink* e o *downlink*: o *uplink* é atrasado 3 janelas temporais em relação ao *downlink*.

A figura 2.4 mostra a transmissão e recepção de um usuário fictício. Nesse exemplo foi designado ao usuário a janela temporal número 2. Pode-se ver que, após receber informações na janela temporal número 2, no *downlink*, haverá duas janelas temporais para que a estação móvel passe para a frequência de *uplink* e esteja

pronta para transmitir informações, ao final do qual o processo se repetirá.

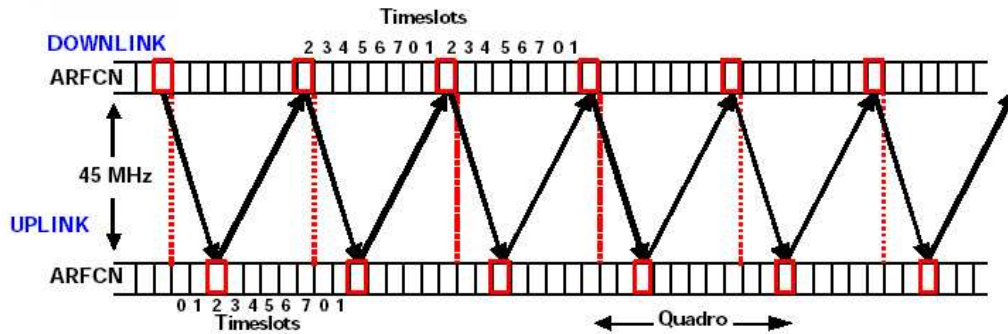


Figura 2.4: Transmissão e recepção de um usuário fictício

É possível ver outra característica do GSM: a unidade móvel utiliza a mesma janela temporal tanto no *uplink* quanto no *downlink*, ou seja, o *uplink* e o *downlink* são alocados conjuntamente.

O GPRS utiliza toda a estrutura de rádio descrita acima, com exceção da alocação de canal: permite que um único usuário transmita em múltiplas janelas temporais num mesmo quadro TDMA (operação multijanelas). Além disso, o *uplink* e o *downlink* são alocados separadamente, o que permite ao GPRS dar suporte ao tráfego de dados assimétrico (por exemplo, *Web browsing*).

Uma janela temporal poderá carregar vários tipos de informação. Para cada tipo de informação haverá uma conformação dos *bits* dentro da janela. A essas “formas” de arrumar os *bits* dentro da janela temporal, dá-se o nome de **estruturas de rajada** (*burst*).

Há no GSM 4 estruturas de rajadas: rajada normal, rajada de acesso aleatório, rajada de correção de frequência e rajada de sincronização. Será visto somente a estrutura de rajada normal, visto que as restantes fogem ao escopo do trabalho.

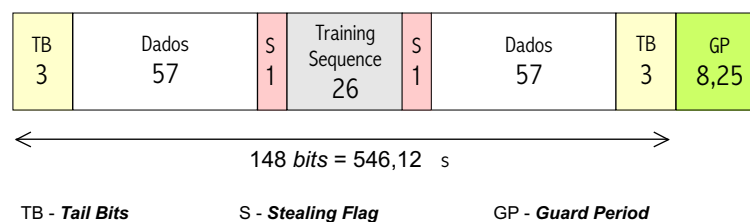


Figura 2.5: Estrutura da rajada normal

Na figura 2.5 é possível ver que a rajada normal transmite somente 148 *bits* ativos, sendo 114 desses com informação, divididos em 2 blocos de 57 *bits*.

O GPRS utiliza as mesmas estruturas de rajada do GSM.

2.4 Canais lógicos

No topo dos canais físicos estão os canais lógicos, definidos para realizar funções de sinalização, disseminação (*broadcast*) de informações do sistema, sincronização, alocação de canal e *paging*. Os canais lógicos definidos no GPRS são:

- *Packet Data Traffic Channel* (PDTCH): é usado para transferir os dados do usuário. Ele é atribuído a uma MS, ou a várias MS no caso de serviços ponto-a-multiponto. Esse canal lógico utiliza a estrutura de rajada normal para conformar os *bits* dentro da janela temporal;
- *Packet Broadcast Control Channel* (PBCCH): é um canal de sinalização ponto-a-multiponto, unidirecional, a partir da BSS para a MS. É usado para distribuir informações especiais sobre a organização da rede de rádio GPRS. Além dessas informações, esse canal lógico pode ser usado para fornecer informações sobre os serviços de comutação por circuitos do GSM. Assim, as MS que trabalham nos dois modos não precisam monitorar o *Broadcast Control Channel* (BCCH) do GSM;
- *Packet Common Control Channel* (PCCCH): é um canal de sinalização bidirecional, ponto-a-multiponto, que transporta informações para a gerência da rede de acesso. Ele consiste de quatro subcanais:
 1. *Packet Random Access Channel* (PRACH): utilizado pela MS para solicitar um ou mais PDTCH;
 2. *Packet Access Grant Channel* (PAGCH): utilizado para alocar um ou mais PDTCH para uma MS;
 3. *Packet Paging Channel* (PPCH): utilizado pela BSS para localizar uma MS, para uma transmissão de pacotes no *downlink*;
 4. *Packet Notification Channel* (PNCH): utilizado para informar a estação móvel sobre a chegada de mensagens de *multicast* ou chamada em grupo.

- *Packet Associated Control Channel* (PACCH): é sempre alocado em combinação com um ou mais PDTCH atribuídos a uma MS. Ele transporta informação de sinalização relacionada a uma MS específica, tais como informações sobre controle de potência;
- *Packet Timing Advance Control Channel* (PTCCH): utilizado para sincronização de quadros. A coordenação entre os canais lógicos de comutação por circuitos e comutação por pacotes é muito importante. Por exemplo, se um PCCCH não está disponível em uma célula, a MS pode usar o *Common Control Channel* (CCCH) do GSM para iniciar sua transferência de pacote. Da mesma forma, se o PBCCH não está disponível, a MS pode verificar o BCCH do GSM para conseguir informações sobre a rede de rádio[11].

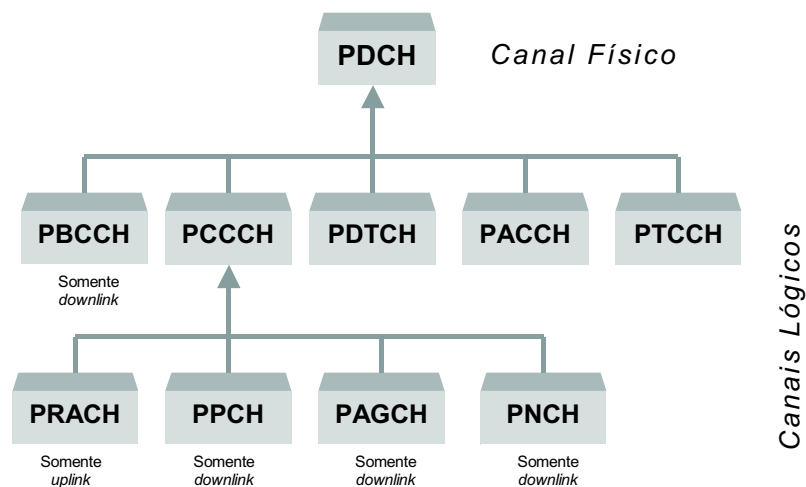


Figura 2.6: Canais lógicos do GPRS

2.5 A pilha de protocolos

A arquitetura de protocolo da comunicação de dados do GPRS é baseada na pilha de protocolos do *Open System Interconnection* (OSI). O modelo OSI representa um esforço da Organização Internacional de Padrões (*International Standards Organization* - ISO) para padronizar o projeto dos sistemas de protocolos de rede, a fim de promover a interconectividade entre os diversos sistemas. Esse modelo separa as

etapas de transmissão em camadas, definindo como cada camada do processo deve proceder na transferência dos dados. Uma camada é um bloco lógico que executa determinadas tarefas por meio dos protocolos. Um protocolo é uma regra de comunicação estabelecida entre as camadas do mesmo nível. Ele contém as definições de como a comunicação será estabelecida, que serviço será executado por essa camada. Cada camada, teoricamente, funciona de modo independente uma da outra. Além disso, cada uma delas oferece os seus serviços às camadas seguintes. Essa estrutura modular facilita a implementação de *softwares* e *hardwares* ao longo da rede, pois define as funções de cada camada, facilitando a operacionalização para os usuários e fabricantes.

O GPRS distingue entre dois planos de protocolos:

- O plano de transmissão envolve os protocolos para a transmissão de informações do usuário e de procedimentos de controle associados, como controle de fluxo;
- O plano de sinalização é constituído de protocolos que controlam e suportam a transmissão do usuário. Algumas funções do plano de sinalização são o controle da conexão, roteamento e gerenciamento da mobilidade[31].

Será descrito somente o plano de transmissão, uma vez que o plano de sinalização foge ao escopo deste trabalho.

Comparado ao GSM, a pilha de protocolos do GPRS para o plano de transmissão contém novas camadas para lidar com o tráfego de dados[31]. O plano de transmissão do GPRS é mostrado na figura 2.7, o qual ilustra, além dos protocolos do plano de transmissão, a pilha de protocolos da Internet.

A pilha de protocolos da Internet contém as seguintes camadas:

- **Camada de aplicação:** oferece suporte às várias aplicações do usuário, tais como, correio eletrônico e *web browsing*. Ela necessita de diferentes tipos de protocolos para gerenciar as sessões de aplicações de acordo com o *software* utilizado pelo usuário;
- **Camada de transporte (TCP/UDP):** os protocolos de transporte, *Transmission Control Protocol* (TCP) e o *User Datagram Protocol* (UDP), proporcionam a troca de dados em conexões na rede. O protocolo TCP possibilita

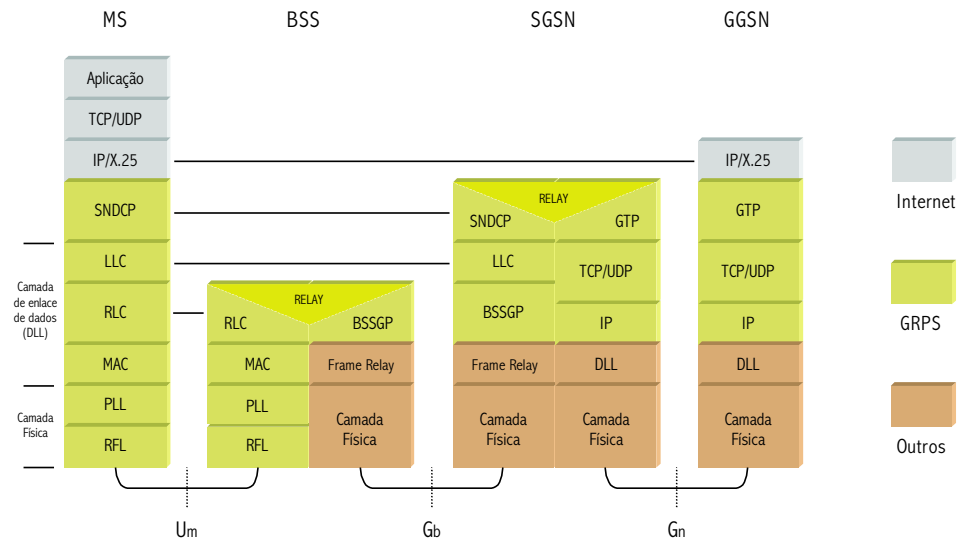


Figura 2.7: Pilha de protocolos do plano de transmissão do GPRS

um fluxo confiável de dados, utilizando retransmissão de pacotes e armazenamento de pacotes no transmissor e no receptor. Um mecanismo conhecido com *Automatic Repeat Request* (ARQ), é utilizado para garantir a entrega de pacotes. O protocolo UDP apenas realiza a entrega de pacotes de dados conhecidos como datagramas. Nesse caso, não há garantia de entrega e nem retransmissão de datagramas quando da detecção de erros. Esse protocolo é principalmente utilizado para transmissão de vídeo e áudio em tempo real;

- **Camada de rede:** utiliza dois tipos de protocolos; IP ou X.25. Porém, atualmente o IP é o protocolo de rede mais utilizado em redes GPRS.

Abaixo da pilha de protocolos da Internet, é definida a pilha de protocolos do plano de transmissão do GPRS. Essa pilha de protocolos contém as seguintes camadas:

- **Subnetwork Dependent Convergence Protocol (SNDCP):** ela é usada para transferir pacotes entre a MS e a SGSN. As tarefas mais importantes dessa camada são a segmentação de pacotes e a compressão de cabeçalho;
- **Camada de enlace:** a camada de enlace de dados entre a MS e a rede de acesso é dividida em duas subcamadas: a subcamada de controle de enlace lógico (*Logical Link Control* - LLC) e as subcamadas de controle de enlace de

rádio (*Radio Link Control* - RLC) e de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC), sendo que a RLC/MAC são consideradas parte da mesma subcamada. A subcamada LLC provê um enlace lógico cifrado de alta confiabilidade baseado no protocolo *High Level Data Link Control* (HDLC). Esse enlace é estabelecido entre a MS e o SGSN. Suas funções incluem entrega de pacotes em ordem, controle de fluxo, detecção de erros e retransmissão baseados no ARQ. O principal propósito da RLC é estabelecer um enlace confiável entre a MS e a BSS. Isso inclui a segmentação e montagem de quadros LLC em blocos de dados RLC. A este bloco de dados RLC é adicionado um cabeçalho MAC e uma sequência de verificação do bloco (*Block Check Sequence* - BCS), que juntos formam um bloco de rádio. Após a codificação de canal, o bloco de rádio codificado terá um tamanho fixo de 456 *bits*. No entanto, a quantidade de *bits* de informação no bloco de rádio dependerá de qual esquema de codificação de canal está sendo usado (CS-1 a CS-4, dando 181 a 428 *bits*, respectivamente) [31]. A MAC controla as tentativas de acesso da MS ao canal de rádio compartilhado por muitas outras estações móveis, ou seja, é responsável pela distribuição de todo o tráfego de dados e controle de sinalização nos canais físicos[31];

- **Camada física:** essa camada é dividida nas subcamadas *Physical Link Layer* (PLL) e *Radio Frequency Layer* (RFL), e opera entre a MS e a BSS. A camada PLL provê um canal físico entre a estação móvel e a BSS, incluindo codificação de canal, detecção e correção de erro. A camada RFL opera abaixo da camada PLL, realizando funções como modulação e demodulação;
- **Base Station Subsystem GPRS Protocol (BSSGP):** transmite pacotes de dados e informações de roteamento entre o BSS e o SGSN. O padrão de comunicação utilizado para essa transmissão é o *Frame Relay* (FR);
- **GPRS Tunnel Protocol (GTP):** é responsável pelo tunelamento da informação entre os GSNs. Ele relaciona a informação de sinalização entre os GSNs e é utilizado entre GSNs de uma mesma PLMN e entre GSNs de diferentes PLMNs. Abaixo do GTP são utilizados os protocolos TCP/UDP e IP/X.25. O TCP pode ser usado juntamente com o X.25 para conexões

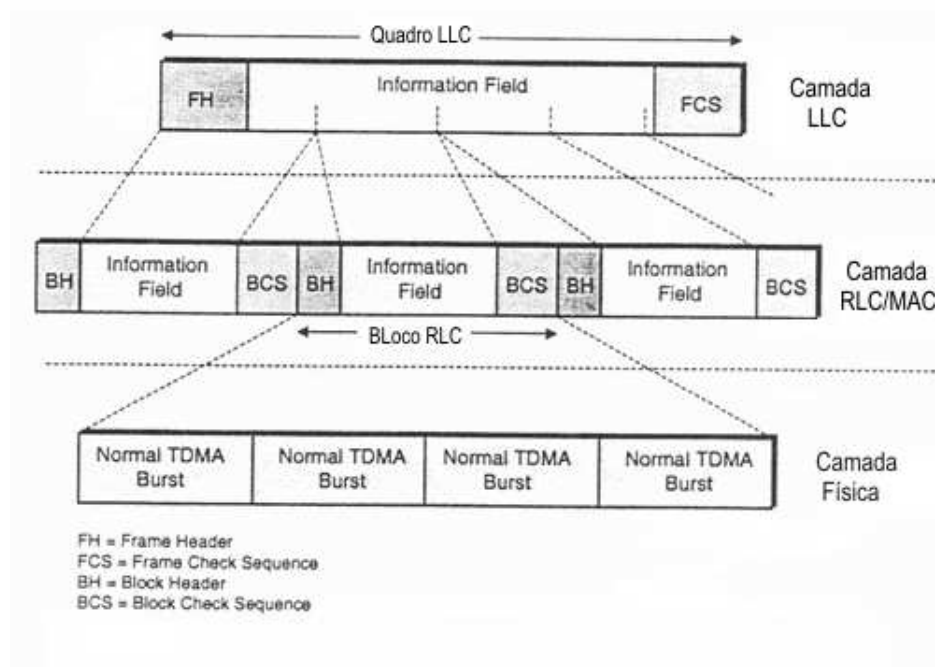
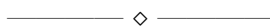


Figura 2.8: Segmentação dos quadros LLC em blocos RLC

seguras, enquanto que o UDP será usado com o IP onde não for necessário confiabilidade na camada de rede. Abaixo do IP podem ser usados protocolos como Ethernet, ISDN ou ATM.

Capítulo 3

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO



O objetivo de engenheiros, analistas e dos próprios usuários é conseguir o melhor desempenho possível dos sistemas para um dado custo, ou seja, se quer o melhor custo-benefício. Para alcançar esse objetivo, é necessário um profundo conhecimento do sistema sob estudo, saber como seus componentes ou subsistemas interagem entre si e como isso influencia no comportamento global do sistema. Tal conhecimento só é possível através de técnicas de avaliação de desempenho, as quais permitem demonstrar e prever, de uma maneira estruturada, sob quais condições o sistema trabalha melhor, quais são seus “gargalos” (pontos onde ocorrem congestionamentos ou filas), etc.

Um sistema é um conjunto de objetos – que podem ser pessoas, máquinas, módulos de *software* ou de *hardware* – com alguma interação ou interdependência, tendo na sua utilização um propósito lógico a alcançar. Pode-se chamar de “sistema”, por exemplo, todo o complexo de uma mineração ou simplesmente o setor de escavação. A escolha dos “limites” do que será chamado “sistema em estudo” vai sempre depender do interesse de quem o estuda[8][29].

As muitas técnicas de avaliação de desempenho de sistemas, disponíveis e fartamente discutidas na literatura, podem ser separadas em dois grandes grupos: **experimentação** e **modelagem**[29].

A experimentação estuda o comportamento do sistema através de experimentos feitos com o sistema real. Esse grupo de técnicas, obviamente, é útil somente quando o sistema sob estudo já existe em um nível tal de extensão que possibilite mensurar o seu desempenho. As principais técnicas de experimentação são:

- Protótipo: É uma simplificação do sistema original, mantendo o comportamento funcional e descartando as características que não são relevantes para ao estudo do sistema¹;
- *Benchmarks*: São padrões de desempenho, normalmente programas computacionais, usados para testar o desempenho de um *software* ou *hardware*;
- Aquisição de dados: É a que, potencialmente, produz os melhores resultados, uma vez que envolve a coleta de dados do sistema real. No entanto, essa técnica, geralmente, é de difícil realização, visto que é quase impossível fazer aferições sem interferir no comportamento do sistema[29].

A modelagem faz experimentos com um modelo do sistema. Para estudar um sistema cientificamente, sem fazer uso das técnicas de experimentação, precisa-se fazer um conjunto de considerações que descreverão as principais características funcionais do sistema. A esse conjunto de considerações dá-se o nome de **modelo**, o qual será usado para compreender como o sistema correspondente “trabalha”. Consequentemente, um modelo nada mais é que uma abstração do sistema sob estudo.

O termo “modelo” tem sido usado em inúmeros ramos da atividade humana, sendo, portanto, classificado de acordo com a sua relação com o sistema sob estudo. Por exemplo, tem-se um modelo **analógico** quando as propriedades do sistema são representadas por outras equivalentes. É o caso de se representar um sistema mecânico pelo correspondente sistema elétrico. O modelo é dito **matemático** quando pode ser analisado por um conjunto de equações matemáticas. Da mesma forma, um modelo é dito **diagramático** se as características do sistema em estudo são representados por um diagrama[8].

¹alguns autores classificam os protótipos como modelos físicos do sistema e não um sistema simplificado; ambas as definições não estão totalmente certas nem tão pouco erradas, são apenas formas diferentes de se encarar a situação.

Os modelos são largamente usados e preferidos por diversos fatores:

- O estudo com modelos é muito menos dispendioso do que com o sistema real ou com protótipos;
- A flexibilidade de um modelo é extremamente superior se comparado ao sistema real. Pode-se testar um modelo sobre diversas condições e configurações sem grande esforço;
- Às vezes, trabalhar com o sistema real não é apropriado. Na aviação comercial, por exemplo: o treinamento com um modelo computacional (simulador), onde o aspirante a piloto possa treitar exaustivamente decolagens, pousos e procedimentos ante a diversas situações de emergência, é muito mais seguro do que com um avião de verdade (que custa milhões de dólares...).

Basicamente, há duas formas de abordar a modelagem de sistemas: através dos **métodos analíticos** e da **simulação**.

Nos métodos analíticos as considerações geradoras do modelo tomam a forma de expressões matemáticas que descrevem, de forma exata ou aproximada, o comportamento do sistema. Os métodos analíticos produzem resultados mais rápidos, com pouco gasto de recursos. No entanto, às vezes, eles não podem ser aplicados, porque, para achar uma solução analítica para o modelo, são necessárias muitas simplificações do mesmo. Essas simplificações impõem restrições ao modelo, que pode, assim, não representar na devida medida o comportamento do sistema, ou seja, o modelo perde precisão[4].

A simulação procura reproduzir, da forma mais fiel possível, o comportamento sistema; envolve a geração de uma história artificial do sistema e o uso dessa história para fazer inferências a respeito das características do sistema em estudo. Esse método permite a inclusão de muitos detalhes do sistema ao modelo sem impor qualquer restrição, sendo possível, assim, construir um modelo mais próximo da realidade[32][4].

Existem algumas características importantes que diferenciam os métodos analíticos da simulação, podendo até auxiliar na escolha desta ou daquela para a resolução do modelo proposto:

- O método analítico fornece valores médios para as métricas²;
- A simulação fornece números para cada evento, as estatísticas são feitas posteriormente;
- O método analítico estuda somente o comportamento do sistema no estado estacionário(*steady-state*);
- A simulação pode avaliar estados dinâmicos ou transientes.

3.1 Simulação

A realização de um estudo de simulação completo (minucioso) e seguro (idôneo) envolve a observância de alguns passos, que são consensuais na literatura sobre simulação.

1. **Formulação do problema:** Um estudo de simulação deveria iniciar com uma declaração (enunciado ou especificação) do problema a ser investigado.
2. **Estabelecimento de objetivos:** Os objetivos do estudo devem ser especificados. Os objetivos indicam as questões a serem respondidas pela simulação. Neste ponto deve ser determinado se a simulação é uma metodologia apropriada para o problema formulado.
3. **Construção do modelo:** Esta fase refere-se à elaboração conceitual e comunicativa do modelo. A formulação conceitual do modelo é transcrita (ou representada) num modelo, geralmente, denominado comunicativo. Dessa forma, o modelo comunicativo é uma abstração do sistema sob estudo expressa na forma de relações lógicas-matemáticas.
4. **Codificação do modelo:** O processo de codificação ou programação do modelo consiste da transcrição do modelo comunicativo num programa escrito em linguagem de programação de computadores para a execução do modelo de simulação em computadores, visando a obtenção de resultados. A linguagem

²medidas de desempenho

de programação a ser utilizada na codificação pode ser uma de propósito geral ou uma linguagem de propósito específico para simulação³.

5. **Verificação:** O modelo programado (ou o programa de computador) deve ser testado para averiguar se este funciona como o pretendido, se o código não possui “*bugs*”. Este passo, geralmente, é referido em programação de computadores como processo de depuração do código do programa.
6. **Validação:** O objetivo da validação é determinar o quanto o modelo conceitual é uma representação razoável do sistema real (ou idealizado) que está sendo modelado. Deve-se responder as seguintes questões: Quanto precisamente o modelo simulado representa o sistema real (ou idealizado)? O modelo simulado pode ser utilizado no lugar do sistema real (ou idealizado) para tomada de decisões relativas ao sistema?
7. **Projeto experimental:** O projeto ou modelo experimental determina a estratégia de simulação a ser utilizada (uma única execução longa da simulação *versus* replicações independentes da simulação), o tamanho do período de inicialização (“*warm-up*”), o tamanho da(s) execução(ões) da simulação, e o número de replicações a ser feito em cada experimento da simulação (se aplicável).
8. **Realização e análise das execuções:** A realização de execuções da simulação para se obter dados de saída, e sua subsequente análise, são usados para estimar medidas de desempenho para o(s) projeto(s) de sistema(s) que está(ão) sendo simulado(s).
9. **Execuções adicionais:** Baseado na análise das execuções que foram completadas, a pessoa responsável pela simulação determina se execuções adicionais são necessárias e que projeto esses experimentos adicionais deveriam obedecer.
10. **Documentação do programa e relatório dos resultados:** A operação do modelo deve ser documentada e um relatório com os resultados deve ser preparado[32].

³para maiores detalhes sobre as linguagens utilizadas na simulação, ver seção 3.1.3.

3.1.1 Terminologia associada aos modelos de simulação

Uma série de termos é usualmente empregada quando da conceituação dos elementos básicos envolvidos na modelagem e na simulação de sistemas. Para uma melhor compreensão dos mesmos, as definições serão acompanhadas de alguns exemplos de sistemas simples[9].

- **Variáveis de estado:** As variáveis do modelo cujos valores definem o estado do sistema são conhecidas como **variáveis de estado**. As variáveis de estado constituem o conjunto de informações necessárias à compreensão do que está ocorrendo no sistema num determinado instante no tempo, com relação aos objetos de estudo. Variáveis de estado definidas numa determinada investigação de um sistema podem ser completamente diferentes daquelas definidas em outro estudo sobre o mesmo sistema[9]. Tomemos como exemplo um posto de gasolina: nesse sistema existirão os clientes que chegarão ao posto para encher o tanque do seu carro e existirão os frentistas que atenderão aos clientes. Numa possível modelagem desse sistema, poderíamos ter como variáveis de estado: o número de carros esperando por atendimento, números de clientes sendo servidos, número de clientes que já foram atendidos, etc.
- **Eventos:** são acontecimentos, programados ou não, os quais, quando ocorrem, provocam uma mudança de estado no sistema. Toda mudança de estado é provocada pela ocorrência de um evento[9]. No exemplo anterior, pode-se considerar como eventos: a chegada de um cliente(carro) ao posto de galosina, o início do atendimento do cliente (quando o frentista começa a encher o tanque do carro), a saída de um cliente do posto, etc.
- **Entidades e Atributos:** Uma entidade representa um objeto que compõe ou move-se através do sistema. Exemplos: os clientes do posto e os frentistas. Os atributos são as características que definem completamente as entidades, diferenciando-as entre si. Exemplos: o modelo do carro, tipo de combustível usado pelo carro, etc. Existem atributos que “carregam” informações necessárias às estatísticas realizadas ao final da simulação. Por exemplo, Poderíamos definir para cada cliente que chega ao posto dois atributos: **Tempo de chegada ao posto - TCP** e **tempo de saída do posto -**

TSP; a diferença de (TSP - TCP) de cada um dos clientes seria útil no cálculo do tempo médio de permanência no sistema.

- **Recursos e filas de recursos:** Um recurso é uma entidade estática que fornece serviços às entidades dinâmicas - no exemplo anterior, um dos frentistas. Se a entidade dinâmica não puder se apoderar de um recurso solicitado, ela deverá aguardar pelo mesmo em uma fila. Se a entidade não encontrar lugar na fila, a mesma poderá tomar o destino de outro recurso (ou outra fila) ou mesmo deixar o sistema. Se puder capturar o recurso, a entidade dinâmica o reterá por um tempo (o qual se costuma chamar de tempo de processamento), liberando-o a seguir. Um recurso pode ter vários estados. Os mais comuns são: **ocupado** e **livre**[9].
- **Atividades e períodos de espera:** Em simulação, diz-se que uma atividade corresponde a um período de tempo predeterminado. Logo, uma vez iniciada, seu final pode ser programado. A duração de uma atividade, no entanto, não é, necessariamente, uma constante. Poderá ser o resultado de uma expressão matemática, um valor aleatório com base em uma distribuição de probabilidades[9]. Ao contrário de uma atividade, uma espera é um período de tempo sobre o qual não se tem controle. Uma vez iniciada, não se pode programar seu fim. Por exemplo, uma entidade entra em uma fila a espera por um recurso. O tempo que a mesma ficará retida na fila dependerá da soma dos tempos de processamento das outras entidades que se encontram na fila ou em processo[9].
- **Tempo (real) simulado e tempo de simulação:** Um cuidado necessário por parte de quem está modelando um sistema diz respeito à relação entre o tempo (do sistema real) simulado e o tempo de simulação (tempo necessário à execução de um experimento no computador). Para certos sistemas, o tempo de simulação pode ser muito maior que o tempo simulado. Por exemplo, na simulação de um modelo de uma rede de computadores, as unidades de tempo admitidas para os eventos são da ordem de milissegundos. Se, no modelo, o número de entidades e o número de processos a que estas devem ser submetidas for grande (milhares de pacotes sendo roteados, por exemplo) o tempo

de *Central Processing Unit* (CPU) devotado a esse processamento poderá ser razoável (dependendo da CPU). Desta forma, para simular, digamos, 15 segundos de funcionamento desse sistema, é possível que se gaste dezenas de minutos de tempo no computador[9]. Por outro lado, toma-se um modelo de um terminal portuário. Os eventos associados a esse tipo de sistema podem ser contabilizados até mesmo na ordem de dias, ou semanas. Por exemplo, o período decorrido entre a chegada de dois navios. Desta forma, os modelos deses tipo de sistema, tipicamente permitem que sejam simulados meses ou anos de operação dos mesmos em apenas alguns segundos ou minutos de processamento. Por conta destas diferenças, é sempre recomendável estar atento a detalhes dessa natureza quando se lida com simulação[9].

Tabela 3.1: Exemplos de elementos de modelos de sistemas

Tipo de Sistema	Entidades	Atributos	Recursos	Filas
Aeroporto	aviões	Número do voo, capacidade	Pistas, terminais	Filas
Manufatura	Partes	Código de peças, datas de entrega	Máquinas, trabalhadores	Filas, Estoques
Comunicação	Mensagens	Destino, comprimento da mensagem	Nós, enlaces	<i>Buffers</i>

3.1.2 Tipos de modelos de simulação

A caracterização de um modelo é dada em função da maneira com que ocorrem as mudanças nas variáveis de estado do sistema ao longo do tempo (variável independente para a maioria dos estudos envolvendo simulação)[9]. Portanto, pode-se classificar os modelos de simulação como segue:

- **Modelos de mudança discreta ou modelos discretos:** Nos modelos assim classificados, as variáveis de estado mantêm-se inalteradas ao longo de

intervalos de tempo e mudam seus valores (instantaneamente) somente em pontos bem definidos, também conhecidos como **tempo de ocorrência do evento**[9];

- **Modelos de mudança contínua ou modelos contínuos:** Nestes modelos, as variáveis de estado podem variar continuamente ao longo do tempo[9].

É importante frisar que a variação do tempo, em ambos os modelos, pode ser tanto discreta como contínua.

Há também a possibilidade de modelagem mista, na qual variáveis dependentes do tempo podem variar ora de maneira contínua ora discretamente ao longo do tempo.

3.1.3 Linguagem de programação associada à simulação

A seleção da linguagem de programação a ser usada é provavelmente o passo mais importante no processo de desenvolvimento de um modelo de simulação. Uma escolha inadequada pode gerar problemas relacionados com o tempo de desenvolvimento e até falhas no modelo de simulação[4].

Existem, basicamente, 4 tipos: linguagem de propósito geral, extensões de uma linguagem de propósito geral, linguagem de simulação e pacotes de simulação. Todas têm suas vantagens e desvantagens. Uma linguagem de propósito geral, como Pascal ou C, é, na maioria dos casos, a primeira escolha, devido à familiaridade anterior do analista com a linguagem. A tendência a essa escolha se acentua quando se verifica que, em projetos de simulação, o tempo disponível para o aprendizado de uma linguagem de simulação ou pacote de simulação praticamente não existe; ao passo que optando por uma linguagem de propósito geral, o analista pode começar o trabalho imediatamente. Uma desvantagem das linguagens de propósito geral é a considerável perda de tempo na confecção de todas as rotinas necessárias à simulação. Extensões de uma linguagem de propósito geral, como o *Simulation Programming Language* (SMPL) para C, constituem uma coleção de rotinas para manipular tarefas que são comumente necessárias em simulação. Seu objetivo é produzir um compromisso entre eficiência, flexibilidade e portabilidade. Linguagens de simulação, como o *General Purpose Simulation System* (GPSS), fazem com que o analista economize bastante

tempo no desenvolvimento de uma simulação. Essas linguagens têm facilidades embutidas para avanço do tempo, listagem de eventos, manipulação de entidades, etc., permitindo que se gaste mais tempo em assuntos relacionados ao sistema a ser modelado, não se preocupando com assuntos existentes em todas as simulações. Além disso, essas linguagens produzem um código “ enxuto ” e modular, bem mais fácil na detecção de erros. Pacotes de simulação, como o ARENA, têm uma biblioteca de estruturas de dados, rotinas e algoritmos. Sua maior vantagem é a economia de tempo que eles produzem. Com um pacote de simulação é possível desenvolver um modelo, resolvê-lo e coletar resultados em apenas um dia. Pode-se dizer que a escolha da linguagem a ser usada recai sobre alguns aspectos:

- Tempo de duração do projeto;
- Tempo disponível para aprender uma outra linguagem;
- Verba disponível[4].

Para fazer uma escolha objetiva e coerente entre as opções disponíveis, é aconselhável que o analista aprenda pelo menos uma linguagem de simulação ou pacote de simulação para que outros fatores, além da familiaridade com uma linguagem de propósito geral, sejam considerados na escolha[4].

3.1.4 Análise dos resultados da simulação

Na maioria das simulações, o que interessa é a análise do sistema no estado estacionário, isto é, o estado em que o sistema se torna estável. Nesses casos, os resultados obtidos na parte inicial da simulação, até o sistema atingir a estabilidade, devem ser removidos. Essa parte inicial é chamada de estado transitório (ou transiente) e o principal problema é identificar o final desse estágio. A identificação do ponto exato do fim do estado transitório é praticamente impossível.

Um método utilizado para minimizar os efeitos do estado transitório é executar a simulação por um tempo relativamente longo, para garantir que as condições iniciais não vão afetar os resultados. No entanto este método desperdiça recursos e não há como dizer com exatidão quão longo deva ser o tempo a ser simulado. Por conta disso, esse método não é aconselhado. Outro método usado para reduzir o

período transiente é iniciar a simulação com valores de parâmetros próximos aos valores no estado estacionário, chamado de truncamento. Dada uma amostra com n observações, o truncamento consiste em ignorar a l primeiras observações e então calcular o mínimo e o máximo do restante das observações. Isto é repetido para $l = 1, 2, \dots, n-1$ até que a $(l+1)$ -ésima observação não seja nem a menor nem a maior das observações restantes. O valor de l neste ponto é igual ao comprimento do estado transitório.

Nos casos em que o estado estacionário não é objeto de interesse, pode-se utilizar as mesmas técnicas aplicadas para eliminar o estado transiente. O problema de determinar o tempo necessário de simulação está relacionado ao intervalo de confiança estipulado para as variáveis do sistema. Um intervalo de confiança compreende um intervalo numérico que possui uma probabilidade igual a $(1 - \alpha)$ de incluir o verdadeiro valor da variável ou medida de desempenho sob análise, onde $(1 - \alpha)$ é denominado nível de confiança do intervalo. Desta forma, α será o erro admitido ao se concluir sobre a presença do verdadeiro valor da variável no intervalo calculado. O principal objetivo é obter o máximo de informação (confiável) com o mínimo esforço. Técnicas que possibilitam a finalização da simulação assim que um determinado nível de confiança é atingido, são baseadas na estimação da variância de parâmetros do sistema[4][3][9].

3.2 Simulação a eventos discretos

A análise de um modelo de simulação discreto, levando em consideração o seu comportamento ao longo do tempo (ou seja, dinamicamente), é chamada de **simulação a eventos discretos**. O termo “discreto”, como foi dito, se refere tão somente ao estado do sistema, não fazendo menção ao tempo associado à simulação. Numa simulação a eventos discretos, os valores de tempo podem ser tanto contínuos quanto discretos.

Independente do sistema a ser modelado, a simulação a eventos discretos terá sempre uma estrutura comum. Se a linguagem usada é de propósito geral, o projetista terá de criar os componentes dessa estrutura. Caso seja usada uma linguagem de simulação, alguns ou a maioria já estará a sua disposição. Os componentes são

os seguintes:

- Estado do sistema: Coleção de variáveis de estado necessárias para descrever o sistema em um determinado momento;
- Relógio de simulação: variável que contém o valor atual do tempo simulado;
- Lista de eventos: lista dos próximos eventos a ocorrerem, ordenados por tempo de ocorrência;
- Contadores de estatística: variáveis que armazenam informações estatísticas para determinar o desempenho do sistema;
- Rotina de inicialização: procedimento que inicializa as variáveis de simulação no tempo zero;
- Rotina de sincronização: procedimento que determina o próximo evento da lista de simulação e avança o relógio de simulação para o instante de ocorrência desse evento;
- Rotina de eventos: procedimento que atualiza o estado do sistema após a ocorrência de um evento e determina o próximo evento a ocorrer. Existe um procedimento específico para cada tipo de evento;
- Gerador de relatório: procedimento que calcula estimativas das medidas de desempenho desejadas, a partir dos contadores de estatística e preparam um relatório ao final da simulação;
- Programa principal: programa que chama a rotina de temporização e determina o próximo evento a ocorrer, chama a rotina de evento e atualiza o estado do sistema de forma adequada. O programa também controla o término da execução, através de um limite no tempo de simulação ou de um limite do número de eventos ocorridos, e chama o gerador de relatório para apresentação dos resultados da simulação[3][33][32].

As relações lógicas entre esses componentes são mostradas na figura 3.1, adaptada da Figura 1.2 de [3]. A simulação começa com o programa principal chamando a rotina de inicialização, onde o relógio de simulação é configurado para zero, o

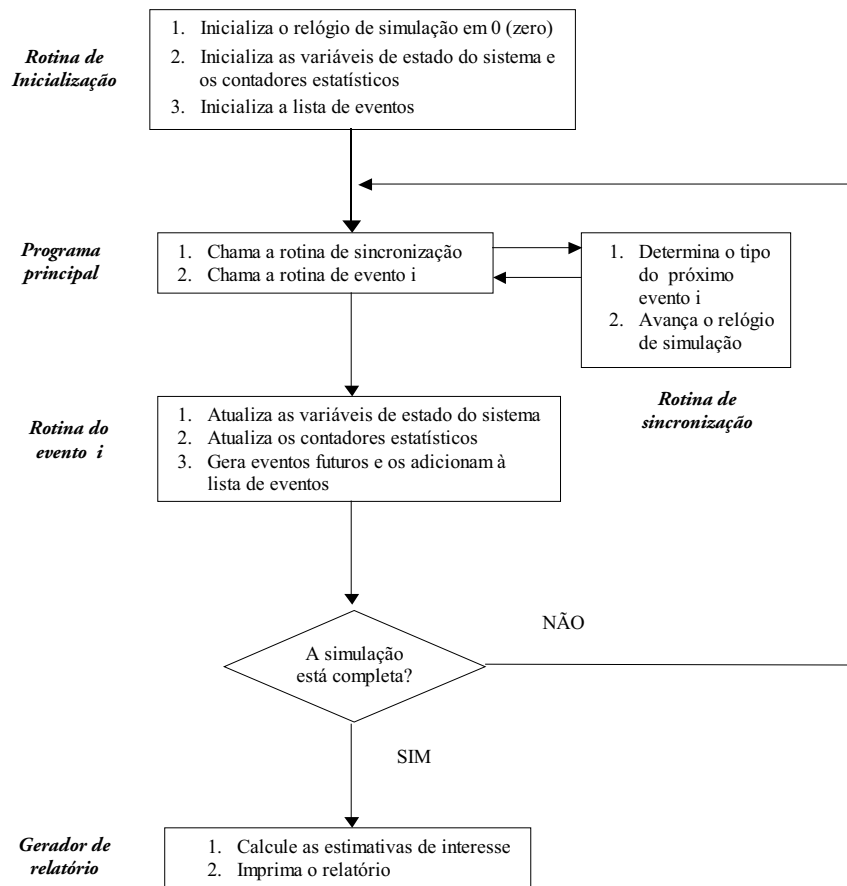


Figura 3.1: Estrutura de fluxo básica de um modelo de SED

estado do sistema, os contadores estatísticos e a lista de eventos são inicializados. Depois de feito isto, o controle retorna ao programa principal que chama a rotina de sincronização para determinar qual tipo de evento é o mais iminente. Se um evento do tipo i é o próximo a ocorrer, o relógio de simulação é avançado para o tempo em que o evento do tipo i irá ocorrer e o controle volta para o programa principal. Então o programa principal chama a rotina de evento i , onde tipicamente 3 tipos de atividades ocorrem:

- O estado do sistema é atualizado para levar em conta o fato que um evento do tipo i ocorreu;
- Informações sobre o desempenho do sistema são adicionadas pela atualização dos contadores estatísticos;
- Os tempos de ocorrência dos eventos futuros são gerados e essa informação é

adicionada a lista de eventos.

Depois que todo o processamento é completado, uma verificação é feita (relativo a algum critério de parada) para determinar se a simulação deve ser finalizada. Se for este o caso, o gerador de relatório é chamado pelo programa principal para computar estimativas (a partir dos contadores estatísticos) das medidas de desempenho desejadas e produz um relatório. Se não for a hora de finalizar o programa, o controle é novamente repassado para o programa principal e todo o processo anteriormente descrito é executado novamente até que o critério de parada seja satisfeito[33][3].

3.2.1 Mecanismos de avanço do tempo

Por causa da natureza dinâmica de um modelo de simulação a eventos discretos, precisa-se manter sob controle o tempo simulado, à medida que a simulação progride, necessitando também de um mecanismo de avanço do tempo simulado de um valor para outro. No modelo de simulação, a variável que fornece o valor atual do tempo simulado é chamada relógio de simulação, conforme visto anteriormente. A unidade de tempo para o relógio de simulação nunca é explicitamente estipulada. Geralmente, utiliza-se a mesma unidade dos parâmetros de entrada. Por isso, na maioria dos casos, não há relação entre o tempo simulado e o tempo necessário para rodar uma simulação no computador. Os dois mais conhecidos mecanismos de avanço do relógio de simulação são: avanço de tempo dirigido por eventos e avanço de tempo dirigido por incrementos fixos[3].

O avanço de tempo dirigido por eventos é o mais largamente usado em simulações discretas. Nele, o relógio de simulação é incrementado automaticamente para o tempo de ocorrência do próximo evento futuro. Resumidamente, o processo ocorre da seguinte forma:

- Primeiramente, o relógio de simulação é inicializado com zero e os tempos de ocorrência dos eventos futuros são determinados;
- Após isso, o relógio de simulação é então avançado para o tempo de ocorrência do mais iminente (primeiro) dentre os eventos futuros;
- A cada evento ocorrido, o estado do sistema e o “conhecimento” sobre os tempos de ocorrência de eventos futuros são atualizados;

- Então o relógio é novamente avançado para o tempo de ocorrência do (novo) mais iminente evento, o estado do sistema é atualizado, etc.[3]

Esse processo é repetido até que algum critério de parada seja satisfeito. Já que as mudanças de estado ocorrem somente nos tempos de ocorrência dos eventos, períodos de inatividade são desconsiderados, devido ao “salto” do relógio de um tempo de ocorrência de um evento para outro. Deve-se notar que os sucessivos “saltos” do relógio de simulação são de tamanhos variáveis[3].

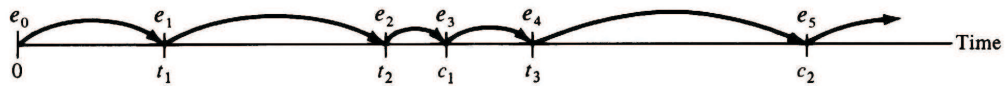


Figura 3.2: Exemplo de avanço de tempo dirigido por evento

No avanço de tempo dirigido por incrementos fixos, o relógio de simulação é avançado em incrementos de exatos Δt unidades de tempo, onde esse Δt é apropriadamente escolhido conforme a simulação. Após cada atualização do relógio, é feita uma verificação para determinar se algum evento ocorreria durante o intervalo anterior de tamanho Δt . Se um ou mais eventos foram listados para terem ocorrido durante este intervalo, considera-se a sua ocorrência no final do intervalo e após isso, o estado do sistema é atualizado apropriadamente. Duas desvantagens desse mecanismo são os erros introduzidos pelo processamento de eventos no final do intervalo em que ocorreriam e a necessidade de decidir qual evento processar primeiro quando eventos que não são simultâneos, na realidade, são tratados como tal pelo modelo. Esses problemas podem se tornar menos severos pela escolha de um Δt menor, mas isso aumenta a quantidade de verificações, fazendo aumentar também o tempo de execução da simulação. Por conta disso, o avanço de tempo dirigido por incrementos fixos não é muito usado para modelos de simulação a eventos discretos em que os tempos entre sucessivos eventos variam muito[3].

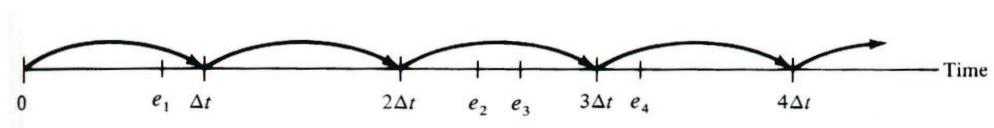
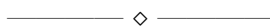


Figura 3.3: Exemplo de avanço de tempo dirigido por incrementos fixos

Capítulo 4

SIMULAÇÃO DA REDE GSM/GPRS



Neste capítulo é apresentado a metodologia de estudo da rede GSM/GPRS, mais especificamente a modelagem e simulação do subsistema MS/BSS, de acordo com 3 esquemas de implementação da comutação híbrida.

4.1 Tipos de alocação de recursos

Os métodos de alocação de recursos em redes móveis celulares podem ser classificados como segue:

1. **Comutação por circuito:** aloca um circuito exclusivamente para uma determinada conexão durante toda a duração do serviço. Apesar de sua simplicidade e fácil implementação, esse método não é adequado quando a fonte de tráfego possui uma característica de rajada.
2. **Comutação por pacote:** aloca um circuito somente quando há transferência de dados através do meio físico.
3. **Comutação híbrida:** este método suporta os dois métodos de alocação de recursos citados anteriormente. Ele pode ser implementado de três formas:

- **Fronteira fixa:** Neste método os recursos são repartidos em duas partes distintas; serviços comutados por circuitos só podem usar uma parte enquanto a outra parte é usada somente pelos serviços comutados por pacotes;
- **Fronteira móvel:** Nesta implementação os serviços comutados por pacotes tem recursos dedicados e também podem usar os recursos que não estão sendo usados pelos serviços comutados por circuitos;
- **Sem fronteiras:** Neste método todos os recursos disponíveis são compartilhados entre os serviços comutados por circuitos e por pacotes[16].

A desvantagem do método fronteira fixa é a baixa utilização dos recursos de rádio causada por períodos de pouco tráfego sobre os recursos destinados à comutação por circuitos enquanto os serviços de dados estão com seus canais dedicados sobrecarregados, mas não podem utilizar os canais ociosos. Os métodos de fronteira móvel e sem fronteira, por outro lado, utilizam os recursos mais eficientemente. Desta forma, a seguir, será utilizado nas simulações somente um esquema baseado no método de fronteira móvel e dois esquemas baseados no método sem fronteiras.

4.2 Descrição do sistema a ser simulado

O subsistema MS/BSS tem como seus componentes físicos as estações móveis, a antena de transmissão e recepção, e o *buffer*. As estações móveis são responsáveis pela geração tanto das chamadas telefônicas quanto dos pacotes de dados a serem transmitidos pela interface aérea. A antena é composta por vários transceptores. Cada transceptor envia e recebe informações na frequência do canal de rádio (portadora) estipulado para si, sendo que esse canal, por sua vez, será compartilhado no tempo por 8 usuários, através da técnica TDMA, descrita anteriormente. O *buffer* é onde os pacotes de dados ou as chamadas telefônicas são armazenados quando não há recursos disponíveis.

4.3 Descrição dos esquemas de implementação da comutação híbrida a serem analisados

4.3.1 Esquema 1

É utilizado neste esquema o método sem fronteira, onde os serviços de voz têm prioridade preemptiva sobre os serviços de dados. Ou seja, se uma chamada de voz, ao chegar ao sistema, não encontrar recursos disponíveis, mas houver algum pacote utilizando um recurso, a transmissão do pacote será suspensa para dar lugar a chamada de voz, sendo o pacote enviado ao *buffer*. Se houver lugar disponível no *buffer*, o pacote aguardará no mesmo até que haja novamente recursos disponíveis para completar sua transmissão. Caso contrário, o pacote será descartado. A chamada de voz será bloqueada se não houver recursos disponíveis e nenhum pacote de dados estiver sendo transmitido, ou seja, se todos os recursos estiverem sendo utilizados por outras chamadas de voz.

A figura 4.1 representa o funcionamento do esquema 1.

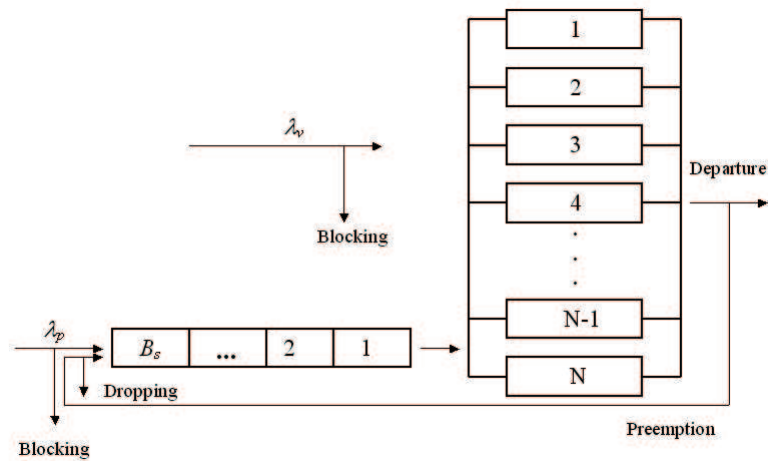


Figura 4.1: Representação do esquema de alocação de recursos 1

4.3.2 Esquema 2

Neste esquema é utilizado o método fronteira móvel, onde os serviços de voz continuam tendo prioridade preemptiva sobre os serviços de dados (somente nos canais compartilhados). Ou seja, se uma chamada de voz, ao chegar ao sistema, não encontrar recursos disponíveis, mas houver algum pacote utilizando um dos recur-

sos que estão sendo compartilhados, a transmissão do pacote será suspensa para dar lugar a chamada de voz, sendo o pacote enviado ao *buffer*. Se houver lugar disponível no *buffer*, o pacote aguardará no mesmo até que haja novamente recursos disponíveis para completar sua transmissão. Caso contrário, o pacote será descartado. A chamada de voz será bloqueada se não houver recursos disponíveis e o número de pacotes sendo transmitidos não exceder o número de canais dedicados ao GPRS (PDCHs).

A figura 4.2 representa o funcionamento do esquema 2.

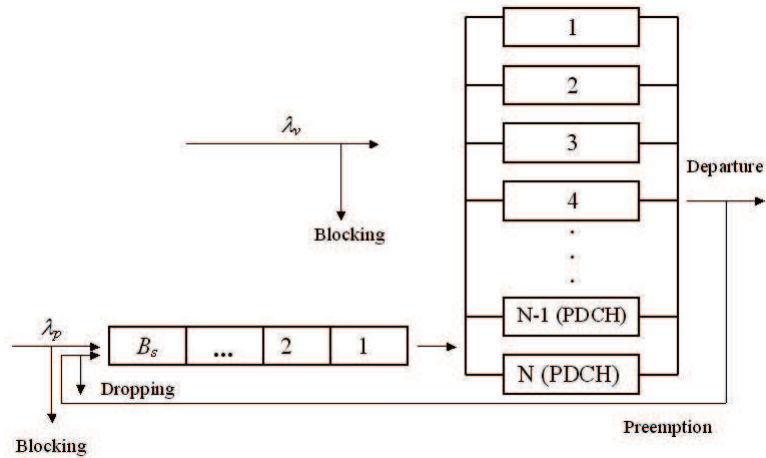


Figura 4.2: Representação do esquema de alocação de recursos 2

4.3.3 Esquema 3

Neste esquema também é utilizado o método sem fronteira, no entanto, os serviços de voz agora são enfileirados no *buffer* caso não encontrem recursos disponíveis. Os pacotes de dados não são enfileirados; se não encontrarem recursos disponíveis, esses pacotes serão bloqueados.

A figura 4.3 representa o funcionamento do esquema 3.

4.4 Medidas de desempenho analisadas

- **Vazão de pacotes:** é quantidade de pacotes de dados transmitidos com sucesso pela interface aérea por unidade de tempo;
- **Probabilidade de bloqueio de voz:** é a probabilidade que uma chamada

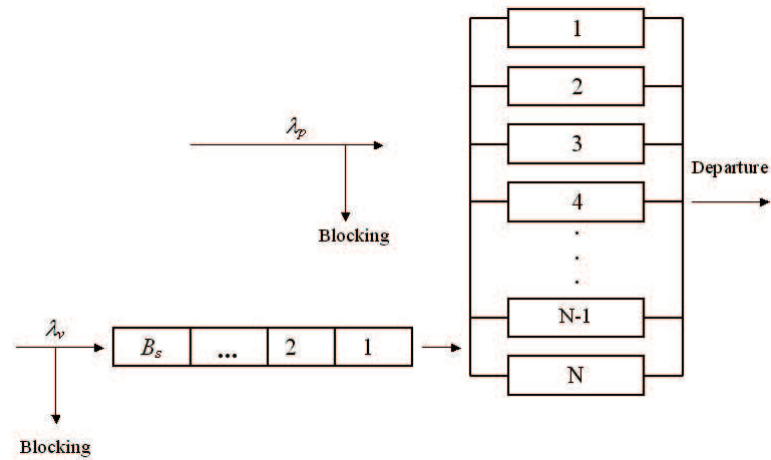


Figura 4.3: Representação do esquema de alocação de recursos 3

telefônica tem de, ao chegar ao sistema, não encontrar recursos disponíveis. Dependendo do esquema de compartilhamento de canais, esses recursos serão um canal físico ou uma posição no *buffer*;

- **Probabilidade de bloqueio de dados:** é a probabilidade que um pacote de dados tem de, ao chegar ao sistema, não encontrar recursos disponíveis. Novamente, esses recursos serão um canal físico ou uma posição no *buffer*, dependendo do esquema de compartilhamento de canais;
- **Probabilidade de preempção do pacote:** é a probabilidade dos pacotes de dados que estão sendo servidos terem seu serviço interrompido para dar lugar a uma chamada telefônica que não encontrou recursos disponíveis.
- **Probabilidade de descarte do pacote:** é a probabilidade do pacote, após ter sofrido a preempção, não encontrar espaço disponível no *buffer*;
- **Tempo médio de espera das chamadas telefônicas:** é o tempo em que as chamadas telefônicas aguardam no *buffer* por recursos disponíveis;
- **Tempo médio de espera dos pacotes:** é o tempo em que os pacotes de dados aguardam no *buffer* por recursos disponíveis;

4.5 Considerações e parâmetros de entrada dos modelos de simulação

Baseado na literatura disponível, as seguintes considerações são utilizadas para os modelos de simulação:

- Disponibilidade dos recursos: 100% (ou seja, não haverá interrupções no serviço telefônico);
- A chegada de chamadas telefônicas e pacotes de dados ao sistema seguem o modelo poissoniano, com médias λ_v e λ_p , respectivamente;
- Codificação de canal utilizada: CS-2 (11,3 Kbps);
- Não é considerado a operação multi-janela (*multi-slot*) para os pacotes de dados;
- O tempo de processamento das chamadas telefônicas é exponencialmente distribuído, com média de 180 segundos;
- Os pacotes tem tamanho padrão exponencialmente distribuído de 22,6 *Kbits*. Conseqüentemente, o tempo de processamento dos pacotes é exponencialmente distribuído com média de 2 segundos;
- É considerado uma única célula composta por 4 portadoras (canais de radiofrequência), perfazendo um total de 32 canais físicos (8 janelas temporais por portadora) para a transmissão de informações;
- Não será considerado o impacto da sinalização sobre a transmissão de dados;
- O *buffer* terá 32 posições, com capacidade cada uma para alocar um pacote inteiro ou um chamada telefônica;
- No esquema 2 uma portadora será dedicada para o GPRS, perfazendo um total de 8 canais para a transmissão de dados e 24 canais compartilhados.

4.6 Validação dos modelos de simulação

Os modelos de simulação foram validados por um método analítico baseado na especificação *Statecharts*. A configuração utilizada para esse fim foi:

- Uma única célula;
- Uma portadora, com um canal dedicado a sinalização, ou seja, 7 canais disponíveis para o tráfego de voz e dados;
- *buffer* com 7 posições;
- Para o esquema 2 foram dedicados dois canais ao tráfego GPRS (PDCHs).

Nas tabelas 4.1 - 4.3 são mostrados alguns dos resultados das simulações preliminares e seus correpondentes através do método analítico para os três esquemas estudados, onde “Pbv” é a probabilidade de bloqueio das chamadas GSM, “Pbp” é a probabilidade de bloqueio dos pacote de dados GPRS, “Ppp” é a probabilidade de preempção dos pacotes de dados GPRS e “Pdp” é a probabilidade de descarte dos pacotes de dados GPRS.

Tabela 4.1: Resultados obtidos através de método analítico e simulação para o esquema 1 com tráfego oferecido GSM/GPRS de 15 Erlang

Método	Pbv	Pbp	Ppp	Pdp
simulação	0,279690	0,785514	0,037314	0,022441
analítico	0,279557	0,782532	0,0367103	0,0257017

Tabela 4.2: Resultados obtidos através de método analítico e simulação para o esquema 2 com tráfego oferecido GSM/GPRS de 15 Erlang

Método	Pbv	Pbp	Ppp	Pdp
simulação	0,451622	0,614425	0,015591	0,008094
analítico	0,453346	0,61164	0,0155193	0,00797882

Tabela 4.3: Resultados obtidos através de método analítico e simulação para o esquema 3 com tráfego oferecido GSM/GPRS de 15 Erlang

Método	Pbv	Pbp	vazão de pacotes (pac./seg.)
simulação	0,119471	0,953132	0,175573
analítico	0,126062	0,949286	0,190177

Os resultados da simulação foram alcançados tendo como referência um nível de confiança de 95%, através da técnica *batch means*, tendo sido utilizado a extensão funcional da linguagem C, SMPL.

4.7 Resultados e análise

Nesta seção serão apresentados os resultados finais obtidos via simulação para os três esquemas de implementação da comutação híbrida, tendo como base a configuração descrita na seção 4.5. A simulação foi executada com o auxílio da extensão funcional da linguagem C, SMPL. O tratamento estatístico dos resultados obtidos no projeto experimental foi baseado num nível de confiança de 95%, tendo sido utilizado a técnica *batch means*.

4.7.1 Análise do aumento do tráfego oferecido GSM/GPRS

Para esta análise, tanto o tráfego oferecido das chamadas GSM quanto dos pacotes GPRS foi estipulado para variar entre 24 e 28,5 Erlang, resultando num tráfego oferecido total GSM/GPRS variando entre 48 e 57 Erlang.

A figura 4.4 mostra a probabilidade de bloqueio das chamadas GSM para os três esquemas descritos anteriormente. Pode-se observar que o enfileiramento das chamadas GSM consegue suprir a falta de prioridade preemptiva das chamadas GSM, fazendo com que o desempenho do esquema 3 seja superior ao dos esquemas 1 e 2. O pior desempenho é do esquema 2, pois o mesmo reserva canais (PDCH) ao GPRS, restringindo assim o número de canais disponíveis para as chamadas GSM.

Por outro lado, como pode ser observado nas figuras 4.5 - 4.9, o esquema 2 obteve o melhor desempenho para a prestação do serviço GPRS. Tal fato se deve, novamente, à reserva dos canais de rádio para o uso exclusivo do GPRS (PDCH).

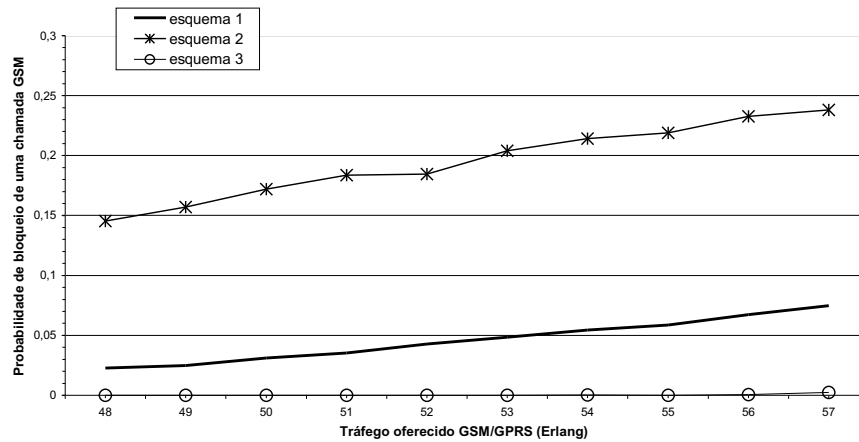


Figura 4.4: Probabilidade de bloqueio das chamadas GSM *versus* tráfego oferecido GSM/GPRS

É possível perceber também, através das figuras 4.6 e 4.7, que a reserva de canais de rádio para o GPRS no esquema 2 diminui a probabilidade de preempção dos pacotes GPRS e, conseqüentemente, a probabilidade de descarte dos mesmos, além de proporcionar o menor tempo médio de espera na fila (figura 4.9) e a maior vazão de pacote GPRS (figura 4.8).

Outro ponto relevante a ser comentado é a forma das curvas para a vazão dos três esquemas (figura 4.8: o esquema 2 proporciona a maior e mais estável vazão, tendo os seus valores máximo e mínimo uma diferença inferior a 15%, enquanto nos esquemas 1 e 3 essa diferença é de 45% e 78%, respectivamente. Fato semelhante pode ser observado nas figuras 4.6 e 4.7 para as probabilidades de preempção e descarte dos pacotes GPRS.

Na figura 4.10, nota-se que para altos valores de tráfego oferecido GSM/GPRS, um usuário GSM tem que aguardar pelo serviço no *buffer* mais de vinte segundos.

4.7.2 Análise do aumento do tráfego oferecido GSM

Para esta análise o tráfego oferecido das chamadas GSM foi estipulado para variar entre 24 e 28,5 Erlang, enquanto que o tráfego oferecido GPRS é mantido fixo, igual a 25 Erlang.

Na figura 4.11 é mostrada a probabilidade de bloqueio de uma chamada de voz *versus* o aumento do tráfego oferecido GSM. De uma forma geral, os resultados

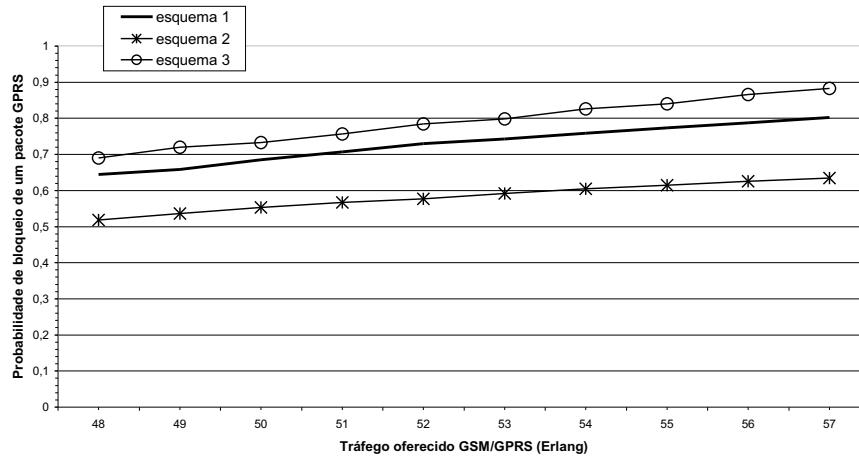


Figura 4.5: Probabilidade de bloqueio de pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GSM/GPRS

obtidos possuem as mesmas características da análise anterior. Tal fato ocorre, por que os esquemas 1 e 2 utilizam os serviços de voz com prioridade preemptiva sobre o serviço GPRS. Ou seja, o comportamento do serviço de voz se mantém independente do tráfego GPRS. No esquema 3, embora não exista essa alta prioridade, o *buffer* é utilizado para o enfileiramento das chamadas de voz que não encontram recursos disponíveis imediatamente. Somando-se a isso, tem-se um curto tempo de serviço dos pacotes GPRS. Essas duas particularidades garantem um desempenho superior desse esquema de alocação de recursos em relação aos demais, com resultados também muito similares à primeira análise.

Nota-se nas figuras 4.12 - 4.16, que o esquema de alocação de recursos 2 novamente obtém o melhor desempenho, no que tange à prestação do serviço GPRS. Assim, na figura 4.12, verifica-se que o uso do *buffer* e da reserva de canais, garante que a probabilidade de bloqueio de um pacote GPRS se mantenha dentro de valores praticamente estáveis (variação menor que 10%), mesmo para altos valores de tráfego oferecido GSM. Isso ocorre porque com canais dedicados, a probabilidade de preempção do pacote é reduzida. Como o tráfego oferecido GPRS é constante, o único fator que sobrecarregará o *buffer* será justamente a probabilidade de preempção. Observa-se ainda nessa figura que a probabilidade de bloqueio de um pacote GPRS para o esquema 1 se aproxima de 78% para altos valores de tráfego GSM. Isso significa que somente o emprego do *buffer* não garante valores aceitáveis de proba-

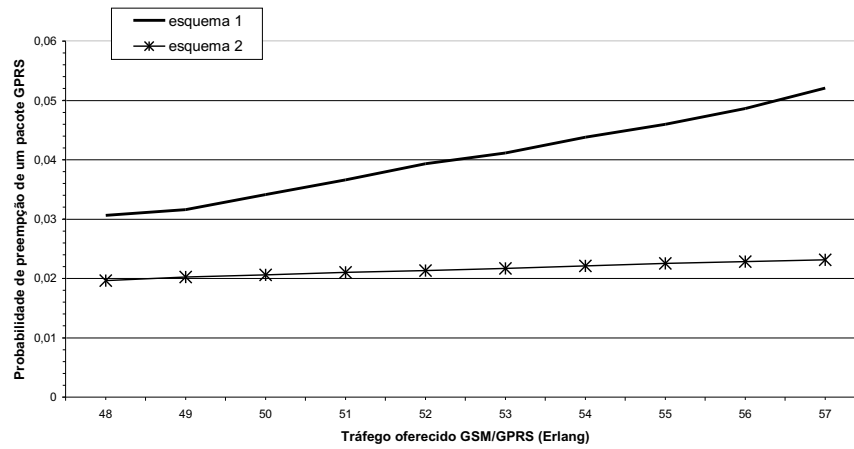


Figura 4.6: Probabilidade de preempção dos pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GSM/GPRS

bilidade de bloqueio dos pacotes GPRS. Para o esquema 3, o bloqueio dos pacotes GPRS alcança níveis impraticáveis.

Através das figuras 4.13 e 4.14, verifica-se, novamente, que o uso da reserva de canais e do *buffer* resulta em uma menor probabilidade de preempção e, conseqüentemente, em uma menor probabilidade de descartes dos pacotes GPRS. Esses mesmos mecanismos garantem uma redução da vazão inferior a 10%, para o esquema 2, ante a altos valores de tráfego oferecido. Em contrapartida, para os esquemas 1 e 3, essa redução é superior a 35% e 53%, respectivamente. Além disso, como é mostrado na figura 4.16, os pacotes GPRS são mais rapidamente atendidos no esquema 2 que no esquema 1.

Na figura 4.17 é mostrado o tempo médio de espera no *buffer* de uma chamada GSM para o esquema 3. Observa-se que esse resultado é bastante similar ao resultado mostrado na figura 4.10, o que demonstra que o tráfego GPRS não tem um impacto decisivo no tempo de espera das chamadas GSM. Isso se deve ao curto tempo de processamento dos pacotes de dados (em torno de 2 segundos).

4.7.3 Análise do aumento do tráfego oferecido GPRS

De forma análoga à análise anterior, o tráfego oferecido das chamadas GPRS foi estipulado para variar entre 24 e 28,5 Erlang, enquanto que o tráfego oferecido GSM é mantido fixo, igual a 25 Erlang.

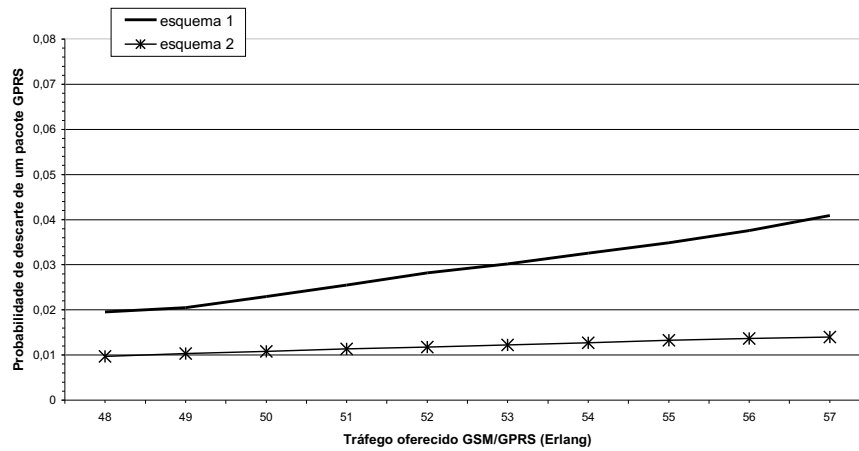


Figura 4.7: Probabilidade de descarte dos pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GSM/GPRS

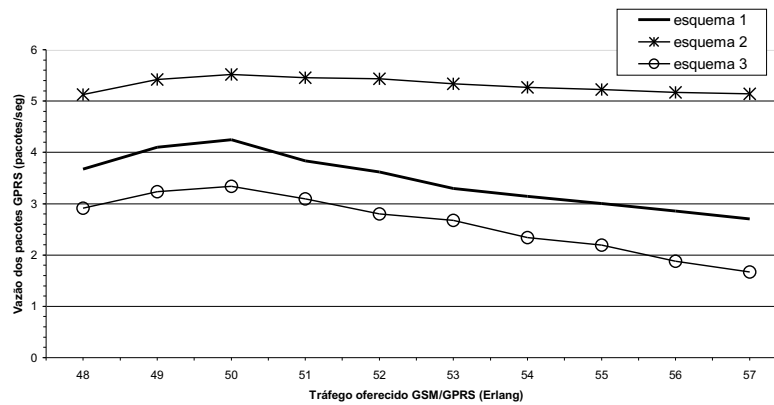


Figura 4.8: Vazão dos pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GSM/GPRS

Como mostrado na figura 4.18, os valores da probabilidade de bloqueio de uma chamada GSM para os esquemas 1 e 2 permanecem constantes, em torno de 3% e 16%, respectivamente; o que atesta novamente a independência dos serviços de voz do tráfego GPRS. Para o esquema 3, 25 Erlang de tráfego oferecido de voz não representa uma carga muito grande devido ao uso do *buffer* para acomodar as chamadas GSM que não são imediatamente atendidas. Assim, a sua probabilidade de bloqueio de uma chamada de voz permanece próximo de zero.

Novamente, como se observa nas figuras 4.19 - 4.23, o esquema de alocação de recurso 2 obteve o melhor desempenho para o escoamento do tráfego GPRS.

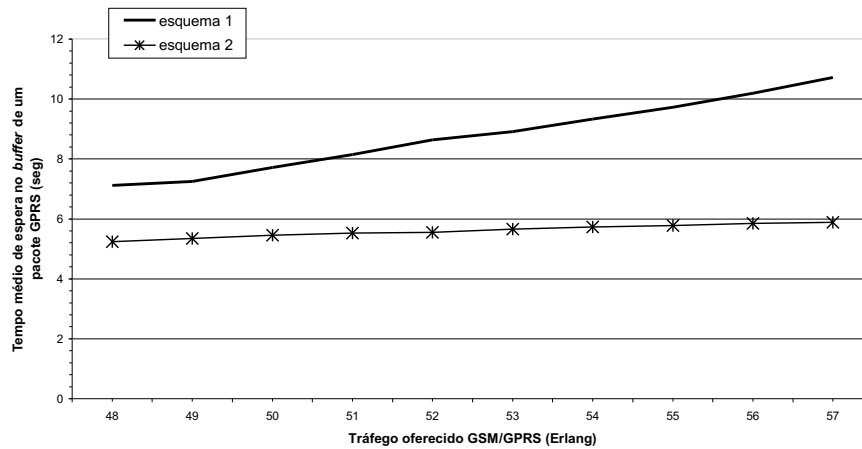


Figura 4.9: Tempo médio de espera no *buffer* dos pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GSM/GPRS

Comparando as figuras 4.19 e 4.12, é possível perceber que a probabilidade de bloqueio dos pacotes GPRS apresenta valores maiores para o aumento no tráfego GSM. Isso acontece porque o tempo de processamento das chamadas GSM, como é sabido, é maior que o dos pacotes. Diante do aumento do tráfego GPRS, o congestionamento no *buffer* ocorre devido à disputa dos recursos de rádio entre os próprios pacotes. Como o tempo de processamento dos pacotes é pequeno, os períodos de congestionamento do *buffer* são menores do que os verificados quando do aumento do tráfego GSM, como pode ser atestado nas figuras 4.16 e 4.23.

Outro aspecto digno de destaque é o comportamento das curvas para o tempo médio de espera no *buffer* dos pacotes GPRS na figura 4.23: a partir de 25,5 Erlang de tráfego oferecido GPRS, esta medida de desempenho se estabiliza em torno de 5,4 segundos (esquema 2) e 7,8 segundos (esquema 1). Isso ocorre porque, com o tráfego GSM fixo, a largura de banda destinada ao escoamento do tráfego GPRS é, aproximadamente, constante. Essa estabilização de valores pode ser observada também nas figuras 4.20 - 4.22.

Desta forma, pode-se concluir que o tamanho do *buffer* tem um impacto positivo maior para o serviço GPRS quando o sistema está submetido somente à aumentos no tráfego GPRS.

Através da figura 4.24 é possível confirmar o pequeno impacto do tráfego GPRS no tempo médio de espera no *buffer* das chamadas GSM, fato já destacado em

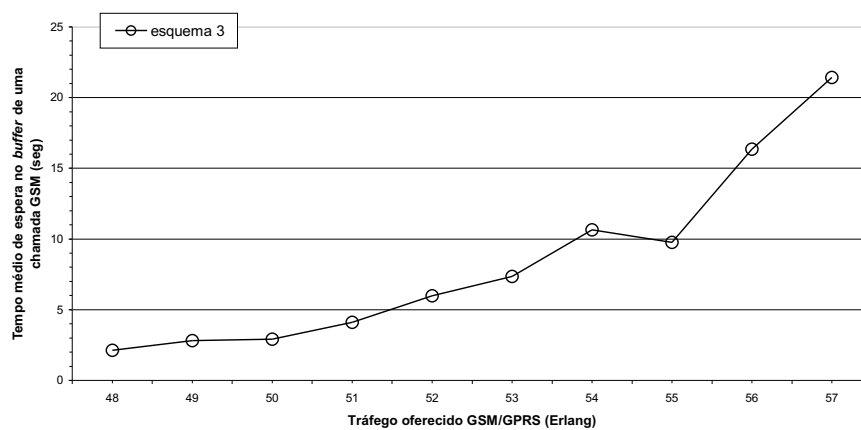


Figura 4.10: Tempo médio de espera no *buffer* das chamadas GSM *versus* tráfego oferecido GSM/GPRS

análises anteriores.

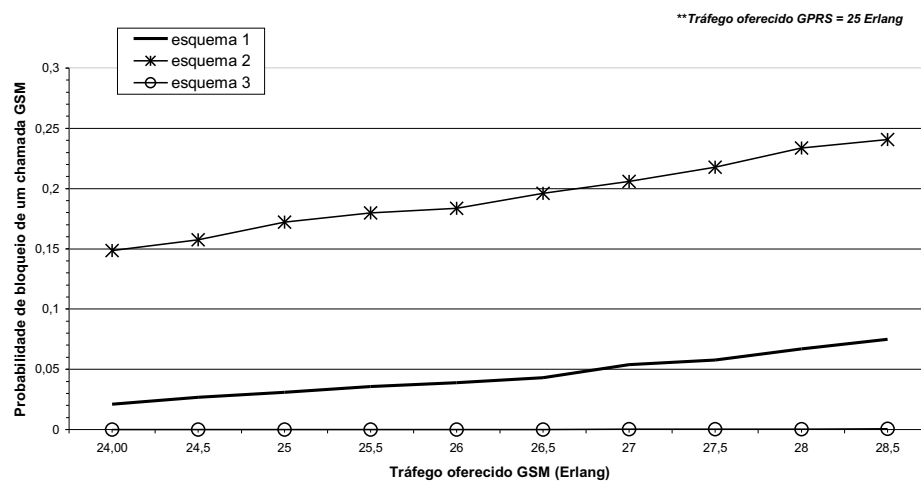


Figura 4.11: Probabilidade de bloqueio das chamadas GSM *versus* tráfego oferecido GSM

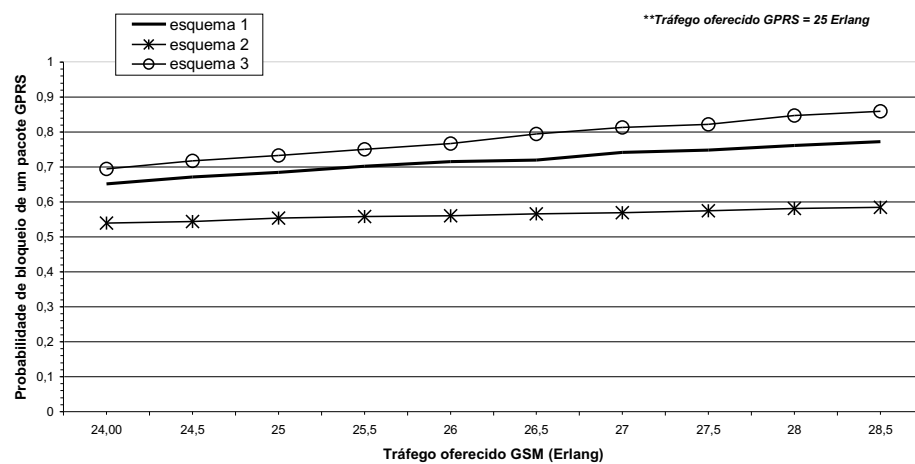


Figura 4.12: Probabilidade de bloqueio de pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GSM

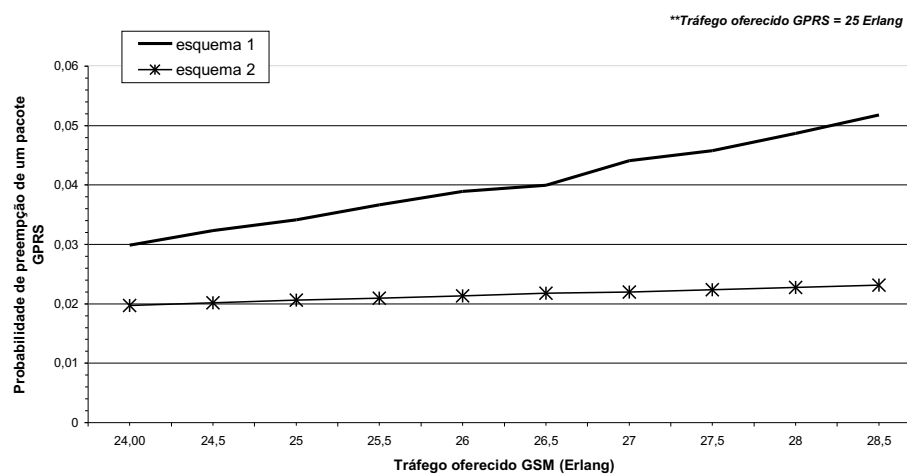


Figura 4.13: Probabilidade de preempção dos pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GSM

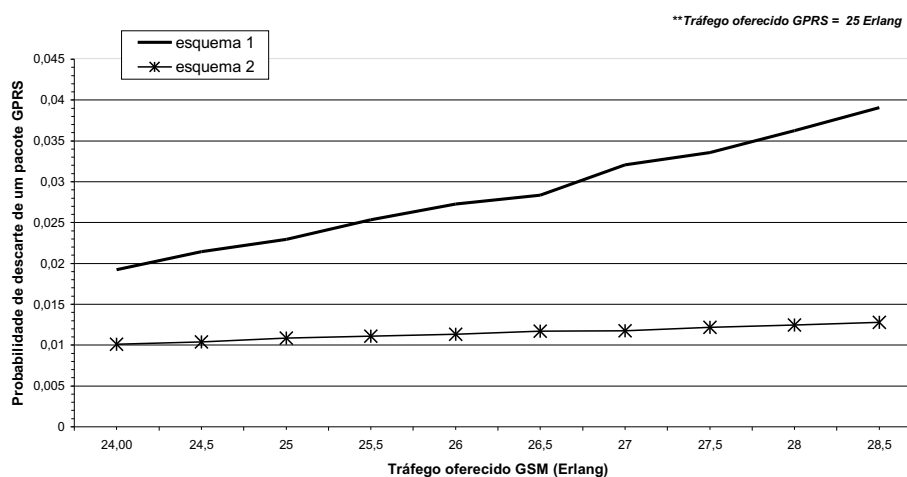
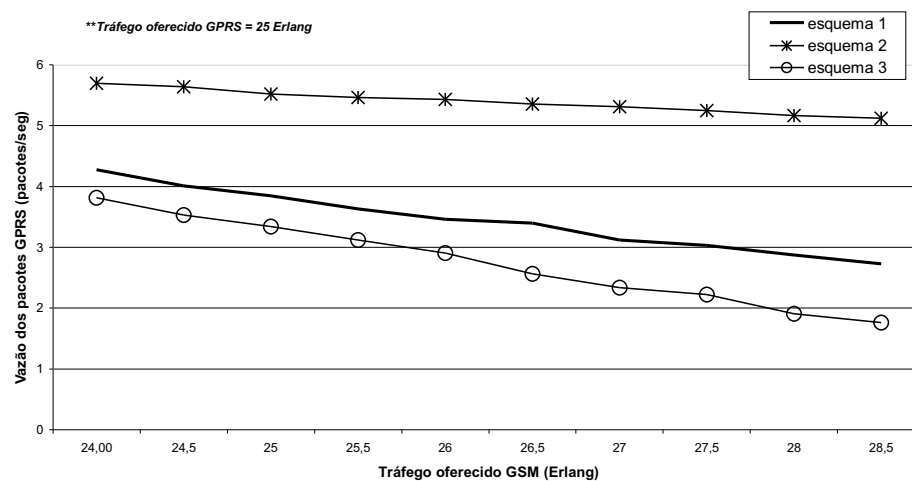
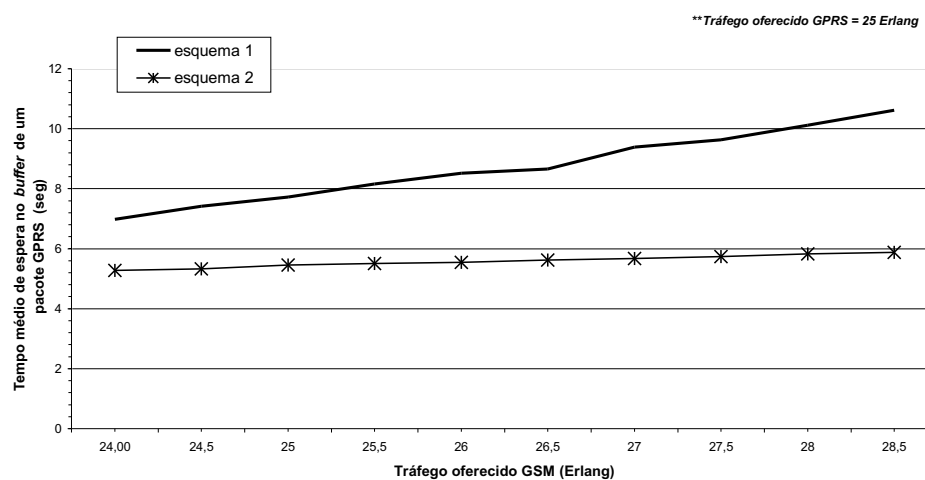


Figura 4.14: Probabilidade de descarte dos pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GSM

Figura 4.15: Vazão dos pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GSMFigura 4.16: Tempo médio de espera no *buffer* dos pacotes GRPS *versus* tráfego oferecido GSM

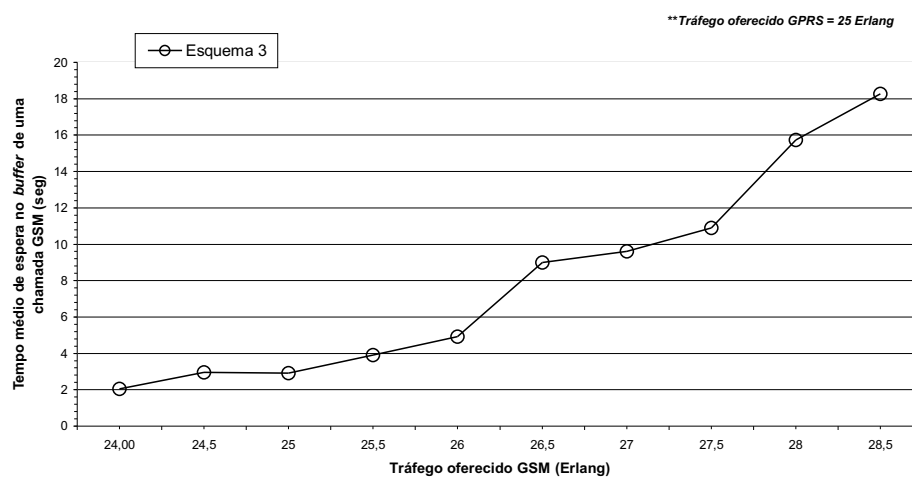


Figura 4.17: Tempo médio de espera no *buffer* das chamadas GSM *versus* tráfego oferecido GSM

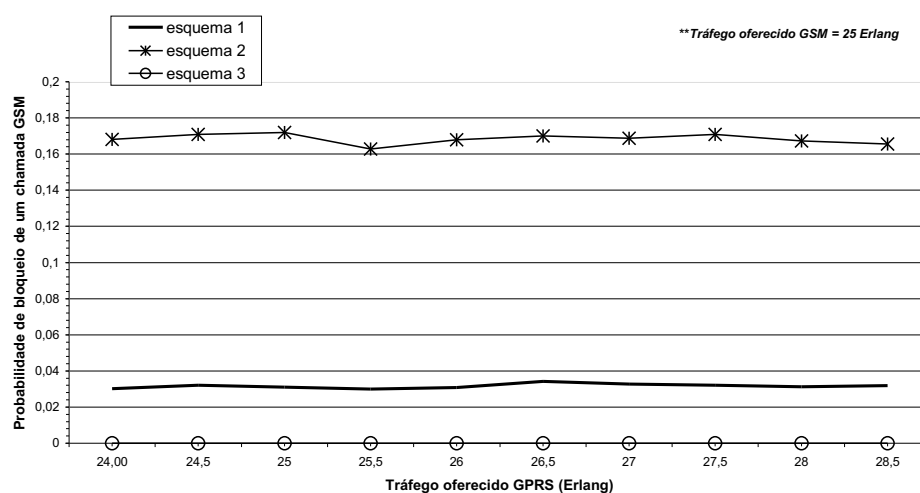


Figura 4.18: Probabilidade de bloqueio das chamadas GSM *versus* tráfego oferecido GPRS

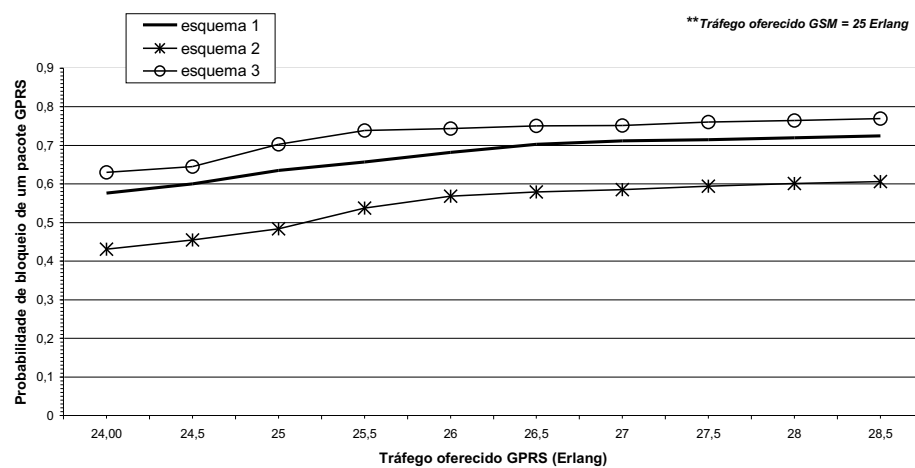


Figura 4.19: Probabilidade de bloqueio de pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GPRS

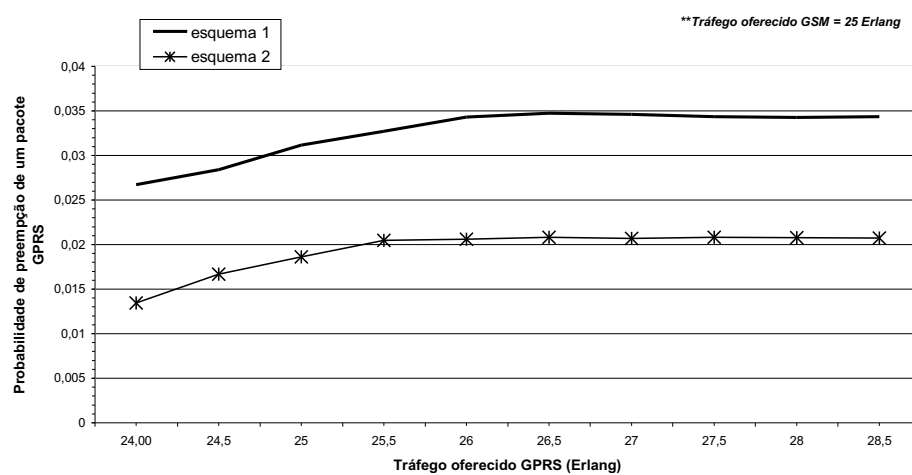


Figura 4.20: Probabilidade de preempção dos pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GPRS

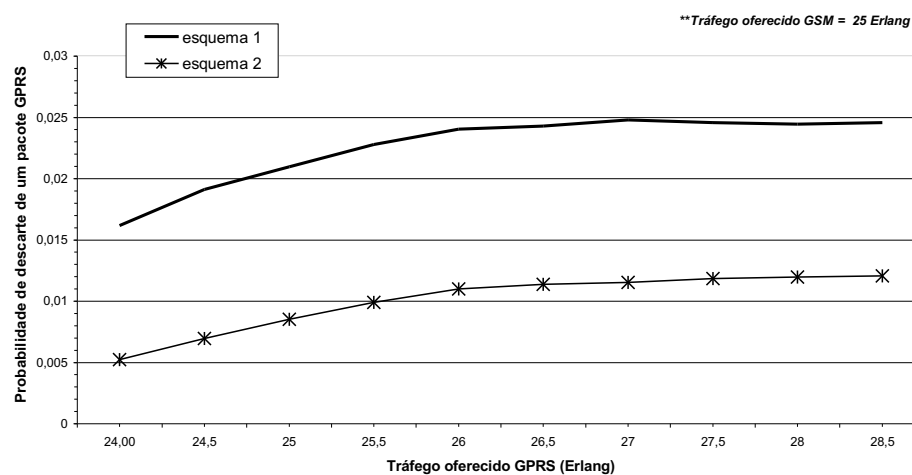


Figura 4.21: Probabilidade de descarte dos pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GPRS

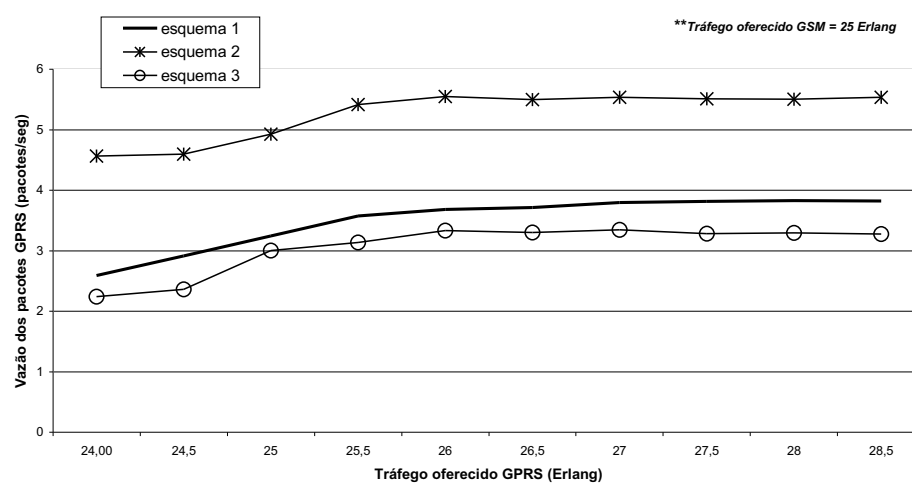


Figura 4.22: Vazão dos pacotes GPRS *versus* tráfego oferecido GPRS

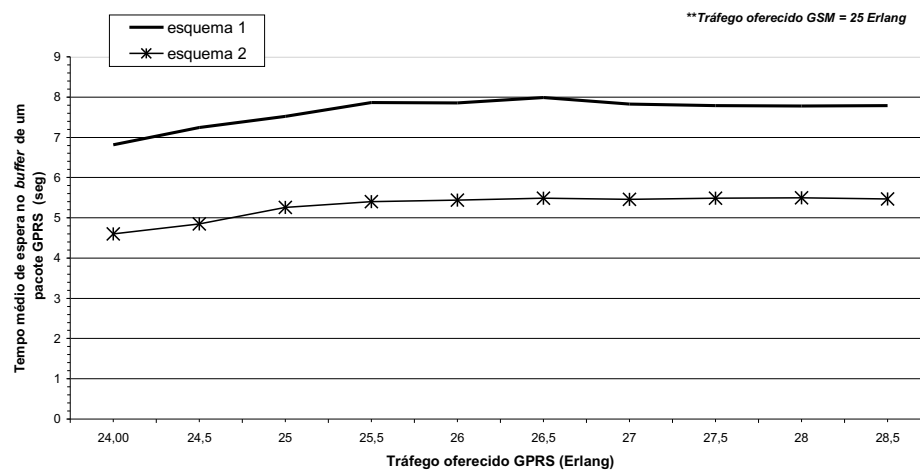


Figura 4.23: Tempo médio de espera no *buffer* dos pacotes GRPS *versus* tráfego oferecido GPRS

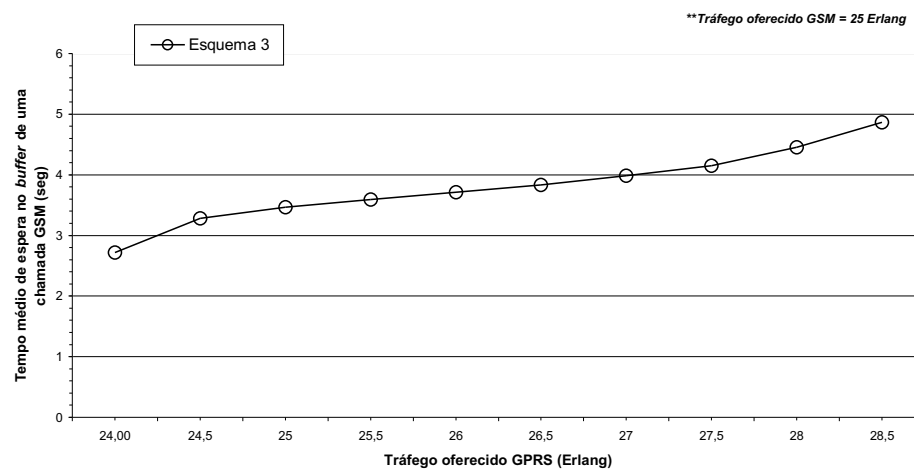
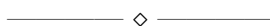


Figura 4.24: Tempo médio de espera no *buffer* das chamadas GSM *versus* tráfego oferecido GPRS

Capítulo 5

CONCLUSÃO



Neste capítulo serão expostas as observações finais sobre os resultados das simulações e os possíveis campos a serem pesquisados e estudados em trabalhos futuros.

5.1 Conclusões finais

Foi apresentado a análise da qualidade de serviço via simulação da rede GSM/GPRS, através de 3 esquemas de implementação da comutação híbrida. São eles: esquema 1, onde é utilizado o método sem fronteiras, as chamadas GSM têm prioridade preemptiva sobre os serviços de voz e os pacotes são enfileirados no *buffer*; esquema 2, onde é utilizado o método de fronteira móvel, as chamadas GSM têm prioridade preemptiva sobre os serviços de voz, os pacotes são enfileirados e há a reserva de canais para o serviço GPRS; o esquema 3, onde é utilizado o método sem fronteiras, as chamadas GSM são enfileiradas no *buffer* e os pacotes não.

Os resultados obtidos demonstraram que:

- O esquema 2 teve o melhor desempenho em todas as medidas, à exceção da medida de desempenho “probabilidade de bloqueio de voz”;
- Os canais dedicados ao GPRS têm impacto decisivo na degradação da qualidade dos serviços telefônicos (probabilidade de bloqueio de voz);
- Para grandes valores de tráfego oferecido GSM/GPRS ou somente GSM, a utilização do *buffer* e da reserva de canais é de fundamental importância para

a prestação do serviço GPRS. No entanto, o número de canais reservados, para uso exclusivo do GPRS, deve obdecer a um compromisso entre a QoS das chamadas telefônicas e a transmissão de dados;

- No que tange ao tempo médio de espera no *buffer* de um chamada GSM, o impacto do tráfego oferecido GPRS é quase inexpressivo no esquema 3;
- No esquema 3, a utilização do *buffer* para as chamadas telefônicas consegue suprir, em um certo grau, a não utilização da prioridade preemptiva para as chamadas GSM. No entanto, o tempo médio de espera das chamadas no *buffer* atinge valores impraticáveis, o que condicionaria um bom desempenho desse esquema a alguma política de contenção de tráfego na rede;
- O esquema 2, através da combinação *buffer*/canais dedicados, provê valores de vazão do tráfego GPRS bem estáveis;
- A probabilidade de preempção dos pacotes GPRS está mais intimamente ligada ao aumento do tráfego GSM e ao número de canais dedicados ao GPRS;
- O tamanho do *buffer* tem impacto direto no tempo médio de espera por serviços. Esse impacto será maior no esquema 3, uma vez que o tempo de processamento das chamadas telefônicas é muito maior que a dos pacotes de dados;
- Quando somente o tráfego GPRS varia, o tamanho do *buffer* tem um impacto positivo maior na prestação do serviço GPRS;
- A prioridade preemptiva deve sempre ser usada, pelo menos enquanto o serviço de voz possuir a maior receita entre os demais serviços, para garantir o menor impacto possível do GPRS sobre o GSM.

As conclusões apresentadas acima indicam “caminhos” para uma melhor prestação dos serviços GSM e GPRS sobre uma mesma estrutura:

1. Em células onde o tráfego de voz e dados, ou somente voz, varia consideravelmente, o emprego da reserva de canais e do *buffer*, desde que obedecendo o compromisso entre a QoS de voz e dados, são indispensáveis para a prestação e manutenção da QoS;

2. Em células onde somente o tráfego GPRS varia consideravelmente o aumento da capacidade do *buffer* é a solução mais viável.

Através das análises, pode-se concluir que o esquema 2 é, dentre todos, aquele com maior capacidade de prover valores estáveis para os parâmetros de Qos para a rede, no que tange a interface aérea. O impacto dos canais dedicados sobre o serviço GSM poderia ser contornado não só pelo número de PDCHs, mas também por algum processo de compartilhamento do *buffer* entre as chamadas telefônicas e os pacotes de dados.

5.2 Trabalhos futuros

A Qos, como dito anteriormente, é um parâmetro fim-a-fim. Portanto, seria relevante o estudo da qualidade de serviço ao longo de toda rede, mensurando o impacto que cada componente da rede tem sobre os parâmetros de Qos, sobretudo, no que tange ao atraso do pacote. As simulações inevitavelmente deverão levar em consideração o *overhead* na rede e o impacto das várias alternativas disponíveis de gerenciamento do tráfego na rede-núcleo (por exemplo, *integrated services* - interserv e *diffserv*). Ou seja, para que se possa ter um panorama o mais próximo possível das condições reais, a análise da Qos deve ter um caráter global.

Outros aspectos relevantes no estudo do GPRS seriam a inclusão nos modelos de simulação da operação em multi-janelas, uma melhor caracterização do tráfego de dados, e principalmente, a mobilidade das estações móveis, uma vez que a grande característica dos sistemas celulares é o *handover*.

Como resultado dos constantes avanços tecnológicos, seria importante também a abordagem da Qos em outros sistemas celulares, sobretudo no EDGE, evolução natural do GPRS.

Referências Bibliográficas

- [1] REDL, Sigumnd M.; WEBER, Matthias K.; OLIPHANT, Malcolm W. *An Introduction to GSM*. Boston/Londres: Artech House, 1995.
- [2] YACOUB, M. D. *Wireless Technology: Protocols, Standards, and Techniques*. CRC Press, 2002.
- [3] LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation modelling and analysis*. 2. ed. McGraw-Hill, 1991.
- [4] JAIN, Raj. *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. John Wiley & Sons, 1991.
- [5] ROSS, Sheldon M. *A course in simulation*. Macmillan publishing Company, 1990.
- [6] MACDOUGALL, M. H. *Simulating computer systems: techniques and tools*. Londres: MIT Press, 1987.
- [7] SOARES, Luis F. G. *Modelagem e simulação discreta de sistemas*. Rio de Janeiro, RJ: Editora Campus, 1992.
- [8] PRADO, Darci Santos do. *Teoria das filas e da simulação*. Belo Horizonte, MG: Editora de Desenvolvimento gerencial, 1999.
- [9] FILHO, Paulo José de Freitas. *Introdução à modelagem e simulação de sistemas com a aplicações em ARENA*. Visual Books, 2001.
- [10] GOMES, Sebastião M. C. *Tráfego: teoria e aplicações*. Rio de Janeiro: EMBRATEL; São Paulo: McGraw-Hill, 1990.

- [11] BETTSTETTER, C.; VOGEL, H. J.; EBERSPACHER, J. *GSM Phase 2+. General Packet Radio Services GPRS: architecture, protocols and air interface*. IEEE Communications Surveys, Third Quarter 1999, vol. 2 no. 3.,1999.
- [12] BRASCHE, Götz; WALKE, Bernhard. *Concepts, services, and protocols of the new GSM phase 2+ General Packet Radio Service*. IEEE Communications Magazine, August 1997.
- [13] GUIMARÃES, Dayani A. *Introdução às comunicações móveis*,1998.
- [14] MOOHEAD, C.; HARDMAN, V.J.; LANE, P.M. *Resource Allocation Schemes to provide QoS for VoIP over GRPS*. International Conference on 3G Mobile Communication Technologies (IEE Conf. Publ. No. 471), pp. 138-142, 2000.
- [15] LIN, P.; LIN, Y.B. *Channel Allocation for GPRS*. IEEE Transaction on Vehicular Technology, vol.50, no.2, pp. 375-387, March 2001.
- [16] MAHDAVI, M.; TAFAZOLLI, R. *Analysis of integrated voice and data for GPRS*, International Conference on 3G Mobile Communication Technologies (IEE Conf. Publ. No. 471), pp. 436-440, 2000.
- [17] ARAÚJO, Hugo; COSTA, José; CORREIA, Luis M. *Analysis of a Traffic Model for GSM/GPRS*. IEEE , pp. c-124 - c-128, 2001.
- [18] LINDERMANN, C.; THUMMLER, A. *Performance Analysis of the General Packet Radio Service*, 21st International Conference on Distributed Computing Systems, pp. 673-680, April 2001.
- [19] FERNG, Huei-Wen; TSAI, Yi-Chou. *Channel allocation and performance stude for the integrated GSM/GPRS system*. IEEE , pp. 1861-1865, 2003.
- [20] FANG, Xioaoyan; GHOSAL, Dipak. *Analyzing Packet Delay across A GSM/GPRS Network*. IEEE , pp. 1-10, 2003.
- [21] HO, Joseph; ZHU, Yixin; MADHAVAPEDDY, Seshu. *Throuput and Buffer Analysis for GSM General Packet Radio Service (GPRS)*. IEEE, pp. 1427-1431, 1999.

- [22] RAJARATNAM, M.; TAKAWIRA, F. *A single cell for the performance analysis of the Radio Layer in GSM phase 2+ (GPRS) Networks under Voice and data traffic*, Personal, 12th IEEE International Symposium on Indoor and Mobile Radio Communications, Vol.1 , pp. C-118 - C-123, 2001.
- [23] BELLALTA, Boris; OLIVER, Miquel; RINCÓN, David. *Capacity and Traffic Analysis of VoIP Services over GPRS Mobile Networks*,
- [24] VANNUCCI, David E.; CHITAMU, Peter J. *Hybrid multiplexing of Voice and Data over IP on GSM/GPRS cellular*,
- [25] SOURCOS, Sergios; COURCOUBETIS, Costas; POLYZOS, George C. *Differentiated Services in the GPRS Wireless Access Environment*,
- [26] STUCKMANN, Peter. *Quality of Service Management in GPRS-based Radio Access Networks*. IEEE Communications Surveys, Third Quarter 1999, vol. 2 no. 3.,1999.
- [27] FERRER, Carles; OLIVER, Miquel. *Overview and Capacity of the GPRS (General Packet Radio Service)*. IEEE , pp. 106-110, March 1998.
- [28] Chuan Heng Foh, Meini, B., Wydrowski, B., Zukerman, M., *Modeling and performance evaluation of GPRS*, Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Spring. IEEE VTS 53rd , Vol. 3 , pp. 2108-2112, 2001.
- [29] SANTANA, Marcos J.; FRANCES, Carlos R. L.; SANTANA, Regina H. C.; *et al. Tools and Methodologies for Performance Evaluation of distributed computing systems - a comparison study*. In: SCSC'97 . Proceedings., 1977. p. 237-253.
- [30] JOINES, J.A.; BARTON, R.R.; KANG, K., GURTIN, *et al. Smart Modeling - Basic methodology and advanced tolls*. In: Winter Simulation Conference (out. 2000). Proceedings. , 2000. p. 241-245.
- [31] GUDDUNG, Hakon. *Capacity Analysis of GPRS*. Noruega. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Telemáticas, Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia.

- [32] FERREIRA, J.O. *Simulação de filas GI/G/m e verificação de aproximações destas por filas Ph/Ph/m*. São Jose dos Campos, 1999. Dissertação(Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais.
- [33] BRESSAN, Graça. *Modelagem e simulação*, 1991.
- [34] *Curso básico de GSM*. disponível em <http://www.PGRedes.hpg.com.br>.
- [35] ZÜRN, Hans H.; SILVEIRA, Fabíola S. V.; AGOSTINI, Marcelo N. *Normas para apresentação de Dissertação e Teses*. Florianópolis, 1999.