

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

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES GSM/GPRS.**

**MICHELLE BITAR LELIS DOS SANTOS**

**TM – ?? – 2003**

UFPA/CT/PPGEE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ  
66.075-900 – BELÉM-PARÁ-BRASIL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES GSM/GPRS.**

**MICHELLE BITAR LELIS DOS SANTOS**

Dissertação de Mestrado  
submetida à Banca  
Examinadora do programa  
de Pós-graduação em  
Engenharia Elétrica para  
obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Elétrica.

UFPA/CT/PPGEE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ  
66.075-900 – BELÉM-PARÁ-BRASIL

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**

**CENTRO TECNOLÓGICO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

***ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES GSM/GPRS.***

**AUTORA: MICHELLE BITAR LELIS DOS SANTOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

**APROVADA EM:**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa (UFPA)  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Luiz Affonso Henderson Guedes de Oliveira (UFPA)  
(Membro)

---

Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês (UFPA)  
(Membro)

---

Prof. Dr. José Ricardo Descardecí (UFPR)  
(Membro)

**VISTO:**

---

Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira (UFPA)  
Coordenador do PPGE/CT/UFPA

**UFPA/CT/PPGEE**  
**CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ**  
**BELÉM-PARÁ-BRASIL**

*Este trabalho é dedicado aos meus amados pais, Roberto e Leila, por todos os ensinamentos, pelo amor, carinho, dedicação e amizade.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por toda fé, esperança e amor;

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, Roberto e Leila, e minhas irmãs, Isabelle e Manuela, pelo carinho, atenção e incentivo para meu aprimoramento pessoal e profissional;

Ao professor João Crisóstomo, por todos os momentos de dedicada orientação, amizade e compreensão no desenvolvimento deste trabalho;

Ao amigo Gláucio Carvalho, pelo importante auxílio, e pelas valiosas contribuições e sugestões no desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus queridos amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, pelo companheirismo e amizade;

Aos meus queridos amigos da Amazônia Celular, por toda orientação e amizade, tão importantes para meu crescimento profissional;

A todo o grupo de professores, funcionários e alunos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, pelo apoio na realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

Lista de figuras.....	VIII
Lista de figuras.....	VIII
Lista de tabelas.....	IX
Lista de tabelas.....	IX
Lista de abreviaturas.....	X
Lista de abreviaturas.....	X
Lista de símbolos.....	XII
Lista de símbolos.....	XII
Resumo.....	XIV
Resumo.....	XIV
Abstract.....	XVI
Abstract.....	XVI
Introdução.....	1
Introdução.....	1
1.A REDE GSM/GPRS.....	4
4.1.Introdução.....	5
4.2.A rede GSM.....	5

4.3. GPRS: General Packet Radio Service.....	7
4.3.1. A tecnologia GPRS.....	7
4.3.2. Arquitetura da rede GPRS.....	9
4.3.3. Esquemas de codificação.....	13
4.3.4. Interface aérea.....	14
4.3.5. Handover.....	17
4.3.6. QoS em redes GPRS.....	18
4.3.7. Procedimentos de gerenciamento de mobilidade.....	19
4.3.8. Pilhas de protocolos.....	24
4.3.9. Limitações da tecnologia GPRS.....	30
2. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS: TEORIA DAS FILAS.....	31
2.1. Introdução.....	31
2.2. Notação e Estrutura de Sistemas de Filas.....	32
2.3. Processos de Markov.....	32
2.4. Processo de Nascimento – Morte.....	33
2.5. Sistemas de Filas em Equilíbrio.....	35
2.6. Sistemas Clássicos de Filas: M/M/1.....	37
2.7. Sistemas de Filas M/M/m/m.....	39
3. MODELAMENTO APLICADO A GSM E GPRS.....	42
4. ANÁLISE DE DESEMPENHO DA REDE GSM/GPRS.....	48
<b>Conclusão.....</b>	<b>61</b>
<b>Conclusão.....</b>	<b>61</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>64</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de rede GSM/GPRS [16].....	10
Figura 1.2 – Interfaces lógicas em redes GPRS [16].....	11
Figura 1.3 – Estados de gerenciamento de mobilidade [14] [15].....	21
Figura 1.4 – GPRS attach [14].....	22
Figura 1.5 – Solicitação de contexto PDP [13].....	23
Figura 1.6 – Plano de transmissão do GPRS [14] [15] [19].....	25
Figura 1.7 – Bloco de dados RLC e bloco de rádio [14].....	29
Figura 2.1 – Diagrama de transição de estado para um processo de nascimento-morte [20] [21].....	34
Figura 2.2 – Diagrama de transição de estado para M/M/1 [20] [21].....	38
Figura 2.3 – Diagrama de transição de estado para M/M/m/m [20] [21].....	40
Figura 3.1 – Rede integrada GSM/GPRS modelada.....	43
Figura 3.2 – Preempção de voz.....	44
Figura 4.1 – Probabilidade de bloqueio.....	51



Figura 4.2 – Tráfego de voz escoado.....	52
Figura 4.3 – Número de canais alocados sob demanda para o tráfego GPRS.....	53
Figura 4.4 – Número máximo de canais alocados para GPRS.....	54
Figura 4.5 – Capacidade de transmissão máxima.....	56
Figura 4.6 – Capacidade de transmissão sob demanda.....	56
Figura 4.7 – Max. throughput utilizando-se CS-2 e 2 PDCHs.....	58
Figura 4.8 – Max. throughput utilizando-se CS-2 e 4 PDCHs.....	59
Figura 4.9 – Max. throughput utilizando-se 2 PDCHs e dif. esquemas de codificação.....	60
Figura 4.10 – Max. throughput utilizando-se 4 PDCHs e dif. esquemas de codificação.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Função das interfaces lógicas nas redes GPRS.....	11
Tabela 1.2 – Parâmetros para os esquemas de codificação [14] [17].....	13
Tabela 1.3 – Características da tecnologia GSM 900 e GSM 1800 [14].....	15
Tabela 1.4 – Canais lógicos GPRS [13] [14].....	16
Tabela 1.5 – Classes de confiabilidade em redes GPRS [13].....	19
Tabela 1.6 – Classes de atraso em redes GPRS [13].....	19
Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para a análise da rede GSM/GPRS [9].....	48
Tabela 4.2 – Parâmetros utilizados para a análise da rede GSM/GPRS (Figura 4.7).....	49
Tabela 4.3 – Parâmetros utilizados para a análise da rede GSM/GPRS (Figura 4.8).....	49
Tabela 4.4 – Parâmetros utilizados para a análise da rede GSM/GPRS (Figura 4.9).....	49
Tabela 4.5 – Parâmetros utilizados para a análise da rede GSM/GPRS (Figura 4.10).....	50
Tabela 4.6 – Valores de taxa de transmissão de dados.....	57

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

*ARQ – Admission Request*

*ARQ – Automatic Repeat Request*

*ATM – Asynchronous Transfer Mode*

AUC – *Authentication Center*  
BCS – *Block Check Sequence*  
BSC – *Base Station Controller*  
BSS – *Base Station Subsystem*  
BSSAP – *Base Station Subsystem Application Part*  
BSSGP – *Base Station Subsystem GPRS Protocol*  
BTS – *Base Transceiver Station*  
CS – *Coding Scheme*  
EDGE – *Enhanced Data Rates for GSM and TDMA/136 Evolution*  
EIR – *Equipment Identity Register*  
ETSI – *European Telecommunications Standards Institute*  
FDMA – *Frequency Division Multiple Access*  
FR – *Frame Relay*  
GGSN – *Gateway GPRS Support Node*  
GMM/SM - *GPRS Mobility Management and Session Management*  
GMSC – *Gateway Mobile Switching Center*  
GPRS – *General Packet Service*  
GSM – *Global System for Mobile Communication*  
GSN – *GPRS Support Nodes*  
GTP – *GPRS Tunneling Protocol*  
HDLC – *High Level Data Link Control*  
HLR – *Home Location Register*  
IMEI – *International Mobile Equipment Identity*  
IMSI – *International Mobile Subscriber Identity*  
IP – *Internet Protocol*  
LLC – *Logical Link Control*  
MAC – *Medium Access Control*  
MAP – *Mobile Application Part*  
MS – *Mobile Station*  
MSC – *Mobile Switching Center*  
PACCH – *Packet Associated Control Channel*  
PAGCH – *Packet Access Grant Channel*  
PBCCH – *Packet Broadcast Control Channel*  
PC – *Personal Computer*  
PDCH – *Packet Data Channel*  
PDP – *Packet Data Protocol*  
PDTCH – *Packet Data Traffic Channel*  
PDU – *Packet Data Unit*  
PLL – *Physical Link Layer*  
PLMN – *Public Land Mobile Network*  
PNCH – *Packet Notification Channel*  
PPCH – *Packet Paging Channel*

PRACH – *Packet Random Access Channel*  
PTCCH – *Packet Timing Advance Control Channel*  
QoS – *Quality of Service*  
RADIUS – *Remote Access Dial In User Service*  
RFL – *Radio Frequency Layer*  
RLC – *Radio Link Control*  
SGSN – *Serving GPRS Support Node*  
SIM – *Subscriber Identity Module*  
SMSC – *Short Message Service Center*  
SNDGP – *Subnetwork Dependent Convergence Protocol*  
TCP – *Transmission Control Protocol*  
TDMA – *Time Division Multiple Access*  
TLLI – *Temporary Logical Link Identifier*  
UDP – *User Datagram Protocol*  
VLR – *Visited Location Register*

## **LISTA DE SÍMBOLOS**

$A/B/m/K/M$  Sistema de filas com  $m$  servidores, onde  $A$  descreve a distribuição do tempo entre chegadas,  $B$  representa a distribuição do tempo de serviço,  $K$  representa a capacidade de armazenamento do sistema e  $M$  o tamanho da população

$M$	Números de servidores em um sistema de filas
$A$	Distribuição do tempo entre chegadas em um sistema de filas
$B$	Distribuição do tempo de serviço em um sistema de filas
$K$	Capacidade de armazenamento de um sistema de filas
$M$	Tamanho da população de um sistema de filas
$M$	Distribuições temporais <i>Markovianas</i>
$D$	Distribuições temporais <i>Determinísticas</i>
$G$	Distribuições temporais <i>Gerais</i>
$M/M/1$	Sistema de fila com distribuição temporal <i>Markoviana</i> e um servidor
$M/M/m/m$	Sistema de fila com distribuição temporal <i>Markoviana</i> , $m$ servidores e capacidade de armazenamento $m$
$x_n$	Variável aleatória
$X(t)$	Processo aleatório
$t_n$	Tempo no instante $n$
$N$	Número inteiro
$E_k$	Estado de um processo de nascimento – morte
$K$	População no Estado $E_k$
$\lambda_k$	Taxa de nascimento
$\mu_k$	Taxa de morte
$P_k(t)$	Probabilidade de Estado do sistema
$p_k$	Probabilidade de equilíbrio
$p_0$	Probabilidade do sistema estar vazio
$\rho = \lambda/\mu$	Intensidade de tráfego
$p_m$	Probabilidade de bloqueio ou fórmula de perda de Erlang B
$N=N_{GSM}+N_{GPRS}$	Números de canais físicos totais na rede GSM/GPRS
$N_{GSM}$	Números de canais físicos utilizados para serviços GSM
$N_{GPRS}$	Números de canais físicos utilizados para serviços GPRS
$\lambda=\lambda_{GSM}+\lambda_{GPRS}$	Taxa de chegada de chamadas GSM/GPRS
	Razão média de chegada das chamadas GSM
	Razão média de chegada das chamadas GPRS
$\lambda_{GSM}$	Razão média de partida de chamadas GSM
$T_{GSM} = 1/\lambda_{GSM}$	Tempo médio de duração de uma chamada GSM
$T_{RAF}$	Tráfego escoado de voz
$E(m)$	Valor médio
$p(m)$	Probabilidade do estado de equilíbrio da fila $M/M/m/m$

$NC_{SD}$	Número médio de canais alocados sob demanda para os serviços GPRS
$NC_{MAX}$	Número médio de canais alocados para o GPRS
$TH_{MAX}$	<i>Throughput</i> máximo
$TH_{SD}$	<i>Throughput</i> sob demanda

## RESUMO

A utilização de tecnologias baseadas em comutação por circuito para prover serviços de dados em redes móveis traz algumas limitações, como: alocação de canal por toda a duração da chamada, baixa taxa de transmissão e tarifação baseada no tempo de ocupação do canal. A tecnologia *General Packet Radio Service* (GPRS) tornou-se recentemente um padrão para estender os serviços oferecidos pela rede

GSM (*Global System for Mobile Communications*). GPRS é um modo de acesso de comutação por pacote que provê serviços de dados na rede GSM com eficiente utilização dos recursos de rádio. Porém, estas duas tecnologias precisam compartilhar os mesmos recursos de rádio da rede e, assim, alguns pontos críticos precisam ser analisados: qual é o impacto de integrar a tecnologia GPRS à rede GSM? Qual é o impacto de reservar canais físicos para os serviços GPRS? É necessário reservar canais físicos para prover serviços de dados com boa qualidade de serviço ou é suficiente a utilização dos canais alocados sob demanda para os serviços GPRS? Este trabalho apresenta um modelo analítico para avaliar o desempenho da rede integrada GSM/GPRS. O modelo apresentado constitui uma fila M/M/m/m. Para garantir que a qualidade de serviço dos serviços de voz não seja afetada com a introdução do GPRS, aplica-se preempção às chamadas de voz. O modelo é utilizado para investigar o impacto de se integrar a tecnologia GPRS à rede GSM, avaliando probabilidades de bloqueio, tráfego de voz escoado, número de canais GPRS e taxa de dados média levando em consideração a quantidade de chamadas GSM e GPRS que chegam no sistema. São apresentadas neste trabalho medidas que podem auxiliar na análise do desempenho da rede integrada GSM/GPRS, mostrando que, após um determinado valor de tráfego oferecido, a alocação de canais físicos para o tráfego GPRS não impacta no desempenho dos serviços de voz da rede GSM e que uma boa qualidade de serviço de dados só é garantida através da alocação permanente de canais físicos para os serviços GPRS.

**Palavras-chave:** rede GSM, rede GPRS, rede integrada GSM/GPRS, desempenho de rede, fila M/M/m/m.

## **ABSTRACT**

Providing data services on mobile networks using circuit switched technology brings some limitations such as: channel allocation during the whole call, low transmission rates and billing based on the channel occupation time. The General Packet Radio Service (GPRS) has recently become a standard to extend the services provided by the Global System for Mobile Communications (GSM). GPRS is a packet switched access mode that provides data services in the GSM network with efficient utilization of the radio resources. But, in an integrated GSM/GPRS network, these two technologies have to share the same radio resources of the network. Then, some critical points have to be analyzed: what is the impact of integrating the GPRS technology into the GSM network? What is the impact on reserving physical channels to GPRS services? Is it necessary to reserve physical channels to provide data services? Is it sufficient to use just on demand physical channels to GPRS services? This work presents an analytical model to evaluate the performance of the integrated GSM/GPRS network. The presented model constitutes a M/M/m/m queue. To guarantee the quality of service of voice services not being affected by the introduction of GPRS, preemptive priority is applied for voice calls. The model is utilized for investigating the impact of integrating the GPRS technology into the GSM network, evaluating: blocking probabilities, carried voice traffic, number of GPRS channels and average throughput taking into account arrivals of GSM and GPRS calls. The measurements presented in this work can be used to analyze the performance of the integrated GSM/GPRS network. These measurements show that, after a determined value of offered traffic, the allocation of physical channels to the GPRS traffic does not impact on the performance of the voice services of the GSM network and that, good



quality of data services, is guaranteed if the network has physical channels allocated permanently to the GPRS services.

**Keywords:** GSM network, GPRS network, integrated network GSM/GPRS, network performance, M/M/m/m queue.



## INTRODUÇÃO

Desde a primeira transmissão de voz feita por Alexander Graham Bell em 1876, esforços não foram poupados no desenvolvimento do mundo das telecomunicações. Atualmente, a telefonia móvel celular é parte integrante do dia-a-dia de parte da população. Porém, o usuário da telefonia móvel não quer mais apenas utilizar seu aparelho celular para fazer transmissão de voz. A maior exigência, além da qualidade da rede celular, é a introdução de novos serviços e aplicações. As operadoras de telefonia celular já oferecem aos usuários troca de mensagens de texto no celular, transferências de arquivo e acesso à *Internet* utilizando a rede celular, e futuramente taxas de *bits* elevadas irão proporcionar transferência de voz e vídeo e ainda acesso à *Internet* no aparelho celular.

As redes celulares podem ser comutadas por circuito ou por pacote. Atualmente, a maioria das redes celulares ainda é comutada por circuito. Porém, as grandes operadoras de telefonia móvel já estudam a migração da rede de comutação por circuito para a rede de comutação por pacote. O objetivo desta migração é oferecer ao cliente serviços de voz e dados na mesma rede.

A utilização da rede comutada por circuito é devido às necessidades das comunicações de voz. A comutação por pacote é utilizada normalmente em redes de dados, como a *Internet*, para suprir as necessidades das comunicações de dados. As diferenças entre as necessidades dos usuários de telefonia e os usuários de redes de computadores eram tão acentuadas, que até o surgimento de voz sobre IP (*Internet Protocol*), estas redes estavam fisicamente separadas e eram tratadas de forma diferente.

As diferenças mais óbvias entre as redes de telefonia e as redes de computadores que utilizam tráfego de dados por rajada dizem respeito à largura de banda necessária (usuários de telefonia precisam de canais de no máximo 64kbps,

enquanto os usuários de redes de computadores procuram sempre taxas mais elevadas), tolerância a erro (a rede de dados precisa ser mais confiável que a de voz), reenvio de informação (não é necessário na rede de voz), atraso (na rede de voz precisa ser baixo e constante, na rede de dados pode ser maior e variar) e conexão (a rede de voz é orientada à conexão) [1].

Por todas essas diferenças, foi mais fácil construir uma rede para dados separada da rede de voz. Porém, compartilhar enlaces entre voz e dados pode trazer vários benefícios atrativos para as empresas prestadoras de serviços. Existem esquemas utilizando ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) para fundir voz e dados, porém, construindo-se uma terceira arquitetura [1]. Para as empresas, a melhor opção seria inserir os pacotes na rede de comutação por circuito.

Na realidade, cada vez que um usuário utiliza um *modem* para conectar seu PC (*Personal Computer*) à *Internet*, ele está utilizando a rede de comutação por circuito para trafegar pacotes. O envio de pacotes em circuitos de voz tem gerado algumas frustrações, principalmente devido à limitação de largura de banda de um circuito de voz. Como resultado, as sessões de dados são lentas e demoradas, causando congestionamento na rede projetada para curtas chamadas de voz.

A característica principal das redes comutadas por circuito é que elas são orientadas à conexão, ou seja, o caminho precisa existir mesmo que a informação não esteja trafegando na rede e o circuito reserva toda a largura de banda durante toda a conversação. Em outras palavras, em uma chamada de voz, a largura de banda não é reutilizada, pois, mesmo quando ambos os usuários estão em silêncio, a banda continua reservada para aquela chamada.

Então, apesar das redes de comutação por circuito serem eficientes e realizarem um bom trabalho de entrega de voz, muitos clientes já preferem utilizar a voz apenas como uma aplicação em uma rede de comutação por pacotes, mais flexível a novos serviços. Além disso, o tráfego de dados já é quase tão intenso quanto o tráfego de voz.

As atuais redes móveis GSM (*Global System for Mobile Communication*) baseadas em comutação por circuito já podem através de *upgrades* de *software* e *hardware* oferecer serviços de envio e recebimento de dados utilizando tecnologias baseadas em comutação por pacote integradas à rede GSM. O GPRS (*General Packet Service*) é a tecnologia escolhida para interligar as redes IP às redes celulares GSM, proporcionando aos usuários o acesso a redes IP através da rede celular com altas taxas de dados.

As principais limitações apresentadas pelo GSM para prover serviços de dados banda larga são: alocação de canal por toda a duração da chamada, a conexão com rede de dados, baixa taxa de transmissão e tarifação baseada no tempo de uso do canal. O GPRS que é uma tecnologia baseada em comutação por pacote aparece como solução para esses problemas. Quando integrado na rede GSM, o GPRS compartilha o mesmo recurso de rádio do GSM, sendo de grande importância, a avaliação dos impactos causados pelo GPRS na rede GSM.

Com o objetivo de avaliar o desempenho do GPRS, vários estudos de simulação utilizando diferentes técnicas vem sendo realizados. Alguns estudos referentes ao desempenho do TCP (*Transmission Control Protocol*) sob GPRS foram abordados em [2] e [3]. Estudos referentes ao dimensionamento da rede GPRS podem ser encontrados em [4] e a correlação entre usuários GSM e GPRS para diferentes técnicas de alocação de canal foi abordada em [5].

Muitos modelos analíticos baseados em cadeias de Markov contínuas no tempo têm sido propostos no estudo do desempenho das redes GSM. Marsan, Marano, Mastroianni e Meo avaliaram os impactos de reservar canais para serviços de dados e multimídia em redes GSM comutadas por circuito [6]. Boucherie e Litjens desenvolveram um modelo de Markov para analisar o desempenho do GPRS sob características de chamadas GSM [7]. Nos últimos anos, novas idéias e modelos surgiram: Ermel, Begain, Muller, Schuler e Schweigel desenvolveram um modelo de Markov que analisa as probabilidades de bloqueio e as taxas médias de dados de

serviços GPRS em redes GSM [8], Lindermann e Thummler em 2001 apresentaram um modelo analítico que utiliza cadeia de Markov contínua no tempo que possibilita a análise do compartilhamento dos canais de rádio pelos serviços GSM e GPRS [9] e, mais recentemente, em 2002, Chen, Wu e Liu avaliaram o desempenho da alocação de recursos de rádio em redes GSM/GPRS baseado em cadeia de Markov bidimensional [10].

O objetivo deste trabalho é analisar o desempenho da rede integrada GSM/GPRS utilizando medidas baseadas em um modelo analítico. Essas medidas auxiliam na avaliação do impacto causado pelo GPRS em redes GSM, analisando a necessidade de alocação permanente de canais para serviços de dados GPRS e a alocação de canais sob demanda para o GPRS, assim como, as capacidades máximas de transmissão de dados alcançadas. O modelo em questão utiliza a fila M/M/m/m representando a interface aérea da rede integrada GSM/GPRS [11].

Este trabalho está dividido em 4 capítulos, como se segue: no Capítulo 1, apresenta-se a rede integrada GSM/GPRS, seus principais componentes, exemplos de arquitetura de rede, protocolos utilizados, interface aérea, esquemas de codificação utilizados e alguns outros principais aspectos da rede GSM/GPRS.

No Capítulo 2, são apresentados os principais conceitos relativos à teoria das filas necessários para o desenvolvimento deste trabalho, tais como, sistemas de filas, processos de Markov e a fila M/M/m/m utilizada para modelar o sistema.

No Capítulo 3, descrevem-se os modelos do sistema e do tráfego e apresentam-se as medidas utilizadas para avaliar o desempenho do sistema.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos a partir de simulações no *software* MATLAB utilizando-se as medidas apresentadas no Capítulo 3.

## **1. A REDE GSM/GPRS**

#### 4.1. INTRODUÇÃO

O IP (*Internet Protocol*), protocolo de rede padrão da *Internet*, ainda tem um longo caminho a percorrer nas redes celulares para que estas se tornem redes baseadas em IP. Em redes GSM (*Global System for Mobile Communication*), o GPRS (*General Packet Service*) é a primeira tecnologia que aparece para interligar as redes IP às redes celulares, proporcionando aos usuários o acesso a redes IP através das redes celulares com altas taxas de dados. O caminho de evolução das redes GPRS para as redes celulares de terceira geração pode ser obtido através da tecnologia EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM and TDMA/136 Evolution*).

Este capítulo dedica-se à discussão da rede GSM/GPRS.

#### 4.2. A REDE GSM

A rede GSM vem sendo amplamente utilizada em diversos países, proporcionando serviços de voz para usuários móveis. Os principais componentes de um sistema GSM são [12] [13] [14] [15]:

- MS (*Mobile Station*): estação móvel GSM;
- BSS (*Base Station Subsystem*): um BSS é formado por BTSs e BSCs e é responsável por toda a transmissão e recepção dos sinais de rádio;
- BTS (*Base Transceiver Station*): a área coberta por uma BTS forma uma célula. A BTS é responsável pela interface de rádio;
- BSC (*Base Station Controller*): uma BSC é responsável por um conjunto de BTSs, realizando *handover*, alocação de canal e etc;
- Interface *Abis*: a interface *Abis* conecta a BTS a BSC. Cada *timeslot* é mapeado em um circuito *Abis* de capacidade fixa de 16 kbps. Quatro

circuitos *Abis* são multiplexados em uma unidade de transmissão de 64 kbps conhecida como *timeslots Abis*. Links E1 são utilizados multiplexando 32 *timeslots Abis*, sendo que dois desses *timeslots* são utilizados para sincronização e controle de sinalização. Dessa forma em um link E1 tem-se 30 *timeslots Abis*, cada um comportando 4 circuitos *Abis*, sendo possível um link E1 ser multiplexado em 120 *timeslots*;

- MSC (*Mobile Switching Center*): realiza as funções de comutação de chamadas na rede GSM, sendo que o tráfego das estações móveis é roteado através da MSC;
- GMSC (*Gateway Mobile Switching Center*): responsável pela conexão da rede GSM com redes de telefonia fixa;
- SMSC (*Short Message Service Center*): responsável em prover serviços de *short message*;
- HLR (*Home Location Register*): base de dados com registro de assinantes locais. Armazena dados permanentes como o perfil do assinante, assim como dados temporários, como a localização do assinante. Quando uma chamada é destinada a um usuário, a localização deste usuário é consultada no HLR;
- VLR (*Visited Location Register*): base de dados com registro de assinantes visitantes;
- AUC (*Authentication Center*): é uma extensão do HLR, contendo todas as informações necessárias para proteger a identidade do usuário. Responsável pela autenticação na rede GSM, gerando e armazenando dados relacionados à segurança, tais como chaves utilizadas para autenticação;
- EIR (*Equipment Identity Register*): base de dados que contém identidade de equipamentos e do usuário, tais como IMEI (*International Mobile Equipment Identity*).



A Figura 1.1 (página 07) mostra em exemplo da rede integrada GSM/GPRS com seus principais nós.

As redes GSM são estruturadas de forma hierárquica, consistindo de, no mínimo, uma região de administração designada a uma MSC. Cada área de administração é composta de pelo menos uma área de localização que consiste de vários grupos de células. Cada grupo de células é designado a uma BSC.

As redes GSM distinguem o usuário do equipamento, tratando-os separadamente. A IMEI (*International Mobile Station Equipment Identity*) identifica apenas a estação móvel, sendo uma espécie de número de série do equipamento. A IMEI é designada pelo fabricante do equipamento e quando é registrado na rede, é armazenado no EIR.

Cada usuário é identificado pela sua identidade IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*) armazenada no cartão SIM (*Subscriber Identity Module*). Uma estação móvel só pode ser operada se, um cartão SIM com uma identidade IMSI válida, for inserido no equipamento com um IMEI válido. O número do telefone do assinante não depende do equipamento utilizado, e sim, do cartão SIM, pois, o número do telefone é designado pelo cartão SIM.

### **4.3. GPRS: GENERAL PACKET RADIO SERVICE**

#### **4.3.1. A TECNOLOGIA GPRS**

O crescimento da telefonia móvel celular, assim como o número de usuários de *Internet*, gerou uma combinação desses dois mercados proporcionando os serviços de dados em redes celulares. Nos próximos anos, haverá uma grande

demanda para serviços de dados em redes sem fio. Em particular, os usuários irão requerer alta performance no acesso de *Internet* sem fio.

Os serviços de dados existentes atualmente para redes celulares, não preenchem mais as necessidades das operadoras de serviços celulares e dos usuários. Do ponto de vista do usuário, as taxas de dados oferecidas atualmente nas redes celulares de comutação por circuito são muito baixas, chegando apenas a 9,6 kbps. Do ponto de vista das operadoras, o planejamento de novos serviços de dados fica limitado pelo fato destes estarem baseados em comutação por circuito que proporciona resultados ineficientes para tráfegos por rajada, caso do tráfego da *Internet*. Para este tipo de tráfego, a comutação por pacote traz resultados muito melhores para os canais de tráfego, permitindo que vários usuários compartilhem o mesmo canal físico.

Com o propósito de viabilizar eficientes serviços de dados nas redes celulares móveis GSM, foi desenvolvida a tecnologia conhecida como GPRS. GPRS melhora e simplifica o acesso sem fio à rede de dados de pacotes, permitindo de maneira eficiente a transferência de pacotes de dados entre as estações móveis e as redes de dados em taxas de até 115 kbps [12]. GPRS integra as redes móveis celulares às redes baseadas em IP, proporcionando ao usuário altas taxas de transmissão e o estabelecimento da sessão em alguns poucos segundos.

GPRS oferece ainda uma maneira mais amigável de cobrança dos serviços de dados. Nos serviços de dados comutados por circuito, a cobrança é baseada na duração da conexão, o que não é interessante para aplicações com tráfego por rajada. Com serviços GPRS comutados por pacote, a cobrança é baseada no volume de tráfego transmitido.

GPRS vem sendo padronizado pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) durante os últimos cinco anos [15]. Nos últimos dois anos, vários testes foram realizados e, diversas empresas como Ericsson, Nortel, Alcatel, Motorola, Nokia e Siemens já estão vendendo seus sistemas GPRS em vários países: Estados

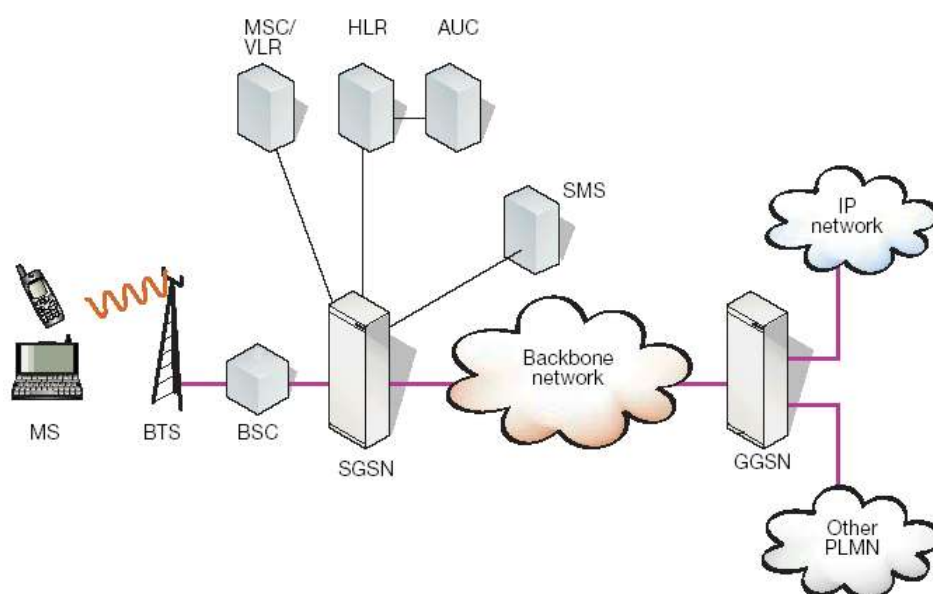
Unidos da América, Austrália, Noruega, Portugal, Espanha, Finlândia, França e Alemanha. Espera-se que até 2003 algumas operadoras no Brasil testem e instalem GPRS.

No padrão GPRS, existem três novos tipos de terminais móveis [12]:

- Terminais classe A: suportam simultaneamente tráfego de conexão por circuito e tráfego GPRS;
- Terminais classe B: suportam tráfego de conexão por circuito e tráfego GPRS, mas não simultaneamente;
- Terminais classe C: suportam apenas tráfego GPRS.

#### **4.3.2. ARQUITETURA DA REDE GPRS**

Com o objetivo de se integrar o GPRS nas redes móveis celulares GSM existentes, uma nova classe de nós de redes, conhecida como GSN (*GPRS Support Nodes*), foi desenvolvida. Os GSNs são responsáveis pela entrega e pelo roteamento de pacotes de dados entre as estações móveis e as redes de dados. A Figura 1.1 mostra um exemplo de rede integrada GSM/GPRS com seus principais nós.



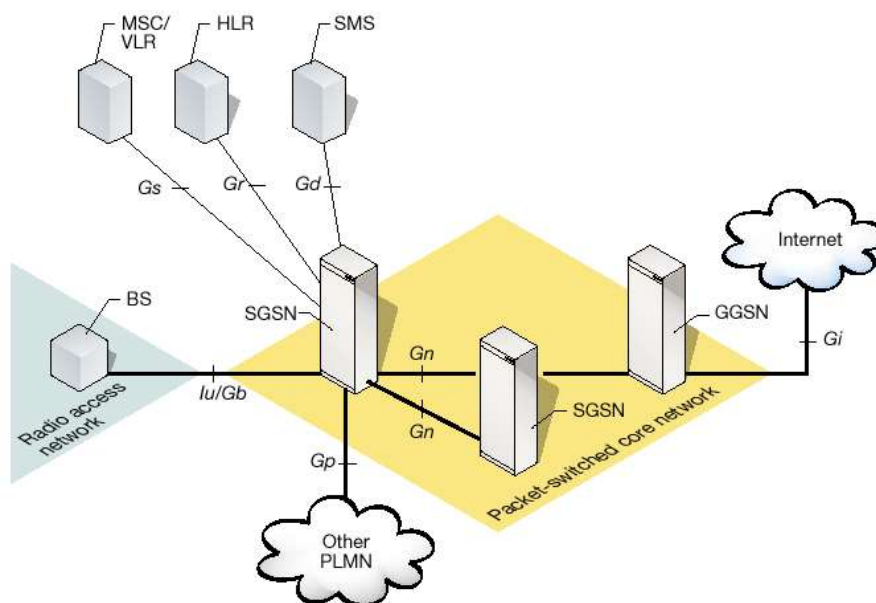
**Figura 1.1** – Exemplo de rede GSM/GPRS [16]

O nó conhecido como SGSN (*Serving GPRS Support Node*) é responsável pela transmissão e recepção dos pacotes de dados das estações móveis dentro de sua área de serviço. Suas tarefas incluem roteamento de pacote, transferência de pacote, gerenciamento, autenticação e funções de bilhetagem. O registro de localização do SGSN grava informações de localização e o perfil de todos os usuários GPRS registrados no SGSN [16] [13].

O nó GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) age como uma interface entre a rede GPRS e as redes de dados externas. O GGSN converte os pacotes vindos do SGSN no formato do protocolo de dados apropriado e os envia para as redes de dados correspondentes. O GGSN trata também os pacotes de dados vindos de redes de dados externas. Para este propósito, o GGSN grava o endereço do SGSN corrente do usuário e seu perfil em seu registro de localização. O GGSN realiza também autenticação e funções de bilhetagem [16] [13].

Todos os GSNs são conectados via interfaces baseadas em IP. Os GSNs encapsulam os pacotes de redes de dados e os enviam utilizando GTP (*GPRS Tunneling Protocol*). Existem dois tipos de enlaces GPRS: aqueles que conectam GSNs de uma mesma rede baseada em IP de um provedor de rede GPRS e, aqueles que conectam GSNs de diferentes redes permitindo *roaming* entre dois provedores de rede GPRS. *Gateways* são utilizados entre as redes GPRS com o objetivo de realizar funções de segurança para proteger as redes contra usuários não autorizados.

A Figura 1.2 mostra algumas interfaces lógicas utilizadas em redes GPRS, e a Tabela 1.1 descreve a função de cada interface mostrada na Figura 1.2.



**Figura 1.2** – Interfaces lógicas em redes GPRS [16]

**Tabela 1.1** – Função das interfaces lógicas nas redes GPRS

INTERFACE	FUNÇÃO
<i>Gn e Gp</i>	Controla sinalização para o gerenciamento de sessão entre SGSNs e GGSNs. A interface <i>Gn</i> é utilizada entre GSNs localizados na mesma rede, já a interface <i>Gp</i> é utilizada para GSNs localizados em diferentes redes GPRS. Estas interfaces possibilitam também a troca do perfil do usuário entre SGSNs, quando a estação móvel move-se de um SGSN para outro.
<i>lu</i>	Controla o tráfego IP entre a rede de comutação por pacote e a rede de rádio. O controle da sinalização entre a rede de comutação por pacote e a rede de rádio é feito pelo SGSN.
<i>Gb</i>	Sinalização SGSN com as ERBs.
<i>Gi</i>	Transporte de dados IP entre a rede móvel celular e redes IP externas, e ainda, sinalização GGSN de controle com servidores de provedores de serviços de <i>Internet</i> localizados em redes IP, incluindo autenticação de usuário.

<i>Gr</i>	Sinalização MAP ( <i>Mobile Application Part</i> ) para auxiliar o envio de dados de usuários entre o SGSN e o HLR. O HLR armazena dados como o perfil do usuário e o endereço do SGSN que o usuário está utilizando.
<i>Gd</i>	Sinalização MAP que auxilia os serviços de mensagens curtas em canais de rádio com comutação por pacote entre o SGSN e o centro de mensagens.
<i>Gs</i>	Provê gerenciamento a usuários que utilizam canais com comutação por pacote e canais com comutação por circuito. Estes procedimentos combinados cobrem, por exemplo, atualizações de localização e <i>paging</i> .

Os principais serviços do GPRS oferecem transferência de dados ponto a ponto por comutação por pacote. Existem dois diferentes tipos de serviços: os serviços ponto a ponto e os serviços ponto a multipontos. O primeiro já é operacional e o segundo estará disponível em versões futuras do GPRS [13].

Os serviços ponto a ponto oferecem transferência de dados entre dois usuários. Já os serviços ponto a multiponto oferecem transferência de dados de um usuário para vários usuários. Existem serviços ponto a multiponto onde pacotes de dados são distribuídos em uma certa área geográfica para um grupo de usuários e, existem serviços ponto a multiponto onde os pacotes de dados são endereçados a um grupo de usuários e são entregues em áreas geográficas onde os membros do grupo estão localizados.

É possível também enviar mensagens curtas sobre GPRS. E ainda muitos serviços suplementares vêm sendo planejados para serem implementados em redes GPRS.

Além dos serviços padronizados, os provedores de serviços GPRS podem oferecer também aos usuários serviços não padronizados, como acesso à base de dados, serviços de mensagens e serviços de validação de cartão de crédito.

#### 4.3.3. ESQUEMAS DE CODIFICAÇÃO

São utilizados na tecnologia GPRS quatro diferentes esquemas de codificação de canal (CS: *Coding Scheme*), cada um com um nível de verificação de integridade dos dados transmitidos na interface aérea. Esses quatro esquemas de codificação são conhecidos como CS-1, CS-2, CS-3, e CS-4 [14] [17].

Considerando a capacidade do canal fixa, há uma relação inversa entre a quantidade de dados transmitida e a integridade dos dados. Os diferentes procedimentos de codificação de erro formam vários tamanhos de blocos de rádio, os quais, produzem quatro taxas de dados de acordo com a Tabela 1.2. As taxas de dados apresentadas nesta 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 pacotes.

**Tabela 1.2** – Parâmetros para os esquemas de codificação [14] [17]

<b>Esquema de codificação de canal (Coding Scheme)</b>	<b>Bits de dados no bloco de rádio</b>	<b>Taxa por time slot (Kbps)</b>	<b>Taxa máxima por 8 time slots (Kbps)</b>
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 a taxa sinal-ruído necessária. Em um canal com boas condições de transmissão: alta taxa sinal-ruído, baixa interferência e alta eficiência espectral, qualquer um dos quatro esquemas de codificação apresentados pode ser utilizado.

Quando se tem boas condições de transmissão no canal, o esquema de codificação com menor proteção de canal (CS-4) proporcionará o maior *throughput*.

Em condições com alta interferência, o esquema de codificação de canal com a maior proteção de canal (CS-1) proporcionará o maior *throughput* devido sua extensiva codificação de erros que causa poucas retransmissões.

Pelo esquema de codificação CS-4, não apresentar proteção de erro, sua utilização é viável apenas para meios de transmissão aérea com boas condições. A estação base é o equipamento na rede responsável por calcular qual esquema de codificação deve ser utilizado em uma conexão GPRS. Assim, o *throughput versus* a proteção de erro de cada esquema de codificação é um parâmetro de capacidade que depende da localização do usuário em relação à estação base e a intensidade do sinal recebido pelo usuário.

A utilização dos esquemas de codificação CS-3 e CS-4 em redes GPRS demanda *upgrades* na rede, visto que os circuitos *Abis* têm capacidade máxima de transmissão de 16 kbps e esses esquemas de codificação precisam de taxas de transmissão de dados superiores a 16 kbps. Assim, a implementação de CS-3 e CS-4 em redes GPRS pode significar um caro investimento para as operadoras. Neste momento, as operadoras precisam optar entre os custos do *upgrade* imediato da rede para utilização de CS-3 e CS-4 ou os custos para introdução posterior das técnicas de modulação para EDGE.

#### **4.3.4. INTERFACE AÉREA**

Na camada física, GSM utiliza uma combinação de FDMA com TDMA para múltiplo acesso. As redes GSM precisam de duas bandas de frequência de 25 MHz, uma para transmissão da estação móvel conhecida como *uplink*, e outra para transmissão da BTS, conhecida como *downlink*. Cada uma dessas bandas de 25 MHz é dividida em 124 canais de 200 KHz.

Cada canal de 200 KHz comporta 8 canais TDMA. Os 8 *timeslots* nestes canais TDMA formam um *frame* TDMA.



A Tabela 1.3 mostra algumas características do padrão GSM.

**Tabela 1.3** – Características da tecnologia GSM 900 e GSM 1800 [14]

<b>Características</b>	<b>GSM 900</b>	<b>GSM 1800</b>
Banda de frequência	890 a 915 MHz	1710 a 1785 MHz
	935 a 960 MHz	1805 a 1880 MHz
Largura de banda do canal	25 MHz	75 MHz
Largura de banda da portadora	200 kHz	200 kHz
Número de portadoras	124	374
Timeslots por portadora	8	8
Acesso múltiplo	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA
Abrangência da célula	300 m a 35 km	100 m a 15 km
Potência do aparelho	0,8 a 8 Watts	0,25 a 1 Watt

A alocação de canal no GPRS é diferente do GSM original, pois, o GPRS possibilita à estação móvel transmissão em múltiplos *timeslots* de um mesmo *frame* TDMA. Este tipo de alocação prove flexibilidade, permitindo a alocação de um a oito *timeslots* por *frame* TDMA para uma estação móvel.

No GSM convencional, um canal é permanentemente alocado para um usuário durante um período de conversação. Já no GPRS, os canais são alocados apenas quando pacotes de dados são transmitidos. Para tráfego em rajada, este tipo de alocação dinâmica oferece maior eficiência de utilização dos recursos de rádio, visto que vários usuários podem compartilhar um único canal físico.

Uma célula que suporta GPRS deve alocar canais físicos para o tráfego GPRS. Este canal é conhecido como PDCH (*Packet Data Channel*) e é retirado do

conjunto de canais comuns disponíveis na célula. Assim, os canais da célula são compartilhados entre o tráfego GPRS e o tráfego comum de voz. O mapeamento dos canais físicos para os serviços de comutação por pacote e por circuito, podem ser alocados dinamicamente, dependendo da quantidade de tráfego e prioridade de serviços. Dependendo da demanda de tráfego GPRS, o número de canais PDCH alocado apenas para este tipo de tráfego pode ser menor ou maior. Com o objetivo de melhorar a qualidade de serviços GPRS, canais que não estejam sendo utilizados pelo GSM convencional, podem ser alocados em demanda como PDCH.

No topo dos canais físicos, estão os canais lógicos, definidos para realizar sinalização, *broadcast* de informação do sistema, sincronismo e outras funções de acordo com a Tabela 1.4.

**Tabela 1.4 – Canais lógicos GPRS [13] [14]**

<b>Canais</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Função</b>
PDTCH	Packet Data Traffic Channel	Transferência de dados do usuário.
PBCCH	Packet Broadcast Control Channel	Distribui para as estações móveis da célula informações especiais sobre a organização da rede de rádio GPRS.
PRACH	Packet Random Access Channel	Utilizado pela estação móvel para solicitar um ou mais PDTCH.
PAGCH	Packet Access Grant Channel	Utilizado para alocar um ou mais PDTCH para uma estação móvel.
PPCH	Packet Paging Channel	Utilizado pelo BSS para encontrar a localização de uma estação móvel ( <i>paging</i> ).
PNCH	Packet Notification Channel	Utilizado para informar para a estação móvel sobre mensagens de <i>multicast</i> ou chamada em grupo.
PACCH	Packet Associated Control Channel	Alocado em combinação com um ou mais PDTCH designado a uma estação móvel. Transporta informação de sinalização, informação de controle de potência e etc.
PTCCH	Packet Timing Advance Control Channel	Utilizado para sincronização de <i>frames</i> .

O mapeamento dos canais lógicos em canais físicos tem dois componentes: o mapeamento em frequência e o mapeamento no tempo. O mapeamento em frequência é baseado no número do *frame* TDMA e nas frequências alocadas para a BTS e para a estação móvel. O mapeamento no tempo é baseado na definição de estruturas *multiframes* no topo do *frame* TDMA.

#### **4.3.5. HANDOVER**

GPRS expande o conceito de área de localização do GSM em área de roteamento. A área de roteamento está relacionada ao gerenciamento de mobilidade do GPRS e é um subconjunto ou igual à área de localização. Cada área de roteamento é controlada por um SGSN que pode controlar várias áreas de roteamento.

Os mecanismos de *handover* são necessários, pois, em uma rede móvel, tem-se o objetivo de manter a conexão de dados, quando o usuário está movendo-se de uma célula para outra ou entre áreas de roteamento. Basicamente, a estação móvel mede a força do sinal das células vizinhas possibilitando a transferência de célula, se necessário. O procedimento de atualização de células é informado ao SGSN pela estação móvel.

Se a estação móvel move-se para uma nova célula e para uma nova área de roteamento, uma atualização de área de roteamento é realizada. Se as duas áreas de roteamento pertencem ao mesmo SGSN, uma intra-atualização de áreas de roteamento no SGSN é realizada. Se as duas áreas de roteamento pertencem a diferentes SGSNs, uma inter-atualização de área de roteamento acontece.

Se a área de localização para a qual o usuário está movendo-se pertence a outra rede GSM, não há atualização de área de roteamento e sim, procedimentos de *roaming* quando existirem acordos entre as duas operadoras.

#### **4.3.6. QoS EM REDES GPRS**

Os requisitos de QoS das aplicações de dados baseadas em comutação por pacote em redes móveis são muito diversos. Diferentes classes de QoS, que podem ser especificadas para cada sessão, é uma importante facilidade. GPRS possibilita a definição de perfis de QoS utilizando os parâmetros de precedência de serviços, confiabilidade, atraso e *throughput* [18].

A precedência de serviço é a prioridade de um serviço em relação a outro. Existem três tipos de níveis de prioridade: alto, normal e baixo.

A confiabilidade indica os requisitos das características de transmissão para uma aplicação. Três classes de confiabilidade são definidas, que garantem o máximo valor para probabilidade de perda, duplicação, seqüenciamento e corrompimento de pacotes.

Os parâmetros de atraso definem valores máximos para o atraso médio e o atraso para 95%. O atraso para 95% é o máximo atraso garantido em 95% de todas as transferências. O atraso é definido como o tempo de transferência fim a fim entre duas estações móveis ou entre uma estação móvel e a interface *Gi* para uma rede de pacotes de dados externa. Isto inclui todos os atrasos dentro de uma rede GPRS, ou seja, o atraso devido à rede de rádio e o atraso devido a rede de comutação por pacote. Atrasos ocorridos nas redes externas a rede GPRS, não são levados em consideração.

O *throughput* especifica a máxima taxa de *bits* e a taxa de *bits* média.

As Tabelas 1.5 e 1.6 mostram alguns valores para as classes de confiabilidade e para as classes de atraso.

**Tabela 1.5** – Classes de confiabilidade em redes GPRS [13]

CLASSE	PROBABILIDADE PARA			
	Perda de pacotes	Pacotes duplicados	Pacotes fora de seqüência	Pacotes corrompidos
1	$10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-9}$
2	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
3	$10^{-2}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-2}$

**Tabela 1.6** – Classes de atraso em redes GPRS [13]

CLASSE	PACOTES DE 128 BYTES		PACOTES DE 1024 BYTES	
	Atraso médio	Atraso para 95%	Atraso médio	Atraso para 95%
1	< 0,5 seg.	< 1,5 seg.	< 2 seg.	< 7 seg.
2	< 5 seg.	< 25 seg.	< 15 seg.	< 75 seg.
3	< 50 seg.	< 250 seg.	< 75 seg.	< 375 seg.
4	Melhor tentativa	Melhor tentativa	Melhor tentativa	Melhor tentativa

Utilizando estas classes de QoS, os perfis de QoS podem ser negociados entre o usuário móvel e a rede para cada sessão, dependendo da demanda de QoS e dos recursos disponíveis. A bilhetagem dos serviços é então baseada no volume de dados transmitidos, o tipo de serviço e o perfil QoS escolhido.

#### **4.3.7. PROCEDIMENTOS DE GERENCIAMENTO DE MOBILIDADE**

Antes de uma estação móvel poder utilizar serviços GPRS, esta deve se registrar em um SGSN de uma rede GPRS. A rede verifica se o usuário está autorizado, copia o seu perfil do HLR para um SGSN, e especifica uma identidade

temporária de usuário móvel de dados. Este procedimento é chamado de *GPRS attach*. Para estações móveis utilizando serviços de comutação por pacote e de comutação por circuito, é possível combinar procedimentos das redes GPRS e das redes móveis de comutação por circuito.

A realização do *GPRS attach* para se iniciar uma sessão GPRS, pode ser procedida pela estação móvel ou pelo SGSN, fazendo com que a estação móvel passe para o estado de gerenciamento de mobilidade READY. O próximo passo é a ativação de contexto PDP (*Packet Data Protocol*), possibilitando a transmissão e recepção de pacotes de dados.

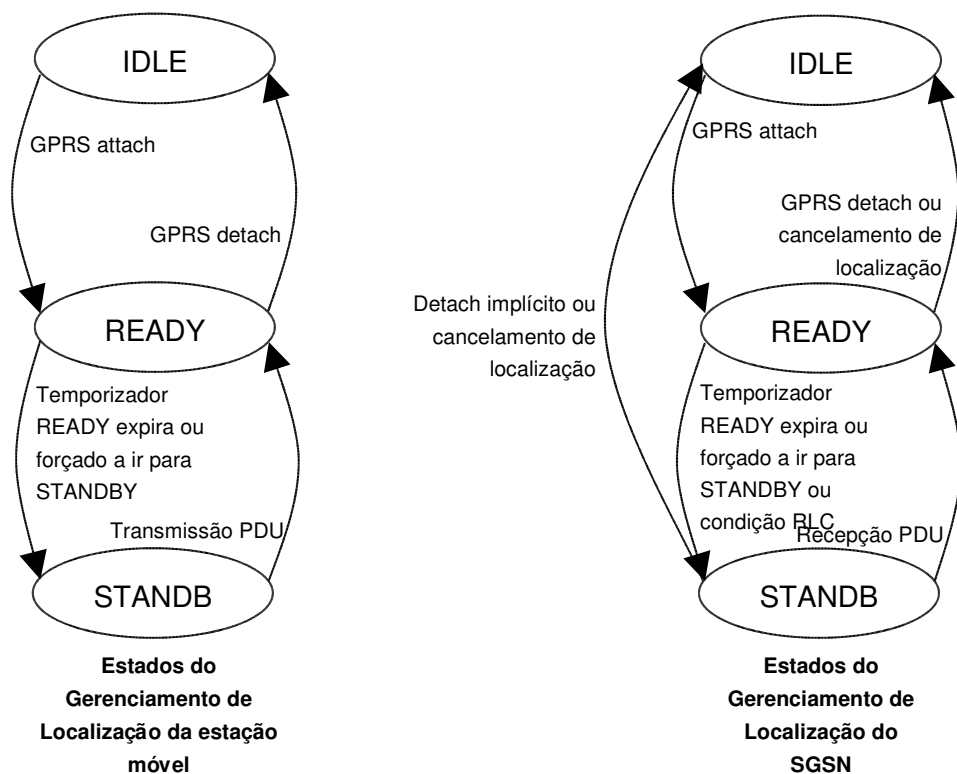
Percebe-se assim que, os procedimentos de gerenciamento de mobilidade são divididos em três fases: estados de gerenciamento de mobilidade, *GPRS attach* e *detach* e ativação e desativação do contexto PDP.

Existem três diferentes estados de gerenciamento de mobilidade: IDLE, STANDBY e READY. A estação móvel pode estar em qualquer um dos três estados.

No estado IDLE, a estação móvel está ligada, mas ainda não procedeu o *GPRS attach*. Neste estado, não existem informações de localização válidas e a estação móvel está invisível para a rede GPRS. Procedendo, um *GPRS attach*, a estação móvel passa para o estado READY. Neste estado, a estação móvel realiza procedimentos de gerenciamento de mobilidade como seleção de célula e ainda deve ativar ou desativar contextos PDP com o propósito de enviar e receber dados. O estado READY é supervisionado por um temporizador, sendo que a estação móvel passa do estado READY para STANDBY quando um período de tempo estabelecido pelo temporizador se expira após a finalização de transferência de dados.

A estação móvel no estado STANDBY está *GPRS attached* e envia para o SGSN atualizações de informações de localização. Quando há uma requisição de contexto PDP para transmissão de dados, a estação móvel passa do estado STANDBY para o estado READY de forma implícita.

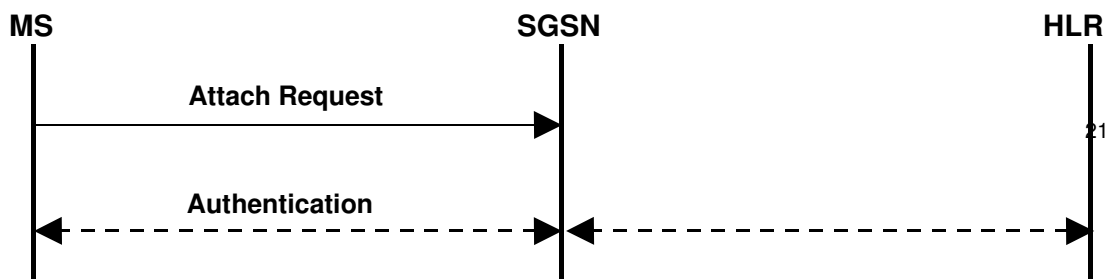
A Figura 1.3 ilustra a transição de um estado para outro dependendo do evento ocorrido.

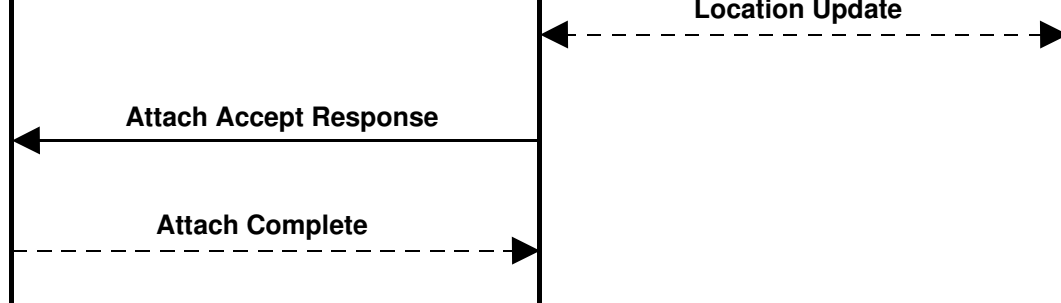


**Figura 1.3** – Estados de gerenciamento de mobilidade [14] [15]

Após a realização do procedimento para um *GPRS attach*, são estabelecidos contextos de gerenciamento de mobilidade na estação móvel e no SGSN, levando a estação móvel para o estado READY.

A Figura 1.4 ilustra um *GPRS attach*. Um *GPRS detach* finaliza a sessão GPRS.





**Figura 1.4** – GPRS *attach* [14]

1. A estação móvel envia um pedido de *GPRS attach*;
2. A autenticação é realizada, sendo que o SGSN envia para o HLR a identidade do assinante móvel;
3. O HLR é atualizado com a informação do atual SGSN da estação móvel;
4. A resposta de aceitação do *GPRS attach* especifica uma identidade de link lógico temporária para a estação móvel.
5. Confirmação do *GPRS attach*.

Para uma estação móvel trocar pacotes de dados com uma rede de pacotes externa, a estação móvel precisará de um ou mais endereços IP utilizados na rede externa. Este endereço é chamado de endereço PDP. Para cada sessão, um contexto PDP é criado, descrevendo as características da sessão e contendo o endereço PDP especificado para a estação móvel, o QoS necessário e o endereço do GGSN que

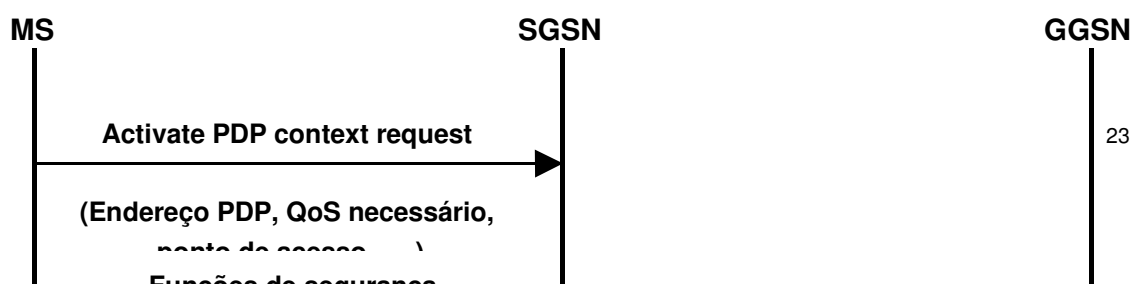


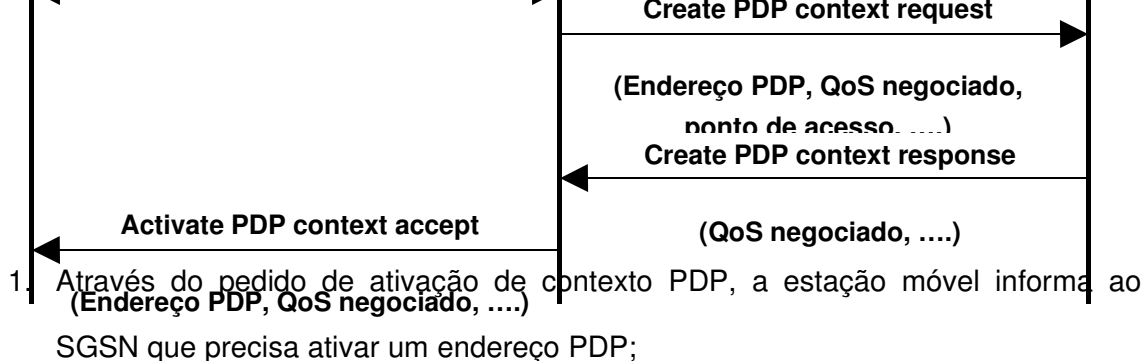
serve como ponto de acesso para a rede de dados externa. Esse contexto é armazenado na estação móvel, no SGSN e no GGSN. Com um contexto PDP ativo, a estação móvel torna-se visível à rede de pacotes externa e pronta para enviar e receber pacotes de dados. Um único usuário pode ter simultaneamente vários contextos PDP ativos em um certo período de tempo.

A ativação de um contexto PDP é realizada após o *GPRS attach*, estando a estação móvel no estado READY.

A alocação de endereços PDP pode ser dinâmica ou estática. Quando a alocação destes endereços for estática, o operador da rede de origem do usuário especifica permanentemente um endereço PDP para o usuário. Se a alocação de endereço for dinâmica, um endereço PDP é designado ao usuário a cada ativação de um contexto PDP. Nesse caso, o endereço PDP pode ser designado para o usuário pelo operador de sua rede de origem ou pelo operador da rede visitada. O operador da rede de origem do usuário decide qual das duas alternativas possíveis deve ser utilizada. Na alocação dinâmica de endereços PDP, o GGSN é responsável pela alocação, ativação e desativação de endereços PDP.

Como mostrado na Figura 1.5 a seguir, utilizando a mensagem “*activate PDP context request*”, a estação móvel informa ao SGSN sobre o pedido de um contexto PDP. Em seguida, algumas funções de segurança, como autenticação do usuário, são executadas. Se o acesso está garantido, o SGSN envia para o GGSN a mensagem “*create PDP context request*”, que por sua vez, cria uma nova entrada em sua tabela de contextos PDP possibilitando o roteamento de pacotes de dados entre o SGSN e a rede de dados externa. Em seguida, o GGSN retorna para o SGSN a mensagem de confirmação “*create PDP context response*”. O SGSN então, atualiza sua tabela de contextos PDP e confirma a ativação de um novo contexto PDP para a estação móvel através da mensagem “*activate PDP context accept*”.





2. Através de um pedido de criação de contexto PDP, o SGSN envia para o GGSN o pedido da estação móvel;
3. Utilizando uma mensagem de resposta de criação de contexto PDP o GGSN informa para o SGSN o endereço PDP designado ou aceito;
4. O SGSN envia para a estação móvel em uma mensagem de aceitação de ativação de contexto PDP a informação do endereço PDP e a informação do perfil de QoS negociado.

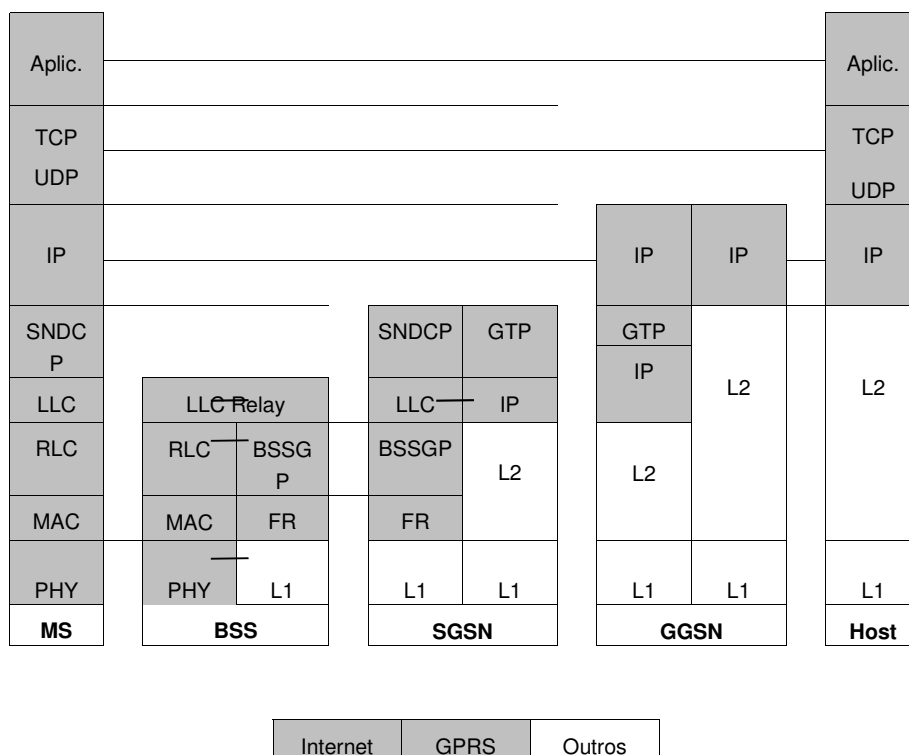
GPRS suporta ainda ativação anônima de contexto PDP. Neste caso, as funções de segurança não são executadas e, o usuário apesar de estar utilizando um contexto PDP, permanece desconhecido para a rede. Ativação anônima de contexto deve ser utilizada para serviços pré-pagos, onde o usuário não quer ser identificado. Neste tipo de ativação, apenas alocação dinâmica de endereço é possível.

#### 4.3.8. PILHAS DE PROTOCOLOS

Com o objetivo de proporcionar a transmissão de dados nas redes celulares e permitir o controle de fluxo, detecção de erro e correção de erro, a rede GPRS utiliza diversos tipos de protocolos.

A arquitetura de comunicação do GPRS, basea-se na arquitetura do GSM. No GPRS, pode-se distinguir dois planos de protocolos: o plano de transmissão que cobre os protocolos para transmissão da informação e os procedimentos de controle, e o plano de sinalização que cobre os protocolos que controlam e realizam a transmissão de informações sobre o usuário, como controle de roteamento e mobilidade [13] [14].

A Figura 1.6 mostra a pilha de protocolos do plano de transmissão, ilustrando as possíveis camadas de protocolos do GPRS e da *Internet*.



**Figura 1.6** – Plano de transmissão do GPRS [14] [15] [19]

A camada de aplicação oferece suporte às várias aplicações do usuário, tais como, *e-mail* e *web browsing*, necessitando de diferentes tipos de protocolos para gerenciar as sessões de aplicações de acordo com o *software* utilizado pelo usuário.

Os protocolos de transporte, TCP e UDP, proporcionam a troca de dados em conexões ponto-a-ponto. O protocolo TCP possibilita um fluxo confiável de dados utilizando retransmissão de pacotes e armazenamento de pacotes no transmissor e no receptor. Um mecanismo conhecido como ARQ (*Automatic Repeat Request*) 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 na detecção de

erros. Este protocolo é principalmente utilizado para transmissão de vídeo e áudio em tempo real.

Em redes GPRS, por serem ambientes *wireless*, as aplicações podem sofrer altos e variados atrasos. Em casos extremos, a conexão TCP deve ser interrompida por alguns minutos. Levando em consideração a quantidade variável da largura de banda disponível, deve ser observado que se um pacote é transmitido e a confirmação de entrega não é recebida, o TCP retransmite o pacote como se este estivesse perdido, quando, na realidade, este pacote pode apenas estar sofrendo atraso. Na maioria dos casos, o atraso na conexão ponto-a-ponto é consequência de retransmissão na subcamada RLC (*Radio Link Control*) devido às condições variáveis da interface de rádio. Assim, o projeto de uma rede GPRS deve assegurar que o TCP observe primeiramente os atrasos dos pacotes e posteriormente as perdas, limitando ainda os atrasos de tal forma que não ocorra *timeout* da conexão TCP [19].

A camada de rede pode utilizar dois tipos de protocolos PDP: IP ou X.25. Porém, atualmente o IP é o protocolo de rede mais utilizado em redes GPRS. Os endereços IP são alocados para o usuário pelo GGSN, mas não necessariamente estão localizados nesta entidade da rede. Os endereços IP podem estar localizados em redes externas, como um provedor de serviços de *Internet*. As redes externas têm acesso ao GGSN e a designação de endereços IP pode ser feita através de um RADIUS (*Remote Access Dial In User Service*), por exemplo. O GGSN suporta endereçamento IP dinâmico e estático. A alocação dinâmica de endereços IP possibilita a sua reutilização, reduzindo a quantidade de endereços IP necessária. Assim, os endereços IP são designados para os usuários dinamicamente, apenas quando estes têm necessidade. Já na alocação estática de endereços IP, há a definição no HLR de um endereço IP estático para cada usuário, ou ainda, o servidor RADIUS pode ser configurado para sempre alocar o mesmo endereço IP para um específico usuário. As redes GPRS estão atualmente baseadas no IPv4, por este motivo, sofrem os mesmos problemas de limitações de quantidade de endereços IP

que as outras redes baseadas em IPv4 sofrem. Futuramente, as redes GPRS utilizarão IPv6.

Os pacotes de dados são encapsulados no *backbone* da rede GPRS que interliga os GSNs e são transmitidos utilizando o protocolo GTP. GTP relaciona a informação de sinalização entre os GSNs e é utilizado entre GSNs de uma mesma PLMN (*Public Land Mobile Network*) e entre GSNs de diferentes PLMNs. No plano de transmissão, GTP emprega um mecanismo de tunelamento para transferir PDUs (*Packet Data Unit*) através da rede GPRS. Os pacotes GTP transmitem os pacotes IP ou os pacotes X.25 do usuário. Como protocolos de transporte e rede, abaixo do GTP, são utilizados os protocolos TCP ou UDP e IP ou X.25, respectivamente. A combinação mais utilizada em redes GPRS é UDP com IP. Normalmente, UDP é utilizado para acessar redes de pacotes baseadas em IP que não precisam de confiabilidade na camada de rede ou abaixo. O protocolo IP é utilizado na camada de rede para rotear os pacotes na rede e abaixo do IP podem ser utilizados protocolos baseados em ATM, por exemplo.

O protocolo utilizado para transferir pacotes de dados entre o SGSN e a estação móvel é o SNDCP (*Subnetwork Dependent Convergence Protocol*). SNDCP é um protocolo de convergência que mapeia as características da camada de rede para as camadas LLC (*Logical Link Control*), tendo a função de multiplexar várias conexões da camada de rede em uma conexão lógica virtual. SNDCP trabalha ainda com segmentação de pacotes, compressão de cabeçalho e compressão de dados no enlace entre a estação móvel e o SGSN. As técnicas de compressão de dados utilizadas, dependendo do tipo do dado em questão, podem fazer com que a percepção do usuário quanto à largura de banda seja aumentada. Se por exemplo, os dados são basicamente texto, podem ser comprimidos em até 25% do seu tamanho original. Uma das técnicas de compressão mais utilizadas é a V.42bis [14]. Esta técnica deve ser implementada nos terminais e nas redes. Porém, esta técnica requer

uma certa capacidade de processamento e memória dos terminais, visto que o transmissor deve comprimir os dados e o receptor deve descomprimi-los.

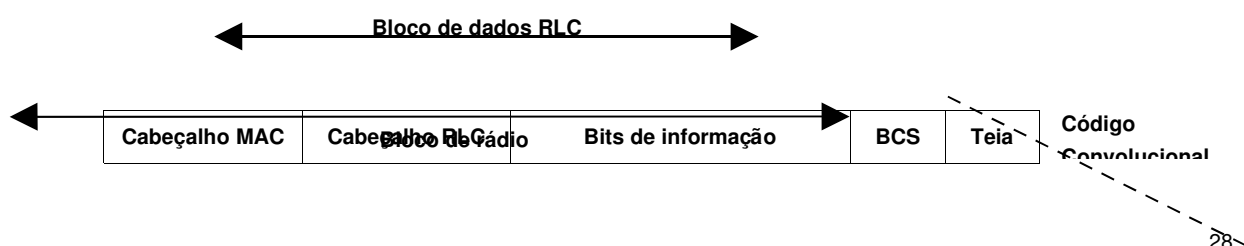
A camada de enlace de dados entre a estação móvel e a rede é dividida em duas subcamadas: a camada LLC entre a estação móvel e o SGSN e a camada RLC/MAC (*Radio Link Control/Medium Access Control*) entre a estação móvel e o BSS (*Base Station Subsystem*) [13].

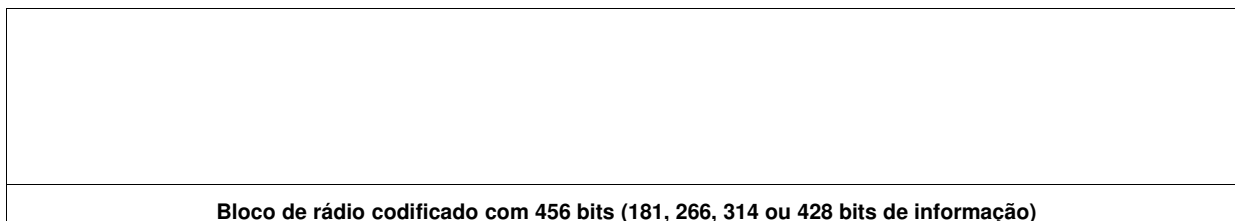
A camada LLC prove um enlace lógico de alta confiabilidade baseado no protocolo HDLC (*High Level Data Link Control*). Este enlace é estabelecido entre a estação móvel e o SGSN e é conhecido como TLLI (*Temporary Logical Link Identifier*). Suas funções incluem controle de seqüência, entrega de pacotes em ordem, controle de fluxo, detecção de erros e retransmissão. Por este motivo, o SGSN deve armazenar os pacotes até a estação móvel confirmar o seu recebimento [14].

A camada RLC/MAC na interface aérea inclui o estabelecimento de um enlace com confiabilidade entre a estação móvel e o BSS e o controle do acesso da estação móvel ao canal de rádio compartilhado por muitas outras estações móveis.

Nessas camadas não há mais a transmissão de pacotes IP ou pacotes GTP, e sim, *frames* LLC e blocos de dados RLC.

A subcamada RLC trabalha com segmentações de pacotes de dados LLC em blocos de dados RLC. A Figura 1.7 mostra que ao bloco de dados RLC são adicionados um cabeçalho MAC e uma seqüência BCS (*Block Check Sequence*) para formar um bloco de rádio. Ao bloco de rádio são aplicados alguns *bits* de cauda e um código convolucional, formando assim um bloco de rádio codificado. A quantidade de *bits* de informação varia de acordo com o esquema de codificação utilizado em: 181 *bits* para CS-1, 266 *bits* para CS-2, 314 *bits* para CS-3 e 428 *bits* para CS-4 [14].





**Figura 1.7** – Bloco de dados RLC e bloco de rádio [14]

A subcamada MAC controla os procedimentos de sinalização de acesso para o canal de rádio, distribuindo todo o tráfego de sinalização de controle e o tráfego de dados para a interface de rádio.

A camada física entre a estação móvel e o BSS é dividida nas subcamadas: PLL (*Physical Link Layer*) e RFL (*Radio Frequency Layer*). A camada PLL provê um canal físico entre a estação móvel e o BSS, incluindo codificação de canal, detecção e correção de erro e detecção de congestionamento. A camada RFL opera abaixo da camada PLL realizando funções como modulação e demodulação. A camada física inclui também procedimentos de resseleção de célula e regulação de potência.

O protocolo BSSGP (*Base Station Subsystem GPRS Protocol*) transmite pacotes de dados e informações de roteamento entre o BSS e o SGSN. O padrão de comunicação utilizado para esta transmissão é o FR.

A arquitetura de protocolos do plano de sinalização de redes GPRS é formada de protocolos para suporte e controle das funcionalidades do plano de transmissão, tais como: *GPRS attach* e *detach*, ativação e desativação de contexto PDP, controle e roteamento de rotas de conexões de rede e alocação de recursos de rede.

A sinalização entre SGSN e GGSN é realizada pelo GTP sobre UDP ou TCP. O protocolo MAP é responsável pela sinalização entre SGSN e HLR, e um subconjunto de protocolos BSSAP (*Base Station Subsystem Application Part*) é utilizado entre SGSN e MSC/VLR (*Mobile Switching Center/Visited Location Register*). Outros protocolos utilizados no GSM convencional, também são necessários na rede GPRS.

Entre a estação móvel e o SGSN, o protocolo GMM/SM (*GPRS Mobility Management and Session Management*) provê suporte às funcionalidades do gerenciamento de sessões e mobilidade como: *GPRS attach* e *detach*, ativação e desativação de contexto PDP, e atualização da localização do usuário.

#### **4.3.9. LIMITAÇÕES DA TECNOLOGIA GPRS**

A máxima taxa de dados prometida pelos fabricantes de GPRS está entre 170 kbps. Porém, essa taxa é alcançada apenas com a utilização de um ótimo esquema de codificação, CS-4, por exemplo, o que requer caros *upgrades* na rede, como já mencionado.

Outro ponto que deve ser levado em consideração é que o usuário final espera altas taxas, qualidade de serviço, terminais que proporcionem os serviços prometidos e custos baixos. Porém, as redes GPRS e os terminais GPRS ainda apresentam muitas limitações.

Para se ter altas taxas de dados, em redes GPRS, deve-se levar em conta, além dos esquemas de codificação, a alocação de vários *timeslots*.

Visto que as redes de dados e as redes de voz utilizam os mesmos recursos de rádio, é pouco provável que a operadora especifique muitos *timeslots* para o tráfego GPRS, já que o tráfego de voz continuará sendo o serviço dominante nas redes celulares. As operadoras provavelmente darão preferência para o tráfego de voz, especificando estaticamente alguns poucos *timeslots* para o tráfego GPRS e deixando ao *timeslots* restantes especificados de forma dinâmica entre o tráfego de voz e o tráfego GPRS.

Quanto aos terminais, é fácil imaginar como será uma tarefa difícil para um equipamento tão pequeno suportar alto processamento e alta potência para recepção e transmissão. Para que os terminais ofereçam recepção e transmissão em torno de 170 kbps, precisam incorporar a utilização de oito *timeslots* no *downlink* e *uplink*. Os



fabricantes de terminais estão prometendo terminais que suportem pelo menos um *timeslot* no *uplink* e três *timeslots* no *downlink*. Com a evolução dos terminais o número de *timeslot* suportado tende a aumentar [14].

## **2. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS: TEORIA DAS FILAS**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

A importância da teoria das filas vem de sua habilidade em descrever o comportamento de vários sistemas de filas complexos.

Qualquer sistema no qual as chegadas acontecem demandando recursos do mesmo, pode ser chamado de sistema de filas. Se o tempo de chegada ou se a quantidade dessas demandas não é predita, podem ocorrer conflitos na utilização dos recursos do sistema, podendo haver o aparecimento de filas de espera. O comprimento dessas filas depende de aspectos como a taxa de chegada das demandas que utilizarão os recursos do sistema e das flutuações estatísticas desta taxa.

Quando, por exemplo, a taxa de chegada excede a capacidade do sistema, as filas são formadas. Porém, mesmo se a taxa de chegada for menor que a capacidade de recursos do sistema, pode haver a formação de filas devido às flutuações estatísticas.

No estudo de teoria de filas, é fundamental a utilização da lei de conservação de fluxo, que afirma que a taxa na qual o fluxo cresce em um sistema é igual à diferença entre a taxa do fluxo de entrada e a taxa do fluxo de saída do mesmo.

## **2.2. NOTAÇÃO E ESTRUTURA DE SISTEMAS DE FILAS**

Para descrever a teoria das filas, precisa-se primeiramente entender a notação utilizada para especificar sistemas de fila. Basicamente, utiliza-se apenas a descrição **A/B/m** que representa um sistema de filas com **m** servidores, sendo que **A** descreve a distribuição do tempo entre chegadas e **B** representa a distribuição do tempo de serviço. **A** e **B** podem assumir os seguintes símbolos: **M** (distribuições temporais Markovianas), **D** (distribuições temporais Determinísticas), **G** (distribuições temporais Gerais), **E** (distribuição temporais de Erlang) e outros que fogem do escopo deste trabalho.

Algumas vezes, faz-se necessário utilizar outros símbolos, adotando-se assim, a notação de Kendall **A/B/m/K/M**, onde **K** representa a capacidade de armazenamento do sistema e **M** o tamanho da população. Se **K** e **M** não são definidos, assume-se que estes parâmetros tem o valor igual a infinito [20].

## **2.3. PROCESSOS DE MARKOV**

Markov criou uma forma simples de dependência entre variáveis aleatórias formando um processo estocástico.

Um processo de Markov com espaço de estado discreto é conhecido como cadeia de Markov. Um conjunto de variáveis aleatórias  $X_n$  forma uma cadeia de Markov se a probabilidade do próximo valor  $x_{n+1}$  depender apenas do valor atual  $x_n$  e não dos valores anteriores. Assim, tem-se uma seqüência aleatória na qual a dependência se estende apenas a um estado anterior.

Analiticamente, a propriedade de *Markov* é escrita de acordo com a expressão abaixo [20]:

$$P [X(t_{n+1})=x_{n+1}|X(t_n)=x_n, X(t_{n-1})=x_{n-1}, \dots, X(t_1)=x_1] = P[X(t_{n+1})=x_{n+1}|X(t_n)=x_n] \quad (2.1)$$

onde  $t_1 < t_2 < \dots < t_n < t_{n+1}$  e,  $x_i$  está incluso em um espaço de estado discreto.

As cadeias de *Markov* discretas no tempo permitem apenas posições discretas e as transições entre essas posições ocorrem apenas em tempos discretos.

A seqüência de variáveis aleatórias  $x_1, x_2, \dots$ , forma uma cadeia de *Markov* discreta no tempo se, para todo  $n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) e todo valor possível das variáveis aleatórias, tem-se para  $i_1 < i_2 < \dots < i_n$  que:

$$P [X_n=j|X_1=i_1, X_2=i_2, \dots, X_{n-1}=i_{n-1}] = P[X_n=j|X_{n-1}=i_{n-1}] \quad (2.2)$$

Diferente das cadeias de *Markov* discretas no tempo, as cadeias de *Markov* contínuas no tempo consideram posições de um conjunto discreto de estados permitindo que a mudança de estado aconteça em qualquer momento no tempo.

O processo aleatório  $X(t)$  forma uma cadeia de *Markov* contínua no tempo se para todo  $n$  inteiro e para qualquer seqüência  $t_1, t_2, \dots, t_{n+1}$  tal que  $t_1 < t_2 < \dots < t_{n+1}$ , tem-se [20]:

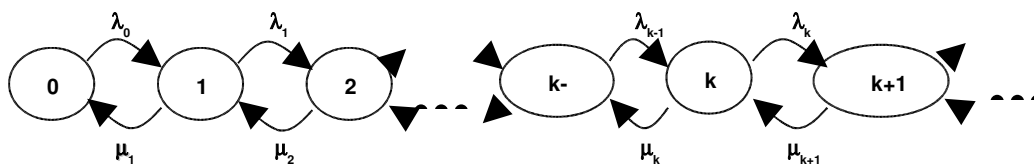
$$P [X(t_{n+1})=j|X(t_1)=i_1, X(t_2)=i_2, \dots, X(t_n)=i_n] = P[X(t_{n+1})=j|X(t_n)=i_n] \quad (2.3)$$

## 2.4. PROCESSO DE NASCIMENTO – MORTE

Uma classe muito importante das cadeias de *Markov* é o processo de nascimento – morte. Assim como qualquer outra cadeia de *Markov*, o processo de nascimento – morte pode ser discreto ou contínuo no tempo, sendo que as transições de estado acontecem apenas entre estados vizinhos. Tem-se então que se  $x_n = i$ , então  $x_{n+1} = i - 1, i$  ou  $i + 1$ .

Um processo de nascimento – morte permite apenas transições de um estado  $E_k$  para os estados vizinhos  $E_{k+1}$ ,  $E_k$  e  $E_{k-1}$ . Quando o processo é dito estar no estado  $E_k$  diz-se que a população naquele instante é  $k$ . A transição de  $E_k$  para  $E_{k+1}$  significa um nascimento dentro da população e a transição de  $E_k$  para  $E_{k-1}$  significa uma morte dentro da população.

Considerando a natureza de nascimentos e mortes, faz-se necessário considerar a taxa de nascimento  $\lambda_k$  que descreve a taxa na qual os nascimentos ocorrem quando a população é de tamanho  $k$ . Da mesma forma, tem-se a taxa de morte  $\mu_k$  que especifica a taxa na qual mortes ocorrem na população de tamanho  $k$ . As taxas de nascimento e morte são independentes do tempo, dependendo apenas de  $E_k$ .



**Figura 2.1** – Diagrama de transição de estado para um processo de nascimento-morte [20] [21]

Considerando-se uma situação dinâmica, tem-se que a diferença entre a razão na qual o sistema entra em  $E_k$  e a taxa na qual o sistema deixa  $E_k$  deve ser igual a razão de alteração de fluxo naquele estado. Observa-se assim que, a razão na qual a probabilidade de fluxo em um certo estado no momento  $t$  é dada por [20] [21]:

$$\text{Fluxo de entrada em } E_k = \lambda_{k-1} P_{k-1}(t) + \lambda_{k+1} P_{k+1}(t) \quad (2.4)$$

enquanto o fluxo de saída de um certo estado no momento  $t$  é dado por [20] [21]:

$$\text{Fluxo de saída de } E_k = (\mu_k + \lambda_k) P_k(t) \quad (2.5)$$

## 2.5. SISTEMAS DE FILAS EM EQUILÍBRIO

Na situação de equilíbrio, o fluxo deve ser conservado, assim, o fluxo de entrada é igual ao fluxo de saída para um dado estado. Tem-se então para o estado  $E_k$  da Figura 2.1 [20] [21]:

$$\begin{aligned} \text{Fluxo de entrada em } E_k &= \text{Fluxo de saída de } E_k \\ \lambda_{k-1} p_{k-1} + \lambda_{k+1} p_{k+1} &= (\mu_k + \lambda_k) p_k \end{aligned} \quad (2.6)$$

Tem-se assim a equação de equilíbrio do sistema.

Levando-se em consideração a conservação de fluxo em qualquer estado, pode-se escrever a seguinte relação entre dois estados  $k-1$  e  $k$ :

$$\lambda_{k-1} p_{k-1} = \mu_k p_k \quad (2.7)$$

A solução da equação acima para  $p_k$  é:

$$p_k = ( \quad_{k-1} / \quad_k ) p_{k-1} \quad (2.8)$$

onde a probabilidade do estado  $k$  é função da probabilidade do estado anterior  $k - 1$ .

A solução geral para a equação 2.8 pode ser escrita como:

$$p_k = \frac{\quad_0 \quad_1 \quad_2 \quad_3 \quad_4 \quad_5 \quad_6 \quad_7 \quad_8 \quad_9 \quad_{10} \quad_{11} \quad_{12} \quad_{13} \quad_{14} \quad_{15} \quad_{16} \quad_{17} \quad_{18} \quad_{19} \quad_{20} \quad_{21} \quad_{22} \quad_{23} \quad_{24} \quad_{25} \quad_{26} \quad_{27} \quad_{28} \quad_{29} \quad_{30} \quad_{31} \quad_{32} \quad_{33} \quad_{34} \quad_{35} \quad_{36} \quad_{37} \quad_{38} \quad_{39} \quad_{40} \quad_{41} \quad_{42} \quad_{43} \quad_{44} \quad_{45} \quad_{46} \quad_{47} \quad_{48} \quad_{49} \quad_{50} \quad_{51} \quad_{52} \quad_{53} \quad_{54} \quad_{55} \quad_{56} \quad_{57} \quad_{58} \quad_{59} \quad_{60} \quad_{61} \quad_{62} \quad_{63} \quad_{64} \quad_{65} \quad_{66} \quad_{67} \quad_{68} \quad_{69} \quad_{70} \quad_{71} \quad_{72} \quad_{73} \quad_{74} \quad_{75} \quad_{76} \quad_{77} \quad_{78} \quad_{79} \quad_{80} \quad_{81} \quad_{82} \quad_{83} \quad_{84} \quad_{85} \quad_{86} \quad_{87} \quad_{88} \quad_{89} \quad_{90} \quad_{91} \quad_{92} \quad_{93} \quad_{94} \quad_{95} \quad_{96} \quad_{97} \quad_{98} \quad_{99}}{\quad_1 \quad_2 \quad_3 \quad_4 \quad_5 \quad_6 \quad_7 \quad_8 \quad_9 \quad_{10} \quad_{11} \quad_{12} \quad_{13} \quad_{14} \quad_{15} \quad_{16} \quad_{17} \quad_{18} \quad_{19} \quad_{20} \quad_{21} \quad_{22} \quad_{23} \quad_{24} \quad_{25} \quad_{26} \quad_{27} \quad_{28} \quad_{29} \quad_{30} \quad_{31} \quad_{32} \quad_{33} \quad_{34} \quad_{35} \quad_{36} \quad_{37} \quad_{38} \quad_{39} \quad_{40} \quad_{41} \quad_{42} \quad_{43} \quad_{44} \quad_{45} \quad_{46} \quad_{47} \quad_{48} \quad_{49} \quad_{50} \quad_{51} \quad_{52} \quad_{53} \quad_{54} \quad_{55} \quad_{56} \quad_{57} \quad_{58} \quad_{59} \quad_{60} \quad_{61} \quad_{62} \quad_{63} \quad_{64} \quad_{65} \quad_{66} \quad_{67} \quad_{68} \quad_{69} \quad_{70} \quad_{71} \quad_{72} \quad_{73} \quad_{74} \quad_{75} \quad_{76} \quad_{77} \quad_{78} \quad_{79} \quad_{80} \quad_{81} \quad_{82} \quad_{83} \quad_{84} \quad_{85} \quad_{86} \quad_{87} \quad_{88} \quad_{89} \quad_{90} \quad_{91} \quad_{92} \quad_{93} \quad_{94} \quad_{95} \quad_{96} \quad_{97} \quad_{98} \quad_{99}} \quad (2.9)$$

Escrevendo a probabilidade de equilíbrio  $p_k$  em termos de uma constante ainda desconhecida  $p_0$ , tem-se:

$$p_k = p_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\quad_i}{\quad_{i+1}} \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

Sendo  $p_k$  probabilidades, obedecem a lei de probabilidade total, assim:

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k = 1 \quad (2.11)$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k = \sum_{k=0}^{\infty} p_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\quad_i}{\quad_{i+1}} = p_0 + p_0 \sum_{k=1}^{\infty} \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\quad_i}{\quad_{i+1}} \quad (2.12)$$

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}} \quad (2.13)$$

Para que as probabilidades de estado de equilíbrio  $p_k$  existam e representem uma distribuição de probabilidades, precisa-se que  $0 < p_0 < 1$ . Na prática tem-se que o sistema pode ficar vazio por um curto período de tempo.

Matematicamente, tem-se [21]:

$$0 < p_0 < 1$$

$$0 < \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}}} \leq 1 \quad (2.14)$$

Para que esta condição seja obedecida, a relação  $\lambda_i / \mu_{i+1}$  tem que ser sempre menor que 1 (um), ou seja, o sistema está em equilíbrio quando a razão de chegada é menor que a razão com que o sistema processa essas chegadas.

## 2.6. SISTEMAS CLÁSSICOS DE FILAS: M/M/1

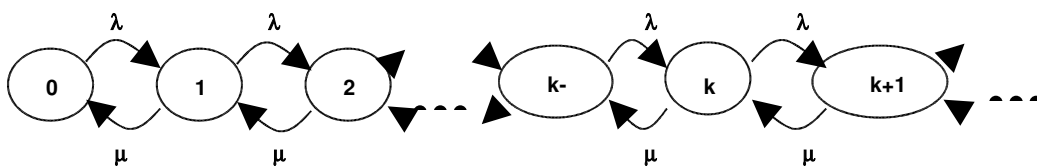
A fila M/M/1 é o sistema mais simples de filas e deve ser descrito pelos coeficientes de nascimento – morte abaixo [20]:

$$\lambda_k = \lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.15)$$

$$\mu_k = \mu \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.16)$$

Ou seja, todos os coeficientes de nascimento são iguais a uma constante  $\lambda$  e todos os coeficientes de morte são iguais a uma constante  $\mu$ .

Assume-se ainda que o espaço de enfileiramento é infinito e que os clientes são atendidos da seguinte forma: o primeiro a chegar é o primeiro a ser atendido. De acordo com as observações descritas acima, pode-se desenhar o seguinte diagrama de transição de estados para a fila M/M/1:



**Figura 2.2** – Diagrama de transição de estado para M/M/1 [20] [21]

Aplicando-se os coeficientes de nascimento – morte da fila M/M/1 à equação de probabilidade de equilíbrio  $p_k$  (2.10), tem-se [20]:

$$p_k = p_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda}{\mu} = p_0 \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \quad (2.17)$$

e  $p_0$  é igual a

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k} \quad (2.18)$$



A condição para que o sistema esteja em equilíbrio é ter-se  $\rho < 1$ , como visto anteriormente.

A série  $\sum_{k=0}^{\infty} \left( \frac{\rho}{1-\rho} \right)^k$  converge se, e somente se,  $\rho < 1$ . Para que  $\rho < 1$ , precisa-se que  $\lambda < \mu$ , ou seja, a razão com a qual as demandas chegam deve ser menor que a razão com que o sistema processa essas demandas, assim [21]:

$$p_0 = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{\rho}{1-\rho} \right)^k} = \frac{1}{1 + \frac{\rho}{1-\rho}} \quad (2.19)$$

Sendo  $\rho = \lambda/\mu$  a intensidade de tráfego, das condições de estabilidade do sistema, precisa-se que  $0 < \rho < 1$ . Pode-se escrever assim,

$$p_k = (1 - \rho) \left( \frac{\rho}{1-\rho} \right)^k \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.20)$$

A equação acima representa a solução para a probabilidade de equilíbrio quando há  $k$  clientes no sistema.

## 2.7. SISTEMAS DE FILAS M/M/m/m

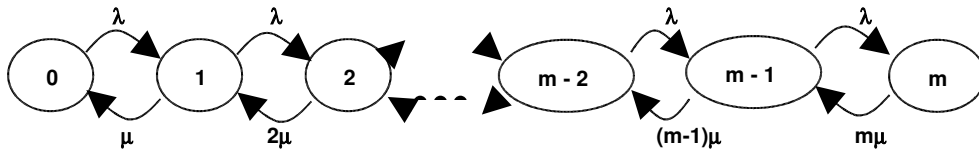
Um sistema de fila M/M/m/m possui  $m$  servidores disponíveis. Cada cliente novo ao chegar no sistema é encaminhado para ser atendido por um servidor. Porém,

se quando na chegada de um cliente, todos os servidores estão ocupados, este cliente é perdido, pois este sistema apresenta fila de espera limitada. Para o sistema de fila  $M/M/m/m$  tem-se os seguintes coeficientes de nascimento – morte [20]:

$$\begin{aligned} \lambda_k &= \begin{cases} \lambda & k < m \\ 0 & k \geq m \end{cases} \\ \mu_k &= \begin{cases} \mu & k = 1 \\ 2\mu & k = 2 \\ \vdots & \vdots \\ (m-1)\mu & k = m-1 \\ m\mu & k = m \end{cases} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\mu_k = k\mu \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2.22)$$

A Figura 2.3 mostra o diagrama de transição de estado para o sistema  $M/M/m/m$ :



**Figura 2.3** – Diagrama de transição de estado para  $M/M/m/m$  [20] [21]

Aplicando-se os coeficientes de nascimento – morte definidos acima à equação de probabilidades de equilíbrio  $p_k$  (2.10), tem-se:

$$p_k = p_0 \prod_{i=0}^{k-1} \frac{\lambda_i}{\mu_{i+1}} \quad k \leq m \quad (2.23)$$

ou

$$p_0 \begin{cases} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!} & k \leq m \\ 0 & k > m \end{cases}$$

$$p_k = \frac{\lambda^k}{\mu^k k!} p_0$$

(2.24)

Resolvendo a equação acima, para encontrar-se  $p_0$ , tem-se [21]:

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^m \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!}}$$

(2.25)

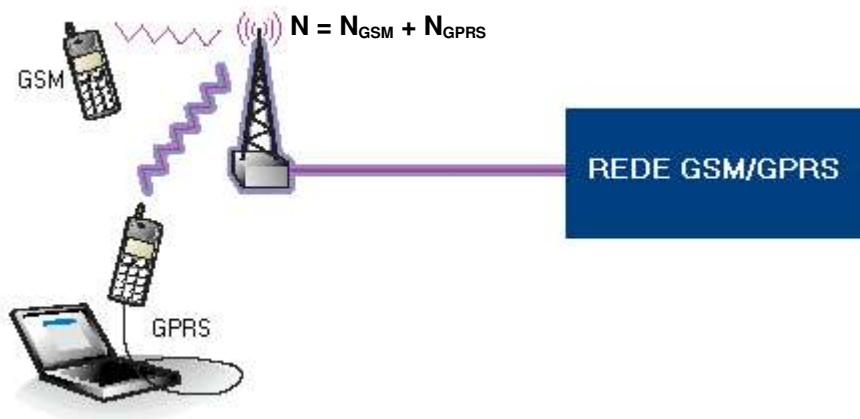
Este sistema é de grande importância para a telefonia, pois, a probabilidade  $p_m$  descreve a fração de tempo que todos os  $m$  servidores estão ocupados. A probabilidade de bloqueio  $p_m$  é chamada também de fórmula de perda de Erlang B. Esta fórmula é representada por  $B(m, \lambda/\mu)$  e é dada pela expressão abaixo [20]:

$$p_m = \frac{\left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^m / m!}{\sum_{k=0}^m \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^k / k!}$$

(2.26)

### 3. MODELAMENTO APLICADO A GSM E GPRS

Para a análise da rede GSM/GPRS, considera-se neste trabalho o tráfego relacionado a uma BTS [9] [10], sendo que esta BTS recebe um grupo de canais físicos  $N = N_{GSM} + N_{GPRS}$  como mostrado na Figura 3.1, onde  $N_{GSM}$  são os canais responsáveis pelo tráfego GSM e  $N_{GPRS}$  são os canais PDCH alocados para o tráfego GPRS. Os canais  $N_{GSM}$  podem também ser utilizados sob demanda para os serviços GPRS.



**Figura 3.1** – Rede integrada GSM/GPRS modelada

Assim, o modelo apresentado representa a interface aérea de uma única célula que atende as chamadas GSM de voz relacionadas a comutação por circuito e os serviços GPRS relacionados a comutação por pacote [10].

O sistema possui ainda um *buffer*, que armazena os pacotes IP quando todos os canais físicos estão ocupados [17]. Porém, a análise do comportamento desses pacotes IP e seu impacto no sistema serão alvo de futuras pesquisas.

Considera-se na análise do sistema a preempção das chamadas GSM, ou seja, as chamadas GSM tem prioridade de atendimento em relação aos serviços GPRS como mostrado na Figura 3.2 [20] [9] [22]. Assim, as chamadas GSM ao chegarem na rede são imediatamente atendidas e os serviços comutados por pacote tornam-se transparentes para estas chamadas [10] [17].

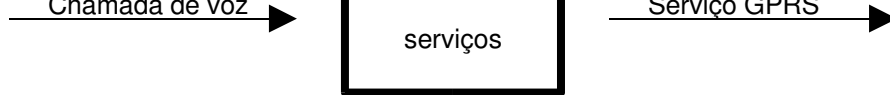
#### CHAMADAS ENTRANTES

Chamada de voz →  
 Serviço GPRS →  
 Chamada de voz →  
 Serviço GPRS →  
 Chamada de voz →

Rede com  
 preempção  
 das chamadas  
 GSM com

#### TRATAMENTO DAS CHAMADAS

Chamada de voz →  
 Chamada de voz →  
 Chamada de voz →  
 Chamada de voz →  
 Serviço GPRS →



**Figura 3.2 – Preempção de voz**

De acordo com a literatura disponível, considera-se que o tráfego GSM de voz e os serviços GPRS chegam ao sistema de acordo com Processos de Poisson com razão média de chegada  $\lambda_{GSM}$  e

$\lambda_{GPRS}$ , respectivamente. Esses dois processos são mutuamente independentes. O tempo médio de duração de uma chamada GSM é uma variável aleatória distribuída exponencialmente com valor médio igual a  $1/\mu_{GSM}$ , onde  $\mu_{GSM}$  é a razão média de partida de chamadas GSM [23] [24] [9] [10] [17].

Devido à preempção das chamadas de voz GSM, o comportamento do sistema para serviços de voz pode ser modelado por uma fila  $M/M/m/m$ , onde  $m$  é igual a  $N_{GSM}$ , o número de canais GSM [9] [17]. Assim, a probabilidade de bloqueio do serviço de voz é dada pela fórmula de Erlang B. O Tráfego escoado de voz  $T_{RAF}$ , que representa o uso dos canais físicos relacionado ao tráfego no sistema, é dado pelo número médio de chamadas na fila. Então [9] [24]:

$$T_{RAF} = E[m] = \sum_{m=1}^{N_{GSM}} m \cdot p(m) \quad (3.1)$$

onde  $p(m)$  é a probabilidade do estado de equilíbrio da fila  $M/M/m/m$ , representada pela equação abaixo [20] [22]:

$$p(m) = \frac{\left( \frac{N_{GSM}}{m!} \right)^m}{\sum_{k=0}^{N_{GSM}} \left( \frac{N_{GSM}}{k!} \right)^k}, \quad (0 \leq m \leq N_{GSM}) \quad (3.2)$$

O número médio de canais que podem ser alocados sob demanda para os serviços GPRS, é dado pelo número médio de canais físicos GSM que não estão sendo usados. Assim,  $NC_{SD}$  é representado pelas equações abaixo:

$$NC_{SD} = N_{GSM} - \sum_{m=1}^{N_{GSM}} m \cdot p(m) = N_{GSM} - T_{RAF} \quad (3.3)$$

O número médio de canais que podem ser alocados para o GPRS é dado por todos os canais físicos disponíveis para escoar o tráfego GPRS, ou seja, o número médio de canais que podem ser utilizados pelo tráfego GPRS é representado pelos canais PDCH dedicados para o tráfego GPRS mais os canais GSM disponíveis que podem ser alocados sob demanda para os serviços GPRS. Assim,  $NC_{MAX}$ , é representado pelas equações abaixo:

$$NC_{MAX} = N_{GPRS} + NC_{SD} = N - T_{RAF} \quad (3.4)$$

Utilizando as equações (3.3) e (3.4), é possível calcular duas medidas de extrema importância para a análise de desempenho da rede integrada GSM/GPRS, os *throughputs* sob demanda e os *throughputs* máximos, ou ainda, as capacidades médias sob demanda e as capacidades médias máximas de transmissão de pacotes sob determinada quantidade de tráfego de voz.

O *throughput* máximo é representado pelo produto da taxa de dados do esquema de codificação utilizado pelo sistema com o número máximo de canais disponíveis para os serviços GPRS de acordo com as equações abaixo:

$$\text{Throughput utilizando CS-1 (9,05 kbps)} \rightarrow TH_{MAX} = 9.05 \times NC_{MAX} \text{ (kbps)} \quad (3.5)$$

$$\text{Throughput utilizando CS-2 (13,4 kbps)} \rightarrow TH_{MAX} = 13.4 \times NC_{MAX} \text{ (kbps)} \quad (3.6)$$

$$\text{Throughput utilizando CS-3 (15,6 kbps)} \rightarrow TH_{MAX} = 15.6 \times NC_{MAX} \text{ (kbps)} \quad (3.7)$$

$$\text{Throughput utilizando CS-4 (21,4 kbps)} \rightarrow TH_{MAX} = 21.4 \times NC_{MAX} \text{ (kbps)} \quad (3.8)$$

O *throughput* sob demanda é representado pelo produto da taxa de dados do esquema de codificação utilizado pelo sistema com o número de canais alocados sob demanda para os serviços GPRS de acordo com as equações abaixo:

$$\text{Throughput utilizando CS-1 (9,05 kbps)} \rightarrow TH_{SD} = 9.05 \times NC_{SD} \text{ (kbps)} \quad (3.9)$$

$$\text{Throughput utilizando CS-2 (13,4 kbps)} \rightarrow TH_{SD} = 13.4 \times NC_{SD} \text{ (kbps)} \quad (3.10)$$

$$\text{Throughput utilizando CS-3 (15,6 kbps)} \rightarrow TH_{SD} = 15.6 \times NC_{SD} \text{ (kbps)} \quad (3.11)$$



$$\textit{Throughput} \text{ utilizando CS-4 (21,4 kbps)} \rightarrow TH_{SD} = 21.4 \times NC_{SD} \text{ (kbps)} \quad (3.12)$$

#### **4. ANÁLISE DE DESEMPENHO DA REDE GSM/GPRS**

Neste capítulo são apresentados dez gráficos gerados com o objetivo de analisar os impactos da implementação do GPRS em redes GSM. Os parâmetros utilizados para a geração das Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 são mostrados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** – Parâmetros utilizados para a análise da rede GSM/GPRS [9]

MODELO	PARÂMETROS	VALORES
REDE INTEGRADA GSM/GPRS	Número de canais físicos (N)	20
	Número de canais PDCH ( $N_{GPRS}$ )	0, 1, 2, 4
	Taxa de transferência de canal PDCH (CS-2)	13,4 kbps
TRÁFEGO	Porcentagem de usuários GSM	95%
	Porcentagem de usuários GPRS	5%
	Tempo médio de duração de uma chamada GSM - $T_{GSM}$	2 min.
	Taxa de chegada de chamadas GSM/GPRS ( $\lambda = \lambda_{GSM} + \lambda_{GPRS}$ )	0,0 – 0,56 chamada/seg.

De acordo com a Tabela 4.1, são utilizadas quatro diferentes configurações para a simulação da rede GSM/GPRS, ou seja, faz-se a análise da rede utilizando 0, 1, 2 ou 4 canais de dados PDCH. Assim, é possível analisar os impactos de alocar canais físicos como PDCH. O número total de canais físicos é 20. O esquema de codificação utilizado é o CS-2 que prove taxa de transferência de 13,4 kbps. A taxa de chegada de chamadas é variada entre 0,0 e 0,56 chamada por segundo para possibilitar o estudo do impacto desta variação na rede. A porcentagem de usuários GSM é fixada em 95%, enquanto a porcentagem de usuários GPRS é 5% [9] [25].

Já as Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam a máxima taxa de transferência variando-se a porcentagem de usuários GSM e GPRS e os esquemas de codificação. As Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 mostram os parâmetros utilizados para geração das Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, respectivamente.

**Tabela 4.2** – Parâmetros utilizados para a análise da rede GSM/GPRS (Figura 4.7)

MODELO	PARÂMETROS	VALORES
REDE INTEGRADA GSM/GPRS	Número de canais físicos (N)	20
	Número de canais PDCH ( $N_{GPRS}$ )	2
	Taxa de transferência de canal PDCH (CS-2)	13,4 kbps

TRÁFEGO	Porcentagem de usuários GSM	95%, 90%, 85%, 80%
	Porcentagem de usuários GPRS	5%, 10%, 15%, 20%
	Tempo médio de duração de uma chamada GSM - $T_{GSM}$	2 min.
	Taxa de chegada de chamadas GSM/GPRS ( $\lambda = \lambda_{GSM} + \lambda_{GPRS}$ )	0,0 – 0,56 chamada/seg.

**Tabela 4.3** – Parâmetros utilizados para a análise da rede GSM/GPRS (Figura 4.8)

MODELO	PARÂMETROS	VALORES
REDE INTEGRADA GSM/GPRS	Número de canais físicos (N)	20
	Número de canais PDCH ( $N_{GPRS}$ )	4
	Taxa de transferência de canal PDCH (CS-2)	13,4 kbps
TRÁFEGO	Porcentagem de usuários GSM	95%, 90%, 85%, 80%
	Porcentagem de usuários GPRS	5%, 10%, 15%, 20%
	Tempo médio de duração de uma chamada GSM - $T_{GSM}$	2 min.
	Taxa de chegada de chamadas GSM/GPRS ( $\lambda = \lambda_{GSM} + \lambda_{GPRS}$ )	0,0 – 0,56 chamada/seg.

**Tabela 4.4** – Parâmetros utilizados para a análise da rede GSM/GPRS (Figura 4.9)

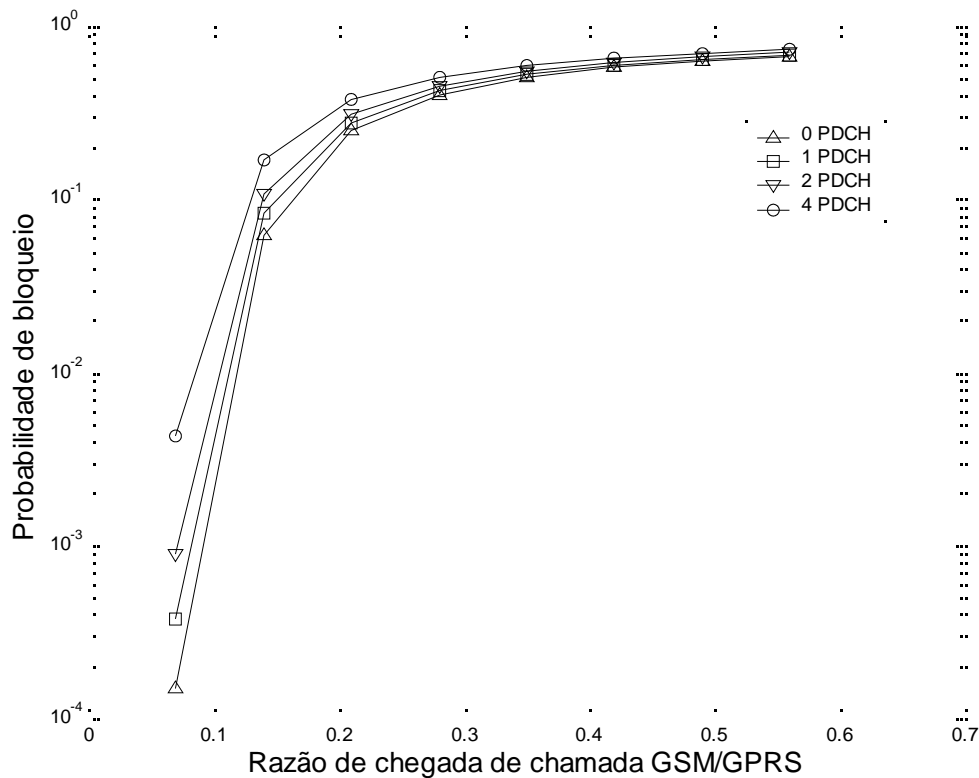
MODELO	PARÂMETROS	VALORES
REDE INTEGRADA GSM/GPRS	Número de canais físicos (N)	20
	Número de canais PDCH ( $N_{GPRS}$ )	2
	Taxa de transferência de canal PDCH	CS-1 – 9,05 kbps CS-2 – 13,4 kbps CS-3 – 15,6 kbps CS-4 – 21,4 kbps
TRÁFEGO	Porcentagem de usuários GSM	95%
	Porcentagem de usuários GPRS	5%
	Tempo médio de duração de uma chamada GSM - $T_{GSM}$	2 min.
	Taxa de chegada de chamadas GSM/GPRS ( $\lambda = \lambda_{GSM} + \lambda_{GPRS}$ )	0,0 – 0,56 chamada/seg.

**Tabela 4.5** – Parâmetros utilizados para a análise da rede GSM/GPRS (Figura 4.10)

MODELO	PARÂMETROS	VALORES
--------	------------	---------

REDE INTEGRADA GSM/GPRS	Número de canais físicos (N)	20
	Número de canais PDCH ( $N_{\text{GPRS}}$ )	4
	Taxa de transferência de canal PDCH	CS-1 – 9,05 kbps CS-2 – 13,4 kbps CS-3 – 15,6 kbps CS-4 – 21,4 kbps
TRÁFEGO	Porcentagem de usuários GSM	95%
	Porcentagem de usuários GPRS	5%
	Tempo médio de duração de uma chamada GSM - $T_{\text{GSM}}$	2 min.
	Taxa de chegada de chamadas GSM/GPRS ( $\lambda = \lambda_{\text{GSM}} + \lambda_{\text{GPRS}}$ )	0,0 – 0,56 chamada/seg.

A Figura 4.1 apresenta a probabilidade de bloqueio de voz de acordo com a fórmula de Erlang B. Pode-se observar nesta figura que, para qualquer configuração de rede utilizada, reservando-se 0 PDCH, 1 PDCH, 2 PDCHs ou 4 PDCHs, a probabilidade de bloqueio de voz é aproximadamente a mesma para um tráfego entre 0,3 e 0,6 chamada por segundo. Percebe-se assim que, a alocação de canais físicos PDCH não impacta no desempenho dos serviços de voz da rede GSM após um determinado valor de tráfego oferecido.

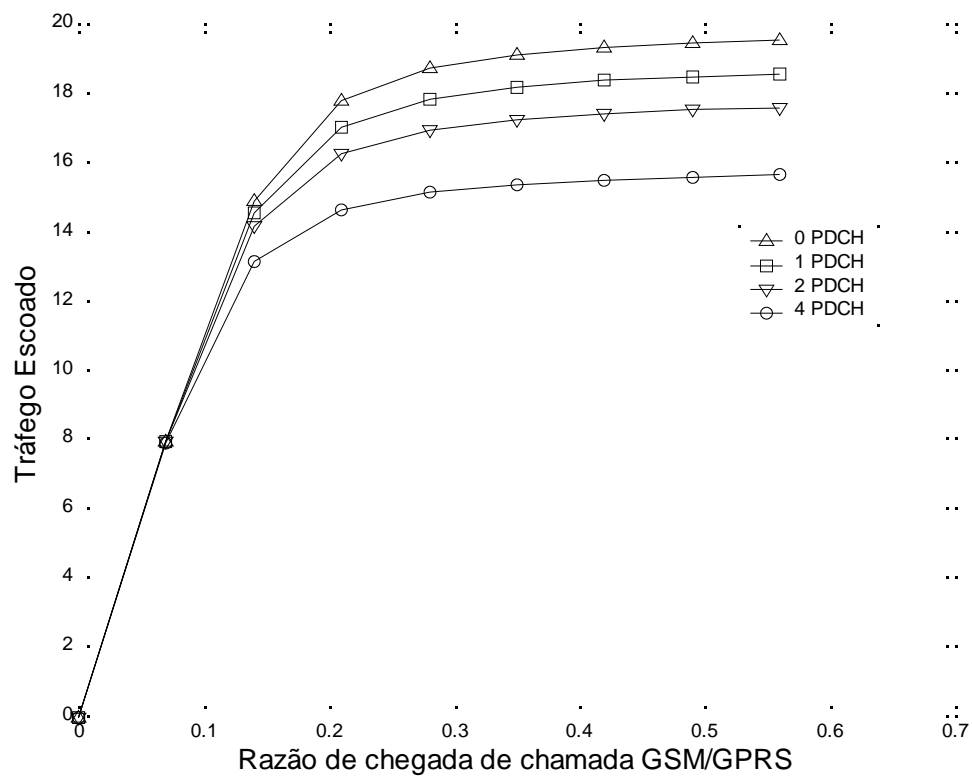


**Figura 4.1** – Probabilidade de bloqueio

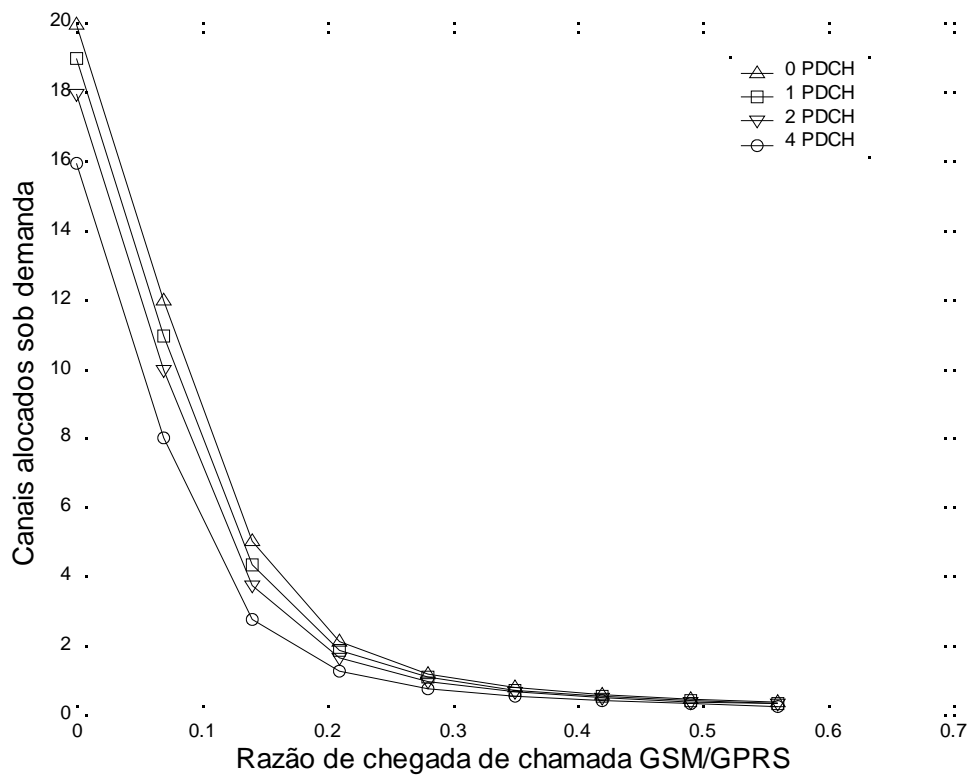
A Figura 4.2 mostra o tráfego de voz escoado de acordo com o tráfego GSM/GPRS oferecido e levando-se em consideração quatro diferentes configurações de rede: reservar 0 PDCH, 1 PDCH, 2 PDCHs ou 4 PDCHs. Conclui-se que aumentando o tráfego de voz na rede, mais canais físicos responsáveis pelo tráfego de voz são necessários, assim, quando a rede está utilizando a configuração de 0 PDCH é possível escoar mais tráfego de voz do que quando a rede está utilizando a configuração de 4 PDCHs.

Percebe-se então, através da Figura 4.2 que, se nenhum canal físico é alocado como PDCH, todos esses canais físicos são utilizados para voz, devido a preempção das chamadas de voz em relação aos serviços GPRS, não havendo canais disponíveis para os serviços de dados. Este cenário é claramente mostrado na Figura 4.3. Esta figura mostra o número de canais disponíveis sob demanda para os serviços

GPRS. Percebe-se através da Figura 4.3 que, para taxas de chegada de chamada entre 0,4 e 0,6 chamada por segundo, quase nenhum canal físico é alocado sob demanda para GPRS, ficando este serviço dependendo apenas dos canais PDCH. Daí a importância de alocar-se canais físicos como PDCH para garantir a qualidade dos serviços de dados.

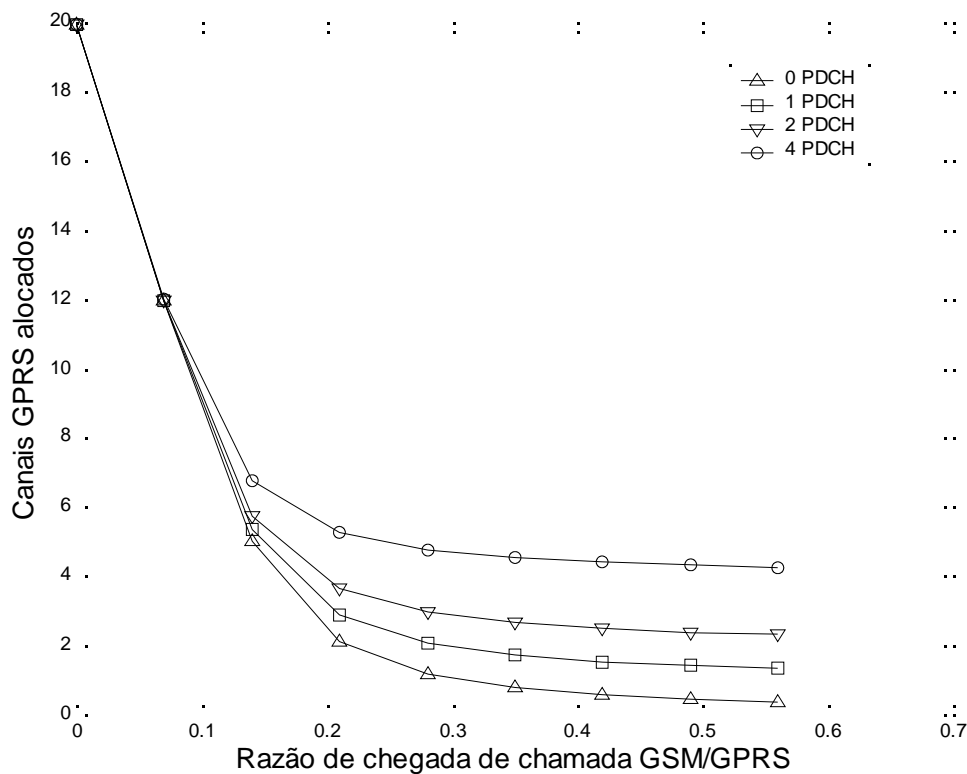


**Figura 4.2** – Tráfego de voz escoado



**Figura 4.3** – Número de canais alocados sob demanda para o tráfego GPRS

Já a Figura 4.4 mostra o número total de canais utilizados para os serviços GPRS, ou seja, os canais sob demanda mais os canais PDCH alocados apenas para os serviços de dados. Mais uma vez, percebe-se claramente que, para altas taxas de tráfego oferecido, apenas os canais PDCH reservados para dados estão disponíveis para os serviços GPRS.



**Figura 4.4** – Número máximo de canais alocados para GPRS

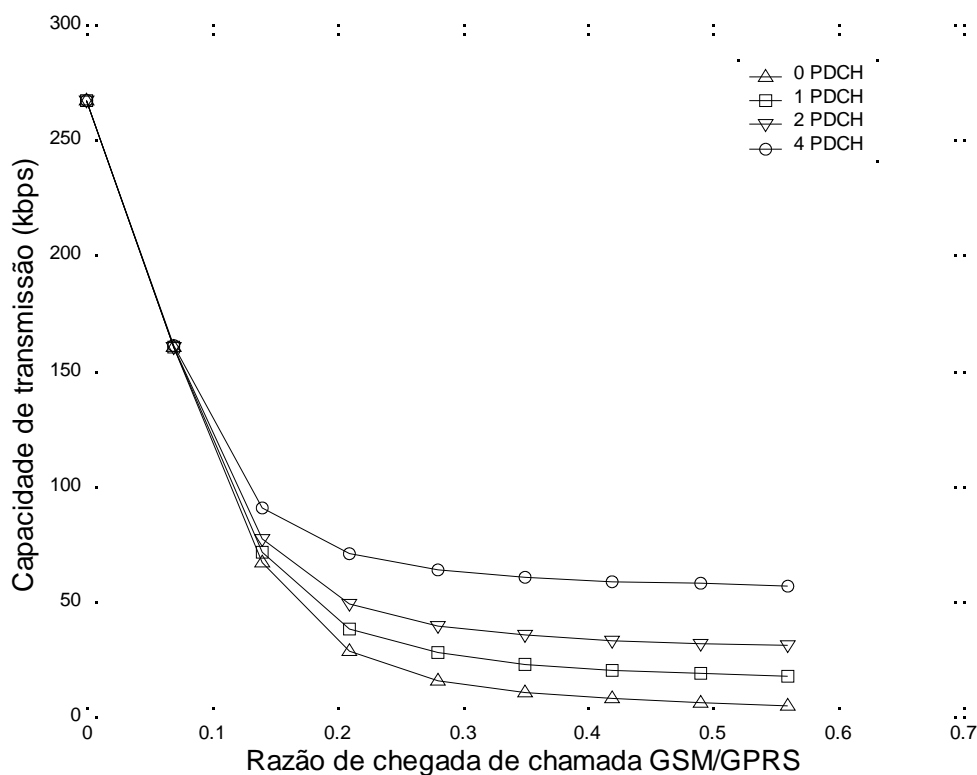
As Figuras 4.5 e 4.6 mostram a taxa de transmissão de dados oferecida ou o *throughput* para os usuários utilizando o número de canais mostrado nas Figuras 4.4 e 4.3 respectivamente. A Figura 4.5 mostra a máxima taxa de transmissão de dados média oferecida utilizando-se os canais PDCH e os canais alocados sob demanda para GPRS nas quatro configurações de rede: 0 PDCH, 1 PDCH, 2 PDCHs e 4 PDCHs. Já a Figura 4.6, mostra a taxa de transmissão de dados média dependente apenas dos canais alocados sob demanda para GPRS. Através da análise destas figuras, percebe-se que as taxas de transmissão de dados satisfatórias são garantidas apenas utilizando-se canais PDCH alocados permanentemente para serviços GPRS. Pode-se notar, por exemplo, na Figura 4.5 que, para 0,56 chamada por segundo, utilizando 4 PDCH tem-se como máxima taxa média de transmissão de dados o valor de 57,85 kbps, este valor diminui para 18,75 kbps se a rede estiver utilizando apenas



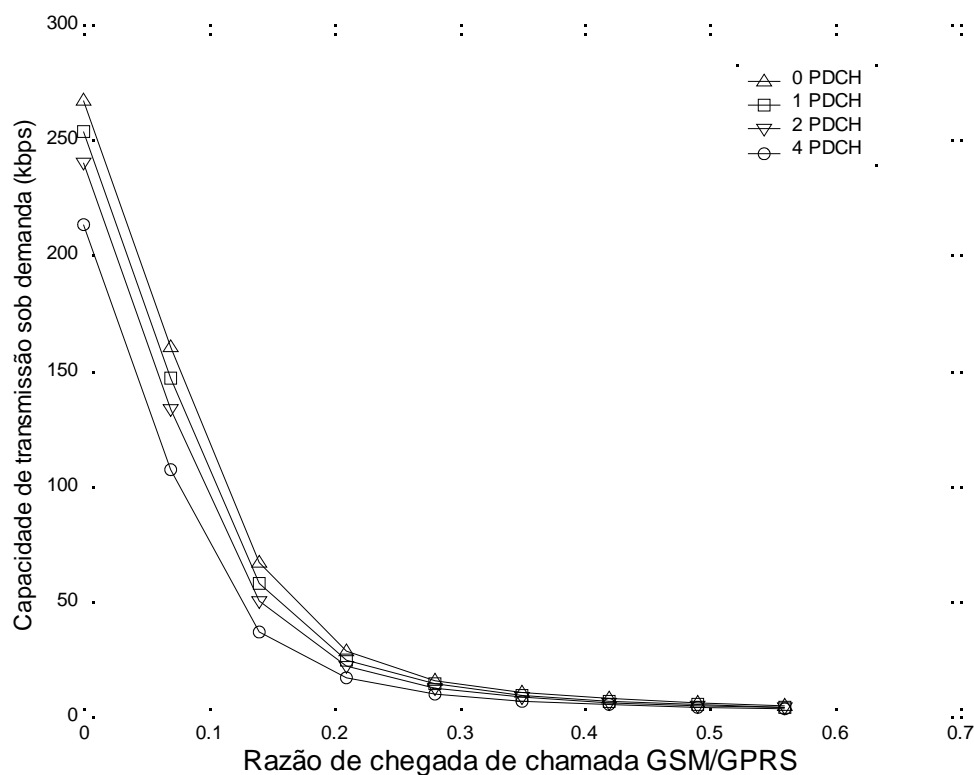
1 PDCH. Para a configuração de rede de 0 PDCH, a máxima taxa de transmissão de dados é de 5,74 kbps, o que é muito baixo.

A Figura 4.6 mostra que para as configurações de rede 0 PDCH, 1 PDCH, 2 PDCHs e 4 PDCHs, tem-se respectivamente as seguintes taxas de transmissão de dados utilizando-se apenas os canais alocados sob demanda para GPRS: 5,75 kbps, 5,35 kbps, 4,97 kbps e 4,25 kbps. Estes valores demonstram que a rede não consegue garantir serviços de dados com boa qualidade de serviço utilizando apenas canais alocados sob demanda.

Apesar da análise dos efeitos dos pacotes IP ser necessária em uma rede baseada em pacotes como a rede GPRS, as Figuras 4.5 e 4.6 mostram as taxas de transmissão de dados oferecidas utilizando-se canais PDCH e canais alocados sob demanda para GPRS dependendo do tráfego oferecido na rede GSM/GPRS, o que é de grande interesse na análise do desempenho destas redes.



**Figura 4.5 – Capacidade de transmissão máxima**



**Figura 4.6 – Capacidade de transmissão sob demanda**

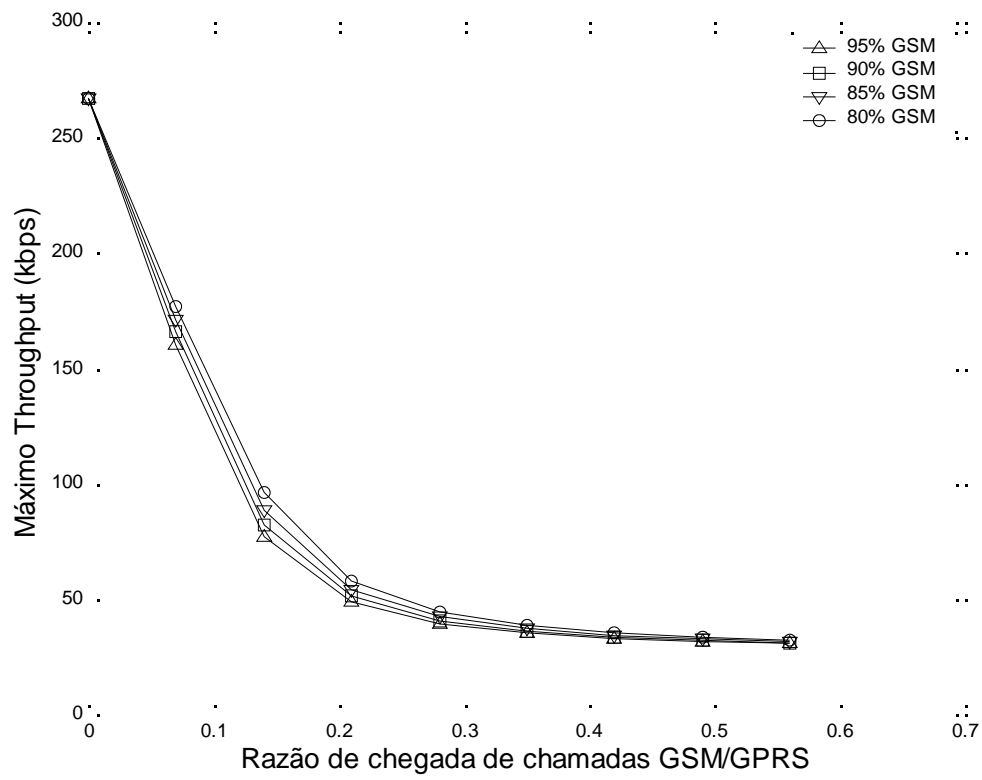
A Tabela 4.6 mostra os valores de taxa média de transmissão de dados máxima e sob demanda para 0,35 chamada por segundo utilizando as quatro configurações de rede: 0 PDCH, 1 PDCH, 2 PDCHs e 4 PDCHs. Se, por exemplo, tem-se 15 usuários GPRS sendo atendidos simultaneamente pela célula em questão e deseja-se prover a esses usuários um perfil de qualidade de serviços com 3,5 kbps por usuário, a taxa máxima requerida é  $15 \times 3,5 \text{ kbps} = 52,5 \text{ kbps}$ . Assim, a única

configuração que garante a qualidade de serviço desejada acima, é a utilização de 4 PDCHs na rede integrada GSM/GPRS, provendo uma taxa máxima de transmissão de dados de 61,56 kbps.

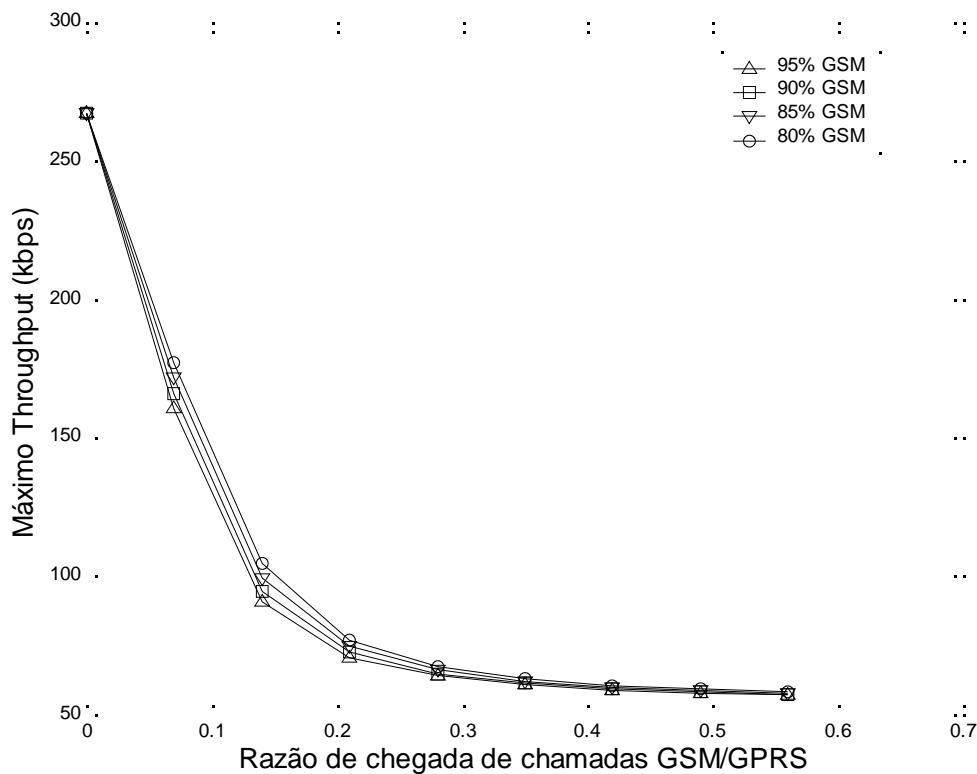
**Tabela 4.6** – Valores de taxa de transmissão de dados

<b>Configuração da rede</b>	<b>TH<sub>MAX</sub> (kbps)</b>	<b>TH<sub>SD</sub> (kbps)</b>
0 PDCH	11,46	11,46
1 PDCH	23,89	10,49
2 PDCH	36,39	9,59
4 PDCH	61,56	7,96

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram a máxima taxa de transmissão de dados ou máximo *throughput* utilizando-se 2 PDCHs e 4 PDCHs respectivamente e, variando-se a percentagem de usuários GPRS entre 5% e 20% e a percentagem de usuários GSM entre 95% e 80%. Analisando-se estas figuras, percebe-se que a variação na quantidade de usuários na rede, não acarreta impactos consideráveis na taxa de transmissão de dados oferecida. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram que, para os quatro casos considerados de variação de quantidade de usuários na rede, a taxa de transmissão de dados é quase a mesma.



**Figura 4.7** – Max. *throughput* utilizando-se CS-2 e 2 PDCHs

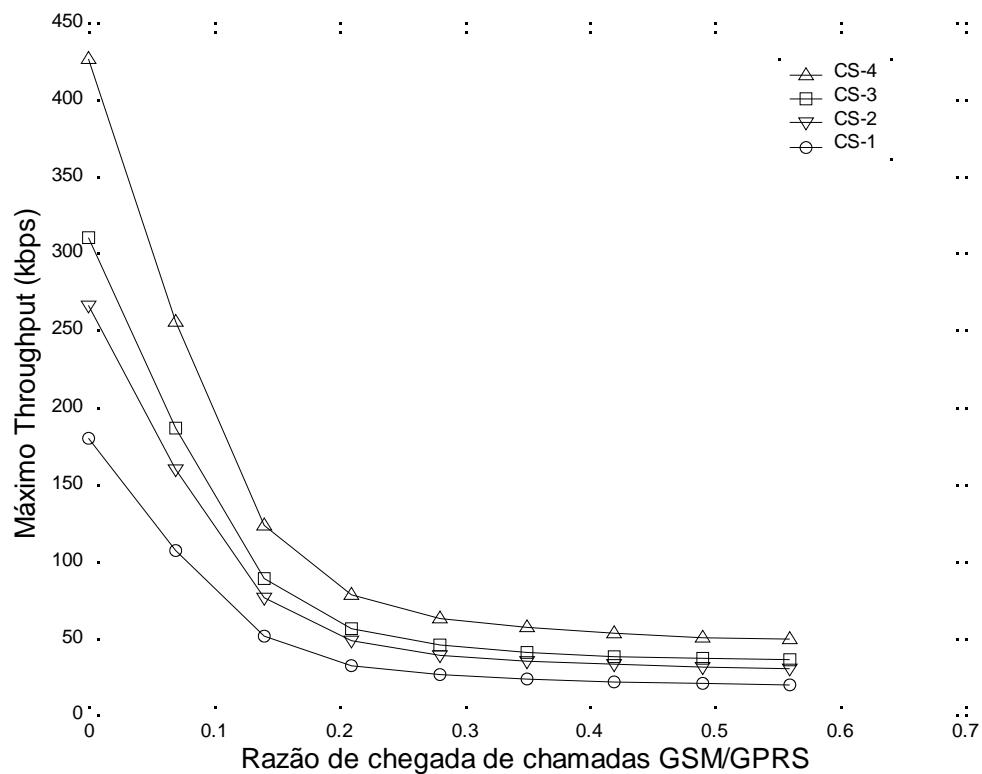


**Figura 4.8** – Max. *throughput* utilizando-se CS-2 e 4 PDCHs

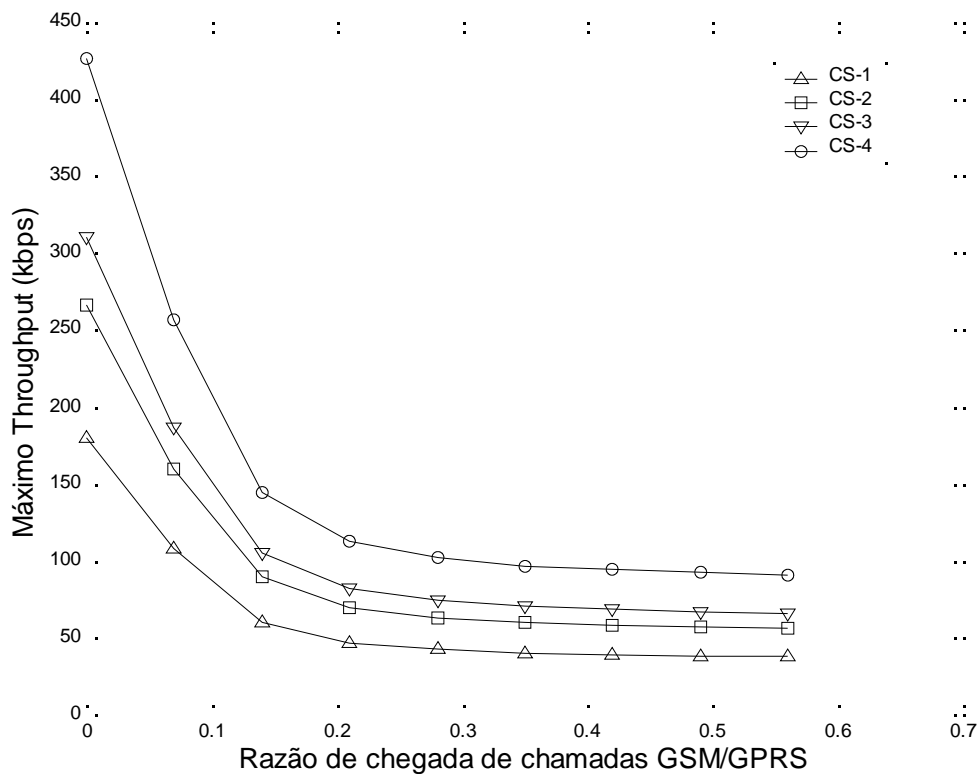
As Figuras 4.9 e 4.10 mostram a máxima taxa de transmissão de dados ou máximo *throughput* utilizando-se 2 PDCHs e 4 PDCHs respectivamente e, variando-se o esquema de codificação utilizado na rede. Cada esquema de codificação utilizado, CS-1, CS-2, CS-3 e CS-4, prove diferentes taxas de transmissão nos canais PDCH, 9,05 kbps, 13,4 kbps, 15,6 kbps, 21,4 kbps, respectivamente. Assim, de acordo com as figuras mostradas abaixo, utilizando-se CS-4 e 4 PDCHs tem-se as maiores taxas de transmissão de dados. Porém, como mencionado no capítulo 1 (item 1.3.3), utilizar os esquemas de codificação CS-1 e CS-2 não requer alterações na rede e, utilizar os esquemas de codificação CS-3 e CS-4 requer *upgrades* na rede, havendo a necessidade de investimentos por parte da operadora na rede celular. Então, de forma satisfatória, a operadora pode utilizar em sua configuração de rede 4 PDCHs e CS-2,

provendo ao usuário taxas de transmissão de dados que garantem uma boa qualidade de serviço como mostrado na Figura 4.10.

É importante notar que as taxas de transmissão médias mostradas nas figuras neste capítulo não representam a taxa de transmissão oferecida para o usuário final, visto que, neste trabalho não é levado em conta o comportamento dos pacotes IP, o *overhead* dos pacotes IP e a troca de sinalização entre os nós da rede.



**Figura 4.9** – Max. *throughput* utilizando-se 2 PDCHs e dif. esquemas de codificação



**Figura 4.10** – Max. *throughput* utilizando-se 4 PDCHs e dif. esquemas de codificação

## CONCLUSÃO

Este trabalho abordou os impactos de integrar a tecnologia GPRS à rede GSM existente e o desempenho da rede GSM/GPRS.

No capítulo 1, foram apresentados os principais conceitos das redes GSM e GPRS, definindo-se os novos nós necessários na rede GSM para implementação do GPRS, esquemas de codificação utilizados e pilhas de protocolos, abordando-se também a qualidade de serviço nas redes GPRS.

No capítulo 2, foram apresentados os fundamentos matemáticos necessários para o modelamento das redes GSM e GPRS. Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos fundamentais de teoria das filas, como: processo de Markov, processo de nascimento-morte e sistemas de filas.

No capítulo 3, foi apresentado um modelo analítico baseado em uma fila M/M/m/m. Este modelo foi utilizado para avaliar o desempenho da rede integrada GSM/GPRS levando-se em consideração a quantidade de chamadas GSM e GPRS que chegam no sistema. Para garantir a qualidade de serviço dos serviços de voz após a integração do GPRS na rede GSM, utilizou-se a aplicação de preempção às chamadas de voz. Foram apresentadas as definições matemáticas para a probabilidade de bloqueio de voz, tráfego de voz escoado, cálculo do número médio de canais GPRS, cálculo do número médio de canais GPRS alocados sob demanda e taxa média de transmissão de dados para cada esquema de codificação utilizado.

No capítulo 4, foram apresentadas medidas que podem auxiliar na análise do desempenho da rede integrada GSM/GPRS e ainda na análise dos impactos de se implementar a tecnologia GPRS em redes GSM. Todas as medidas apresentadas levam em consideração a preempção dos serviços de voz em relação aos serviços GPRS.

Foram mostradas e avaliadas no capítulo 4 medidas quantitativas para a probabilidade de bloqueio de voz, tráfego de voz escoado, número de canais GPRS utilizados e taxa média de transmissão de dados reservando-se 0, 1, 2 ou 4 canais de dados PDCH. Através da análise da probabilidade de bloqueio de voz, observou-se que, para qualquer configuração de rede utilizada, 0 PDCH, 1 PDCH, 2 PDCHs ou 4 PDCHs, essa probabilidade é aproximadamente a mesma para um tráfego entre 0,3 e 0,6 chamada por segundo, onde foi mostrado que após um determinado valor de tráfego oferecido, o desempenho dos serviços de voz da rede GSM não é impactado pela alocação de canais físicos PDCH.

A análise da quantidade de canais físicos alocados sob demanda para os serviços GPRS mostrou a necessidade de se reservar canais físicos de dados PDCH permanentemente para prover serviços GPRS com boa qualidade de serviço e boas taxas de transmissão. Concluí-se assim que, uma boa qualidade de serviço de dados



só pode ser garantida através de uma alocação permanentemente de canais físicos para os serviços GPRS.

Foram apresentados também no Capítulo 4 os valores de taxa média de dados levando-se em consideração os canais físicos permanentemente alocados para GPRS, os canais físicos alocados sob demanda para GPRS e o esquema de codificação utilizado. Em todas as análises realizadas, pode-se perceber que as melhores taxas de transmissão de dados são alcançadas quando se têm canais físicos alocados permanentemente para os serviços GPRS. É importante ressaltar que as taxas de transmissão médias mostradas não representam a taxa de transmissão oferecida para o usuário final, visto que, neste trabalho não é levado em conta o comportamento dos pacotes IP, o *overhead* dos pacotes IP e a troca de sinalização entre os nós da rede.

Através do modelo e medidas apresentados neste trabalho, o projetista de redes GSM/GPRS pode calcular o impacto da integração do GPRS nas redes GSM, a quantidade de PDCHs necessária para a rede prover serviços de dados com qualidade de serviço satisfatória e as taxas de transmissão de dados desejadas.

Como ressaltado anteriormente, as medidas aqui apresentadas representam os primeiros esforços de um trabalho de análise de desempenho da rede GSM/GPRS, visto que, não levaram em conta os impactos da utilização dos pacotes IP. Sendo assim, sugere-se que este estudo seja alvo de futuras pesquisas e resulte em novos trabalhos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GORALSKI, Walter; KOLON, Matthew. "IP Telephony", McGraw-Hill, 2000.
  
- [2] MEYER, M.; "TCP Performance over GPRS", Proc. 1<sup>st</sup> Wireless Communications and Networking Conference, New Orleans, 1999.
  
- [3] KALDEN, R.; MEIRICK, I.; MEYER, M.; "Wireless Internet Access Based on GPRS" IEEE Personal Comm. 7, 8-18, Apr. 2000.
  
- [4] MALOMSOKT, Sz.; NÁDAS, Sz.; TÓTH, G.; ZARÁNDY, P.; "Simulation Based GPRS Network Dimensioning", Proc. 12<sup>th</sup> ITC Specialist Seminar on Mobile Systems and Mobility, Norway, 2000.
  
- [5] STUCKMANN, P.; MULLER, F.; "GPRS Radio Network Capacity and Quality of Service using Fixed and On-Demand Channel Allocation Techniques", Proc. 51<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference, Tokyo, Japan, 2000.
  
- [6] MARSAN, M. Ajmone; MARANO, S.; MASTROIANNI, C.; MEO, M.; "Performance Analysis of Cellular Mobile Communication Networks Supporting Multimedia Services", Mobile Networks and Applications (MONET) 5, 167-177, 2000.

- [7] BOUCHERIE, R. J.; LITJENS, R.; "Radio Resource Sharing in a GSM/GPRS Network", Proc. 12<sup>th</sup> ITC Specialist Seminar on Mobile Systems and Mobility, Norway, 2000.
- [8] ERMEL, M.; BEGAIN, K.; MULLER, T.; SCHULER, J.; SCHWEIGEL, M.; "Analytical Comparison of Different GPRS Introduction Strategies", Proc. 3<sup>rd</sup> ACM Int. Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Boston, MA, 3-10, 2000.
- [9] LINDEMANN, C.; THÜMMLER, A.; "Performance Analysis of the General Packet Radio Service", University of Dortmund, Department of Computer Science, Germany, 2001 IEEE.
- [10] CHEN, Wei-Yeh; WU, Jean-Lien; LIU, Hung-Huan; "Performance Analysis of Radio Resource Allocation in GSM/GPRS Networks", National Taiwan University of Science and Technology, 2002 IEEE.
- [11] CARVALHO, G. H. S.; SANTOS, M. B. L.; COSTA, J. C. W. A.; "Performance Analysis of GSM/GPRS Network", DEEC/CT/UFPA, ITS 2002.
- [12] GRANBOHM, Hakan; WIKLUND, Joakim. "GPRS – General packet radio service", Ericsson Review No. 2, 1999.
- [13] BETTSTETTER, Christian; VOGEL, Hans-Jorg; EBERSPACHER, Jorg. "GSM Phase 2+. General Packet Radio Services GPRS: architecture, protocols and air interface", IEEE Communications Surveys, Third Quarter 1999, vol. 2 no. 3. ([www.comsoc.org/pubs/surveys](http://www.comsoc.org/pubs/surveys))

[14] GUDDING, Hakon; "Capacity Analysis of GPRS", Revised Edition of Master Thesis, Department of Telematics, Faculty of Electrical Engineering and Telecommunications, Norwegian University of Science and Technology, 2000.

[15] ETSI; "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); General Packet Radio Service (GPRS); Service description; Stage 2", GSM 03.60 version 7.4.1 Release 1998.

[16] EKEROTH, Lars; HEDSTROM, Per-Martin. "GPRS support nodes", Ericsson Review No. 3, 2000.

[17] FOH, Chuan; MEINI, Beatrice; WYDROWSKI, Bartek; ZUKERMAN, Moshe; "Modeling and Performance Evolution of GPRS", The University of Melbourne, Università di Pisa, 2001 IEEE.

[18] KARAGIANNIS, Georgios; "QoS support in GPRS", EMN Wireless Multimedia Research, Ericsson.

[19] TATARANNI, F.; PORCARELLI, S.; DI GIANDOMENICO, F.; BONDAVALLI, A.; SIMONCINI, L.; "Modeling and Analysis of the Behavior of GPRS systems", University of Pisa, IEI/CNR, University of Firenze, 2001 IEEE.

[20] KLEINROCK, Leonard; "Queueing Systems, Volume 1: Theory", John Wiley & Sons, 1975.

[21] CARVALHO, Gláucio Haroldo Silva de; "Análise da qualidade de serviço aplicada a redes móveis celulares com alocação de canal fixa", Dissertação de Mestrado,

Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, 2001.

[22] GROSS, D.; HARRIS, C.; “Fundamentals of Queueing Theory”, John Wiley & Sons, 1974.

[23] RAJARATNAM, M.; TAKAWIRA, F.; “A single Cell model for the performance analysis of the radio layer in the GSM phase 2+ (GPRS) Networks under voice and data traffic”, University of Natal, South Africa, 2001.

[24] KATZELA, I.; NAGHSHINEH, M.; “Channel Assignment Schemes for Celular Mobile Telecommunications Systems: A Comprehensive Survey”, IEEE Personal Communications, June 1999.

[25] MAHDAVI, M.; TAFAZOLLI, R.; “Analysis of integrated voice and data for GPRS”, 3G mobile communications technologies, conference publication, No 471, 2000.