



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE COMUNICAÇÕES - DECOM

Análise de Desempenho dos Sistemas Móveis Celulares 2G, 2,5G e 3G

Por

Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira

**Tese submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica
da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a
obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.**

Banca Examinadora :

Prof. Dr. Renato Baldini Filho (Orientador) - FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Bartolomeu Ferreira Uchôa Filho - UFSC
Prof. Dr. Celso de Almeida - FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Leonardo de Souza Mendes - FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho - PUCC

Campinas, 12 de Agosto de 2005.

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

OL4a Oliveira, Carlos Henrique Rodrigues de
Análise de desempenho dos sistemas móveis celulares
2G, 2,5G e 3G / Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira. --
Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Renato Baldini Filho.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Telefonia celular. 2. Sistema de comunicação móvel.
3. TCP/IP (Protocolo de rede de computação). 4. Métodos
de simulação. 5. Teoria das filas. I. Baldini Filho, Renato.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Performance analysis of 2G, 2.5G and 3G cellular mobile systems.

Palavras-chave em Inglês: Cellular telephony, Mobile communication system, TCP/IP
(Computer network protocol), Simulation methods, Queuing
theory.

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática.

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Bartolomeu Ferreira Uchôa Filho, Celso de Almeida, Leonardo de
Souza Mendes e Omar Carvalho Branquinho.

Data da defesa: 12/08/2005

Resumo

Este trabalho de tese estuda e analisa o desempenho dos sistemas móveis celulares GSM de segunda geração (2G), GPRS de segunda geração intermediária (2,5G) e CDMA2000 de terceira geração (3G).

Na primeira parte deste trabalho de tese são avaliadas estratégias de compartilhamento dos canais de comunicação utilizados pelos sistemas GSM e GPRS, em busca daquela que resulte no menor impacto na qualidade dos serviços prestados por ambas as redes. Para esta avaliação, e como contribuição deste trabalho de tese, são desenvolvidos algoritmos aplicados em um simulador de eventos discretos desenvolvido em linguagem de programação C/C++. Os resultados das simulações mostram que a reserva de canais exclusivos ao sistema GPRS apresenta degradação na qualidade de serviço prestado pelo sistema GSM e que a melhor estratégia de compartilhamento é utilizar os canais de comunicação para o sistema GPRS nos momentos em que estes canais não são usados pelo sistema GSM.

Na segunda parte deste trabalho de tese são feitas análises de desempenho dos sistemas móveis celulares de terceira geração, CDMA2000 1xRTT e CDMA2000 1xEVDO, baseadas na qualidade do serviço prestado por estas redes operando com várias aplicações simultâneas fim-a-fim entre cliente e servidor. Técnicas de detecção multiusuário e de antenas adaptativas são utilizadas na recepção destas aplicações e é avaliada a nova qualidade de serviço. Para estas análises de desempenho e como contribuição deste trabalho de tese, modelos de simulação são desenvolvidos utilizando a ferramenta OPNET. As redes CDMA2000 1xRTT e 1xEVDO apresentam bom desempenho, analisado pelo parâmetro atraso da qualidade de serviço, na passagem de tráfego das aplicações HTTP, *E-mail*, VoIP, FTP, Telnet e Acesso a Banco de Dados. O desempenho da rede CDMA2000 1xEVDO melhora tanto com detecção multiusuário como com antenas adaptativas em relação ao receptor *rake*.

Abstract

This thesis work studies and analyzes the performance of cellular mobile systems GSM of second generation (2G), GPRS of second intermediate generation (2,5G) and CDMA2000 of third generation (3G).

In the first part of this thesis work, sharing strategies of communication channels used by GSM and GPRS systems are evaluated to find the one that results in the lowest impact in the quality of services supported by both networks. To this evaluation, and as contribution of this thesis work, algorithms applied in a discrete-event simulator developed in C/C++ programming language are developed. The simulation results show that the reserve of exclusive channels to the GPRS system presents degradation in the quality of service given for GSM system and that the better sharing strategy is to use the communication channels for the GPRS system whenever these channels are not used by the GSM system.

In the second part of this thesis work, performance analyses of the third generation cellular mobile systems, CDMA2000 1xRTT and CDMA2000 1xEVDO, based on the quality of service supported by these networks operating with several end-to-end simultaneous applications between client and server are made. Multiuser detection and adaptive antennas techniques are used in the reception of these applications and the new quality of service is evaluated. For these performance analyses, and as contribution of this thesis work, simulation models are developed using the OPNET tool. The CDMA2000 1xRTT and 1xEVDO networks present good performance analyzed through the delay parameter of quality of service running HTTP, E-mail, VoIP, FTP, Telnet and Data Base Access applications. The CDMA2000 1xEVDO network performance improves using either multiuser detection or adaptive antennas when compared with rake receiver.

Agradecimentos

- A Deus, por mais esta caminhada de sucesso em minha vida. Sua presença me confortou e me deu força nas horas difíceis deste trabalho.
- A minha mãe pela força e pelo carinho que me deu para superar todos os obstáculos e poder concluir mais esta etapa em minha vida.
- A minha noiva Sonia, pelo seu amor, carinho e força que me deu e que me ajudaram muito no desenvolvimento deste trabalho.
- Ao Prof. Dr. Renato Baldini Filho, pela dedicação e atenção desprendidas ao meu trabalho nestes últimos cinco anos.
- A todos os amigos de Pós-Graduação que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.
- Ao CPqD e meus colegas de trabalho pelo apoio para a realização deste trabalho.
- Aos colegas e funcionários da FEEC, pela amizade e companheirismo.

Glossário

AMPS : Advanced Mobile Phone Service

ARQ : Automatic Repeat Request

AT : Access Terminal

AWGN : Additive White Gaussian Noise

BER : Bit Error Rate

BPSK : Binary Phase-Shift Keying

BSC : Base Station Controller

BTS : Base Transceiver Station

CDMA : Code Division Multiple Access

EDGE : Enhanced Data Rates for Global Evolution

ERB : Estação Rádio Base

ESN : Electronic Serial Number

EVDO : Evolution Data Optimized

FER : Frame Error Rate

FIFO : First In First Out

FTP : File Transfer Protocol

GGSN Gateway GPRS Support Node

GPRS : General Packet Radio Service

GSM : Global System for Mobile Communications

HA : Home Agent

HDR : High Data Rate

HLR : Home Location Register

HTTP : HyperText Transfer Protocol

HSCSD : High Speed Circuit-Switched Data

IMT-2000 : International Mobile Telecommunications - 2000

IP : Internet Protocol

ITU : International Telecommunication Union

ISO : International Standard Organization

LAC : Link Access Control

LIFO : Last In First Out

MAC : Medium Access Control

MAI : Multiple Access Interference

MIMO : Multiple-Input Multiple-Output

MMSE : Minimum Mean Square Error

MOS : Mean Opinion Score

MS : Mobile Station

MSC : Multi Slot Capability

MSC : Mobile Switching Center

MUD : Multiuser Detection

NMT : Nordic Mobile Telephone

OSI : Open System Interconnect

PCF : Packet Control Function

PCU : Packet Control Unit

PDC : Personal Digital Communications

PDCH : Packet Data Channel

PDSN : Packet Data Serving Node

PER : Packet Error Rate

PPP : Point-to-Point Protocol

RLP : Radio Link Protocol

RTT : Radio Transmission Technology

SGSN : Serving GPRS Support Node

SINR : Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

SMC : Serviço Móvel Celular

SMS : Short Message Service

SRBP : Signaling Radio Burst Protocol

TACS : Total Access Communication System

TDM : Time Division Multiplexing

TDMA : Time Division Multiple Access

TSS : Time Slot Sharing

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System

VoIP : Voice over IP

WCDMA : Wideband Code Division Multiple Access

WWW : World Wide Web

Símbolos e Notações

CS : Code Scheme

d_V : Duração da chamada de voz

N_P : Número de pacotes por sessão

N_{RB} : Número de Radio Blocks

N : Número de servidores

r : Número médio de usuários no sistema

R_B : Radio Block

S_p : Tamanho do pacote em bits

T_r : Tempo médio de residência no sistema

T_s : Tempo médio de serviço

T_w : Tempo médio de espera

σ_r : Desvio Padrão de r

σ_{T_r} : Desvio Padrão de T_r

σ_{T_s} : Desvio Padrão de T_s

σ_w : Desvio Padrão de w

μ : Intensidade média do tráfego

ρ : Taxa de utilização do sistema

λ : Taxa média de chegada de usuários

w : Número médio de clientes esperando

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Histórico dos Sistemas Móveis Celulares	1
1.2	Objetivos e Contribuições	3
1.3	Organização e Estrutura	5
2	Modelagem de Tráfego por Pacotes	6
2.1	Introdução	6
2.2	Teoria de Filas	7
2.2.1	Alguns Parâmetros Básicos	8
2.2.2	Fila de um único servidor	9
2.2.3	Múltiplos servidores	11
2.3	Modelo de Tráfego para <i>Web Browsing</i>	12
2.3.1	Sessões	13
2.3.2	Páginas	13
2.3.3	Pacotes	15
3	Compartilhamento de Canais nos Sistemas GSM e GPRS	16
3.1	Introdução	16
3.2	Técnica de Simulação de Eventos Discretos	18
3.2.1	Introdução	18
3.2.2	Exemplo 1 - Sistema Celular com Apenas uma Célula	18

3.3	O Sistema Simulado	24
3.3.1	Diagrama em Blocos	24
3.3.2	Características Básicas do Sistema a ser Simulado	25
3.3.3	Interrupção de Transmissão de Pacotes	28
3.3.4	Tabelas no Simulador	29
3.3.5	Definição das Variáveis	33
3.3.6	Variáveis do Gerador de Sessões do GPRS	34
3.3.7	Variáveis do Gerador de Chamadas de Voz do GSM	36
3.3.8	Variáveis de Saída do Simulador - Indicadores de Desempenho dos Sistemas	37
3.3.9	Processamento dos Eventos	41
3.3.10	Métodos de Validação Empregados	66
3.3.11	Resultados do Simulador	73
3.3.12	Conclusões	82
4	CDMA2000	84
4.1	Introdução	84
4.2	Descrição Geral do CDMA2000 1X	84
4.2.1	Interfaces de Rádio e Interfaces Terrestres	85
4.2.2	Pilha de Protocolos	86
4.3	Nós de Rede e Enlaces	87
4.3.1	<i>Mobile Station</i> (MS)	88
4.3.2	<i>Base Station</i> (BS)	89
4.3.3	<i>Packet Data Serving Node</i> (PDSN)	90
4.3.4	<i>Home Agent</i> (HA)	90
4.3.5	Enlace PPP Tunnel	90
4.3.6	Enlace de Rádio	90

4.4	Modelos de Nós	93
4.4.1	Modelo de Nó da <i>Mobile Station</i>	93
4.4.2	Modelo de Nó do <i>Handset</i>	95
4.4.3	Modelo de Nó da <i>Base Station</i>	96
4.4.4	Modelo de Nó da PDSN	97
4.5	Modelos de Processos	98
4.5.1	Modelo de Processo RLP3 (<i>Radio Link Protocol 3</i>)	98
4.5.2	Modelo de Processo MAC MUX	101
4.5.3	Modelos de Processos LAC, LAC <i>Master</i> , SRBP e SRBP <i>Master</i> . . .	103
4.5.4	Modelo de Processo <i>Voice</i>	103
4.5.5	Modelo de Processo <i>Short Message Service</i> (SMS)	104
4.5.6	Modelo de Processo PPP MUX	104
4.5.7	Modelo de Processo RRM (<i>Radio Resource Management</i>)	105
4.5.8	<i>Radio Transceiver Pipeline</i>	107
4.6	Avaliação do Modelo de Simulação	108
4.6.1	Depuração e Validação do Código	108
4.6.2	Teste de Retransmissão de Quadros RLP	109
4.6.3	Entrada e Saída de Dados	113
4.6.4	Análise do Efeito da Taxa de Erro	113
4.6.5	Tráfego com o Protocolo TCP	118
4.7	Limitações no Modelo e Conclusões	123
4.8	CDMA2000 1xEVDO	125
4.8.1	Introdução	125
4.8.2	Potência de Transmissão no Enlace Direto	126
4.8.3	Taxas de Dados no Enlace Direto	127
4.8.4	Pilha de Protocolos	131
4.8.5	Taxas de Dados no Enlace Reverso	133

4.8.6	Análise do Efeito da Taxa de Erro	133
4.8.7	Tráfego com o Protocolo TCP	136
4.8.8	Tráfego com os Protocolos TCP e UDP	139
4.8.9	Detecção Multiusuário	144
4.8.10	Antenas Adaptativas	145
4.8.11	Conclusões do Modelo de Simulação	157
5	Conclusões Finais e Trabalhos Futuros	159
5.1	Conclusões e Comentários	159
5.2	Trabalhos Futuros	161
A	Empacotamento RLP	163
B	Passos para determinação da PER (<i>Packet Error Rate</i>)	166
B.1	Potencialidade de correção do código convolucional	169
C	Artigos Publicados e Submetido	171

Lista de Figuras

2.1	Modelo de fila com um servidor.	8
2.2	Fila única com múltiplos servidores.	11
3.1	Modelo de tráfego de pacotes adotado no simulador.	17
3.2	Representação de uma célula com N canais.	19
3.3	Estrutura básica da simulação de eventos discretos.	21
3.4	Descrição dos eventos do exemplo 1.	22
3.5	Fluxograma da simulação.	23
3.6	Diagrama em blocos do simulador.	24
3.7	Estrutura de quadros do sistema GSM/GPRS [Kalden].	26
3.8	Interrupção da transmissão de pacote.	29
3.9	Modelo de tráfego de pacotes adotado no simulador.	35
3.10	Tempos de espera e transmissão de um pacote.	37
3.11	Tempos de espera e transmissão de um pacote com interrupção.	38
3.12	Tempo de sistema T_s	40
3.13	Fragmentação de um pacote em <i>Radio Block</i>	42
3.14	Sessão de pacotes na simulação.	44
3.15	Fluxograma do evento chegada de sessão.	50
3.16	Fluxograma do evento chegada de chamada de voz.	53
3.17	Fluxograma do evento término de chamada de voz.	57
3.18	Fluxograma do evento chegada de pacote.	60

3.19 Fluxograma do evento término de pacote.	64
3.20 Fluxograma do evento Amostragem.	65
3.21 Probabilidade de bloqueio para 3 e 10 canais.	67
3.22 Sistema validado.	68
3.23 Tempos médios na fila e no sistema para diferentes valores de tempo de retenção T_H	71
3.24 Número de pacotes na fila e no sistema para diferentes valores de tempo de retenção T_H	72
3.25 Valores de entrada e de saída da simulação com apenas tráfego de voz. . . .	74
3.26 Probabilidade de bloqueio para tráfego total de 27,3 Erl e 36 canais.	75
3.27 Valores de entrada e de saída da simulação com tráfego de voz e dados sem alocação exclusiva.	76
3.28 Probabilidade de bloqueio para tráfego total de 27,3 Erl com 36 canais sem alocação exclusiva ao GPRS.	77
3.29 Vazão média obtida no sistema GPRS sem alocação exclusiva de canais. . . .	78
3.30 Atraso médio de pacotes no sistema GPRS sem alocação exclusiva de canais. . . .	79
3.31 Valores de entrada e de saída da simulação com tráfego de voz e dados com alocação exclusiva.	80
3.32 Probabilidade de bloqueio para tráfego total de 27,3 Erl com 36 canais e alocação exclusiva de 5 canais ao GPRS.	81
3.33 Vazão média obtida no sistema GPRS com alocação exclusiva de cinco canais. . . .	81
3.34 Atraso médio de pacotes no sistema GPRS com alocação exclusiva de cinco canais.	82
4.1 Pilha de protocolos CDMA2000 1X - Interface de rádio [<i>Spread Spectrum</i>]. . .	87
4.2 Modelo de referência para transmissão de dados orientada a pacotes do CDMA 2000 [<i>Wireless IP</i>].	88

4.3	Diagrama do cenário de simulação básico com os objetos desenvolvidos para rede CDMA2000 1X acompanhados de objetos padrão da biblioteca do OPNET.	89
4.4	Modelo de canais nas estações móveis.	91
4.5	Modelo de canais nas estações rádio base.	92
4.6	Diagrama do modelo de nó da <i>mobile station</i> .	94
4.7	Diagrama do modelo de nó <i>handset</i> .	95
4.8	Diagrama do modelo de nó da <i>base station</i> .	96
4.9	Diagrama do modelo de nó da PDSN.	97
4.10	Estrutura de listas do modelo de processo RLP3.	99
4.11	Diagrama do modelo de processo RLP3.	100
4.12	Diagrama de sinalização realizado pelo modelo de processo RRM.	105
4.13	Diagrama de envio de quadros RLP de dados e NAK do caso de teste.	112
4.14	Vazão na camada de aplicação para mensagens de 8000 bytes.	115
4.15	Vazão média no canal SCH do enlace reverso para mensagens de 8000 bytes.	115
4.16	Tempo médio de atraso de recepção para mensagens de 8000 bytes.	116
4.17	Vazão na camada de aplicação do tráfego HTTP Servidor->Cliente.	120
4.18	Atraso na camada de aplicação do tráfego HTTP Servidor->Cliente.	121
4.19	Vazão na camada de aplicação do tráfego <i>E-mail</i> Cliente->Servidor.	122
4.20	Atraso na camada de aplicação do tráfego <i>E-mail</i> Cliente->Servidor.	122
4.21	Atrasos médios na camada de aplicação para HTTP e <i>E-mail</i> .	123
4.22	Diagrama do cenário de simulação e os elementos da rede 1xEVDO.	126
4.23	Forma de utilização da potência no enlace direto na IS-95 e no 1xEVDO.	127
4.24	Processo de alocação de taxa de dados de forma dinâmica no 1xEV-DO.	128
4.25	Técnica de transmissão com espaçamento de 4 <i>slots</i> .	129
4.26	Processamento de um pacote IP.	132
4.27	Vazões médias no transmissor do AT.	135

4.28	Tempos médios de atraso na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.	136
4.29	Vazões na camada de aplicação do modelo de referência ISO-OSI.	137
4.30	Tráfego HTTP do cenário TCP com dois ATs.	138
4.31	Tráfego HTTP do cenário TCP com trinta ATs.	139
4.32	Atraso fim-a-fim de pacotes e taxa máxima requerida no AT0 e na BTS0. . .	141
4.33	Vazões na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.	142
4.34	Atrasos médios na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO. . .	142
4.35	Vazão na camada física.	143
4.36	PER no enlace reverso.	145
4.37	Vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.	146
4.38	Atraso na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.	146
4.39	PER no enlace reverso.	148
4.40	Vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.	149
4.41	Atraso na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.	150
4.42	PER no enlace direto.	152
4.43	PER no enlace reverso.	153
A.1	Composição de MUX PDUs de acordo com as MUX Options.	163
A.2	Segmentação de um pacote IP em frames RLPs na camada MAC.	164
B.1	<i>Link budget</i> do enlace reverso.	167
B.2	<i>Link budget</i> do enlace direto.	168

Capítulo 1

Introdução

1.1 Histórico dos Sistemas Móveis Celulares

Os sistemas móveis celulares sofreram fortes mudanças estruturais ao longo de suas gerações. A primeira geração (1st *generation* - 1G) surgiu no início da década de 1980 e foi baseada na tecnologia analógica. O serviço analógico implantado nas Américas, em alguns países da Ásia e adotado no Brasil, foi denominado de AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*) [Faruque]. Nos países escandinavos, o serviço analógico implantado foi o NMT (*Nordic Mobile Telephone*) [Steinbugl]. No Reino Unido e alguns países da Ásia este serviço foi denominado TACS (*Total Access Communication System*) [Steinbugl]. Os sistemas analógicos foram construídos para operação de serviços de voz (sem transmissão de dados) comutados por circuito.

A segunda geração (2nd *generation* - 2G) dos sistemas de comunicações móveis celulares emergiu a partir de 1990 e foi baseada na tecnologia digital. As principais tecnologias foram : GSM (*Global System for Mobile Communications*) [Mehrotra] e [Redl] desenvolvida na Europa, CDMA (*Code Division Multiple Access*) [Lee] e TDMA (*Time Division Multiple Access*) [Harte] desenvolvidas na América do Norte e PDC (*Personal Digital Communications*) desenvolvida no Japão. Nesta fase, além dos serviços de voz, houve a oferta de novos serviços de dados, como identificação de chamada, fax e o serviço de mensagens curtas (*Short Message Service* - SMS).

O crescimento explosivo da Internet trouxe um grande impacto na demanda por novos

serviços de comunicação sem fio. Entretanto, a taxa efetiva de dados dos sistemas 2G comutados por circuito, entre 9,6 e 14,4 kbps (kilo bits por segundo), era relativamente baixa para tráfego na Internet. Como resultado, foram desenvolvidas novas tecnologias em uma fase posterior à 2G conhecida como 2G+ ou 2,5G para aumentar a velocidade da comunicação de dados a valores reais de até 70 kbps. Os sistemas 2,5G foram baseados nas tecnologias HSCSD (*High Speed Circuit-Switched Data*) [Heine] para a transmissão de dados comutados por circuito e GPRS (*General Packet Radio Service*) [Heine] para a transmissão de dados comutados por pacotes.

A terceira geração (3rd *generation* - 3G) dos sistemas de comunicações móveis celulares está baseada em dois sistemas para transmissão de dados comutados por pacotes, o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [Dahlman] e [Richard] e o CDMA2000 (1xRTT e 1xEVDO) [Knisely] e já foram implantados em vários países do mundo [http3] e [http4]. O objetivo dos sistemas 3G é o provimento de taxas de dados mais altas em comparação com os sistemas 2G e 2,5G e a possibilidade da oferta de serviços adicionais, como por exemplo, acesso rápido a Internet, jogos, vídeo, além de voz. Segundo o padrão global de sistemas móveis celulares 3G, o IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications - 2000*) [http5] do ITU (*International Telecommunication Union*), para um sistema ser considerado de terceira geração é preciso que ele atenda a pelo menos uma das seguintes taxas de dados : 144 kbps em ambientes veiculares, 384 kbps em ambientes de pedestres e 2 Mbps em ambientes fechados [http5]. O sistema EDGE (*Enhanced Data Rates for Global Evolution*) [Heine] é considerado pelo IMT-2000 um sistema também de terceira geração.

Pesquisas para o desenvolvimento dos sistemas de comunicações móveis celulares de quarta geração (4th *generation* - 4G) já foram iniciadas, com previsão de disponibilidade comercial deste sistema para 2010. Recentemente, a operadora japonesa NTT DoCoMo [http6] anunciou o êxito na transmissão de dados com taxa de 1 Gbps no canal direto (da estação rádio base para o cliente) usando equipamentos de rede de acesso 4G em testes de laboratório. A quarta geração dos sistemas de comunicações móveis celulares também é conhecida como

B3G (*Beyond 3G*).

1.2 Objetivos e Contribuições

As operadoras do serviço móvel celular (SMC) com tecnologia GSM provêem serviços de voz e dados a baixas taxas (9,6 kbps) comutados por circuito. A tecnologia GPRS propicia às operadoras GSM o oferecimento de serviços de dados comutados por pacotes como a Internet com comunicação em valores reais de até 70 kbps.

Para que os serviços com GPRS possam entrar em operação, é preciso que as operadoras GSM expandam o núcleo da rede (*core network*) com novos elementos de rede para comutação de dados por pacotes como, por exemplo, o PCU (*Packet Control Unit*), o SGSN (*Serving GPRS Support Node*) e o GGSN (*Gateway GPRS Support Node*), além de compartilhar os canais de tráfego da interface aérea (comunicação entre os terminais móveis e as estações rádio base) tanto para a prestação do serviço de voz quanto para a prestação do serviço de dados por pacotes.

Para uma operadora GSM, o compartilhamento dos canais de tráfego pode, ou acarretar na degradação da qualidade do serviço de voz prestado, ou então resultar em uma quantidade de canais de tráfego insuficientes para prestar o serviço de dados por pacotes com uma determinada qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) desejável. Para o estudo deste problema, são propostas e analisadas duas formas de compartilhamento:

A primeira é o uso da capacidade ociosa: Como os canais de tráfego do serviço de voz são ocupados de forma aleatória e não são ocupados 100 % do tempo, pode-se afirmar que existe uma capacidade ociosa que pode ser usada para o serviço de dados por pacotes nestes instantes de tempo.

A segunda é o uso de canais exclusivos: Parte dos canais de tráfego disponíveis são dedicados exclusivamente para o serviço de dados por pacotes.

Na primeira parte deste trabalho de tese é avaliado o impacto destas duas formas de compartilhamento dos canais de tráfego em busca daquela que ofereça a menor degradação

da qualidade de serviço prestado por ambas as redes. Para esta avaliação e como contribuição deste trabalho de tese, foram desenvolvidos algoritmos aplicados em um simulador de eventos discretos desenvolvido em linguagem de programação C/C++. Esta avaliação, baseada nos resultados das simulações, não foi encontrada na literatura.

Este trabalho de tese auxilia as operadoras GSM na escolha da melhor estratégia de compartilhamento dos canais de tráfego entre os serviços de voz e de dados comutados por pacotes, de forma a minimizar a degradação do desempenho na prestação de ambos os serviços.

As operadoras que utilizam a tecnologia CDMA2000 1xRTT com taxa de dados de até 153,6 kbps ou a tecnologia CDMA2000 1xEVDO com taxa de dados de até 2,4 Mbps, necessitam conhecer a qualidade de serviço que será percebida pelo usuário, se analisadas as características de vazão de dados e conseqüentemente o atraso para tráfego de dados por pacotes, em aplicações como, por exemplo, uma transferência de arquivos ou a navegação pela Internet. Além disso, tão importante quanto a oferta de novos serviços é a necessidade de se conhecer com que qualidade estes serviços serão ofertados pelas operadoras. Portanto, existe a necessidade de haver mecanismos que permitam analisar o comportamento das redes CDMA2000 ao operar serviços de dados por pacotes de forma simultânea e fim-a-fim entre os clientes e os servidores das aplicações. Dois pontos que dificultam esta análise são: a representação da rede com fidelidade levando em conta todos os seus elementos envolvidos e suas pilhas de protocolos para comunicação fim-a-fim e a definição das distribuições estatísticas que possam modelar as diversas aplicações do tráfego por pacote gerado pelos usuários.

Na segunda parte deste trabalho de tese são feitas análises, não encontradas na literatura, do desempenho das redes de comunicações móveis celulares de terceira geração, CDMA2000 1xRTT e CDMA2000 1xEVDO, baseadas na qualidade do serviço prestado por estas redes, com todos os seus elementos envolvidos e suas pilhas completas de protocolos, operando com várias aplicações simultâneas de dados comutados por pacotes, de forma fim-a-fim entre cliente e servidor. Técnicas de detecção multiusuário e de antenas adaptativas são utilizadas

na recepção destas aplicações para análise da nova qualidade de serviço. Estas análises são feitas através de modelos de simulação utilizando técnicas baseadas em eventos discretos utilizando a ferramenta de simulação OPNET. Estes modelos permitem retratar de forma muito próxima casos reais. Este trabalho de tese contribui como uma orientação na escolha dos novos serviços ofertados na operação das redes CDMA2000 1xRTT e CDMA2000 1xEVDO, na avaliação da qualidade de serviço oferecido por estas redes e na estimativa da capacidade destas redes, em termos do número máximo de usuários, para a qualidade de serviço desejada.

1.3 Organização e Estrutura

Esta tese está organizada como segue. No **Capítulo 2** são apresentados conceitos gerais e definições para a modelagem de tráfego por pacotes. Este capítulo fornece os fundamentos para o desenvolvimento das simulações propostas. No **Capítulo 3** são apresentadas técnicas de compartilhamento dos canais de tráfego do sistema móvel celular GSM (2G) e GPRS (2,5G). Um modelo de simulação é apresentado para analisar a melhor forma de compartilhamento dos recursos rádio disponíveis tanto para o sistema GSM quanto para o sistema GPRS. O **Capítulo 4** apresenta as tecnologias do sistema móvel celular CDMA2000 (3G). Na primeira parte deste capítulo é apresentada a tecnologia CDMA2000 1xRTT. Um modelo de simulação baseado na ferramenta comercial OPNET foi desenvolvido para analisar o comportamento desta rede na entrada dos serviços comutados por pacotes em uma comunicação fim-a-fim entre cliente e servidor. Na segunda parte deste capítulo é apresentada a tecnologia CDMA2000 1xEVDO. Foi também desenvolvido um modelo de simulação no OPNET para analisar o comportamento desta rede, na entrada dos serviços comutados por pacotes, em uma comunicação fim-a-fim entre cliente e servidor e o efeito da utilização das técnicas de detecção multiusuário ou antenas adaptativas nesta comunicação. O **Capítulo 5** trata das conclusões, comentários sobre os resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros. Ao fim desta tese há um apêndice e as referências bibliográficas.

Capítulo 2

Modelagem de Tráfego por Pacotes

2.1 Introdução

Na comutação por circuito, um enlace dedicado ligando o transmissor e o receptor é criado e permanece ativo enquanto não for desfeito, mesmo não havendo informação sendo transmitida [http1] e [http2].

Na transmissão por pacotes, a transmissão de dados só ocorre enquanto houver pacotes a serem enviados. Assim, o enlace é compartilhado por outros usuários. Dessa forma, há um melhor aproveitamento do recurso do sistema no tempo e a vazão máxima do sistema estaria sendo dividida entre os vários usuários compartilhantes daquele recurso.

Na transmissão por pacotes, todos os usuários estão conectados ao sistema, mas não há uma conexão fixa e dedicada entre um transmissor e um receptor.

A rede de pacotes tem a capacidade de dividir os dados recebidos em blocos menores, acondicioná-los em pacotes, identificá-los e endereçá-los corretamente. Dessa forma, cada quantidade de informação completa pode ser composta de vários pacotes que são endereçados ao mesmo destino, mas que podem percorrer caminhos diferentes pela rede. Uma vez no destino, os pacotes serão juntados adequadamente para formar novamente a informação original. Assim, esse tipo de transmissão é eficiente no uso dos recursos e da capacidade da rede.

Na transmissão por pacotes pode ocorrer de não haver recurso algum disponível em um instante de entrada de pacotes no sistema. Para lidar com esse problema, uma das técnicas

utilizadas é a geração e gerenciamento de filas (*buffers*) de pacotes.

O estudo relativo a essa questão deve resolver problemas tais como :

- Qual o tamanho máximo da fila ?
- Qual o atraso máximo admitido na fila ?
- Quantos servidores são necessários para realizar a transmissão no tempo adequado ?

Essas e outras questões são estudadas na teoria de filas, que será apresentada de forma resumida a seguir. Este capítulo é baseado em [1].

2.2 Teoria de Filas

A teoria de filas [Yacoub] estuda o desempenho de sistemas que tenham uma fonte de recursos utilizáveis finita e que é compartilhada por uma população de usuários em número maior do que os recursos do sistema. Dessa forma, fica conceituada uma disputa pela utilização dos recursos do sistema pelos seus usuários, além de uma espera para ser servido.

A análise do desempenho do sistema em servir os usuários faz parte do estudo das filas. Assim, a teoria de filas trata de sistemas onde pacotes de usuários chegam a uma certa taxa para serem servidos, esperam pelo serviço caso não possam ser imediatamente servidos e são liberados após terem esperado e sido servidos.

A matemática da teoria de filas na análise de desempenho de redes é simplificada e facilitada pelo emprego de premissas que modelam as redes de forma aproximada.

Um modelo simples de fila com único servidor é mostrado na Figura 2.1. Através dele pode-se definir alguns conceitos básicos.

O modelo é constituído por uma população de clientes que chegam no sistema em uma determinada taxa λ . O servidor deve desempenhar alguma tarefa sobre os itens (clientes) que chegam. Os itens são servidos um a um, portanto quando o servidor estiver ocupado, o próximo item a chegar deverá esperar na fila. Quando o servidor terminar o processamento de um determinado item, este será imediatamente despachado para fora do sistema. Tão logo

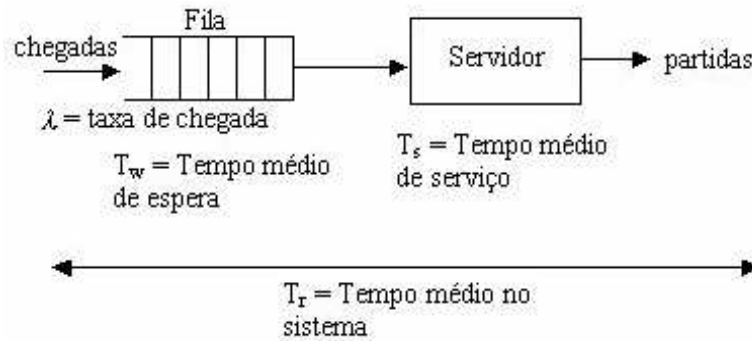


Figura 2.1: Modelo de fila com um servidor.

isto aconteça, o próximo item da fila, que depende da disciplina de controle da fila, deverá ser servido.

2.2.1 Alguns Parâmetros Básicos

Os parâmetros são variantes com o tempo.

- Sistema : fila de espera + servidor
- Taxa média de chegada de usuários : λ
- Fila de espera :
 - Número médio de clientes esperando (*waiting*) : w
 - Desvio Padrão de w : σ_w
 - Tempo médio de espera : T_w
- Disciplina para controle da fila de espera : FIFO (*First In, First Out*), LIFO (*Last In, First Out*), etc.
- Servidor (recursos)
 - Tempo médio de serviço : T_s
 - Desvio Padrão de T_s : σ_{T_s}
 - Utilização média, ρ : fração do tempo em que o servidor está ocupado
 - Número de servidores : N
 - Número médio de clientes sendo atendidos : s

Fórmulas de Little	Servidor Único	Multiservidor
$s = \lambda.T_s$	$\rho = \lambda.T_s$	$\rho = \frac{\lambda.T_s}{N_s}$
$w = \lambda.T_w$	$r = w + \rho$	$r = w + \rho.N_s$
$r = \lambda.T_r$ e $T_r = T_s + T_w$		

Tabela 2.1: Fórmulas Genéricas.

- Número médio de usuários no sistema, clientes residentes no sistema (fila + servidor) : r
- Desvio Padrão de r : σ_r
- Tempo médio de espera (residência) no sistema de um item : T_r
- Desvio Padrão de T_r : σ_{T_r}
- Intensidade média do tráfego : μ

O fator de utilização do sistema (ρ) está relacionado com sua capacidade e pode ser dado pelo produto da taxa média de chegada de clientes (λ) a serem servidos pelo tempo médio (T_s) do serviço. Assim,

$$\rho = \lambda T_s \text{ com } 0 \leq \rho \leq 1. \quad (2.1)$$

Quando a utilização do sistema está próxima de 100 %, o tempo médio de espera no sistema cresce monotonicamente. Limites práticos, como o tempo de resposta do sistema e o tamanho da fila colocam o valor de ρ entre 70 e 90 %.

Algumas relações são válidas genericamente e, embora não sejam muito úteis isoladamente, são apresentadas na Tabela 2.1 por expressar conceitos úteis.

2.2.2 Fila de um único servidor

Conforme explicado anteriormente, o desempenho de um sistema com fila pode ser aproximado através de tabelas de fórmulas simplificadas, evitando assim uma matemática mais complexa.

Para que a aproximação seja válida, é necessário colocar algumas condições de contorno que, embora diminuam a precisão dos modelos, não impedem que seus resultados sejam suficientes para analisar o desempenho de vários sistemas práticos.

No caso geral para a análise de desempenho de um sistema, os dados de entrada e saída são os seguintes :

Entrada : Taxa de chegada λ , Tempo de serviço T_s .

Saída : Número de itens esperando w , Tempo de espera T_w , Número de itens residentes no sistema r , Tempo de residência T_r .

Condições de contorno :

- População de itens : infinita, de modo que seu tamanho (que poderia ser variável) não interfira na taxa de chegada;
- Tamanho da fila : infinito, também para que nenhum item seja perdido do sistema;
- Disciplina de controle da fila : FIFO;
- Taxa de Chegada : distribuição de Poisson, tempo entre chegadas distribuído exponencialmente;
- Tempo de Serviço : distribuição exponencial ou constante;

Notação utilizada nos modelos de sistemas com fila :

$X/Y/Z/W$

Onde :

X é a distribuição da taxa de chegada (tempo entre chegadas)

Y é a distribuição do tempo de serviço

Z é o número de servidores

W é o tamanho da fila (Buffer) : número máximo de pacotes no sistema.

Algumas distribuições possíveis para X e Y :

M $\Rightarrow$ Poisson, Exponencial

E $\Rightarrow$ Erlang

H $\Rightarrow$ Hiperexponencial

D $\Rightarrow$ Chegadas Determinísticas e Tempo de serviço fixo

G $\Rightarrow$ Gerais e independentes

Exemplo :

Modelo M/M/1 $\Rightarrow$ Chegada por Poisson, tempo de serviço exponencial, modelo com um servidor e fila infinita.

2.2.3 Múltiplos servidores

A Figura 2.2 mostra o modelo a ser analisado.

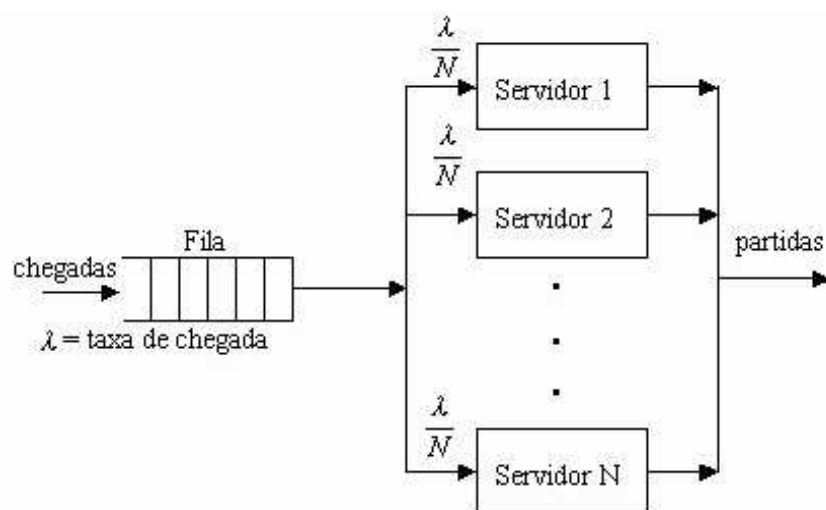


Figura 2.2: Fila única com múltiplos servidores.

Trata-se de uma única fila sendo servida por vários servidores. Assume-se todos eles idênticos. Qualquer item que chegue ao sistema será servido imediatamente assim que houver um servidor livre.

Como os servidores são iguais, não há algoritmo algum de escolha de servidor no caso de haver mais de um livre na chegada de um item. Obviamente, se todos estiverem ocupados na chegada do item, uma fila começará a ser formada. Esta será esvaziada na medida em que os servidores se liberarem e utilizando-se da respectiva disciplina de controle.

O modelo é M/M/N e o tempo médio de serviço é igual para todos os servidores.

Condições de contorno :

- População de itens : infinita de modo que seu tamanho (que poderia ser variável) não interfira na taxa de chegada ;
- Tamanho da fila : infinito também para que nenhum item seja perdido do sistema ;
- Disciplina de controle da fila : FIFO ;
- Taxa de Chegada : distribuição de Poisson, tempo entre chegadas exponencial ;
- Tempo de Serviço : distribuição exponencial para todos os servidores ;
- Todos os servidores igualmente carregados.

2.3 Modelo de Tráfego para *Web Browsing*

O modelo descrito neste item foi proposto por Reyes-Lecuona et al. [Reyes] e é baseado em uma estrutura composta por três níveis : sessão, página e pacote.

- Nível de sessão : uma sessão de *web browsing* é iniciada com o acionamento do *web browser* (p. ex. *Internet Explorer* ou *Mozilla Firefox*) e é finalizada com o fechamento do mesmo ;
- Nível de página : corresponde à visita a uma página na Internet. Uma página é composta por diversos arquivos (figuras, imagens, arquivos HTML, etc) ;
- Nível de pacote : são os pacotes IP cujo conteúdo (*payload*) contém porções dos arquivos que constituem as páginas.

Segundo este modelo, uma sessão consiste na ação, executada por um usuário, de acessar páginas da Internet. As visitas às páginas (que compõem uma sessão) são também uma ação do usuário, de forma que as características estatísticas do modelo nos níveis de sessão e de página são fortemente dependentes da quantidade de acesso do usuário, de forma que estas características estatísticas são extraídas da análise de dados empíricos. Por outro lado, as características estatísticas do modelo no nível de pacote dependem preponderantemente do protocolo de comunicação e não do comportamento do usuário.

O modelo de tráfego para *web browsing* proposto por Reyes-Lecuona et al. [Reyes] é baseado em um modelo de comportamento do usuário e em algumas considerações a respeito dos protocolos de camada de enlace. A partir do modelo de comportamento e das características do protocolo, diversas variáveis aleatórias são identificadas e modeladas a partir de dados experimentais.

2.3.1 Sessões

A chegada de sessões é modelada como um processo de Poisson (da mesma forma que as chamadas telefônicas) e o número de sessões por unidade de tempo (indicado por λ_s) determina a intensidade de tráfego neste modelo. Portanto, o intervalo entre duas chegadas sucessivas é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa de média $1/\lambda_s$ [Papoulis91]

$$p(t) = \lambda_s \exp(-\lambda_s t). \quad (2.2)$$

Uma sessão é composta pelo acesso a um certo número de páginas, que é uma variável aleatória que segue uma distribuição log-normal [Reyes]. A distribuição log-normal possui função densidade de probabilidade dada por [Papoulis91]

$$p(x) = \frac{1}{x} \exp[-\ln(\frac{x}{2})]. \quad (2.3)$$

2.3.2 Páginas

Uma página, por sua vez, é constituída por elementos como imagens, figuras, textos, etc., cada um deles encapsulado em um arquivo. A soma dos tamanhos destes arquivos consistirá em um certo tamanho da página em bits (ou bytes). Assume-se neste modelo que este tamanho é modelado seguindo a distribuição de Pareto [Reyes], cuja função densidade de probabilidade é [Papoulis91]

$$g(x) = \frac{\alpha k^\alpha}{x^{\alpha+1}}, \text{ para } x \geq k \text{ e } 0 \text{ para } x < k \quad (2.4)$$

em que α e k são parâmetros da função que definem a sua forma.

Tamanho do pacote (S_d)	Probabilidade de ocorrência
40 bytes	$P_0 = 30,17 \%$
552 bytes	$P_1 = 12,27 \%$
576 bytes	$P_2 = 13,08 \%$
1500 bytes	$P_3 = 44,48 \%$

Tabela 2.2: Distribuição multimodal para o tamanho do pacote IP.

A transmissão do conteúdo de uma página é iniciada quando o usuário aciona o endereço daquela página. O tempo de transmissão da página dependerá da vazão de bits do enlace utilizado que, por sua vez, dependerá de parâmetros como da taxa de transmissão e qualidade do enlace. Após o término da transmissão do conteúdo da página (ou seja, a página está completa no aplicativo *browser*), o usuário inicia a leitura da mesma, gastando para isso um determinado tempo de leitura. Dados de medidas mostram que a distribuição do tempo de leitura se aproxima de uma distribuição Gama [Reyes], cuja função densidade de probabilidade é dada por [Papoulis91]

$$p(t) = \frac{a^b t^{b-1}}{\Gamma(b)} \exp(-at). \quad (2.5)$$

Os parâmetros a e b definem a forma da distribuição e $\Gamma(b)$ é a função Gama, definida como

$$\Gamma(b) = \int_0^\infty \xi^{b-1} \exp(-\xi) d\xi. \quad (2.6)$$

A informação contida numa página é transmitida através de pacotes IP. Três tamanhos de pacotes S_d são previstos neste modelo, de acordo com dados de medidas : 552, 576 e 1500 bytes [Braden]. Pacotes de 40 bytes são também possíveis, correspondendo a apenas *headers* do protocolo TCP/IP. O tamanho do pacote IP, portanto, pode assumir os valores 40, 552, 576 e 1500 bytes, caracterizando uma distribuição multimodal [Reyes], com probabilidades dadas na Tabela 2.2.

A representação matemática da função densidade de probabilidade multimodal é

$$p(n) = P_0\delta(n - 40) + P_1\delta(n - 552) + P_2\delta(n - 576) + P_3\delta(n - 1500).$$

2.3.3 Pacotes

Para completar o modelo de transmissão, resta caracterizar os tempos de chegada dos pacotes. Segundo [Reyes], o intervalo de tempo entre chegadas é fortemente dependente do protocolo da camada de enlace. O presente modelo de tráfego utiliza a distribuição exponencial negativa para o intervalo entre chegada de pacotes, já apresentada anteriormente, para caracterizar os intervalos entre chegada de pacotes.

Capítulo 3

Compartilhamento de Canais nos Sistemas GSM e GPRS

3.1 Introdução

A rede de acesso dos sistemas móveis celulares GSM (*Global System for Mobile Communication*) e GPRS (*General Packet Radio Service*) é caracterizada pelo compartilhamento dos recursos de rádio entre os usuários do serviço de voz (GSM) e os usuários do serviço de dados por pacotes (GPRS) como *Web Browsing*, *E-Mail*, FTP, Vídeo Conferência, etc. Este compartilhamento de recursos provoca uma degradação do desempenho de ambos os serviços cuja análise é dificultada pelo grande número de variáveis envolvidas no processo, como as condições de propagação, níveis de tráfego de voz e de dados, modelagem do tráfego de dados, capacidade de escoamento de dados dos canais, entre outras. Desta forma, o uso de um simulador de rede de acesso GSM/GPRS que modele o compartilhamento dos recursos de rádio torna-se necessário para o seu estudo.

Os serviços de voz seguem as premissas de Erlang B [Yacoub] (chamadas não atendidas não são colocadas em uma fila, são eliminadas), enquanto que os serviços de transmissão de dados por pacotes seguem modelos empíricos e dependentes da aplicação. Uma aplicação com transmissão de pacotes é mostrado na Figura 3.1.

Neste modelo, cada sessão é composta por um número aleatório de pacotes, de tamanhos também aleatórios. Este modelo de tráfego, que é uma versão simplificada daquele introduzido em [Reyes] e descrito no Capítulo 2, explicita a possibilidade de compartilhamento

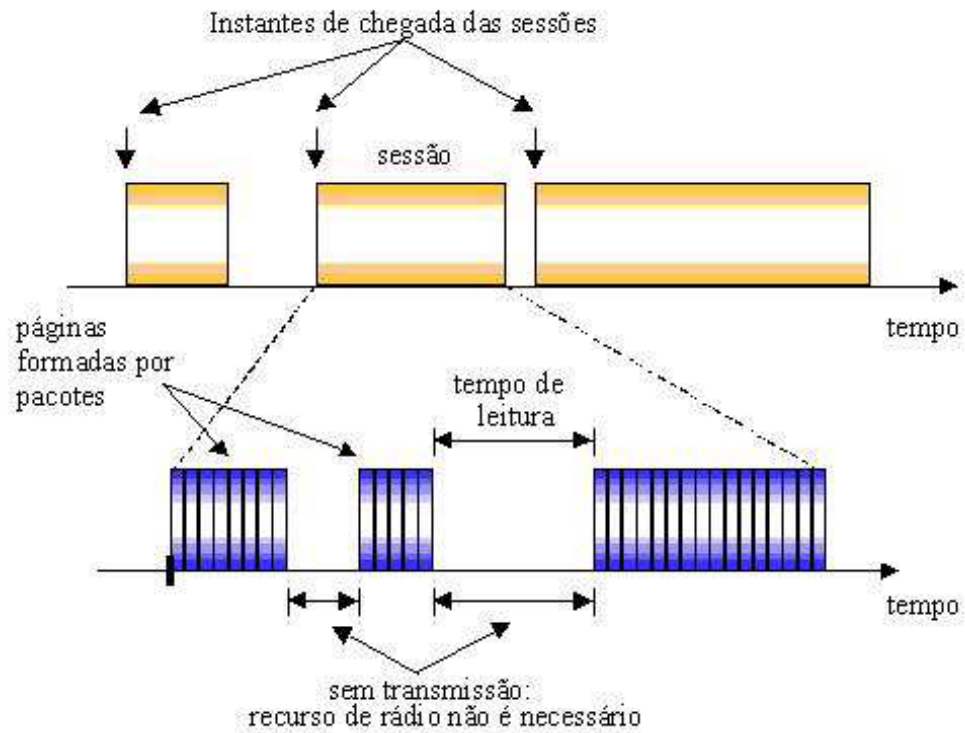


Figura 3.1: Modelo de tráfego de pacotes adotado no simulador.

de recursos entre dois ou mais usuários do serviço GPRS, aproveitando os intervalos sem transmissão de pacotes denominados “tempos de leitura”.

Além do compartilhamento entre usuários do serviço GPRS, outra modalidade de compartilhamento possível e explorado no sistema GSM/GPRS é aquele entre usuários GSM e GPRS.

Um simulador foi desenvolvido para duas formas distintas de compartilhamento dos recursos : a primeira utiliza parte dos recursos de rádio de forma exclusiva ao serviço GPRS e a segunda utiliza todos os recursos de rádio dando prioridade ao serviço de voz. Foi utilizada preponderantemente a técnica de simulação por eventos discretos, que será detalhada na próxima sessão. Este capítulo é baseado em [1].

3.2 Técnica de Simulação de Eventos Discretos

3.2.1 Introdução

Técnicas de simulação de eventos discretos são geralmente utilizadas na análise de sistemas dinâmicos onde a evolução do estado do sistema ocorre devido à ocorrência de eventos [Banks]. Como um exemplo desta categoria de sistemas podemos citar o atendimento de clientes numa agência bancária. A chegada de um cliente à fila de atendimento da agência, o início do atendimento de um cliente por um funcionário da agência e o término de um atendimento são exemplos de eventos discretos que ocorrem numa agência bancária. O estado do sistema “agência bancária” pode ser caracterizado pelo número de clientes na fila de atendimento e o número de clientes em atendimento.

A simulação de um sistema requer a sua modelagem, que é analisada através de um exemplo simples a seguir.

3.2.2 Exemplo 1 - Sistema Celular com Apenas uma Célula

Consideremos um sistema celular composto por uma única célula atendida por uma estação rádio base, onde os usuários localizados dentro da célula acessam a rede de telecomunicações para chamadas telefônicas de voz através de canais. O número de canais é geralmente menor do que o número de usuários na célula, exigindo, portanto, que os usuários compartilhem os canais. A Figura 3.2 mostra uma representação deste sistema.

O funcionamento do sistema obedece as seguintes premissas :

- As chamadas são independentes entre si ;
- As chamadas originadas pelos usuários são modeladas como um processo de Poisson, o que implica que o intervalo entre chamadas segue uma distribuição exponencial negativa, com λ chamadas por segundo (o intervalo médio entre chamadas é $1/\lambda$) ;
- Ao aparecimento de uma chamada, um canal de rádio frequência desocupado é alocado ao usuário para a transmissão. O canal selecionado passa, então, para o estado “ocupado” ;

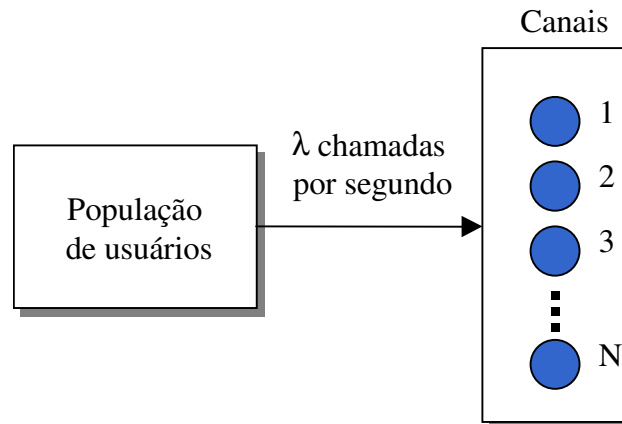


Figura 3.2: Representação de uma célula com N canais.

- Uma chamada será bloqueada e eliminada do sistema se todos os canais já estiverem ocupados (chamadas não atendidas não são colocadas em uma fila) no instante de chegada da chamada;
- Quando um canal é alocado à uma chamada, este canal permanece retido por toda a duração da chamada. As durações das chamadas (ou tempos de retenção dos canais) são independentes e sem memória, sendo modeladas como uma distribuição exponencial negativa;
- Após o final da chamada, o canal é então liberado, retornando ao estado “livre”.

Baseados nesta descrição, podemos identificar os elementos do sistema de acordo com os conceitos apresentados anteriormente :

- Sistema : É composto pela população de usuários e o conjunto de canais disponíveis à população;
- Estado do sistema : Neste sistema simples, o estado pode ser descrito pelo número de canais ocupados. Caso tivéssemos uma fila para chamadas aguardando canal desocupado, o número de usuários na fila seria outra variável descritiva do estado do sistema;
- Entidade : Usuários e canais;

- Atributos : Um usuário pode ser ativo (com chamada em progresso) ou inativo (sem chamada), enquanto que um canal pode estar “ocupado” ou “livre” ;
- Eventos : Dois eventos podem ocorrer neste sistema : chegada de uma chamada e término de uma chamada ;
- Atividade : É a duração de uma chamada. Apesar desta variável ser de natureza aleatória (exponencialmente distribuída), saberemos a sua duração no início da mesma ;
- Atraso : Neste sistema simples, não existe atraso, pois as chamadas bloqueadas (as que não encontram canais livres) são eliminadas do sistema.

3.2.2.1. Lista de Eventos Futuros

Uma simulação de eventos discretos consiste basicamente no gerenciamento do processamento dos eventos, de acordo com os tempos de ocorrência dos eventos. Este gerenciamento é baseado na Lista de Eventos Futuros (FEL - *Future Event List*), onde os eventos são listados de forma crescente de seus tempos de ocorrência. A cada processamento de um evento (com as possíveis alterações do estado do sistema), os eventos futuros originados durante o processamento do evento presente são incluídos na FEL, de acordo com os seus tempos (futuros) de ocorrência. Após a atualização da FEL, o evento mais iminente (aquele no topo da FEL) é então processado, repetindo o ciclo até que a simulação termine. A Figura 3.3 mostra a estrutura básica de simulação.

A seguir detalharemos um pouco mais alguns destes conceitos, baseados no exemplo do sistema celular.

3.2.2.2. Eventos em uma Simulação

Conforme já descrito, eventos são ocorrências que acontecem em certos instantes de tempo, podendo provocar :

- Alteração do estado do sistema ;
- Ocorrência de outros eventos futuros, que devem ser agendados.

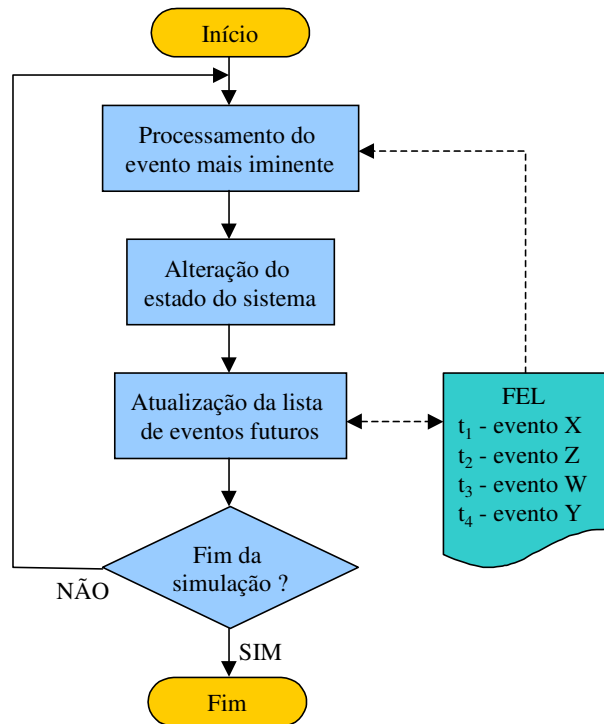


Figura 3.3: Estrutura básica da simulação de eventos discretos.

Neste exemplo, existem dois eventos, como mostra a Figura 3.4.

A seguir descrevemos o processamento dos eventos “chegada de chamada” e “término de chamada”.

3.2.2.2.1 Chegada de Chamada no instante $t = t_1$.

Quando uma chamada chega ao sistema, as seguintes tarefas devem ser realizadas como parte do processamento do evento :

Verificar a existência de canal livre para completar a chamada.

– Caso haja canal livre :

- Selecionar canal disponível, rotulando-o como “ocupado” (mudança de estado do sistema) ;

- Agendar um evento do tipo “término de chamada” (a liberação do canal) : o canal fica retido durante toda a chamada. Ao término da chamada, o canal é liberado, o que caracteriza o evento “término da chamada”. A duração da chamada (d) é uma variável

Evento	Alteração no estado do sistema	Eventos futuros causados	Coleta de estatística
Chegada de chamada	Canal passa do estado livre para o estado ocupado (caso haja canal livre).	• Caso haja canal livre, um evento “término de chamada” será agendado. • Nova “chegada de chamada” é agendada.	Caso a chamada seja bloqueada, o contador de chamadas bloqueadas é incrementado.
Término de chamada	Canal passa do estado ocupado para o estado livre.		

Figura 3.4: Descrição dos eventos do exemplo 1.

aleatória com distribuição exponencial negativa. Portanto, o evento “término de chamada” é agendado para $t = t_1 + d$ (agendamento de evento futuro).

– Caso não haja canal livre :

- Bloquear chamada, eliminando-a do sistema ;
- Incrementar o contador de chamadas bloqueadas (coleta de estatística).

O evento “chegada de chamada” (próxima chamada) é agendado para o instante $t = t_1 + T$, onde T é uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa (agendamento de evento futuro).

No processamento do evento “chegada de chamada” podemos destacar claramente as ações do tipo mudança de estado, agendamento de evento futuro e coleta de estatística.

3.2.2.2.2 Término de Chamada no instante $t = t_2$.

Liberar canal utilizado pela chamada, rotulando-o como “livre” (mudança de estado do sistema). O evento “término de chamada” apenas altera o estado do sistema, sem provocar novos eventos.

A Figura 3.5 apresenta um fluxograma mais detalhado da simulação do sistema do Exemplo 1.

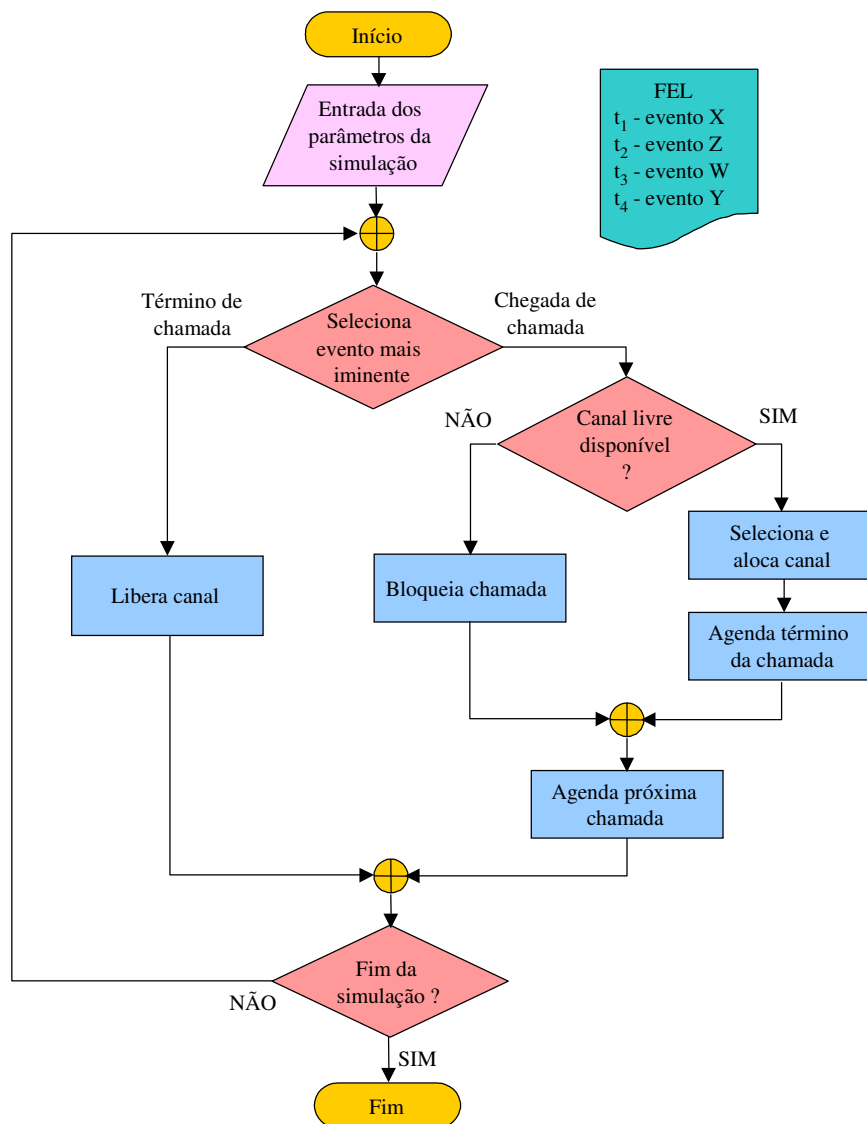


Figura 3.5: Fluxograma da simulação.

A simulação inicia-se com a entrada dos parâmetros da simulação. Para o exemplo em estudo, utilizamos os seguintes parâmetros :

- número mínimo de chamadas ;
- tempo mínimo simulado ;
- número de canais disponíveis ;

- tráfego oferecido ao sistema;
- duração média da chamada.

Após a entrada dos parâmetros, a simulação começa com a identificação do evento mais iminente. Estipula-se que o primeiro evento será sempre a chegada de uma chamada.

3.3 O Sistema Simulado

3.3.1 Diagrama em Blocos

A Figura 3.6 mostra um diagrama simplificado do sistema a ser simulado.

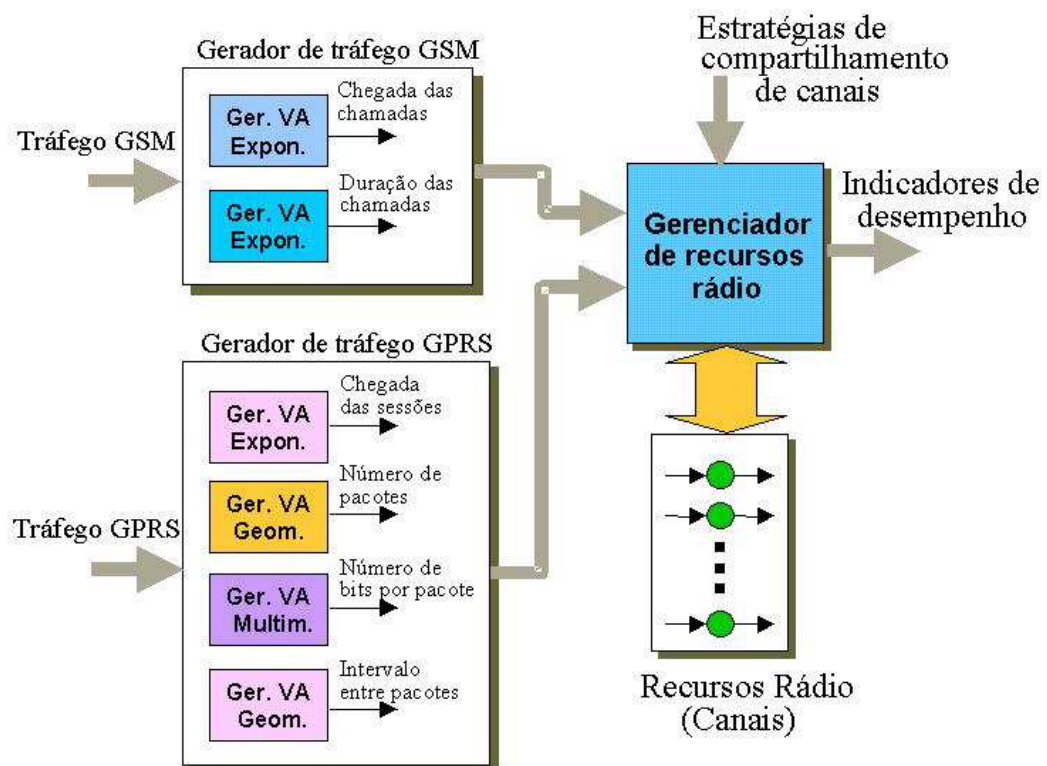


Figura 3.6: Diagrama em blocos do simulador.

Os geradores de variável aleatória (VA) nos blocos geradores de tráfego serão descritos adiante.

Os blocos “Gerador de tráfego GSM” e “Gerador de tráfego GPRS” geram chamadas e sessões, conforme os modelos de Erlang B e de pacotes, respectivamente. O bloco Gerenciador

de recursos de rádio é responsável pelo compartilhamento de canais entre os serviços GSM e GPRS. Dentre as funções exercidas pelo Gerenciador de recursos de rádio, podemos destacar :

- Alocação e liberação de canais ;
- Controle da fila de pacotes aguardando transmissão ;
- Garantia de prioridade do serviço GSM sobre o GPRS ;
- Cálculo dos indicadores de qualidade dos serviços e desempenho.

Os geradores de chamadas e sessões criam alguns dos eventos processados no simulador.

3.3.2 Características Básicas do Sistema a ser Simulado

A Figura 3.7 apresenta a estrutura de quadros do sistema GSM/GPRS. Cada canal GSM tem largura de banda de 200 kHz. Este canal é compartilhado no tempo por oito usuários durante $577 \mu s$. Estes oito intervalos de tempo (*time slots*) formam um quadro TDMA do GSM com duração de 4,615 ms. Já os *time slots* usados pelo GPRS são chamados de PDCH (*Packet Data Channel*). Cada PDCH é formado por doze *Radio Blocks* (R_B). Cada *Radio Block* de duração de 20 ms é formado por quatro *time slots* de quatro quadros TDMA consecutivos.

A seguir são descritas as características básicas do sistema celular utilizado no simulador :

- O sistema celular é composto por apenas uma célula. Os efeitos associados à propagação do sinal de RF são modelados através do uso aleatório uniformemente distribuído de quatro *Code Schemes* (CS), método utilizado pelo serviço GPRS que implica em quatro diferentes taxas de transmissão de acordo com a intensidade do sinal ;
- O número de canais de tráfego no sistema a ser simulado é uma entrada da simulação ;
- A unidade mínima de tempo no sistema será um *Radio Block* ;
- Duas estratégias de compartilhamento de canais entre os serviços GSM e GPRS são previstas : a) Todos os canais são compartilhados. Canais podem ser utilizados tanto para o serviço GSM quanto para o serviço GPRS, mas com prioridade de uso dos canais

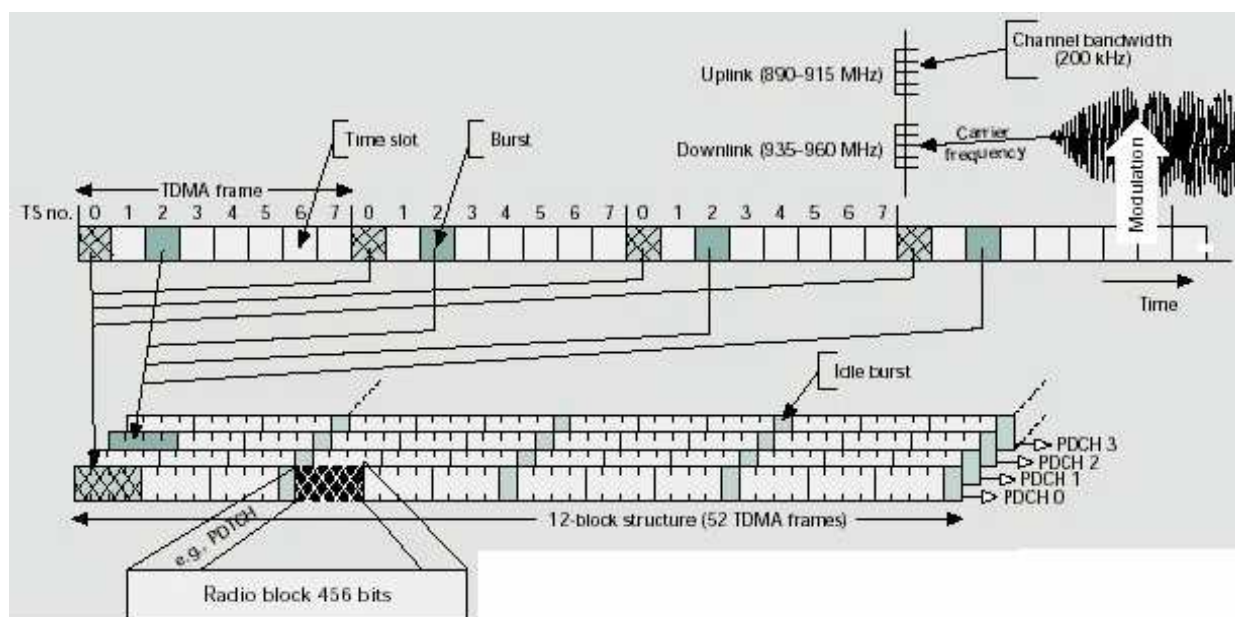


Figura 3.7: Estrutura de quadros do sistema GSM/GPRS [Kalden].

dada aos usuários do serviço GSM. b) Parte dos canais é de uso exclusivo para o serviço GPRS e os canais restantes são compartilhados entre os serviços GSM e GPRS, como no caso a) com prioridade de uso dos canais dada aos usuários do serviço GSM nos canais restantes.

- Chamadas de voz (tráfego GSM) interrompem a transmissão de um pacote. É implementado um mecanismo onde um canal em uso por um usuário GPRS pode ser disponibilizado a um usuário GSM;
- Há compartilhamento de canal entre usuários na transmissão de um pacote no serviço GPRS - operação *Time Slot Sharing* (TSS) - onde dois ou mais estações móveis podem compartilhar o mesmo canal;
- Implementação da operação *Multi Slot Capability* (MSC) no serviço GPRS, onde uma estação móvel pode usar até quatro canais;
- Para simplificação do simulador, não será implementado o mecanismo de acesso do terminal móvel ao sistema.

Características referentes ao tráfego de voz :

- Tráfego de voz tem maior prioridade que o tráfego de pacotes ;
- Chamadas são bloqueadas quando não houver canais disponíveis (não há fila para chamadas de voz) ;
- Chamadas bloqueadas são eliminadas do sistema ;
- Quando houver mais de um canal disponível, um canal será selecionado aleatoriamente.

Características referentes ao tráfego de pacotes :

- Transmissão de pacotes tem menor prioridade que o tráfego de voz, quando canais são compartilhados entre os serviços GSM e GPRS ;
- Não se esperará o final da transmissão de um *Radio Block* quando ocorrer a interrupção da transmissão do pacote por uma chamada de voz. Assim o número de bits que falta ser transmitido terá que ser armazenado em uma tabela ;
- Sessões e pacotes não atendidos por falta de canal são colocadas numa fila, aguardando a liberação de um canal ;
- Serão considerados quatro *Code Schemes* (CS), permitindo diferentes taxas de transmissão ;
- O tempo de retenção do canal por um usuário GPRS dependerá do CS, da quantidade de *Radio Block* utilizados e do número de bits a serem transmitidos ;
- Ao término de cada pacote de uma dada sessão, o canal utilizado é liberado ;
- A fila de espera de pacotes para um canal disponível possui tamanho infinito ;
- O bloco de bits do usuário (um pacote) deve ser dividido em unidades chamadas *Radio Blocks* de tamanho dependente do CS utilizado :
 - Para CS-1 : *Radio Block* com 181 bits de *payload* (carga útil) ;
 - Para CS-2 : *Radio Block* com 268 bits de *payload* ;
 - Para CS-3 : *Radio Block* com 312 bits de *payload* ;

- Para CS-4 : *Radio Block* com 428 bits de *payload*.
- Sob o ponto de vista da implementação do simulador, o fato de se utilizar quatro quadros TDMA consecutivos para a formação de um *Radio Block* não é relevante, pois a estrutura de multiquadros TDMA para formação do PDCH, apresentada na Figura 3.7, não é explicitamente implementada;
- Cada *Radio Block* dura 20 ms - esta informação contribui para determinar quanto tempo um canal permanece alocado a um usuário GPRS;
- Cada segmento de voz também dura 20 ms, entretanto o canal é alocado durante toda a duração da chamada de voz;
- A transmissão total de um pacote de um usuário pode requerer vários *Radio Blocks*;
- Possibilidade de transmitir com vários *Radio Blocks* (operação *Multi Slot Capability*).

3.3.3 Interrupção de Transmissão de Pacotes

Uma característica importante do sistema GSM/GPRS é o caráter *preemptive* do tráfego de voz com relação ao tráfego de pacotes. O caráter *preemptive* permite que um canal em uso para a transmissão de pacote (GPRS) seja alocado a uma chamada de voz (GSM), interrompendo, assim, a transmissão do pacote. Esta é uma forma de garantir a prioridade do serviço de voz sobre o de pacotes. A Figura 3.8 mostra um exemplo de interrupção.

Quando a transmissão de um pacote é interrompida, o restante do pacote (a parte que ainda não foi transmitida) é colocado em uma fila, aqui chamada de fila de interrupção. Na prática, são armazenadas nesta fila as informações necessárias para o restabelecimento da transmissão do pacote quando um canal é liberado. As condições no restabelecimento da transmissão podem mudar com relação às aquelas antes da interrupção. Por exemplo, as condições de propagação podem mudar, de forma que um diferente *code scheme* deve ser utilizado. Portanto, os tempos de retenção do canal podem mudar. Desta forma, deve-se armazenar o número de bits restantes e não o tempo restante de transmissão.

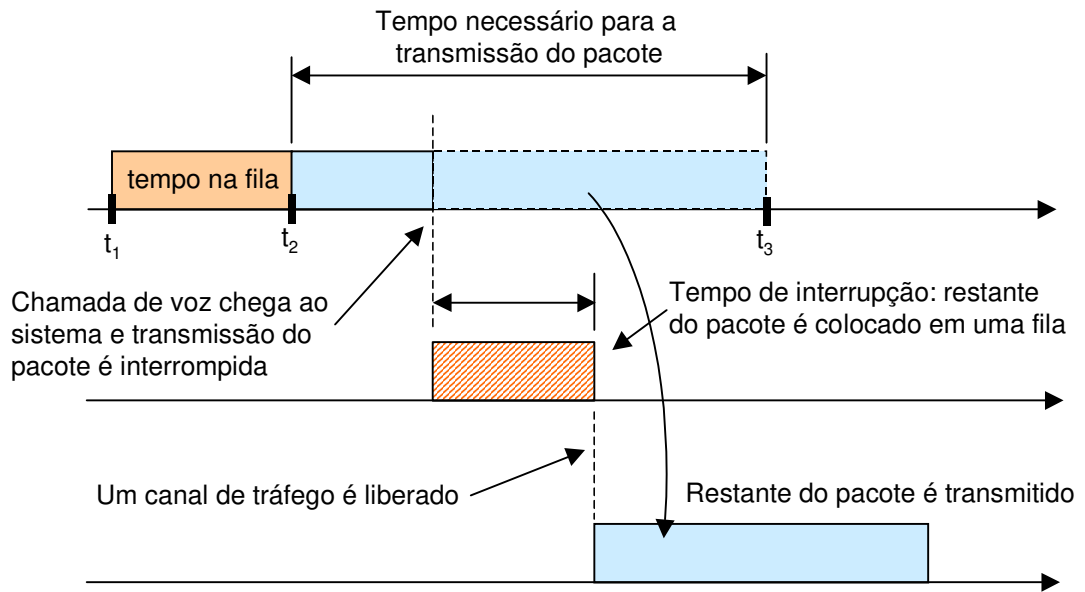


Figura 3.8: Interrupção da transmissão de pacote.

3.3.4 Tabelas no Simulador

A operação do simulador é baseada em algumas tabelas que armazenam informações a respeito do estado do sistema (tabelas de alocação dos canais, fila de interrupção, fila de espera, sessões ativas e de eventos futuros) e informações a respeito do estado das sessões. Os valores apresentados nas tabelas são apenas demonstrativos. Estas tabelas são apresentadas na sequência desta subseção.

Fila de interrupção

Nesta fila, exemplificada na Tabela 3.1, as informações dos pacotes interrompidos por uma chamada de voz são armazenadas de forma que, quando houver canal disponível, seja possível realizar os cálculos necessários para as suas transmissões. Os pacotes armazenados nesta fila têm prioridade sobre os pacotes na fila de espera, ou seja, assim que um canal é liberado, o simulador verifica primeiro se existe algum pacote na fila de interrupção para depois verificar a fila de espera. Em cada posição da fila (colunas) armazena-se o número identificador da sessão, o número identificador do pacote, o número de bits que restam para serem transmitidos e o tempo de entrada do pacote na fila.

Posição na fila	1	2	3	4	5
Número da sessão	36	45	46	100	204
Número do pacote	3	5	2	7	9
Bits restantes	107	100	1380	2333	500
Tempo de entrada	127,0	128,4	130,8	134,6	150,7

Tabela 3.1: Fila de interrupção.

Fila de espera

Esta fila armazena as informações dos pacotes à espera de transmissão. A Tabela 3.2 mostra um exemplo desta fila e as informações armazenadas. Em cada posição da fila armazena-se o número identificador da sessão, o número identificador do pacote e o tempo de entrada do pacote na fila.

Posição na fila	1	2	3	4	5
Número da sessão	36	45	46	100	204
Número do pacote	3	5	2	7	9
Tempo de entrada	127,0	128,4	130,8	134,6	150,7

Tabela 3.2: Fila de espera.

Sessões Ativas

Uma sessão estará ativa enquanto ainda existirem pacotes a serem transmitidos ou em transmissão. O estado ativo da sessão ocorrerá durante : (a) a transmissão de um dos pacotes, (b) o tempo de espera entre dois pacotes e (c) a espera de um pacote por um canal disponível (pacote na fila de espera ou de interrupção).

A Tabela 3.3 mostra exemplos de sessões ativas, onde são armazenados o número identificador da sessão, o número de pacotes a serem transmitidos, a quantidade de segmentos do pacote ativo, o tempo de transmissão do pacote, o tempo do pacote nas filas de espera e interrupção, o número total de interrupções do pacote ativo e o tipo de serviço.

Número identificador da sessão	30	32	35	36
Número de pacotes a serem transmitidos	5	3	2	7
Quantidade de segmentos do pacote ativo	2	3	2	8
Tempo de transmissão do pacote ativo	0,01	0,015	0,019	0,012
Tempo na fila de espera do pacote ativo	12,5	60,8	0,6	2,0
Tempo na fila de interrupção do pacote ativo	0,2	0,8	0	0
Número total de interrupções do pacote ativo	2	1	0	0
Tipo de serviço	WWW	FTP	<i>E-mail</i>	FTP

Tabela 3.3: Sessões ativas.

Convenciona-se que o “número de pacotes a serem transmitidos” correspondem aos pacotes futuros e àquele em transmissão. O item “número de pacotes a serem transmitidos” da tabela de sessões ativas será atualizado sempre após a conclusão da transmissão de um pacote. Quando o número de pacotes a ser transmitido chegar a “0”, a sessão é eliminada da tabela.

Tabela de Alocação de Canais

A tabela de alocação de canais armazena informações importantes sobre as chamadas e as transmissões de pacotes que ocorrem nos canais. As informações armazenadas são :

- estado dos canais (restante ocupado = 0, restante livre = 1, exclusivo ocupado = 2, exclusivo livre = 3);
 - restante ocupado significa o canal que restou, depois de selecionar os canais exclusivos, estar ocupado;
 - restante livre significa o canal que restou, depois de selecionar os canais exclusivos, estar livre;
 - exclusivo ocupado significa o canal selecionado como exclusivo estar ocupado;
 - exclusivo livre significa o canal selecionado como exclusivo estar livre;
- tipo de serviço trafegando no canal (GSM ou GPRS);

- para o caso de serviço GPRS ;
 - início da transmissão ;
 - final da transmissão ;
 - *Code Scheme* utilizado ;
 - números identificadores da sessão.

Um exemplo de alocação de canais é mostrado na Tabela 3.4 :

Canal	1	2	3	4	5
Estado	0	1	1	2	3
Início de transmissão (t_2)		122,6	124,3	127,0	129,1
Final de transmissão (t_3)		152,1	157,1	158,1	159,1
Sessão		33	55	66	88
CS usado		2	3	4	1
Tipo do serviço	GSM	GPRS	GPRS	GPRS	GPRS

Tabela 3.4: Alocação de canais.

Tabela de Eventos Futuros

A tabela de eventos futuros mostra os eventos cujas ocorrências estão agendadas. Este tipo de tabela é um dos componentes centrais de uma simulação de eventos discretos. Os eventos futuros são listados nesta tabela em uma ordem crescente de tempo (futuro) de ocorrência. Quando um novo evento futuro deve ser agendado, este é incluído na tabela de eventos futuros na posição correta de forma a manter a ordem crescente de tempo de ocorrência. O controle central do simulador de eventos discretos é feito através desta tabela, processando-se aquele evento mais iminente. Após o processamento do evento, volta-se à tabela de forma a identificar o próximo evento e processá-lo.

Uma etapa fundamental em simulação de eventos discretos é o agendamento de eventos. O agendamento faz parte do processamento do evento sendo processado no instante de tempo $t = t_0$. As etapas genéricas do agendamento de um evento são :

1. Determina-se o intervalo de tempo Δt entre o instante atual (t_0) e a ocorrência do evento que será agendado. Este tempo depende do tipo de evento sendo processado e do evento a ser agendado. Por exemplo, se o evento sendo processado é a chegada de uma chamada, devemos agendar o término da chamada. O tempo neste caso é a duração da chamada. Outros exemplos são tempo de transmissão, intervalo entre chamadas, etc ;
2. O tempo em que o evento a ser agendado deverá ocorrer é dado por $t_0 + \Delta t$, onde t_0 é o instante atual ;
3. O evento é então armazenado na tabela de eventos futuros, ordenada em ordem crescente de tempo de ocorrência do evento.

Uma vez processado, o evento é retirado da tabela de eventos futuros e os eventos restantes avançam uma posição na tabela. A estrutura da lista de eventos futuros é composta dos seguintes campos :

- Tempo de ocorrência do evento ;
- Tipo do evento ;
 - * Amostragem ;
 - * Chegada de uma chamada (GSM) ;
 - * Liberação de um canal pelo GSM ;
 - * Chegada de uma sessão (GPRS) ;
 - * Chegada de um pacote (GPRS) ;
 - * Liberação de um canal pelo GPRS.
- Número identificador da seqüência da chamada ou sessão (Nºseqüencial) ;
- Número do canal que está sendo alocado ou liberado no momento.

A Tabela 3.5 mostra um exemplo de tabela de eventos futuros.

3.3.5 Definição das Variáveis

As variáveis utilizadas no simulador podem ser classificadas nos seguintes grupos :

Seqüência de eventos	Tempo de Ocorrência	Tipo do Evento	Nºseqüencial	Nºcanal
1	2,0	2	1	1
2	2,5	4	1	1
3	3,2	6	2	5
4	4,0	2	0	1
5	4,7	1	1	7
6	5,7	3	2	2
7	11	5	0	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tabela 3.5: Eventos futuros.

- Variáveis aleatórias com distribuições de probabilidades definidas são usadas para definir o tráfego gerado pelos usuários GSM e GPRS. Por exemplo, a duração de uma chamada GSM segue uma distribuição exponencial com valor médio conhecido;
- Variáveis aleatórias com distribuições desconhecidas são usadas para definir o desempenho do sistema e, portanto, aquelas cujas distribuições desejamos determinar através da simulação. Por exemplo, o valor médio da vazão de dados no sistema GPRS;
- Variáveis (ou parâmetros) de entrada de simulação são usadas para caracterizar o sistema particular a ser simulado. Por exemplo, o número de canais disponíveis ao sistema.

3.3.6 Variáveis do Gerador de Sessões do GPRS

O modelo de tráfego para as sessões do GPRS utilizado neste simulador é uma versão simplificada daquele proposto por [Reyes], caracterizado como sessões de *Web Browsing* consistidas em uma seqüência de páginas na transmissão em *download* (do servidor para o cliente). A principal simplificação feita é o tratamento da chegada de uma sessão, tratada como uma página composta por um conjunto de pacotes. Nesta subseção descreveremos um modelo de tráfego simplificado. A Figura 3.9 mostra o modelo com as variáveis utilizadas.

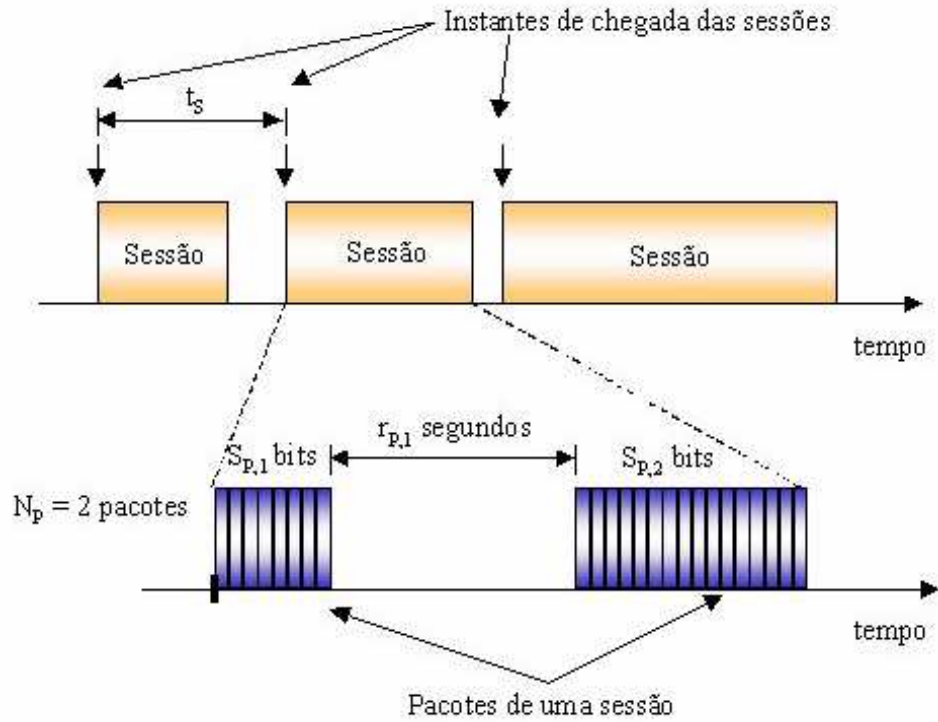


Figura 3.9: Modelo de tráfego de pacotes adotado no simulador.

As características deste modelo são :

- Uma sessão é composta por N_p pacotes ;
- Cada pacote é composto por S_p bits ;
- Intervalo t_s entre chegada de sessões é modelado como uma variável aleatória (VA) com distribuição exponencial ;
- Intervalo entre pacotes r_p é modelado como uma VA com distribuição geométrica ;
- O número de pacotes N_P que compõem uma sessão é uma VA com distribuição geométrica ;
- O tamanho dos pacotes em bits S_p é uma VA com distribuição Multimodal.

A Tabela 3.6 mostra as variáveis associadas ao gerador de sessões para o serviço GPRS.

Todos os momentos das distribuições da Tabela 3.6 são uma simplificação do modelo de [Reyes] para o serviço *Web Browsing* e mostrado a seguir :

Parâmetro	Amostra	Distribuição	Parâmetro da distribuição
Intervalo entre chegada de sessões	t_S	Exponencial	Intervalo médio entre sessões $1/\lambda_s$
Intervalo entre pacotes	r_p	Geométrica	Valor médio - $\overline{r_p}$
Tamanho do pacote em bits	S_p	Multimodal	Valor médio - $\overline{S_p}$
Número de pacotes por sessão	N_P	Geométrica	Valor médio - $\overline{N_P}$

Tabela 3.6: Variáveis associadas ao gerador de sessões de Web browsing.

- $1/\lambda_s = 30 \text{ s}$;
- $\overline{r_p} = 1 \text{ s}$;
- $\overline{S_p} = 320, 4200, 4608 \text{ ou } 12000 \text{ bits}$;
- $\overline{N_P} = 47 \text{ pacotes}$.

3.3.7 Variáveis do Gerador de Chamadas de Voz do GSM

O modelo de tráfego para o sistema GSM é aquele baseado no modelo de Erlang B, como descrito na Tabela 3.7 :

Parâmetro	Amostra	Distribuição	Parâmetro da distribuição
Intervalo entre chamadas	t_V	Exponencial	Intervalo médio entre chamadas $1/\lambda_v$
Duração da chamada	d_V	Exponencial	Valor médio $1/\mu_v$

Tabela 3.7: Variáveis do gerador de chamadas do GSM.

- O intervalo entre chegadas das chamadas é modelado como uma VA com distribuição exponencial com média $1/\lambda_v$;
- A duração da chamada é modelada como uma VA com distribuição exponencial de média $1/\mu_v$;
- O tráfego oferecido é definido por $A = \lambda_v/\mu_v$ Erlangs.

3.3.8 Variáveis de Saída do Simulador - Indicadores de Desempenho dos Sistemas

No sistema GSM :

- Taxa de bloqueio no sistema GSM (B) : razão entre o número de chamadas GSM bloqueadas e o número total de chamadas GSM.

No sistema GPRS :

- Atrasos na fila de espera : Um pacote entra na fila de espera quando, ao chegar ao sistema, não for encontrado um canal disponível para a transmissão. O tempo que o pacote fica nesta fila é denominado de atraso na fila de espera. Este tempo é a diferença entre os instantes de tempo t_2 e t_1 na Figura 3.10. O tempo de transmissão do pacote é dado por $t_3 - t_2$.

Quando um pacote é retirado da fila de espera para ser transmitido, o tempo que o pacote ficou esperando na fila é armazenado na tabela de sessões ativas referente à sessão e ao pacote correspondente, para que se possa calcular ao final da transmissão do pacote seu tempo gasto no sistema.

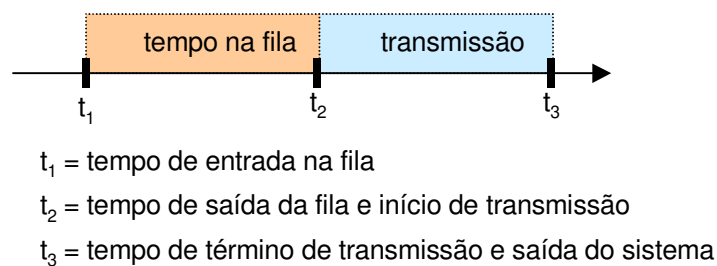


Figura 3.10: Tempos de espera e transmissão de um pacote.

- Atrasos na fila de interrupção : O atraso na fila de interrupção observado por um pacote é a somatória de todos os tempos aguardados na fila de interrupção durante seu processo de transmissão. A Figura 3.11 mostra um exemplo de transmissão de pacotes com interrupção.

Quando um pacote é retirado da fila de interrupção, o tempo que o pacote permaneceu nesta fila (por exemplo, intervalo $t_6 - t_5$ na Figura 3.11) é somado ao tempo total de interrupção, que está armazenado na tabela de sessões ativas, nas posições referentes à sessão e ao pacote em questão. Portanto, ao final da transmissão, o tempo total de interrupção no exemplo da Figura 3.11 será $[(t_4 - t_3) + (t_6 - t_5)]$.

- Atrasos no sistema : O atraso no sistema é o tempo gasto na fila de espera, adicionado do tempo total de interrupções e do tempo gasto efetivamente para a transmissão. Este tempo, por sua vez, é a diferença entre o instante da conclusão da transmissão (t_7 na Figura 3.11) e o instante em que o pacote entrou na fila de espera (t_1 na Figura 3.11).

Ao término da transmissão de cada pacote, os seguintes dados são coletados e utilizados para cálculos estatísticos :

- atraso na fila de espera ;
- atraso na fila de interrupção ;
- número de interrupções sofridas pelo pacote.

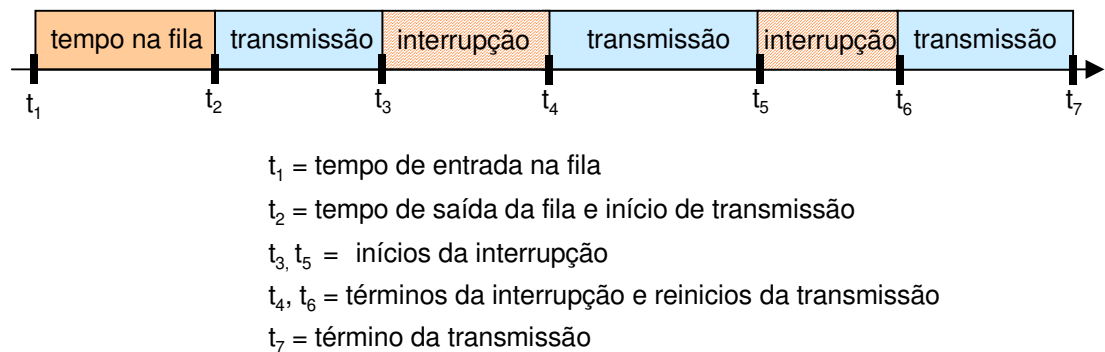


Figura 3.11: Tempos de espera e transmissão de um pacote com interrupção.

As taxas de transmissão possíveis são calculadas pela razão entre o números de bits transmitidos em cada *Radio Block* e a sua duração (20 ms). Por exemplo, a taxa de transmissão para CS1 é de 9,05 kbps (181 bits / 20 ms). A coleta da taxa de transmissão é feita por pacote transmitido e depende do *Code Scheme* (CS) e do *Multi Slot Capability* (MSC) selecionado. A seleção do MSC é feita de acordo com canais livres (exclusivos e restantes). Se

houver 4 canais livres, seleciona MSC4 e utiliza os quatro canais disponíveis, se houver 3 canais livres, seleciona MSC2 e utiliza dois dos três canais disponíveis, se houver apenas 1 canal livre, seleciona MSC1 e utiliza este único canal disponível.

a) Se MSC1, a taxa de transmissão para cada CS vale :

CS	Taxa de transmissão
CS1	9,05 kbps
CS2	13,4 kbps
CS3	15,6 kbps
CS4	21,4 kbps

b) Se MSC2, a taxa de transmissão para cada CS é duplicada e vale :

CS	Taxa de transmissão
CS1	18,1 kbps
CS2	26,8 kbps
CS3	31,2 kbps
CS4	42,8 kbps

c) Se MSC4, a taxa de transmissão para cada CS é quadruplicada e vale :

CS	Taxa de transmissão
CS1	36,2 kbps
CS2	53,6 kbps
CS3	62,4 kbps
CS4	85,6 kbps

- Vazão média V_{med} , vazão mínima V_{min} e vazão máxima V_{max} : A vazão mínima é o menor valor de vazão observado no sistema GPRS ao final da simulação. A vazão máxima é o maior valor de vazão observado no sistema GPRS ao final da simulação. A vazão média é média das vazões observadas durante as transmissões dos pacotes ponderada pelo atraso no sistema.

Os valores das vazões máxima e mínima são obtidos entre todas as vazões computadas e armazenadas ao longo da simulação.

Cálculo da vazão média em bit/s.

$$V_{med} = \frac{\sum_i R_i \times T_i}{T_s} \quad (3.1)$$

em que R_i é a taxa de transmissão do i -ésimo pacote, T_i é o tempo de uso efetivo do canal do i -ésimo pacote e T_s é o tempo de atraso no sistema (tempo de transmissão + tempo da fila de espera + tempo da fila de interrupção).

Consideramos T_s , onde ocorreram efetivamente transmissões de pacotes e onde não ocorreram transmissões de pacotes devido a espera nas filas de espera e interrupção conforme Figura 3.12.

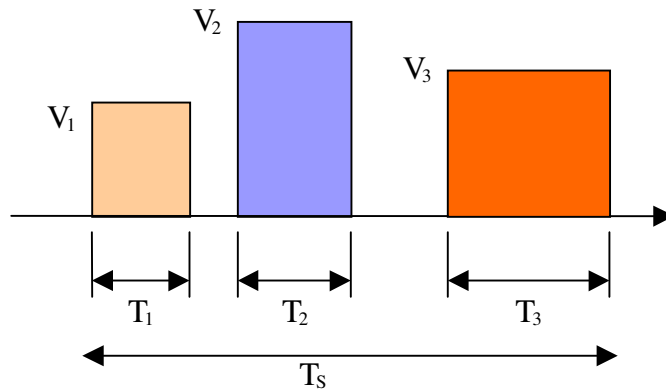


Figura 3.12: Tempo de sistema T_s .

Na Figura 3.12 V_1, V_2 e V_3 representam vazões em determinados intervalos de tempo e dependem do CS e do MSC selecionados.

Número médio de interrupções por pacote causadas pelo GSM (N_I) : Todas as interrupções que um pacote ativo sofrer serão contabilizadas e armazenadas na tabela de sessões ativas na respectiva posição referente à sessão do pacote ativo. Ao término da transmissão de um pacote, o número de interrupções nesta tabela é zerado.

– Indicadores de desempenho comuns :

- Vazão mínima no sistema;
- Vazão média no sistema;
- Vazão máxima no sistema;
- Atraso médio de pacotes no sistema;
- Número de canais usados pelo GPRS;
- Número de canais usados pelo GSM;
- Probabilidade de bloqueio.

3.3.9 Processamento dos Eventos

Esta subseção apresenta os fluxogramas de processamento de todos os eventos discretos do simulador GPRS/GSM. Seis eventos são previstos neste simulador :

1. Chegada de sessão de pacotes;
2. Chegada de chamada de voz;
3. Término de chamada de voz;
4. Chegada de pacote;
5. Término de pacote;
6. Amostragem do sistema.

Os cinco primeiros eventos (Chegada de sessão de pacotes, Chegada de chamada de voz, Término de chamada de voz, Chegada de pacote e Término de pacote) são de natureza aleatória. Enquanto que o evento Amostragem do sistema é de natureza determinística, pois ocorrem em instantes de tempo pré-determinados.

3.3.9.1 Cálculo do tempo de retenção de canal para transmissão de pacotes

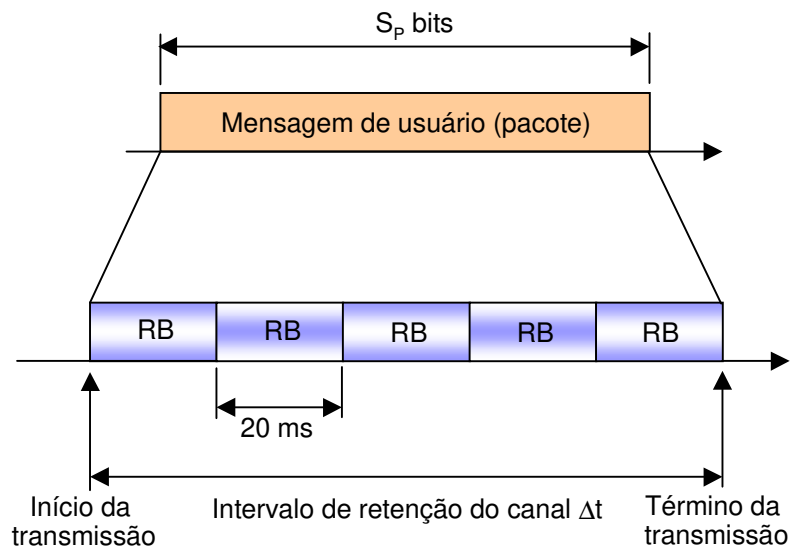
Quando um canal é alocado para a transmissão de um pacote, o conhecimento do tempo de retenção do canal permite o agendamento do instante de liberação do canal.

Segundo a especificação do sistema GPRS, uma mensagem de um usuário é transmitida em um ou mais *Radio Blocks*. O tamanho de um *Radio Block* em termos de bits de informação depende do *Code Scheme* utilizado como mostra a Tabela 3.8.

<i>Code Scheme</i>	Número de bits
CS-1	181 bits
CS-2	268 bits
CS-3	312 bits
CS-4	428 bits

Tabela 3.8: Tamanho em bits do *Radio Block* em função do *Code Scheme*.

Desta forma, um pacote deve ser fragmentado em pequenos blocos de duração de 20 ms. A quantidade de bits de cada bloco depende do CS utilizado e do MSC selecionado. Esta fragmentação da mensagem é ilustrada na Figura 3.13.

Figura 3.13: Fragmentação de um pacote em *Radio Block*.

Assim, o tempo de retenção do canal para a transmissão de um pacote pode ser calculado seguindo as seguintes etapas :

1. Dado o número de bits na mensagem do usuário (pacote), o *Code Scheme* a ser utilizado e o MSC selecionado, calculamos o número de *Radio Blocks* (N_{RB}) necessários

$$N_{RB} = \frac{S_{p,i}}{N_{MSC} \times R_B} \quad (3.2)$$

em que $S_{p,i}$ é o número de bits contidos no i -ésimo pacote da sessão, N_{MSC} é a quantidade de *Radio Blocks* e depende do MSC selecionado e R_B é o tamanho em bits do *Radio Block* para o CS utilizado. Se $N_{RB} > N_{MSC}$, a diferença em bits vai para a fila de espera.

2. Dado que cada *Radio Block* dura 20 ms, o tempo total de retenção do canal t_{RE} é dado por

$$t_{RE} = 0,02 \times N_{RB} \text{ (s)}. \quad (3.3)$$

É importante notar que, seguindo as etapas acima, geralmente teremos um número não inteiro de *Radio Blocks*. A rigor, este número deveria ser aproximado para o próximo número inteiro, uma vez que, fisicamente, não é possível transmitir frações de *Radio Blocks*. No entanto, para aumentar a precisão do tempo total de retenção do canal, N_{RB} não será aproximado para um número inteiro.

3.3.9.2 Processamento do evento “Chegada de sessão no tempo $t = t_0$ ”

As principais etapas deste processamento são :

- a) caracterizar parcialmente a sessão ;
- b) verificar se existe canal exclusivo ou restante disponível. Canais exclusivos são canais reservados exclusivamente ao serviço GPRS e canais restantes são a diferença entre todos os canais do sistema e os canais exclusivos ;
 - b.1) se existe canal exclusivo ou restante disponível : alocar canal e determinar tempo de retenção do canal para a transmissão daquele pacote ;
 - b.2) se não existir canal exclusivo ou restante disponível : compartilhar canal usado por pacote para uso de outro pacote.
 - b.3) se não existir canal em uso para pacote, vá para item c) ;
- c) agendar a chegada da próxima sessão ;
- d) fim do processamento.

A seguir, descrevemos as ações tomadas neste processamento de chegada de sessão.

Procedimento (a) : Caracterizar parcialmente a sessão.

Uma sessão é caracterizada pelo tipo de serviço (*E-mail*, HTTP, FTP, etc), número de pacotes, número de bits em cada pacote e intervalo de tempo entre o final de um pacote e o início do próximo. No procedimento de chegada de uma sessão, apenas o tipo da sessão e o número de pacotes contidos na mesma são determinados. Os demais parâmetros, tais como, número de bits em cada pacote e intervalo de tempo entre eles, são determinados quando o pacote for efetivamente alocado a um canal para transmissão. Portanto, na chegada de uma sessão, apenas o gerador de variáveis aleatórias geométricas é utilizado para gerar o número de pacotes na sessão.

Para simplificação, apenas a sessão do tipo HTTP é prevista.

A Figura 3.14 apresenta todas as características de uma sessão.

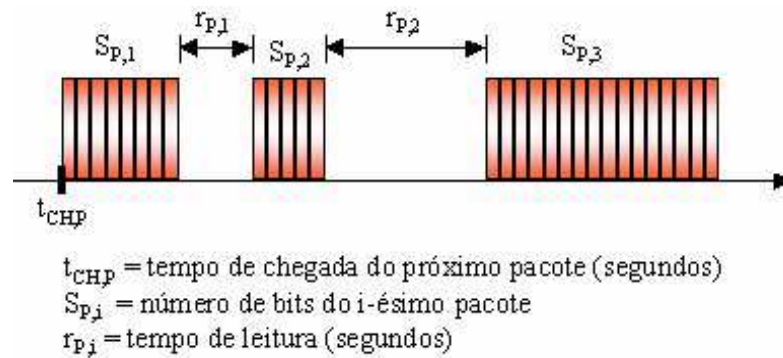


Figura 3.14: Sessão de pacotes na simulação.

Os parâmetros que caracterizam parcialmente a sessão são armazenados na tabela de sessões ativas.

Procedimento (b) : Verificar se existe canal exclusivo ou restante disponível.

Através do exame da matriz de estado dos canais apresentada anteriormente, pode-se identificar a existência ou não de canais livres. Os processamentos destas duas possibilidades são detalhados a seguir.

b.1) Há canal exclusivo ou restante disponível.

Neste caso, o processamento subsequente objetiva alocar um ou mais canais (operação MSC) para a transmissão do primeiro pacote da sessão e calcular o tempo em que o canal a ser alocado ficará retido para a transmissão. Este tempo de retenção depende da taxa de transmissão (que depende do CS utilizado) e da quantidade de bits a serem transmitidos.

A seguir, apresentamos o procedimento para o cálculo do tempo de retenção do canal e do instante de tempo em que o canal será liberado.

Procedimentos para a determinação do tempo de retenção do canal para transmissão de pacote.

1) Determinar o número de bits contidos no primeiro pacote ($S_{P,1}$) da primeira sessão, usando o gerador de VA com distribuição de Multimodal ;

2) O uso de MSCs entre 3 possibilidades (MSC1, MSC2 e MSC4) implica na possibilidade do uso de um, dois ou quatro *Radio Blocks*, respectivamente, para transmissão do mesmo pacote. Verifica-se então a quantidade de canais livres (exclusivos e restantes) para operação MSC. Se houver 4 canais livres, transmite na operação MSC4 nos quatro canais disponíveis, se houver 3 canais livres, transmite na operação MSC2 em dois dos três canais disponíveis, se houver apenas 1 canal livre, transmite na operação MSC1 neste único canal disponível.

3) Selecionar um *Code Scheme* dentre os quatro possíveis, a partir de uma variável aleatória uniforme discreta com espaço amostral (1, 2, 3 e 4). A escolha do CS pode também ser feita baseada na estimativa da interferência observada no instante em que o pacote chega ao sistema ;

4) A partir do CS e MSC selecionados, podemos calcular o tempo de retenção do canal, necessário para a transmissão do pacote, da seguinte maneira :

4.1) Número de *Radio Blocks* (N_{RB}) necessários

$$N_{RB} = \frac{S_{p,i}}{N_{MSC} \times R_B}. \quad (3.4)$$

4.2) Se N_{RB} for maior que a quantidade de *Radio Blocks* indicada pelo MSC selecionado, a diferença em bits vai para a fila de espera, como mostrado no exemplo a seguir.

Exemplo 1. Para um pacote de 1200 bits, se escolhidos MSC4 (4 R_Bs) e CS1 (181 bits), os 476 $[1200 - (4 \times 181)]$ bits restantes vão para a fila de espera e os 4 R_Bs serão ocupados totalmente transmitindo 724 (4×181) bits.

O pacote é constituído de vários segmentos a serem transmitidos. Supondo $P_{n,m}$ a identificação de um pacote, n sendo a identificação do pacote e m sendo a identificação da quantidade de segmentos do pacote. O pacote n de uma determinada sessão a ser transmitido só poderá ser decrementado depois que todos os m segmentos forem transmitidos. No Exemplo 1, o pacote possui cinco segmentos pois quatro serão ocupados plenamente com 724 (4×181) bits cada um. O quinto segmento com 476 $[1200 - (4 \times 181)]$ bits vai para a fila de espera e atualiza-se a quantidade de segmentos na tabela de sessões ativas. O segmento de pacote, para ocupação do canal, é tratado da mesma forma que se trata o pacote, ou seja, é como se o segmento de pacote fosse um novo pacote. Somente depois que todos os segmentos do pacote forem transmitidos, é retirado este pacote na tabela de sessões ativas. O segmento de pacote também poderá ser interrompido e ir para a fila de interrupção.

Exemplo 2. Se para o Exemplo 1 forem escolhidos MSC4 (4 R_Bs) e CS3 (312 bits), os quatro R_Bs comportam 1248 (4×312) bits. Neste caso, os três primeiros R_Bs transmitirão 936 (3×312) bits cada e o quarto R_B transmitirá 264 $(1200 - 936)$ bits. Este exemplo mostra o caso de N_{RB} fracionário com 3,846 $[(1200 \times 4) / 1248]$ R_Bs .

4.3) O tempo necessário para a transmissão do pacote por canal será

$$t_{RE} = N_{RB} \times 20 \text{ ms} \quad (3.5)$$

em que N_{RB} pode ser valor fracionário.

4.4) O instante do término da transmissão do pacote (F_{PC}) por canal ocupado é calculado por

$$F_{PC} = t_{RE} + t_0, \quad (3.6)$$

em que t_0 é o instante de tempo de chegada da sessão.

5) Agendar o evento “liberação do canal ocupado pelo GPRS” no tempo $t = F_{PC}$.

b.2) Não há canal exclusivo ou restante disponível (compartilhamento de *time slot* é permitido - operação TSS) :

b.2.1) Se existir canal exclusivo ou restante sendo utilizado para transmissão de pacotes, então :

1) Se houver apenas um canal exclusivo ou restante transmitindo pacotes, selecioná-lo para atender ao pacote que chegou. Caso haja mais de um canal transmitindo pacotes, selecionar aquele cujo tempo de início de transmissão (t_2 na Figura 3.10 e na tabela de alocação de canais) seja o mais próximo de t_0 (instante de chegada do pacote).

2) Determinar o tamanho do pacote $P = \text{Multimodal}$.

3) Determinar o tempo de retenção do canal (t_{RE}).

4) Calcular o tempo de transmissão restante após interrupção :

$$t_{tr} = t_L - t_0 \quad (3.7)$$

em que t_{tr} é o tempo de transmissão restante, t_L é o tempo de liberação do canal agendado do pacote interrompido e t_0 é o instante da interrupção.

5) Agendar o tempo de liberação do canal (término do pacote) para $t_L = t_0 + t_{tr}$. O agendamento implica na atualização da tabela de eventos futuros.

· Se $t_{RE} > t_{tr}$, o restante do pacote em bits vai para fila de interrupção pelo procedimento do item 6 a seguir ;

· Se $t_{RE} \leq t_{tr}$, o canal é liberado mais cedo.

6) Após atender o pacote que chegou, devemos caracterizar o pacote interrompido, que estava sendo transmitido pelo canal selecionado. Este pacote é colocado no final da fila de interrupção. A caracterização do pacote interrompido objetiva basicamente determinar o número de bits restantes a serem transmitidos na oportunidade de um novo canal.

- Calcular o tempo restante de transmissão do pacote. O tempo final (previsto) de transmissão do pacote (t_3) está armazenado na tabela de alocação de canais. Dado que o instante atual na simulação é (t_0), o tempo restante de transmissão (t_R) é

$$t_R = t_3 - t_0. \quad (3.8)$$

- Com o tempo restante de transmissão t_R , podemos calcular o número de *Radio Blocks* (N_{RB}) que faltam para serem transmitidos. Como o intervalo de tempo é de 0,02 segundo por *Radio Block*,

$$N_{RB} = \frac{t_R}{0,02}. \quad (3.9)$$

- Com o CS armazenado na tabela de alocação de canais que estava sendo utilizado na transmissão do pacote, podemos calcular finalmente o número de bits que restam para serem transmitidos

$$N_{BIT} = N_{RB} \times R_B,$$

em que R_B é o tamanho em bits do *Radio Block*.

- O pacote interrompido é então colocado no final da fila de interrupções. Isto corresponde a colocar as informações deste pacote na tabela de fila de interrupções.

- Finalmente, devemos retirar o agendamento do fim da transmissão deste pacote da tabela de eventos futuros.

b.2.2) Se não existir canal exclusivo ou restante sendo utilizado para transmissão de pacotes, o compartilhamento de canal não é permitido. O pacote deve ser colocado na fila de espera.

b.2.2.1) Colocar as seguintes informações a respeito do pacote na fila de espera :

- Número identificador da sessão ;
- Número identificador do pacote que está na fila de espera ;
- Tempo de entrada na fila de espera. Este tempo será utilizado para determinar

o tempo que o pacote ficou na fila de espera.

Procedimento (c) : Agendar a chegada da próxima sessão

Este é o último passo neste processamento “Chegada de sessão”. O agendamento da próxima sessão ocorre independentemente da existência de canal para transmissão da sessão processada. Uma sessão é agendada apenas na ocorrência da chegada da sessão, pois o modelo de tráfego de pacotes modela o intervalo entre chegadas de sessões.

Para agendar a próxima sessão, calcula-se o intervalo entre sessões (que depende do tráfego de sessões) como sendo uma amostra de uma VA com distribuição exponencial. Deve-se atualizar a tabela de eventos futuros.

Procedimento (d) : Fim do processamento

O fluxograma do tratamento da chegada de uma sessão está mostrado na Figura 3.15.

3.3.9.3 Processamento do evento “Chegada de chamada de voz no tempo $t = t_0$ ”

Neste evento, uma chamada de voz chega ao sistema e um canal restante livre (se houver) deve ser alocado. Caso não haja canal restante disponível no sistema neste instante, mas exista uma ou mais transmissões de pacotes em curso, então uma das transmissões de pacotes será interrompida e o canal que estava sendo utilizado passa a servir a chamada de voz que acabou de chegar ao sistema. Caso todos os canais restantes estejam ocupados por chamadas de voz, a chamada é bloqueada e eliminada do sistema. Independentemente da alocação de canal para a chamada, a próxima chamada deve ser agendada. Os passos do processamento deste evento são os seguintes :

- 1) Verificar se há canal restante disponível no sistema na tabela de alocação de canais.

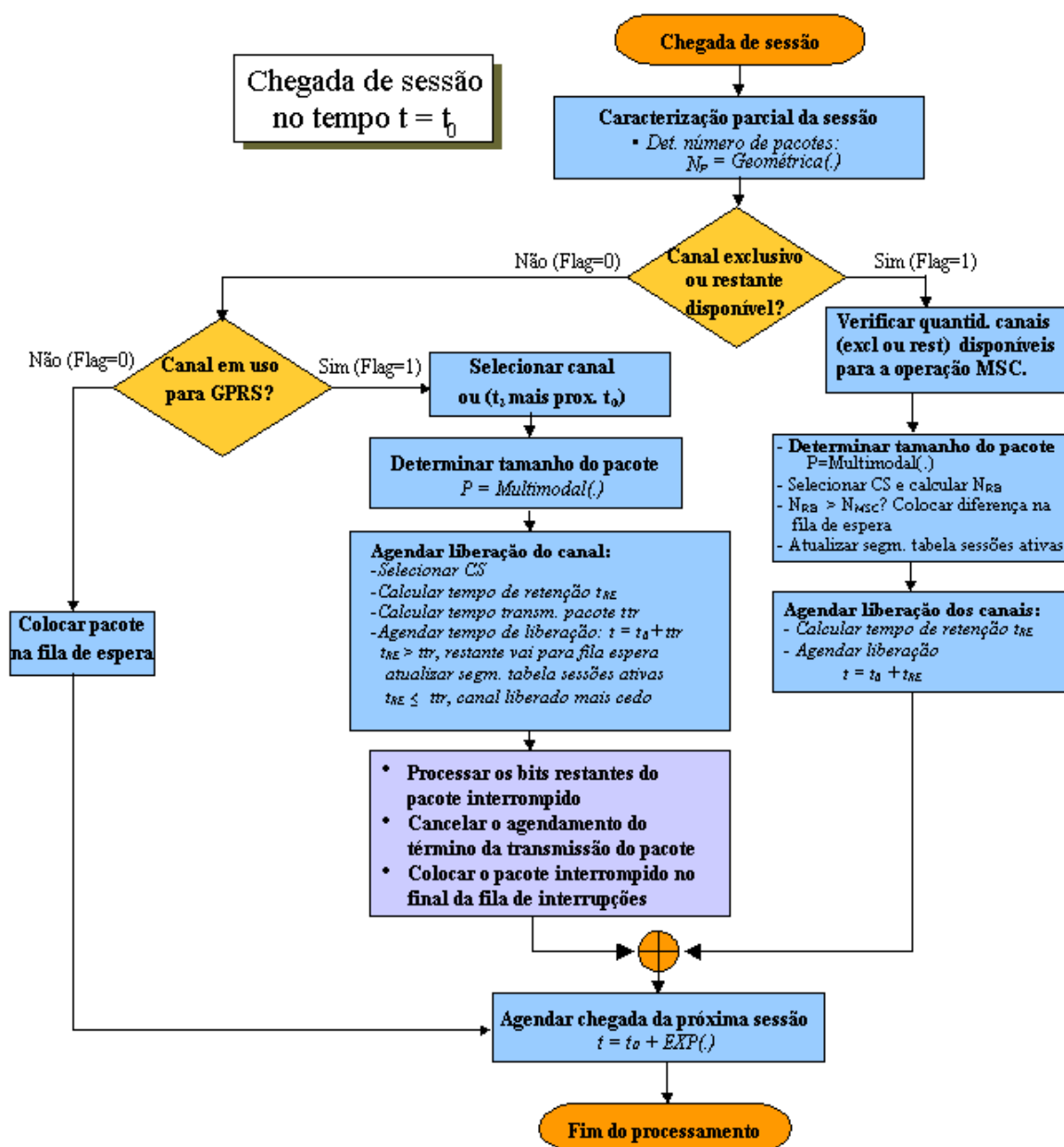


Figura 3.15: Fluxograma do evento chegada de sessão.

a) Caso haja mais do que um canal restante disponível, selecionar aleatoriamente um deles para a transmissão da chamada de voz.

a.1) Determinar a duração da chamada (d), que é uma VA com distribuição exponencial;

a.2) Agendar o tempo de liberação do canal com sendo $t = t_0 + d$. O agendamento implica na atualização da tabela de eventos futuros;

a.3) Fim do processamento.

b) Caso não haja canal restante disponível, verificar se há canal sendo utilizado para transmissão de dados (GPRS) :

b.1) Se existir canal restante sendo utilizado para transmissão de pacotes :

b.1.1) Se houver apenas um canal restante transmitindo pacotes, selecioná-lo para atender a chamada de voz. Caso haja mais de um canal transmitindo pacotes, selecionar aquele cujo tempo de início de transmissão (t_2 na Figura 3.10 e na Tabela 3.4) seja mais próximo de t_0 (instante de chegada da chamada) ;

b.1.2) Determinar duração da chamada d , que é uma VA com distribuição exponencial;

b.1.3) Agendar o tempo de liberação do canal (término da chamada de voz) para $t = t_0 + d$. O agendamento implica na atualização da tabela de eventos futuros;

b.1.4) Após atender a chamada de voz, devemos caracterizar o pacote interrompido, que estava sendo transmitido pelo canal selecionado. Este pacote é colocado no final da fila de interrupção. A caracterização do pacote interrompido objetiva basicamente determinar o número de bits que resta para ser transmitido, de forma que, quando aquele usuário GPRS receber outro canal, a transmissão daquele pacote possa ser continuada.

- Calcular o tempo restante de transmissão do pacote. O tempo final (previsto) de transmissão do pacote (t_3) está armazenado na tabela de alocação de canais.

Dado que o instante atual na simulação é t_0 , o tempo restante de transmissão t_R é

$$t_R = t_3 - t_0. \quad (3.10)$$

- Com o tempo restante de transmissão t_R , podemos calcular o número de *Radio Blocks* N_R que faltam para serem transmitidos. Como o intervalo de tempo é de 0,02 segundo por *Radio Block*,

$$N_{R_B} = \frac{t_R}{0,02}. \quad (3.11)$$

- Dado o CS que estava sendo utilizado na transmissão do pacote (esta informação está armazenada na tabela de alocação de canais), podemos calcular finalmente o número de bits que restam para serem transmitidos

$$N_{BIT} = N_{R_B} \times R_B, \quad (3.12)$$

em que R_B é o tamanho em bits do *Radio Block*.

- O pacote interrompido é então colocado no final da fila de interrupções. Isto corresponde a colocar as informações deste pacote na tabela da fila de interrupções (Tabela 3.1).

- Finalmente, devemos retirar o agendamento do fim da transmissão deste pacote, presente na tabela de eventos futuros (Tabela 3.5).

b.2) Se não existir canal restante sendo utilizado para dados :

Bloquear a chamada e coletar dados (incrementar contador de chamadas bloqueadas).

2) Agendar chegada da próxima chamada de voz :

Como no caso do evento de chegada de sessão, a etapa final do processamento de chegada de chamada de voz deve ser o agendamento da próxima chegada de chamada de voz, independentemente da existência de canal restante livre para ser alocado à chamada. A próxima chamada de voz é agendada para $t = t_0 + t_a$, onde t_0 é o instante de chegada da presente

chamada e t_a é um tempo aleatório exponencialmente distribuído $[EXP(.)]$ e atualizada na tabela de eventos futuros.

O fluxograma deste processamento com as principais etapas é mostrado na Figura 3.16.

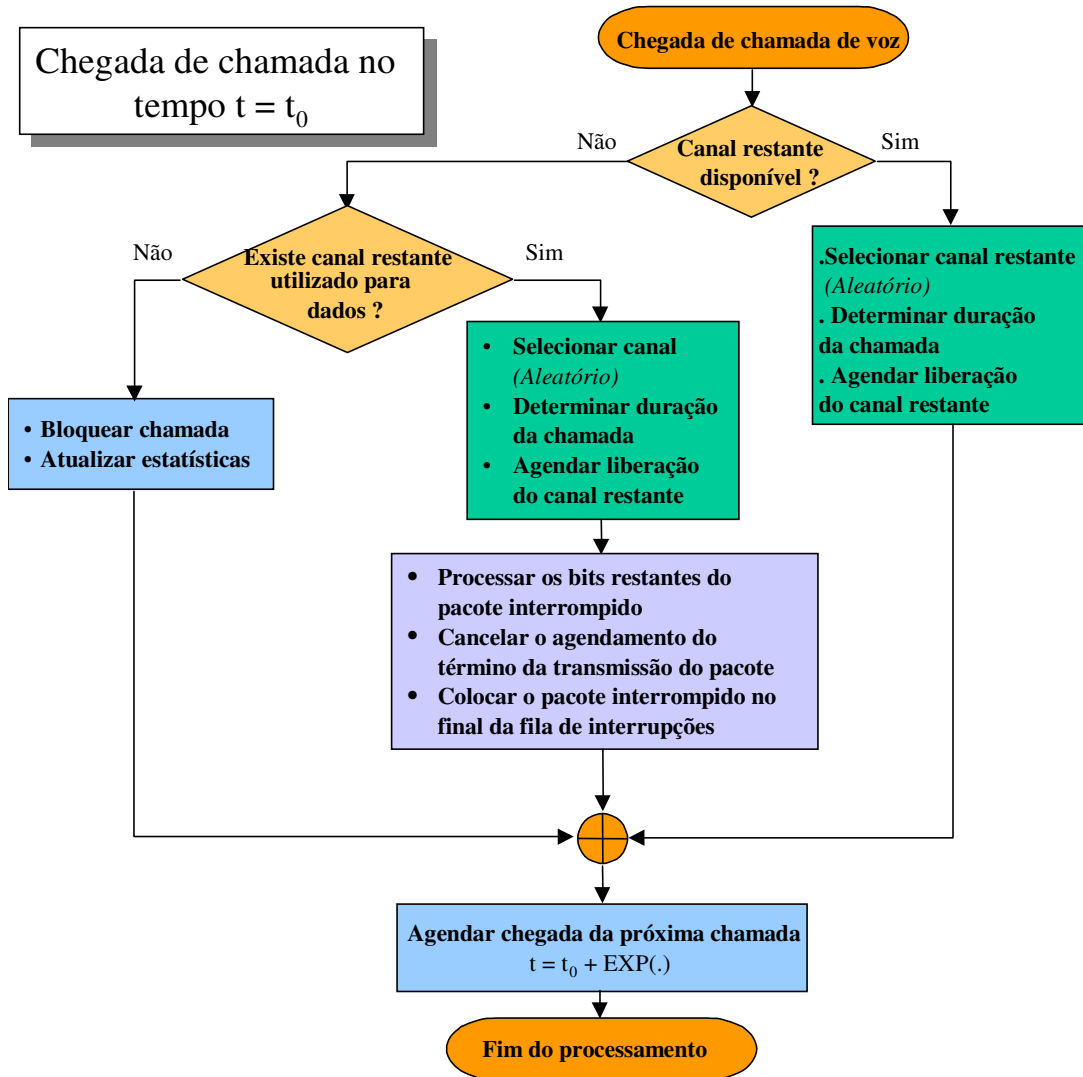


Figura 3.16: Fluxograma do evento chegada de chamada de voz.

3.3.9.4 Processamento do evento “Término da chamada de voz no tempo $t = t_0$ ”

Este evento ocorre quando uma chamada de voz termina, de forma que o canal restante que estava sendo utilizado é liberado. Uma vez liberado, este canal poderá ser utilizado para a transmissão de uma nova chamada de voz, se houver, ou um pacote que esteja nas filas de interrupção ou de espera (nesta ordem) aguardando a liberação de um canal. O

processamento deste evento é descrito a seguir :

1) Liberar canal restante ;

Atualizar a tabela de alocação de canais restantes e estatísticas.

2) Verificar se há nova chamada de voz ;

· Se houver, proceder como descrito no fluxograma do evento chegada de chamada de voz ;

· Senão, processar o item 3) a seguir.

3) Verificar se há pacotes na fila de interrupções.

3.1) Caso haja pacotes na fila de interrupções :

a) Coletar informações do pacote interrompido no topo da fila de interrupções (números identificadores da sessão e do pacote e número de bits restantes para transmissão) ;

b) Selecionar CS a ser utilizado (aleatório) e determinar tamanho do *Radio Block* (R_B) ;

c) Calcular tempo de retenção do canal Δt ;

- O número de *Radio Blocks* N_{RB} (de duração 20 ms) necessário para a transmissão do pacote é

$$N_{RB} = \frac{N_{BIT}}{R_B}, \quad (3.13)$$

em que N_{BIT} é o número de bits restantes para transmissão e R_B é o tamanho em bits do *Radio Block*. Note que o número N_{BIT} está armazenado na tabela de interrupções (ver Tabela 3.1) ;

- O tempo necessário para a transmissão do pacote é

$$\Delta t = N_{RB} \times 0,02. \quad (3.14)$$

d) Agendar liberação do canal restante para o instante $t_0 + \Delta t$ e atualizar tabela de eventos futuros ;

e) Atualizar tabela de alocação de canais ;

f) Atualizar a fila de interrupção (avançar todos os pacotes);

g) Calcular o tempo que o pacote ficou na fila de interrupção. O instante de tempo que o pacote entrou na fila está armazenado na tabela da fila de interrupção. O tempo que pacote permaneceu na fila é igual ao instante atual (t_0) subtraído do tempo que ele entrou na fila;

h) Atualizar as estatísticas de saída previstas anteriormante;

i) Atualizar a quantidade de segmentos na tabela de sessões ativas;

j) Fim do processamento.

3.2) Caso não haja pacotes na fila de interrupções :

Neste caso, devemos verificar se existem pacotes na fila de espera.

3.2.1) Caso haja pacotes na fila de espera :

a) Determinar a sessão a que pertence o primeiro pacote na fila (esta informação está presente na fila de espera);

b) Atualizar os dados desta sessão na tabela de sessões ativas (decrementar o número de pacotes a serem transmitidos);

c) Retirar o primeiro pacote e atualizar a fila de espera;

d) Computar o tempo que o pacote que será transmitido ficou na fila : o instante de tempo que o pacote entrou na fila está armazenado na fila de espera. O tempo que o pacote permaneceu na fila é igual ao instante atual (t_0) subtraído do tempo que ele entrou na fila;

e) Determinar o tamanho do pacote a ser transmitido usando a função Multimodal. O tamanho dos pacotes de uma sessão é determinado apenas no momento em que o pacote será transmitido;

f) Agendar a liberação do canal restante, como descrito no processamento do evento “Chegada de sessão”;

g) Atualizar a quantidade de segmentos na tabela de sessões ativas;

h) Fim do processamento.

3.2.2) Caso não haja pacotes na fila de espera :

Fim do processamento.

O fluxograma deste processamento é mostrado na Figura 3.17.

3.3.9.5 Processamento do evento “Chegada de pacote no tempo $t = t_0$ ”

Este evento é similar ao evento “Chegada de sessão”. As diferenças entre estes dois eventos são basicamente : (1) no processamento de “Chegada de pacote” não precisaremos caracterizar a sessão e (2) não agendaremos a chegada da próxima sessão quando estamos processando a chegada de um pacote. O processamento basicamente consiste em se tentar alocar um canal para a transmissão do pacote que chegou. Caso não haja canal exclusivo (se ele existir no sistema) ou restante disponível, o canal em uso para pacote é compartilhado. As etapas do processamento deste evento são :

Verificar se existe canal exclusivo ou restante disponível :

1) Há canal disponível.

O processamento subsequente se assemelha àquele utilizado no processamento de chegada de sessão quando há canal disponível. Os passos são os seguintes :

a) Verificar a quantidade de canais (exclusivos ou restantes) disponíveis para a operação MSC;

b) Determinar o número de bits no pacote ($S_{P,i}$), usando um gerador de VA com distribuição Multimodal;

c) Selecionar um canal;

d) Calcular o fim do pacote, (pelo procedimento descrito anteriormente no processamento do evento “Chegada de Sessão”). Notar que um novo CS, diferente do CS utilizado pelo pacote anterior pertencente à mesma sessão, pode ser utilizado para este novo pacote;

e) Agendar liberação de canal;

f) Atualizar a tabela de sessões ativas;

g) Fim do processamento.

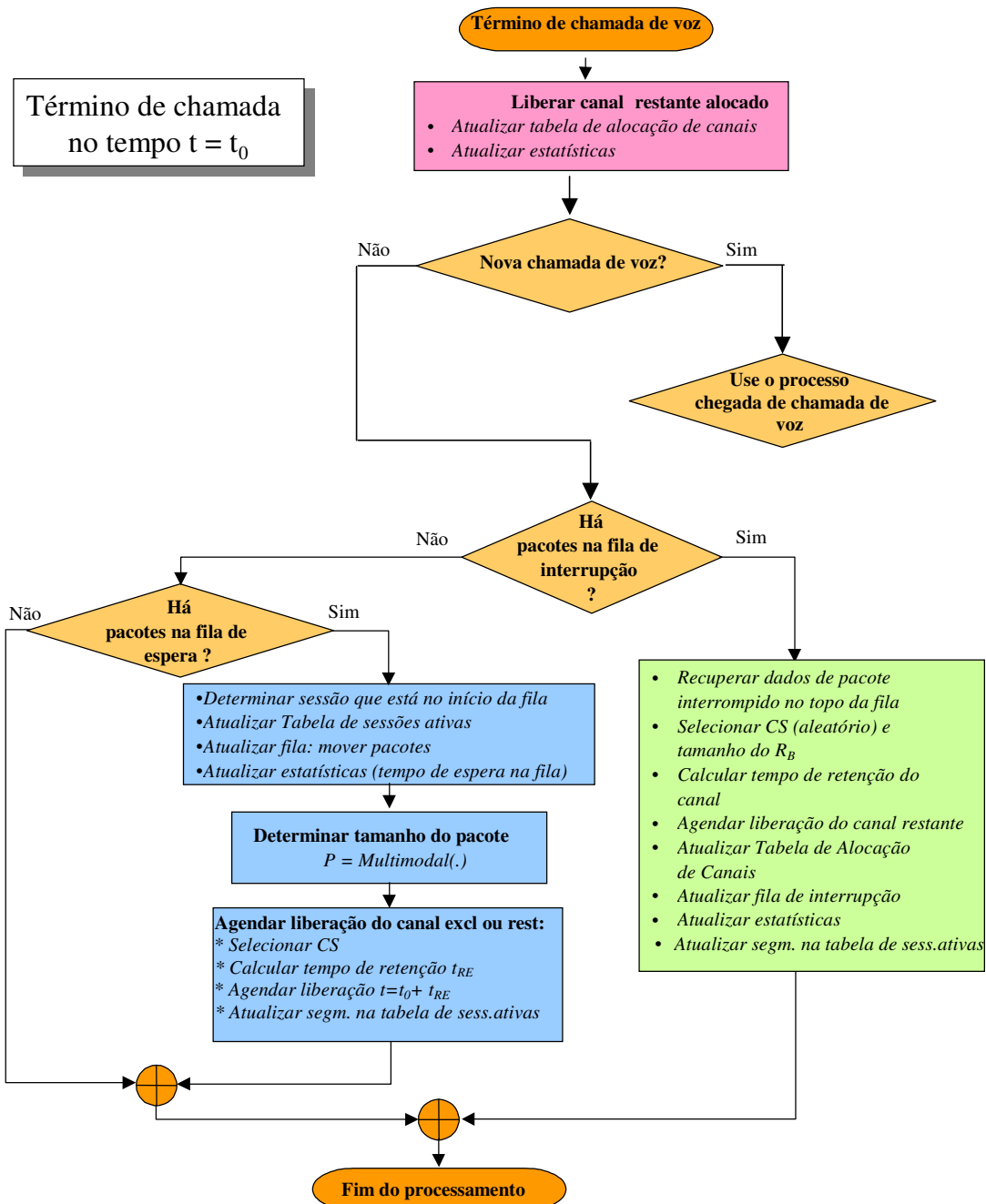


Figura 3.17: Fluxograma do evento término de chamada de voz.

2) Não há canal exclusivo ou restante disponível (compartilhamento de canal é permitido - operação TSS) :

* Se existir canal exclusivo ou restante sendo utilizado para transmissão de pacotes, então :

i. Se houver apenas um canal exclusivo ou restante transmitindo pacotes, selecioná-lo para atender ao pacote. Caso haja mais de um canal transmitindo pacotes, selecionar aquele cujo tempo de início de transmissão (t_2 na Figura 3.10 e na Tabela 3.4) seja mais próximo de t_0 (instante de chegada do pacote);

ii. Determinar tamanho do pacote $P = \text{Multimodal}(\cdot)$;

iii. Selecionar CS e calcular N_{RB} ;

iv. Atualizar a quantidade de segmentos na tabela de sessões ativas;

v. Determinar o tempo de retenção do canal (t_{RE});

vi. Agendar o tempo de liberação do canal (término do pacote) para $t = t_0 + t_{RE}$. O agendamento implica na atualização da tabela de eventos futuros;

vii. Após tratar o pacote, devemos tratar o pacote interrompido, que estava sendo transmitido pelo canal selecionado. Este pacote é colocado no final da fila de interrupção. O tratamento do pacote interrompido objetiva basicamente determinar o número de bits que restam para ser transmitido, de forma que, quando aquele usuário GPRS receber outro canal, a transmissão daquele pacote possa ser continuada.

• Calcular o tempo restante de transmissão do pacote. O tempo final (previsto) de transmissão do pacote (t_3) está armazenado na tabela de alocação de canais. Dado que o instante atual na simulação é t_0 , o tempo restante de transmissão t_R é

$$t_R = t_3 - t_0. \quad (3.15)$$

- Com o tempo restante de transmissão t_R , podemos calcular o número de *Radio Blocks* (N_R) que faltam para serem transmitidos

$$N_{R_B} = \frac{t_R}{0,02}. \quad (3.16)$$

- Dado o CS que estava sendo utilizado na transmissão do pacote e que R_B é o tamanho em bits do *Radio Block*, podemos calcular finalmente o número de bits que restam para serem transmitidos

$$N_{BIT} = N_{R_B} \times R_B.$$

- O pacote interrompido é então colocado no final da fila de interrupções. Isto corresponde a colocar as informações deste pacote na fila de interrupções (Tabela 3.1);

- Finalmente, devemos retirar o agendamento do fim da transmissão deste pacote, presente na tabela de eventos futuros.

* Se não existir canal exclusivo ou restante sendo utilizado para transmissão de pacotes, segue os passos do item b.2.2) do processamento do evento “Chegada de sessão” e fim do processamento.

O fluxograma deste processamento com as principais etapas é mostrado na Figura 3.18.

3.3.9.6 Processamento do evento “Término de pacote no tempo $t = t_0$ ”

Ao final da transmissão de um pacote, o canal exclusivo ou restante utilizado é liberado. Devemos, então, verificar se há pacotes (de qualquer sessão) em ambas as filas (de espera e de interrupção), aguardando liberação de um canal exclusivo ou restante. Caso haja pacotes na fila, o primeiro deles toma então o canal exclusivo ou restante que acabou de ser liberado, com prioridade para os pacotes na fila de interrupção. Paralelamente, verifica-se se a sessão, cujo pacote acabou de ser transmitido, possui outros pacotes. No caso positivo, a ocorrência do próximo pacote é agendada. O processamento deste evento é composto pelas seguintes etapas :

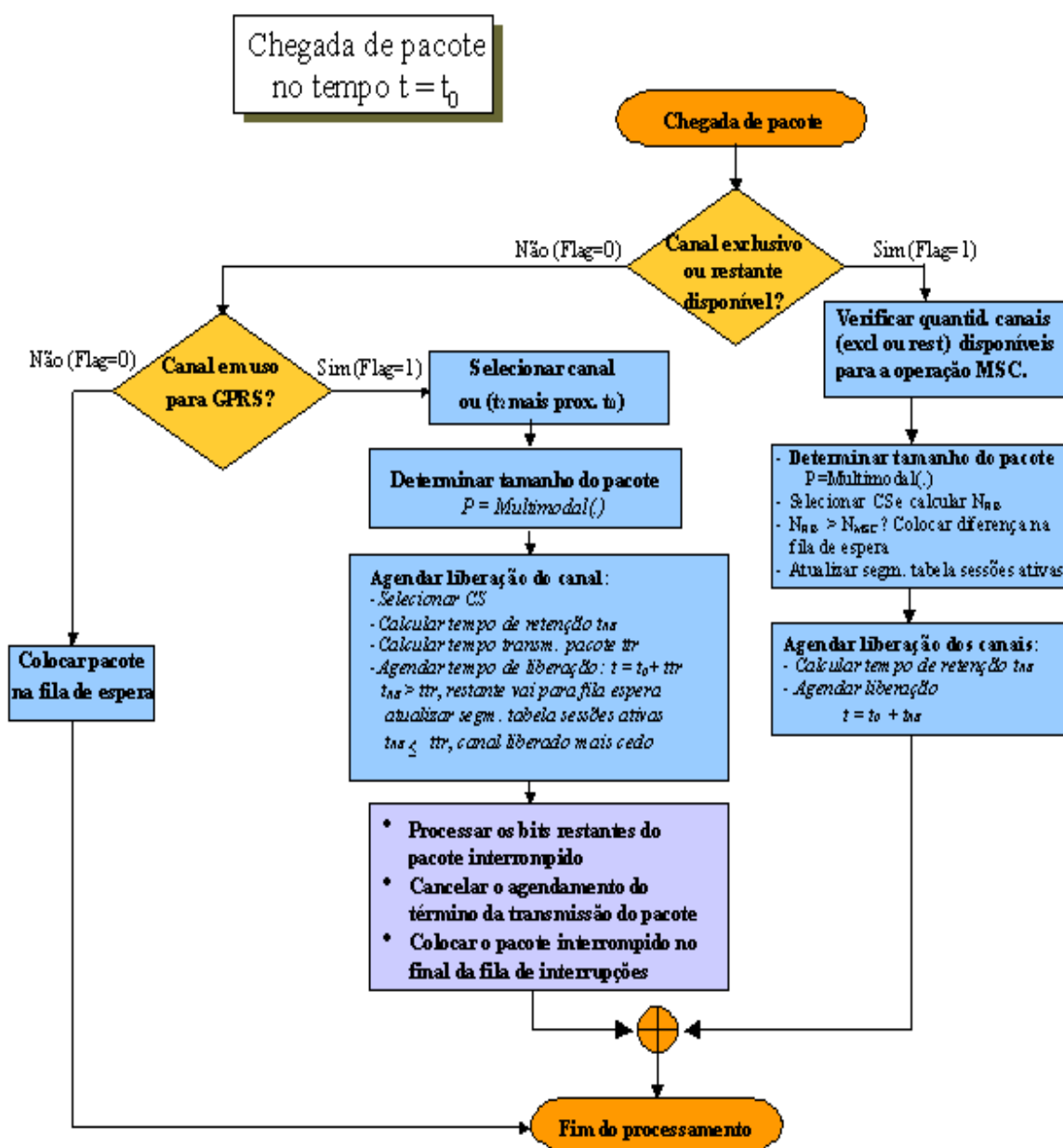


Figura 3.18: Fluxograma do evento chegada de pacote.

1) Liberar canal exclusivo ou restante de transmissão e atualizar tabela de alocação de canais e estatísticas.

2) Verificar se há ainda pacotes naquela sessão.

2.1) Se ainda houver pacotes na sessão em questão, então :

Agendar a chegada do próximo pacote, levando em conta o intervalo t_{int} entre o pacote transmitido e o próximo :

a) $t_{int} = Geométrica(.)$;

b) Chegada do próximo pacote é agendada para $t = t_0 + t_{int}$;

c) Atualizar tabela de sessões ativas.

2.2) Se não houver mais pacotes na sessão em questão, a sessão está encerrada :

a) Atualizar tabela de sessões ativas;

b) Coletar estatísticas.

3) Verificar se há pacotes na fila de interrupções.

3.1) Caso haja pacotes na fila de interrupções :

a) Coletar informações do pacote interrompido no topo da fila de interrupções (números identificadores da sessão e do pacote e número de bits restantes para transmissão) ;

b) Selecionar CS a ser utilizado (aleatório) e determinar tamanho em bits do *Radio Block* (R_B) ;

c) Calcular tempo de retenção do canal exclusivo ou restante Δt :

- O número de *Radio Blocks* (N_{R_B}) necessário para a transmissão do pacote

é

$$N_{R_B} = \frac{N_{BIT}}{R_B} \quad (3.17)$$

em que N_{BIT} é o número de bits restantes para transmissão e R_B é o tamanho em bits do *Radio Block*. Note que o número N_{BIT} está armazenado na tabela de interrupções (Tabela 3.1).

- O tempo necessário para a transmissão do pacote é

$$\Delta t = N_{RB} \times 20 \text{ ms.}$$

- d) Agendar liberação do canal exclusivo ou restante para o instante $t_0 + \Delta t$ (Atualizar tabela de alocação de canais);
- e) Atualizar fila de interrupção;
- f) Atualizar estatísticas de saída do simulador;
- g) Atualizar a quantidade de segmentos na tabela de sessões ativas;
- h) Calcular o tempo que o pacote ficou na fila de interrupção : O instante de tempo que o pacote entrou na fila está armazenado na fila de Interrupção. O tempo que o pacote permaneceu na fila é igual ao instante atual (t_0) subtraído do tempo que ele entrou na fila;
- i) Fim do processamento.

3.2) Caso não haja pacotes na fila de interrupções : Devemos verificar se existe pacote na fila de espera :

3.2.1) Caso haja pacotes na fila de espera :

- a) Determinar a sessão a que pertence o primeiro pacote na fila;
- b) Atualizar os dados desta sessão na tabela de sessões ativas (decrementar o número de pacotes a serem transmitidos);
- c) Retirar o primeiro pacote e atualizar fila de espera;
- d) Computar o tempo que o pacote que será transmitido ficou na fila : o instante de tempo que o pacote entrou na fila está armazenado na fila de espera. O tempo que pacote permaneceu na fila é igual ao instante atual (t_0) subtraído do tempo que ele entrou na fila;
- e) Determinar o tamanho do pacote a ser transmitido, usando a função Multimodal (o tamanho dos pacotes de uma sessão são determinados apenas no momento em que o pacote será transmitido);

f) Agendar a liberação do canal, como descrito no processamento do evento “Chegada de sessão” ;

g) Atualizar a quantidade de segmentos na tabela de sessões ativas ;

h) Fim do processamento.

3.2.2) Caso não haja pacotes na fila de espera :

Fim do processamento.

O fluxograma deste processamento é mostrado na Figura 3.19.

3.3.9.7 Amostragem do Sistema

Este evento ocorre a intervalos prefixados de tempo com o objetivo de coletar informações à respeito do estado do sistema. As informações coletadas na amostragem do sistema são o número de pacotes na fila $N_{PcktStack}$ aguardando transmissão e o número de pacotes no sistema $N_{pcktSys}$. O número de pacotes no sistema é a soma do número de pacotes na fila com o número de pacotes sendo transmitidos.

A amostragem ocorre em múltiplos de T_A . O valor T_A deve ser cuidadosamente escolhido de forma a garantir a captura de todas as variações da variável $N_{PcktStack}$.

O processamento do evento amostragem é descrito a seguir :

– Verificar se existem pacotes na fila aguardando a liberação de canal, através do *flag* fila.

o Se existir pacotes na fila :

- Calcular número de pacotes na fila ;

Atribuir $N_{PcktStack} = \text{Número de pacotes aguardando um canal}$.

- Calcular número de pacotes no sistema.

Atribuir $N_{pcktSys} = \text{Número de Canais} + N_{PcktStack}$.

o Se não existir pacotes na fila : neste caso, o número de pacotes no sistema é igual ao número de canais ocupados por pacotes.

- Número de pacotes na fila é igual a zero ;

- Calcular número de pacotes no sistema.

Atribuir $N_{pcktSys} = \text{Número de canais ocupados por pacotes}$.

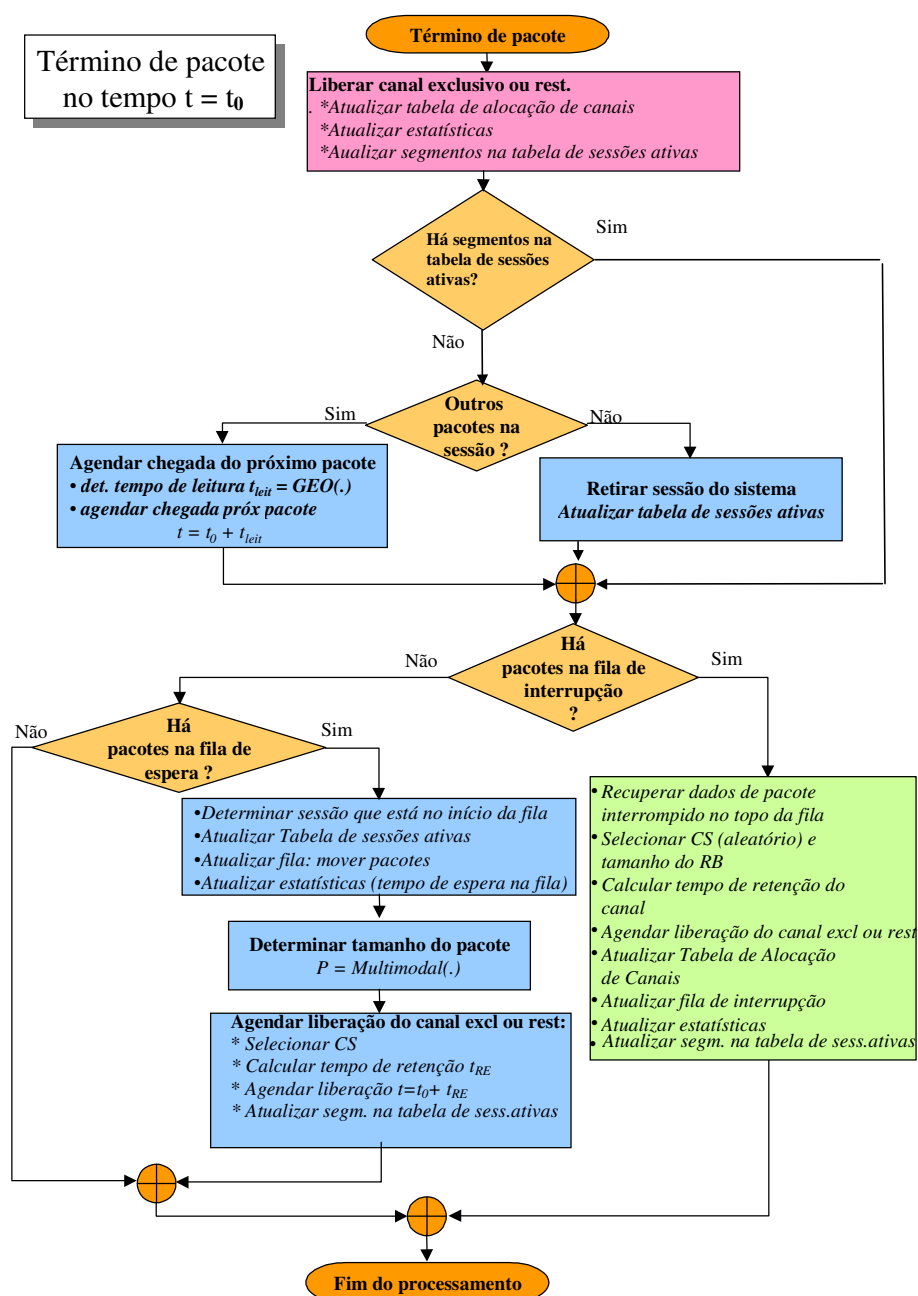


Figura 3.19: Fluxograma do evento término de pacote.

- Agendar o próximo instante de amostragem ;

$$t = t_0 + T_A \quad (3.18)$$

- Final do processamento.

Intervalo de amostragem

O valor do intervalo de amostragem T_A deve ser ajustado de tal forma a obedecer os princípios da teoria da amostragem

$$T_A \leq \frac{T_S}{2N} \quad (3.19)$$

em que T_S é o tempo médio de retenção do canal e N é o número de canais no sistema.

O fluxograma deste processamento é mostrado na Figura 3.20.

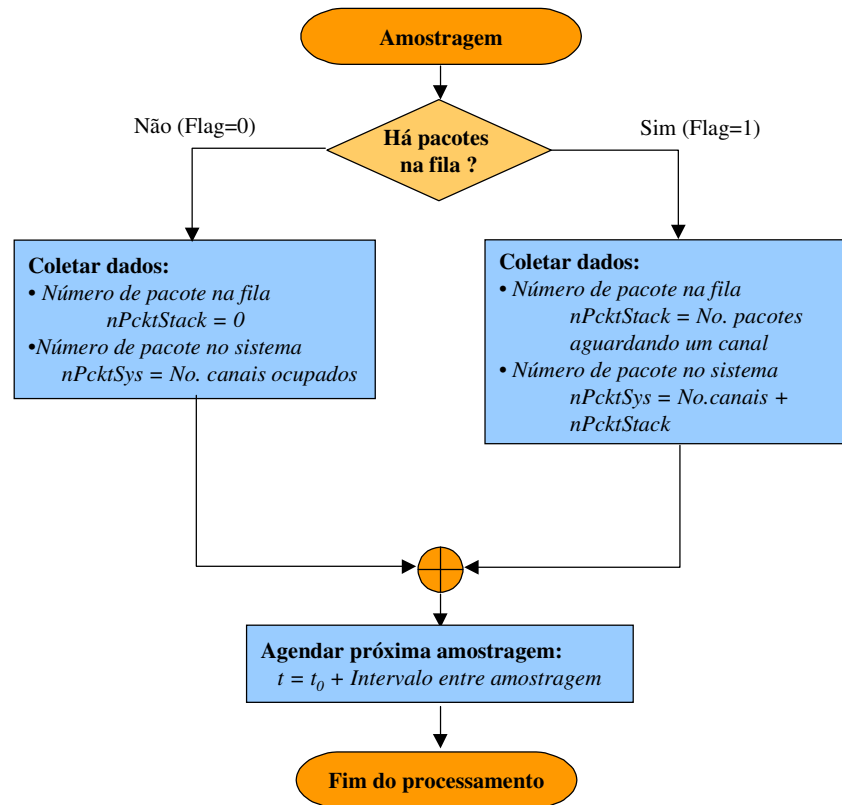


Figura 3.20: Fluxograma do evento Amostragem.

3.3.10 Métodos de Validação Empregados

A validação do simulador é dividida em duas etapas. Na primeira etapa, a parte do simulador correspondente ao tráfego de voz é testada e validada utilizando-se a tabela de Erlang B. Vários casos de número de canais e tráfego oferecido serão simulados, coletando-se a taxa de bloqueio observada. Estas taxas são, então, comparadas com os valores de probabilidade de bloqueio da tabela de Erlang B.

Na segunda etapa da validação, a parte do simulador correspondente ao tráfego de pacotes é testada e validada utilizando o modelo de tráfego de pacotes de forma simplificada, onde cada sessão é composta por apenas um pacote. Desta forma, pode-se calcular analiticamente alguns parâmetros de desempenho do sistema através do sistema de fila M/M/N, e assim compará-los com os valores correspondentes obtidos na simulação.

3.3.10.1 Validação do serviço de voz - GSM

O serviço de voz foi implementado no simulador baseado nas premissas de Erlang B, ou seja, não há fila para chamadas não atendidas e as chamadas bloqueadas são eliminadas do sistema. Portanto, a validação da etapa correspondente ao serviço de voz consiste em coletar valores de probabilidade de bloqueio no simulador para diferentes valores de números de canais e tráfego oferecido, e compará-los com os valores teóricos esperados.

A Figura 3.21 mostra os valores simulados e teóricos de probabilidade de bloqueio para 3 e 10 canais.

As Tabelas 3.9 e 3.10 mostram estes mesmos valores utilizando nível de confiança de 90 %. Cada valor simulado de probabilidade de bloqueio foi obtido a partir de 20 realizações de simulação com 50.000 chamadas em cada realização.

Observa-se que os valores simulados são muito próximos dos valores esperados teoricamente, com erros menores que 2,45 %, de onde se concluiu que a etapa do simulador correspondente ao serviço de voz está funcionando como esperado.

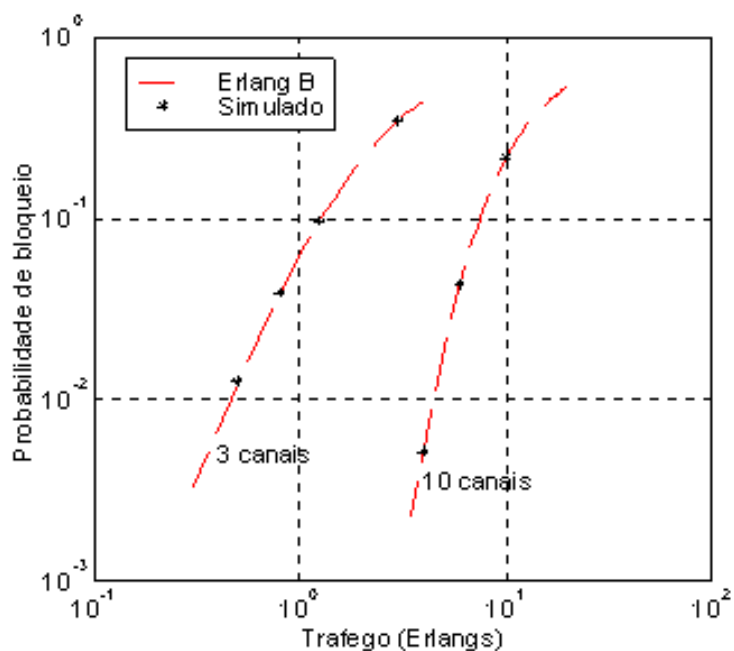


Figura 3.21: Probabilidade de bloqueio para 3 e 10 canais.

3.3.10.2 Validação do serviço de pacotes - GPRS

A etapa do simulador correspondente ao serviço GPRS foi modelada como um sistema de filas e um número pré-determinado de servidores (ou canais de tráfego). Como visto anteriormente, o modelo de sessões de pacotes utilizado é bastante complexo, onde cada sessão é composta por um conjunto de pacotes. A validação da etapa correspondente ao serviço GPRS, usando este modelo de sessões implementado, é dificultada pelo fato de não haver

Tráfego (Erlang)	Probabilidade de bloqueio (%)		
	Teórico	Simulado	Erro (%)
0,50	1,27	1,25 ± 0,103	1,575
0,8	3,87	3,88 ± 0,199	-0,259
1,25	9,70	9,64 ± 0,254	0,619
3,0	34,62	34,56 ± 0,511	0,173

Tabela 3.9: Probabilidades de bloqueio simuladas e teóricas para $N = 3$ canais.

	Probabilidade de bloqueio (%)		
Tráfego (Erlang)	Teórico	Simulado	Erro (%)
4,0	0,531	$0,518 \pm 0,099$	2,448
6,0	4,31	$4,30 \pm 0,280$	0,230
10,0	21,46	$21,46 \pm 0,472$	0,047

Tabela 3.10: Probabilidades de bloqueio simuladas e teóricas para $N = 10$ canais.

uma formulação matemática da qual poderíamos extrair resultados esperados para os parâmetros de desempenho do sistema. Desta forma, realizamos testes de validação utilizando um modelo de tráfego simples, onde cada sessão é composta por apenas um pacote. Portanto, assumimos nestes testes que cada pacote que equivale à uma sessão tem tamanho T_H segundos, onde T_H é uma variável aleatória de distribuição exponencial. Note que T_H pode ser entendido como sendo o tempo de serviço de um canal (ou servidor). Além disso, como as sessões chegam ao sistema numa taxa de λ sessões por segundo, o intervalo T_s entre chegada de sessões tem média $1/\lambda$, como ilustrado na Figura 3.22.

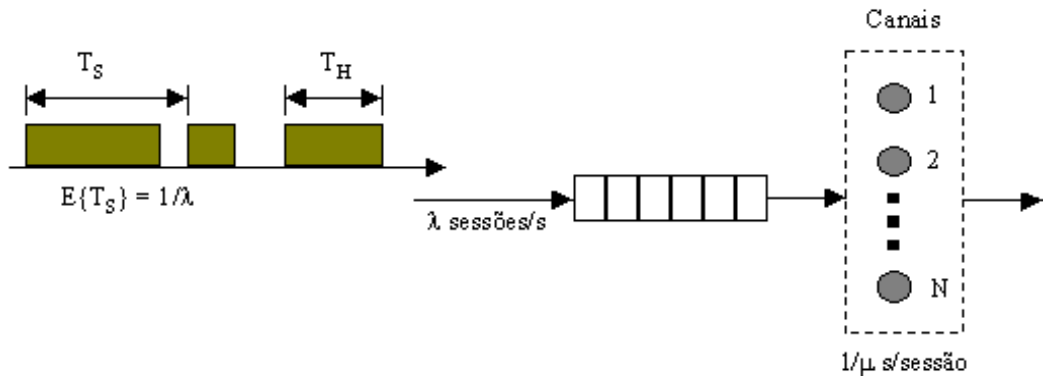


Figura 3.22: Sistema validado.

O esquema mostrado na Figura 3.22 é modelado analiticamente, onde os principais parâmetros de desempenho, como : (i) número médio de pacotes na fila (N_{FILA}), (ii) número médio de pacotes no sistema (N_{SIS}), (iii) tempo médio gasto na fila (T_{FILA}) e (iv) tempo

médio gasto no sistema (T_{SIS}), podem ser calculados usando o formulário do sistema de fila M/M/N apresentado na Tabela 3.11.

Variável	Para um canal	Para N canais
Nºmédio de elementos no sistema r	$r = \frac{\rho}{1-\rho}$	$r = C \frac{\rho}{1-\rho} + N\rho$
Tempo médio no sistema T_r	$T_r = \frac{T_S}{1-\rho}$	$T_r = \frac{C}{N} \frac{T_S}{1-\rho} + T_S$
Nºmédio de elementos na fila w	$w = \frac{\rho^2}{1-\rho}$	$w = C \frac{\rho}{1-\rho}$
Tempo médio na fila T_w	$T_w = T_S \frac{\rho}{1-\rho}$	$T_w = \frac{C}{N} \frac{T_S}{1-\rho}$

Tabela 3.11: Formulário para o cálculo de parâmetro de desempenho de um sistema fila+servidores.

Na Tabela 3.11 N é o número de servidores ou canais. Os valores de ρ , C e K são dados por

$$\rho = \frac{\lambda T_S}{N}, \quad (3.20)$$

$$C = \frac{1 - K}{1 - \rho K}, \quad (3.21)$$

$$K = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \frac{(N\rho)^i}{i!}}{\sum_{i=0}^N \frac{(N\rho)^i}{i!}}. \quad (3.22)$$

A Tabela 3.12 mostra os parâmetros utilizados no simulador para os testes de validação. Foram efetuadas 20 realizações de simulação com 50.000 pacotes em cada realização, de forma a aumentar a precisão do resultado.

Na Tabela 3.13 são mostrados os valores obtidos na simulação dos parâmetros de desempenho para tempo médio de retenção de canal $T_H = 0,5 s$, juntamente com os valores teóricos dos parâmetros de desempenho, os intervalos de confiança e os erros com relação aos valores teóricos. Nota-se nesta tabela o pequeno erro (menor do que 0,45 %) dos valores simulados com relação aos valores teóricos esperados.

Sistema	
Número de canais	3
Número médio de sessões/segundo	5
Tempo médio de retenção de canal	0,3, 0,4 e 0,5 s
Simulação	
Intervalo de amostragem	0,01 s
Número de pacotes/realização	50000
Número de realizações	20

Tabela 3.12: Parâmetros do simulador para a validação da etapa de pacotes.

		Intervalo confiança		
Parâmetro	Valor médio	%	Valor teórico	Erro (%)
Nºde pacotes na fila	3,495	4,92	3,5110	0,444
Tempo na fila/pacote	0,699	5,14	0,7020	0,422
Nºde pacotes no sistema	5,99	2,91	6,0110	0,315
Tempo no sistema/pacote	1,217	3,11	1,2020	0,31

Tabela 3.13: Valores obtidos na simulação para $T_H = 0,5$ s.

A Figura 3.23 compara os valores obtidos na simulação e teóricos de tempo médio gasto na fila e no sistema, para diferentes valores de tempo médio de retenção T_H .

Da mesma forma, a Figura 3.24 compara os valores simulados e teóricos do número de pacotes na fila e no sistema.

Observa-se nas Figuras 3.23 e 3.24 a concordância dos valores simulados com os valores obtidos analiticamente, o que mostra a validade da implementação da etapa de pacotes do simulador.

A Tabela 3.14 mostra os valores obtidos na simulação e teóricos e o erro associado para :

- Número médio de pacotes na fila (N_{FILA}) ;

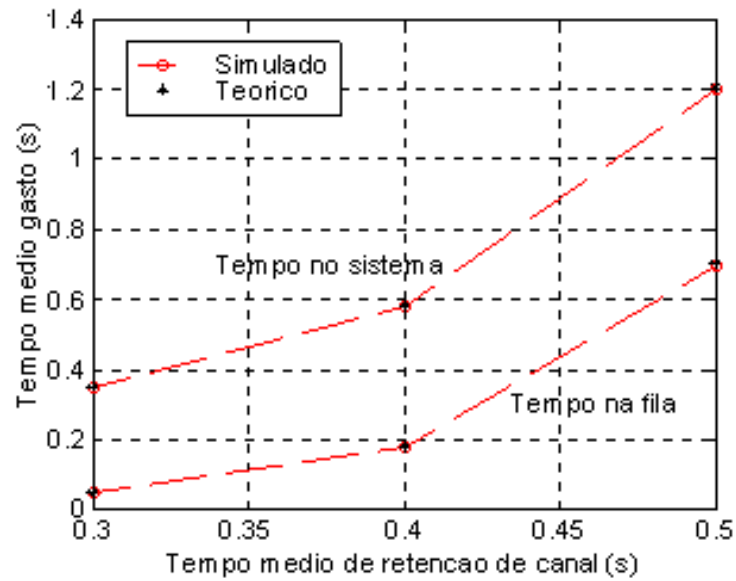


Figura 3.23: Tempos médios na fila e no sistema para diferentes valores de tempo de retenção T_H .

- Número médio de pacotes no sistema (N_{SIS});
- Tempo médio gasto na fila (T_{FILA});
- Tempo médio gasto no sistema (T_{SIS}).

Os parâmetros utilizados para o sistema simulado são :

- Número de canais : 3
- Número médio de sessões por segundo : 5 sessões/s
- Intervalo de amostragem no simulador : 0,01 s
- Número de realizações : 20
- Número de pacotes em cada realização : 50.000

3.3.10.3 Conclusão da validação

Nesta seção apresentamos os resultados dos testes de validação do simulador GSM/GPRS. Foram validadas isoladamente as etapas correspondentes ao serviço de voz (GSM) e ao serviço de pacotes (GPRS). Para a etapa correspondente ao serviço de voz, foram simuladas diversas

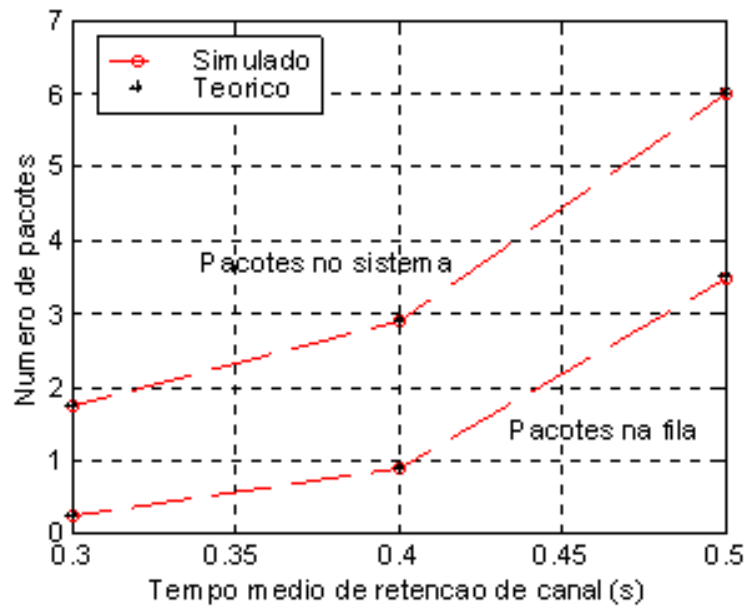


Figura 3.24: Número de pacotes na fila e no sistema para diferentes valores de tempo de retenção T_H .

situações caracterizadas pelo número de canais disponíveis e tráfego oferecido, coletando-se as probabilidades de bloqueio observadas. Estes valores de probabilidade foram comparados com os valores obtidos através da tabela de Erlang B. Observou-se uma grande concordância entre os valores simulados e esperados (teóricos), com erros menores do que 2,45 %.

A etapa correspondente ao serviço de pacotes (GPRS) foi validada alterando-se o modelo de tráfego de pacotes existente para um modelo de tráfego que permitia o cálculo analítico de alguns parâmetros de desempenho do sistema. Neste novo modelo, cada sessão é composta

	$T_H = 0,3 s$			$T_H = 0,4 s$			$T_H = 0,5 s$		
	Sim	Teórico	Erro (%)	Sim	Teórico	Erro (%)	Sim	Teórico	Erro (%)
N_{FILA}	0,2415	0,2370	-1,9198	0,8881	0,8890	0,1069	3,4954	3,5110	0,4429
N_{SIS}	1,7473	1,7370	-0,5959	2,8901	2,8890	-0,0363	5,9921	6,0110	0,3144
$T_{FILA} (s)$	0,0483	0,0470	-2,6596	0,1775	0,1780	0,2809	0,6990	0,7020	0,4202
$T_{SIS} (s)$	0,3497	0,3470	-0,7637	0,5778	0,5780	0,0433	1,1984	1,2020	0,3037

Tabela 3.14: Comparação entre valores simulados e teóricos.

por apenas um pacote, cuja duração (ou tempo de retenção de canal) segue uma distribuição exponencial. Da simulação foram extraídos os valores médios de tempo gasto do pacote na fila e no sistema e os números médios de pacotes na fila e no sistema. Os valores simulados foram comparados com os respectivos valores calculados analiticamente. Observou-se uma grande concordância entre os valores simulados e esperados (teóricos), com erros menores do que 2,66 %.

3.3.11 Resultados do Simulador

A primeira simulação executada foi feita considerando apenas tráfego de voz. Os valores de entrada da simulação foram :

- Número de canais disponíveis : 36
- Duração média da chamada de voz : 3 min
- Tráfego de voz oferecido ao sistema por usuário : 50 mErl
- Quantidade de usuários : 546

Os valores de entrada e de saída da simulação são apresentados em forma de relatório na Figura 3.25.

O tempo (t) de simulação indicado no Relatório de Resultados da Simulação (Figura 3.25) no item GERAL e apresentado em horas é calculado pela expressão

$$t = \frac{n^{\circ} \text{ chamadas}}{\lambda \left(\frac{\text{chamadas}}{\text{min}} \right)}. \quad (3.23)$$

São processadas pelo menos 100.000 chamadas para haver pouca dispersão em torno do valor médio dos resultados. Como a duração média da chamada de voz é de 3 min e o tráfego é de 27,3 Erl (546 x 0,05), o tempo (t) de simulação é calculado por

$$t = \frac{100.000}{27,3 \times \frac{1}{3}} = 10.989 \text{ min} = 183 \text{ h}. \quad (3.24)$$

O tempo real da simulação (tempo de relógio) depende da velocidade de processamento do computador onde o programa está sendo executado. Utilizando um computador com

Relatório de Resultados da Simulação

PARÂMETROS DE ENTRADA UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

GERAL

- Tempo de Simulação (h): 183
- N° de simulações realizadas: 1

SISTEMA

- N° de canais disponíveis no sistema GSM/GPRS: 36
- N° de canais exclusivos disponíveis para GPRS: 0

GSM

- Duração média da chamada de voz (min): 3,0000
- Tráfego de voz por usuário (Erlang): 0,0500
- Quantidade de usuários de voz: 546

GPRS

- Intervalo entre chegada de sessões (s): 0,0000
- Intervalo entre pacotes (s): 0,0000
- Número de pacotes por sessão: 0,0000

Distribuição do tamanho do pacote (bits)

- SP1: 320 [0,00%]
- SP2: 4200 [0,00%]
- SP3: 4608 [0,00%]
- SP4: 12000 [0,00%]

Distribuição do code scheme

- CS1: 181 [0,00%]
- CS2: 268 [0,00%]
- CS3: 312 [0,00%]
- CS4: 428 [0,00%]

INDICADORES DE DESEMPENHO

- Vazão mínima no sistema (kbps): 0,0000
- Vazão média no sistema (kbps): 0,0000
- Vazão máxima no sistema (kbps): 0,0000

- Atraso médio de pacotes no sistema (s): 0,0000
- Probabilidade de bloqueio (%): 2,0758

Figura 3.25: Valores de entrada e de saída da simulação com apenas tráfego de voz.

processador de 1,8 GHz, a terceira simulação que será apresentada mais adiante e a mais demorada, foi executada em menos de 10 h.

O gráfico da probabilidade de bloqueio para tráfego total oferecido de 27,3 Erl (546 usuários x 50 mErl por usuário) ao sistema GSM com 36 canais é apresentado na Figura 3.26.

Observa-se que o valor da probabilidade de bloqueio está de acordo com o valor teórico da probabilidade de bloqueio de 2 % obtido da tabela de Erlang B para um tráfego oferecido de 27,3 Erl com 36 canais.

A segunda simulação executada foi feita considerando tráfego de voz e dados sem alocação exclusiva de canais para o serviço de dados e priorizando o serviço de voz. Os valores de entrada da simulação para o sistema GSM foram :

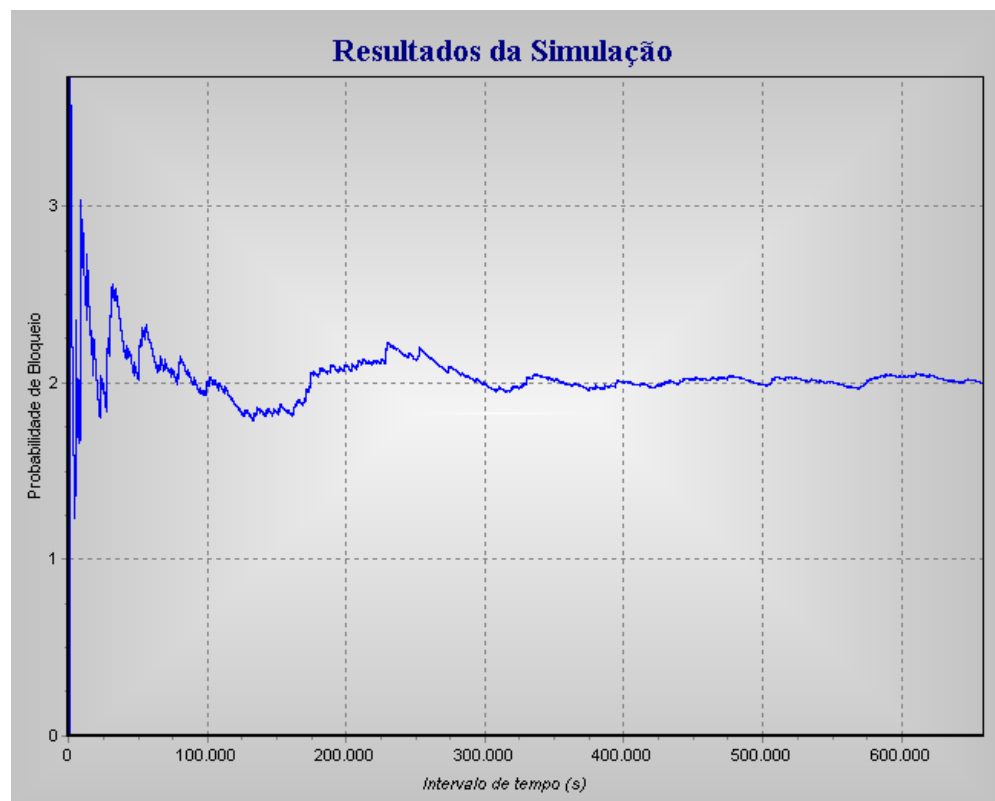


Figura 3.26: Probabilidade de bloqueio para tráfego total de 27,3 Erl e 36 canais.

- Duração média da chamada de voz : 3 min
- Tráfego de voz oferecido ao sistema por usuário : 50 mErl
- Quantidade de usuários : 546

Os valores de entrada da simulação para o sistema GPRS foram :

- Intervalo entre chegada de sessões : 30 s
- Intervalo entre pacotes : 0,9 s
- Número de pacotes por sessões : 47 pacotes
- Distribuição do tamanho do pacote : De acordo com a Tabela 2.2
- Distribuição dos quatro *Code Schemes* : Igualmente distribuídos.

Os valores de entrada da simulação comuns aos dois sistemas foram :

- Número de canais disponíveis para os sistemas GSM e GPRS : 36

- Número de canais exclusivos disponíveis para o sistema GPRS : 0

Os valores de entrada e de saída da simulação são apresentados em forma de relatório na Figura 3.27. O gráfico da probabilidade de bloqueio para tráfego total oferecido de 27,3 Erl ao sistema com 36 canais é apresentado na Figura 3.28. O valor da probabilidade de bloqueio apresentado na Figura 3.28 está em concordância com o valor apresentado na Figura 3.26 porque não há canais alocados exclusivamente para o serviço GPRS e o serviço de voz (GSM) tem prioridade em relação ao serviço de dados (GPRS).

Relatório de Resultados da Simulação		
PARÂMETROS DE ENTRADA UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO		
GERAL	GPRS	
- Tempo de Simulação (h): 183	- Intervalo entre chegada de sessões (s): 30,0000	
- N° de simulações realizadas: 1	- Intervalo entre pacotes (s): 0,9000	
SISTEMA	- Número de pacotes por sessão: 47,0000	
- N° de canais disponíveis no sistema GSM/GPRS: 36	Distribuição do tamanho do pacote (bits)	Distribuição do code scheme
- N° de canais exclusivos disponíveis para GPRS: 0	- SP1: 320 [30,17%]	- CS1: 181 [25,00%]
GSM	- SP2: 4200 [12,27%]	- CS2: 268 [25,00%]
- Duração média da chamada de voz (min): 3,0000	- SP3: 4608 [13,08%]	- CS3: 312 [25,00%]
- Tráfego de voz por usuário (Erlang): 0,0500	- SP4: 12000 [44,48%]	- CS4: 428 [25,00%]
- Quantidade de usuários de voz: 546		
INDICADORES DE DESEMPENHO		
- Vazão mínima no sistema (kbps): 0,0016	- Atraso médio de pacotes no sistema (s): 0,2819	
- Vazão média no sistema (kbps): 43,4262	- Probabilidade de bloqueio (%): 1,9975	
- Vazão máxima no sistema (kbps): 85,6000		

Figura 3.27: Valores de entrada e de saída da simulação com tráfego de voz e dados sem alocação exclusiva.

O gráfico da vazão média obtida no sistema GPRS sem alocação exclusiva de canais é apresentado na Figura 3.29. O valor da vazão média observada é em torno de 44 kbps. O gráfico do atraso médio de pacotes no sistema GPRS sem alocação exclusiva de canais é apresentado na Figura 3.30. O valor do atraso médio observado é em torno de 280 ms.

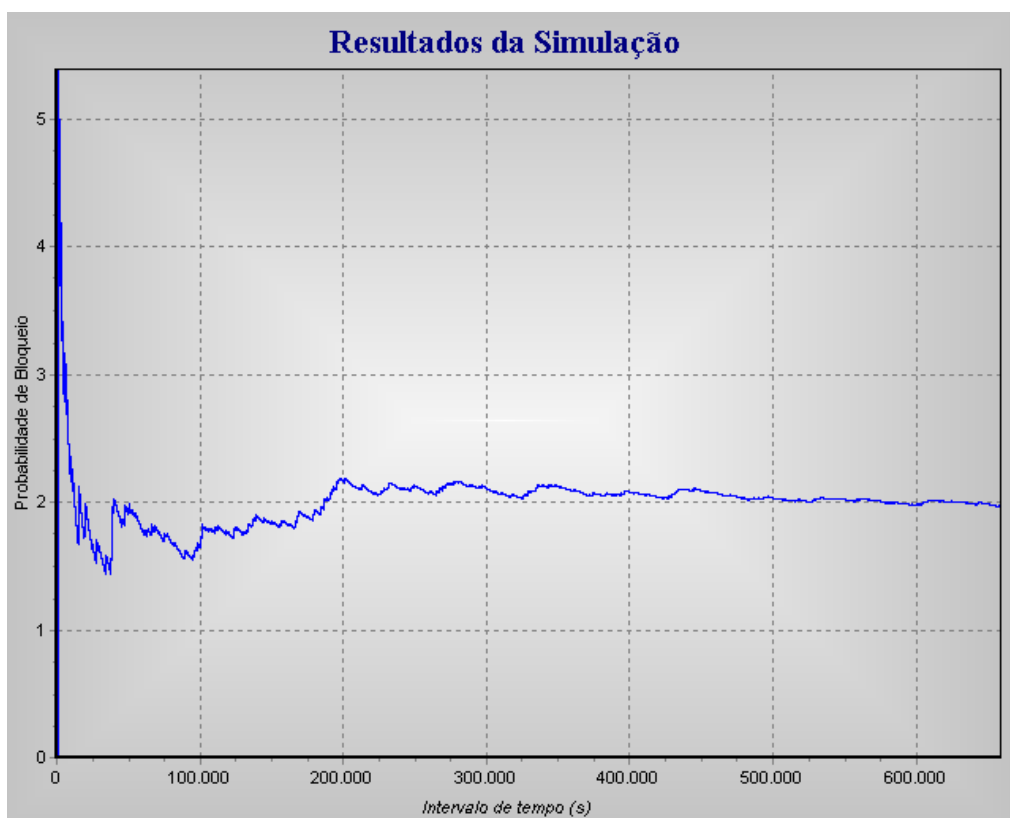


Figura 3.28: Probabilidade de bloqueio para tráfego total de 27,3 Erl com 36 canais sem alocação exclusiva ao GPRS.

A terceira simulação executada foi feita considerando tráfego de voz e dados com alocação exclusiva de cinco canais para o serviço de dados e priorizando o serviço de voz nos canais restantes. Os valores de entrada da simulação para o sistema GSM foram :

- Duração média da chamada de voz : 3 min
- Tráfego de voz oferecido ao sistema por usuário : 50 mErl
- Quantidade de usuários : 546

Os valores de entrada da simulação para o sistema GPRS foram :

- Intervalo entre chegada de sessões : 30 s
- Intervalo entre pacotes : 0,9 s
- Número de pacotes por sessões : 47 pacotes



Figura 3.29: Vazão média obtida no sistema GPRS sem alocação exclusiva de canais.

- Distribuição do tamanho do pacote : De acordo com a Tabela 2.2
- Distribuição dos quatro *Code Schemes* : Igualmente distribuídos.

Os valores de entrada da simulação comuns aos dois sistemas foram :

- Número de canais disponíveis para os sistemas GSM e GPRS : 36
- Número de canais exclusivos disponíveis para o sistema GPRS : 5

Os valores de entrada e de saída da simulação são apresentados em forma de relatório na Figura 3.31. O gráfico da probabilidade de bloqueio para tráfego total oferecido de 27,3 Erl ao sistema com 36 canais e alocação exclusiva de 5 canais para o sistema GPRS é apresentado na Figura 3.32.

Comparando o valor da probabilidade de bloqueio em torno de 7 % apresentado na Figura 3.32 com a probabilidade de bloqueio em torno de 2 % apresentada nas Figuras 3.26 e 3.28, a

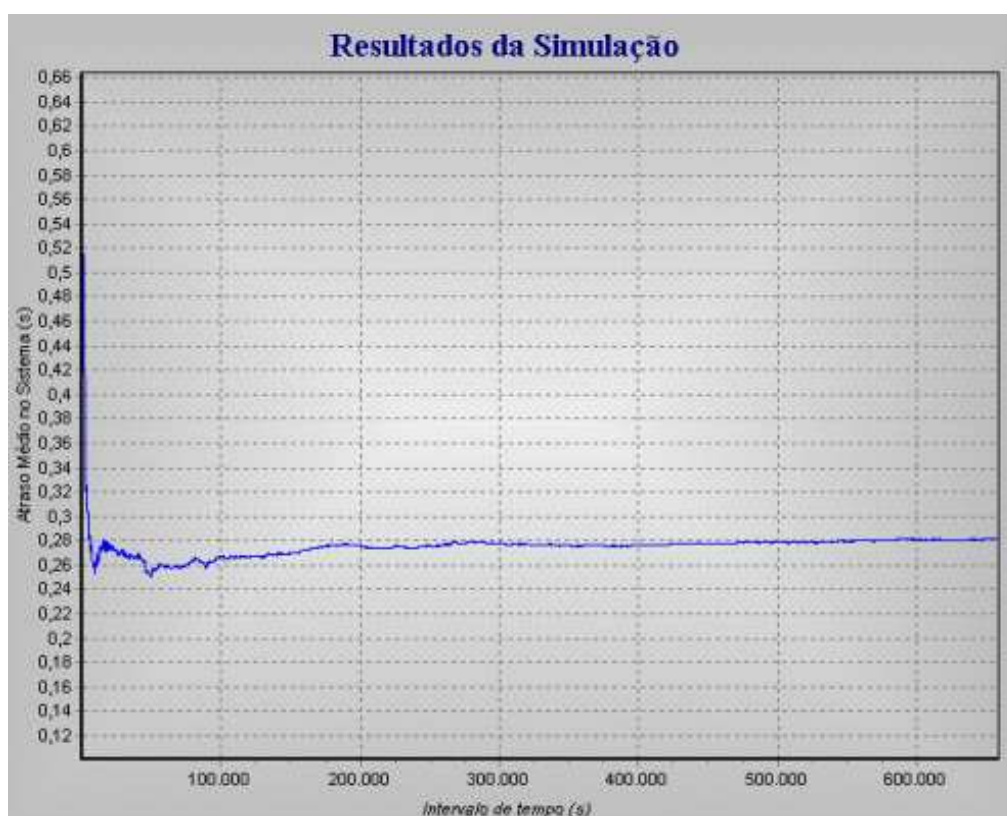


Figura 3.30: Atraso médio de pacotes no sistema GPRS sem alocação exclusiva de canais.

diferença é de aproximadamente 5 %. Esta diferença é devida à alocação exclusiva de canais para a operação do sistema GPRS.

O gráfico da vazão média obtida no sistema GPRS com alocação exclusiva de 5 canais é apresentado na Figura 3.33. O valor da vazão média observada é em torno de 51,5 kbps.

O gráfico do atraso médio de pacotes no sistema GPRS com alocação exclusiva de 5 canais é apresentado na Figura 3.34. O valor do atraso médio observado é em torno de 260 ms.

Mesmo com cinco canais exclusivos alocados, o serviço GPRS não apresenta significativa melhora se comparados os atrasos médios de pacotes no sistema GPRS apresentados na Figura 3.34 (com alocação exclusiva) e na Figura 3.30 (sem alocação exclusiva), com diferença em torno de 20 ms e se comparadas as vazões médias apresentadas na Figura 3.33 (com alocação exclusiva) e na Figura 3.29 (sem alocação exclusiva) com diferença em torno de 7,5 kbps.

Relatório de Resultados da Simulação		
PARÂMETROS DE ENTRADA UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO		
GERAL	GPRS	
- Tempo de Simulação (h): 183	- Intervalo entre chegada de sessões (s): 30,0000	
- N° de simulações realizadas: 1	- Intervalo entre pacotes (s): 0,9000	
SISTEMA	- Número de pacotes por sessão: 47,0000	
- N° de canais disponíveis no sistema GSM/GPRS: 36	Distribuição do tamanho do pacote (bits)	Distribuição do code scheme
- N° de canais exclusivos disponíveis para GPRS: 5	- SP1: 320 [30,17%]	- CS1: 181 [25,00%]
GSM	- SP2: 4200 [12,27%]	- CS2: 268 [25,00%]
- Duração média da chamada de voz (min): 3,0000	- SP3: 4608 [13,08%]	- CS3: 312 [25,00%]
- Tráfego de voz por usuário (Erlang): 0,0500	- SP4: 12000 [44,48%]	- CS4: 428 [25,00%]
- Quantidade de usuários de voz: 546		
INDICADORES DE DESEMPENHO		
- Vazão mínima no sistema (kbps): 0,1539		
- Vazão média no sistema (kbps): 51,6063	- Atraso médio de pacotes no sistema (s): 0,2625	
- Vazão máxima no sistema (kbps): 85,6000	- Probabilidade de bloqueio (%): 7,0472	

Figura 3.31: Valores de entrada e de saída da simulação com tráfego de voz e dados com alocação exclusiva.

Com a alocação exclusiva de canais, a degradação na qualidade do serviço GSM é muito mais drástica que a melhoria trazida ao serviço GPRS. A melhor estratégia de compartilhamento é utilizar os canais de comunicação para o serviço GPRS nos momentos em que estes canais não são usados pelo serviço GSM. Estas conclusões estão validadas por um trabalho analítico apresentado em [Donahue].

Como o serviço GSM é comutado por circuito e o serviço GPRS é comutado por pacote, a falta de canal atua diretamente na degradação da qualidade de serviço de voz pelas próprias premissas de Erlang B (chamadas bloqueadas são descartadas), enquanto que, para o serviço GPRS, a falta de canal para a transmissão de dados não degrada significativamente a qualidade do serviço de dados, devido a possibilidade de uso de filas. Esta análise não trata da comunicação de dados por pacotes em tempo real como, por exemplo, voz sobre IP (VoIP), uma vez que este tipo de tráfego é bem menos tolerante a atrasos.

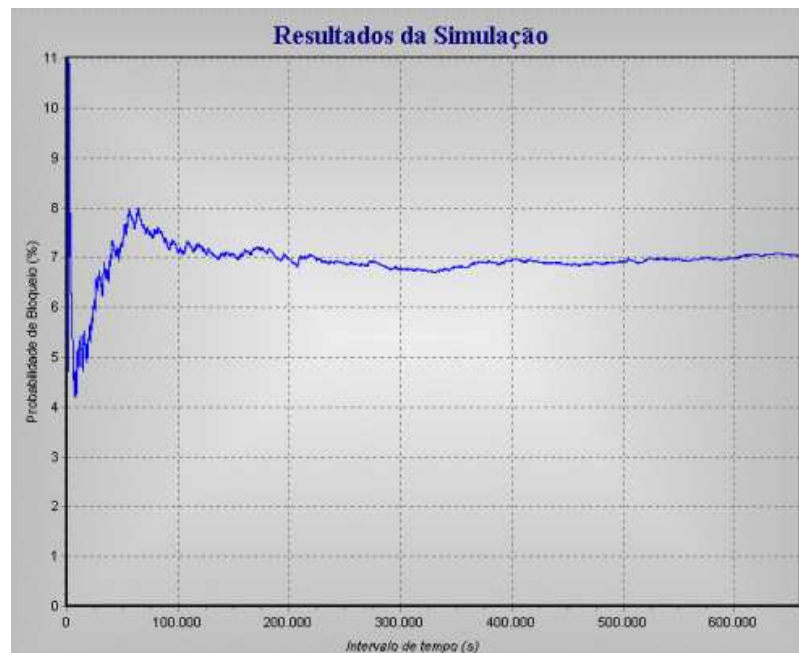


Figura 3.32: Probabilidade de bloqueio para tráfego total de 27,3 Erl com 36 canais e alocação exclusiva de 5 canais ao GPRS.

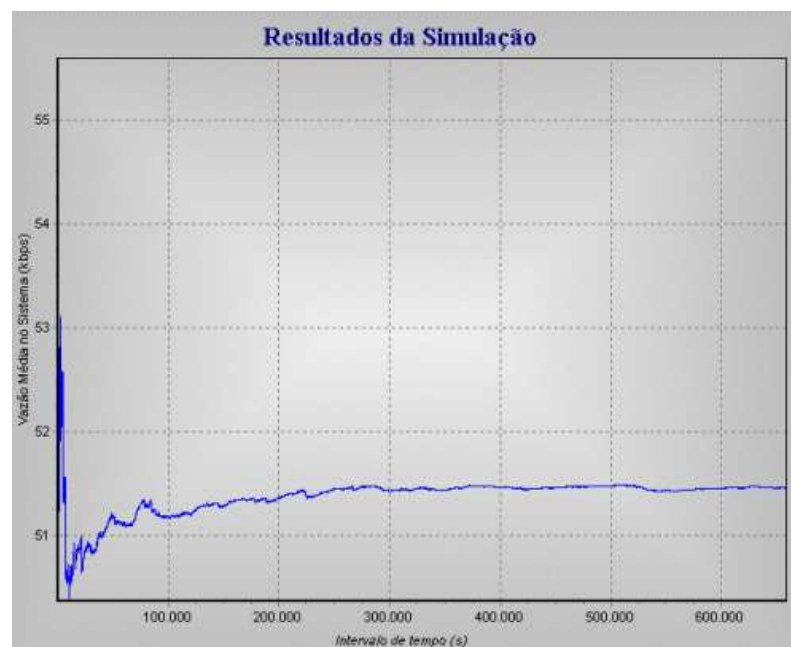


Figura 3.33: Vazão média obtida no sistema GPRS com alocação exclusiva de cinco canais.

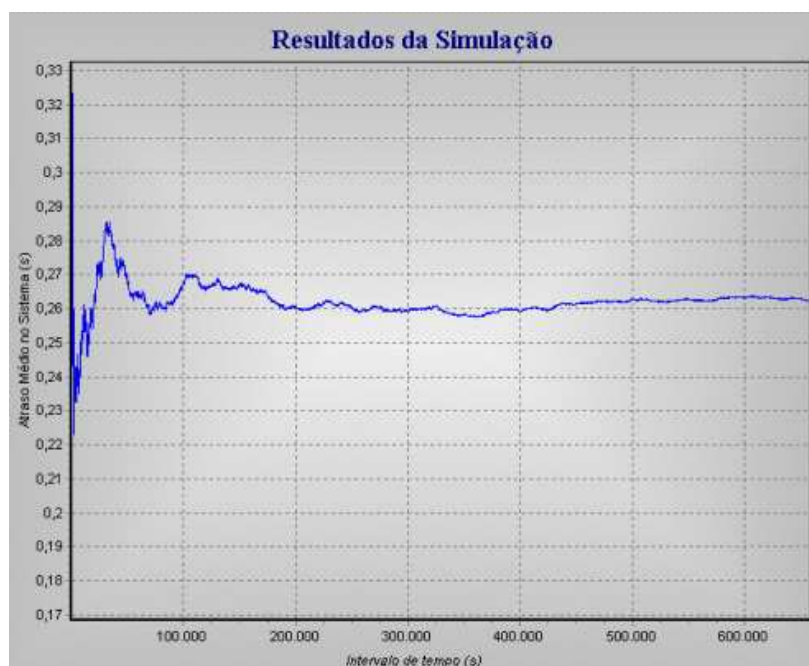


Figura 3.34: Atraso médio de pacotes no sistema GPRS com alocação exclusiva de cinco canais.

A estratégia de compartilhamento reservando cinco canais exclusivos para o tráfego GPRS, dos 36 canais disponíveis no sistema e mantendo a mesma probabilidade de bloqueio para o tráfego GSM (2 %), foi descartada porque implicaria na queda do tráfego de voz para 22,8 Erl, o que significaria uma queda de aproximadamente 16,5 % de usuários no sistema GSM, ou seja, de 546 para 456 usuários.

3.3.12 Conclusões

O simulador desenvolvido para o sistema móvel celular GSM/GPRS modela as etapas necessárias para a estimativa de parâmetros de desempenho da rede de acesso, tais como, taxa de bloqueio, vazões mínima, máxima e média e atraso de transmissão.

O simulador utiliza preponderantemente a técnica de eventos discretos e pode ser descrito por seis eventos possíveis, sendo cinco deles de natureza aleatória (chegada de sessão, chegada de chamada de voz, término de chamada de voz, chegada de pacote e término de pacote) e um deles de natureza determinística (amostragem do sistema).

A contribuição deste simulador é tornar possível o estudo da variação da qualidade de

serviço provocado pelo compartilhamento dos recursos de rádio nos sistemas GSM/GPRS uma vez que os usuários dos serviços de transmissão de voz e de transmissão de dados por pacotes disputam os mesmos recursos comuns (canais de tráfego).

Capítulo 4

CDMA2000

4.1 Introdução

Simulações em computadores têm sido amplamente adotadas na análise do comportamento de sistemas de comunicação sem fio, auxiliando no planejamento, dimensionamento e otimização destes sistemas.

Este capítulo apresenta uma descrição de um modelo de simulação desenvolvido no ambiente OPNET, com o objetivo de analisar o desempenho das redes móveis celulares de terceira geração (3G) CDMA2000 1xRTT (*Radio Transmission Technology*), chamada apenas de CDMA2000 1X [CDG], e CDMA2000 1xEVDO (*Evolution Data Optimized*), chamada apenas de 1xEVDO [CDG], em um cenário de comunicação fim-a-fim entre cliente e servidor e é baseado em [2].

O OPNET é um *software* de simulação baseado em eventos discretos capaz de modelar redes com e sem fio.

4.2 Descrição Geral do CDMA2000 1X

O sistema CDMA2000 1X é uma rede de telecomunicações sem fio que suporta serviços de voz, transmissão de dados orientada a circuitos, transmissão de dados orientada a pacotes e serviços de mensagens curtas (*Short Message Service* - SMS).

Os principais componentes do sistema CDMA2000 1X são :

- Estação móvel (*Mobile Station* - MS) utilizada pelos usuários e se comunica com o

sistema por meio da BTS, apresentada a seguir, e de dois elementos auxiliares, o registrador de usuário de voz (*Home Location Register* - HLR) e o registrador de usuário de dados (*Home Agent* - HA) que executam as funções relacionadas com mobilidade e segurança dos usuários, tais como autenticação, localização e atribuição de endereço IP dinâmico. O HLR executa as funções relacionadas com roaming de voz enquanto que o HA realiza as funções relacionadas com o serviço de comutação de pacotes.

- Estação Base (*Base Station* - BS). Uma estação base possui duas partes : Estação base transceptora (*Base Transceiver Station* - BTS) e controladora das estações base (*Base Station Controller* - BSC). A BTS conhecida também como estação rádio base (ERB) é uma estação fixa que se comunica com as estações móveis. Uma BSC controla uma ou mais BTSs. BTS e BSC podem estar fisicamente no mesmo ponto ou em pontos diferentes.
- Centro de Comutação Móvel (*Mobile Switching Center* - MSC). É o equipamento que realiza a função de comutação de circuitos. Junto ao MSC pode haver equipamentos para interfuncionamento (*Interworking Function* - IWF) da rede móvel com outras redes como por exemplo a Internet. O tráfego comutado pelo MSC pode ser de voz ou transmissão de dados orientada a comutação de circuitos.
- Central de Serviços de Dados por Pacote (*Packet Data Serving Node* - PDSN). É o equipamento utilizado para realizar a função de comutação de pacotes. Realiza a interface com outras redes de comutação de pacotes.

4.2.1 Interfaces de Rádio e Interfaces Terrestres

A BSC possui interfaces com a central de comutação de voz (MSC) e com a central de comutação de pacotes IP (PDSN). A interligação entre BSC e PDSN pode utilizar uma função intermediária de comutação chamada Função Controladora de Pacotes (*Packet Control Function* - PCF).

A tecnologia CDMA2000 1X permite oferecer serviços de voz, dados orientados a conexão

(FAX e *Dial-up*), serviços de comutação de pacotes (rede IP) e serviço de mensagens curtas (SMS).

A rede CDMA2000 1X possui dois tipos de interfaces : a interface de rádio, entre as estações móveis e estações rádio base, e as interfaces terrestres, entre os demais elementos da rede. O foco do modelo de simulação desenvolvido é a interface de rádio, uma vez que esta interface é o gargalo do sistema do ponto de vista do desempenho (capacidade de atendimento aos usuários e qualidade de serviço) e também é onde está concentrada a maior parte do custo do sistema. As interfaces terrestres foram representadas simplificadaamente utilizando, na maior parte, elementos já existentes na biblioteca do OPNET.

4.2.2 Pilha de Protocolos

A tecnologia CDMA2000 1X permite a transmissão simultânea de informação na mesma banda de rádio. Uma mesma banda é compartilhada por diversas estações transmissoras e cada estação transmissora pode realizar a transmissão de informação utilizando simultaneamente diferentes canais. A Figura 4.1 apresenta os diferentes canais na interface da camada física e da camada de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC). A camada MAC realiza a multiplexação das diferentes fontes de tráfego (voz, dados, SMS) nos canais adequados. A transmissão de bits de informação na interface de rádio é realizada em blocos denominados quadros da camada física com duração de 20 milissegundos (ms).

Cada tipo de tráfego é transmitido de forma diferente. O tráfego de voz é enviado diretamente à sub-camada da MAC, chamada sub-camada MUX. O tráfego de dados utiliza o protocolo de enlace de rádio (*Radio Link Protocol* - RLP) para acesso aos canais de tráfego ou o protocolo de sinalização de rádio (*Signaling Radio Burst Protocol* - SRBP) para o acesso aos canais comuns de controle e sinalização. No caso do tráfego de controle e sinalização há o protocolo de controle de acesso ao enlace (*Link Access Control* - LAC).

A Figura 4.2 apresenta o modelo de referência para os serviços de transmissão de dados orientada a pacotes. A introdução deste serviço é a principal evolução do sistema CDMA2000

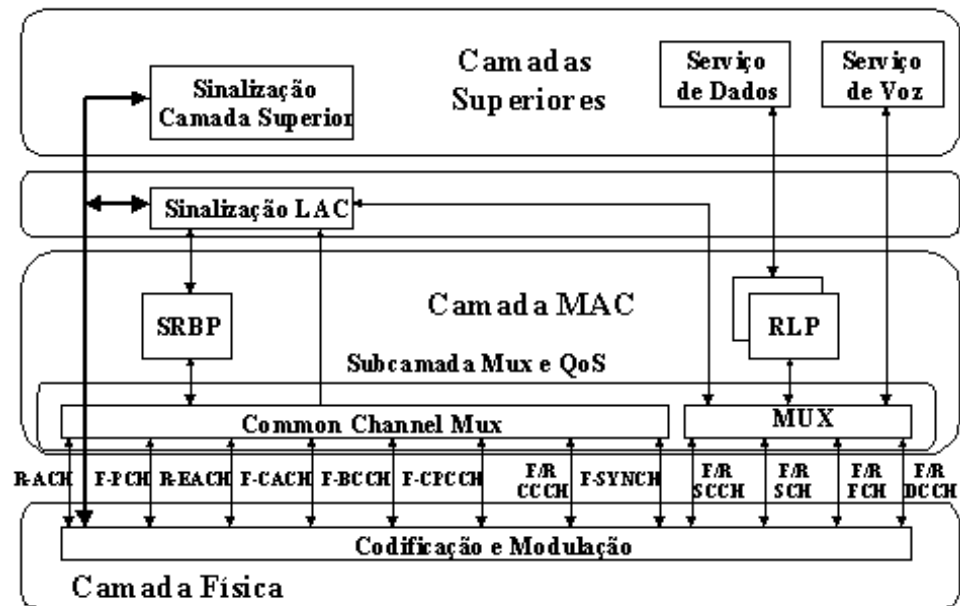


Figura 4.1: Pilha de protocolos CDMA2000 1X - Interface de rádio [Spread Spectrum].

1X em relação a seus antecessores. Na estação móvel, a camada superior é uma camada de Protocolo de Internet (Internet Protocol - IP, que utiliza uma conexão através do protocolo ponto-a-ponto (*Point-to-Point Protocol* - PPP) para alcançar a PDSN. Esta conexão PPP é transportada pela interface de rádio entre a estação móvel e a estação rádio base, que na Figura 4.2 é chamada de rede de rádio (*Radio Network* - RN) e pela interface entre estação rádio base e a PDSN. Em cada uma destas interfaces há uma pilha de protocolos própria. Uma das funções destes protocolos é garantir a transmissão de dados de forma transparente em relação à camada IP, permitindo inclusive a mobilidade do terminal. Esta característica permite aproveitar toda a pilha de protocolos IP e aplicações desenvolvidas para o ambiente de redes fixas.

4.3 Nós de Rede e Enlaces

Foram desenvolvidos os seguintes nós de rede e enlaces para os cenários utilizados nas simulações :

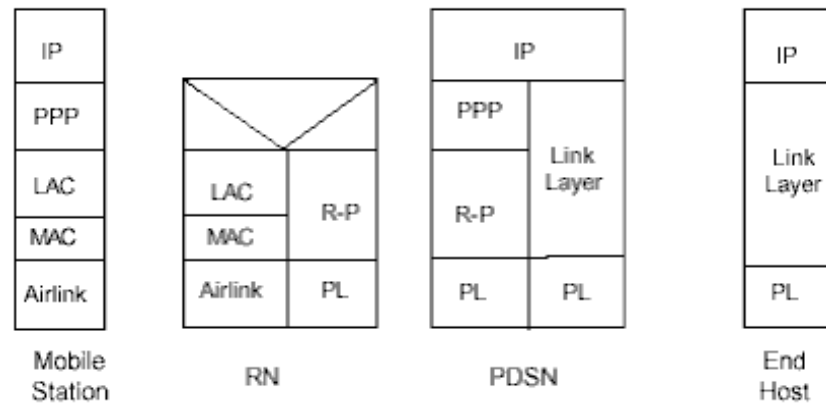


Figura 4.2: Modelo de referência para transmissão de dados orientada a pacotes do CDMA 2000 [*Wireless IP*].

- *Mobile Station* (MS);
- *Base Station* (BS);
- *Packet Data Serving Node* (PDSN);
- *Home Agent* (HA);
- Enlace PPP entre a BS e a PDSN chamado PPPTunnel;
- Enlace de rádio entre a MS e a BS.

Um cenário de simulação da rede CDMA2000 1X com os nós de rede desenvolvidos (MS0, BS0, PDSN e HA) e outros nós de rede da biblioteca do OPNET (*Applications*, *Profiles*, *Tasks* e *Server*) pode ser visto na Figura 4.3.

Os nós de rede *Applications*, *Profiles* e *Tasks* são modelos de perfil de tráfego e utilizados para configurar o tráfego IP, como por exemplo, HTTP e *E-mail*.

4.3.1 *Mobile Station* (MS)

O nó de rede *mobile station* desenvolvido apresenta dois tipos de modelos : terminais de serviços orientados à conexão (MS-Voz) e terminais de dados orientados a pacotes (MS-IP). Os dois modelos também permitem o serviço de mensagens curtas (SMS).

Os terminais móveis se comunicam com as estações rádio base do modelo de simulação por meio da interface de rádio. O registro das estações móveis nas estações rádio base é

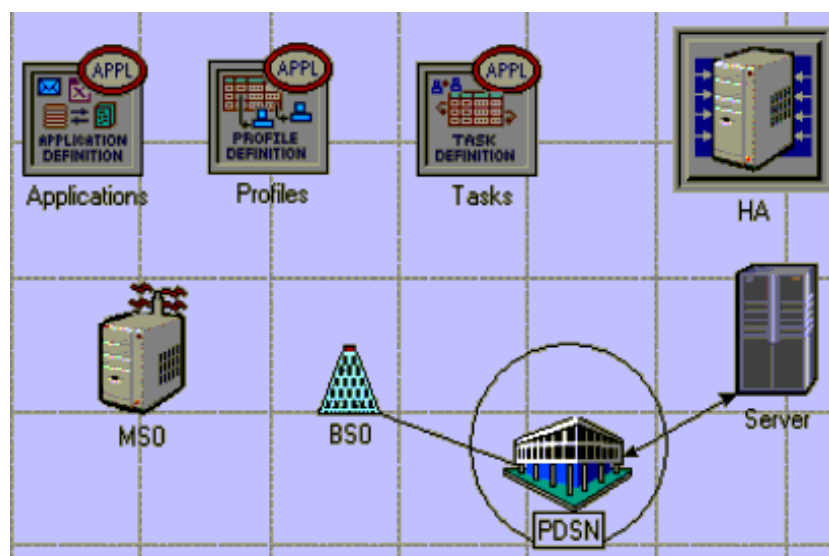


Figura 4.3: Diagrama do cenário de simulação básico com os objetos desenvolvidos para rede CDMA2000 1X acompanhados de objetos padrão da biblioteca do OPNET.

realizado dinamicamente durante a simulação. Para simplificação do modelo de simulação, o critério de seleção da estação rádio base para registro é a menor distância e não a maior relação sinal ruído mais interferência (*signal-to-interference-plus-noise ratio* - SINR), apesar de que nem sempre menor distância significa maior SINR. A distância entre móvel e base também limita a taxa máxima de transmissão de dados, que diminui à medida que o móvel está mais distante da estação rádio base. Assim, a posição geográfica do móvel influencia o comportamento da simulação.

4.3.2 Base Station (BS)

O nó de rede *base station* desenvolvido representa conjuntamente as funções da BTS e da BSC de um setor de uma célula do sistema CDMA2000 1X. O modelo possui uma interface de rádio com os terminais móveis. Há também uma única interface para conexão, via um enlace do tipo PPPTunnel, com o nó PDSN.

4.3.3 *Packet Data Serving Node* (PDSN)

O nó PDSN representa uma central de comutação de pacotes IP. É um roteador IP padrão. As interfaces originais do roteador permitem conectar o nó PDSN a um determinado número de nós da rede IP (servidores ou roteadores). Além destas interfaces, há um conjunto de outras interfaces onde são interligados os enlaces, do tipo PPPTunnel, com os nós BSs.

4.3.4 *Home Agent* (HA)

O nó de rede *home agent* é uma base de dados centralizada, consultada pelos nós MS e BS. Cada cenário de simulação possui um nó HA. O nó HA não é conectado a nenhum outro nó de rede.

4.3.5 Enlace PPPTunnel

O enlace PPPTunnel é utilizado para interligar nós BS e PDSN. É um enlace que permite a passagem de pacotes do tipo PPPTunnel, que são trocados entre estações rádio base e PDSN. Os pacotes transmitidos neste enlace possuem uma estrutura de dados associada que informa o ESN (*Electronic Serial Number*) da MS, o que permite o roteamento correto pela conexão PPP. O enlace PPPTunnel deve ser configurado com um valor conveniente de taxa de transmissão, por exemplo, 2 Mbps.

4.3.6 Enlace de Rádio

O sistema CDMA2000 1X possui uma série de canais, conforme mostrado na Figura 4.1. Cada *transceiver* (transmissor e receptor) de rádio pode ter vários canais. Cada canal pode transmitir apenas um pacote por vez. Se um pacote for enviado a um canal durante a transmissão de outro pacote no mesmo canal, ele será colocado numa fila de espera. Para simular os vários canais da interface de rádio, foram criados vários canais no modelo de simulação associados aos *transceivers* dos modelos de estações móveis e estações rádio base. O modelo de simulação implementa os seguintes canais de rádio do sistema CDMA2000 1X :

- Canal piloto (PICH) ;

- Canal fundamental (FCH) ;
- Canal suplementar (SCH) ;
- Canal de acesso (ACH) ;
- Canal de *paging* (PCH).

A Figura 4.4 mostra a correspondência entre a numeração dos canais e os canais do modelo CDMA2000 1X para os transmissores e receptores de estações móveis.

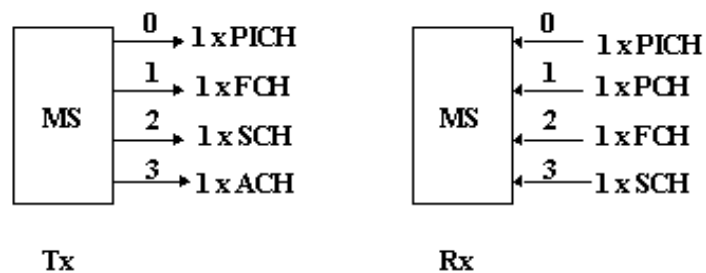


Figura 4.4: Modelo de canais nas estações móveis.

Os canais do enlace reverso (da MS para BS) são : canal piloto (PICH), canal fundamental (FCH), canal suplementar (SCH) e canal de acesso (ACH). Os canais do enlace direto (da BS para MS) são : canal piloto (PICH), canal fundamental (FCH), canal suplementar (SCH) e canal de *paging* (PCH).

A Figura 4.5 apresenta a correspondência da numeração dos canais nas estações rádio base.

Uma estação rádio base realiza transmissões simultâneas para diversas estações móveis. Devido à propriedade dos canais do OPNET, que permite apenas uma transmissão em cada canal, é preciso criar um par de canais FCH e SCH para cada estação móvel. Como o número de canais é estático, é preciso determinar previamente um número limite para a quantidade de estações terminais ativas simultaneamente em um mesmo setor.

O canal de acesso (ACH) é um canal do enlace reverso usado pela estação móvel (MS) para iniciar comunicação com a estação rádio base (ERB) e responder mensagens do canal

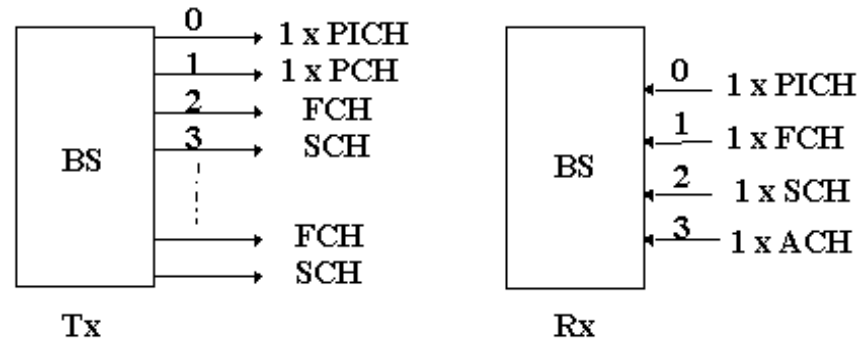


Figura 4.5: Modelo de canais nas estações rádio base.

de *paging*. O canal é compartilhado por várias estações e é utilizado normalmente quando o terminal não está ativo e não possui um canal dedicado para sinalização. Este canal usa um protocolo de acesso tipo *slotted aloha*.

O canal de *paging* (PCH) é um canal do enlace direto usado por uma estação rádio base para transmitir informações de controle específicas às estações móveis. Um mesmo canal é utilizado para se comunicar com várias estações móveis.

O canal piloto (PICH) reverso é usado para auxiliar a estação rádio base na detecção da transmissão de uma MS, para tornar coerente a detecção na estação rádio base e para carregar informação do subcanal de controle de potência direto. No contexto da simulação, o canal piloto direto é utilizado para que as estações rádio base possam transmitir um pacote que será recebido pelas estações móveis. Este pacote identifica a estação rádio base e permite ao móvel calcular a distância até a estação rádio base. No início da simulação as estações rádio base transmitem um quadro no PICH. Os móveis recebem os pacotes, determinam a distância e selecionam a estação rádio base mais próxima para realizar o registro.

O canal fundamental (FCH) e o canal suplementar (SCH) são canais utilizados para sinalização e tráfego de voz e dados.

4.4 Modelos de Nós

Cada nó de rede descrito anteriormente é composto por um conjunto de processadores de código de programação e filas que são interligados por fluxos de pacotes (*packet streams*) do OPNET e que compõem um modelo de nó.

Alguns processadores estão interconectados por mais de um *packet stream* de entrada ou saída. Nestes casos, é preciso interligar os processadores utilizando o *packet stream* adequado. Cada *packet stream* é numerado sequencialmente. A relação entre esse número e a utilização do *packet stream* é tabelada para utilização nos modelos de processos.

A seguir é feita uma descrição de cada modelo de nó.

4.4.1 Modelo de Nó da *Mobile Station*

O modelo de nó da *mobile station*, apresentado no diagrama da Figura 4.6, possui uma camada de aplicação e uma pilha de protocolos TCP/IP padrão da biblioteca do OPNET. A esta pilha foi acrescentada a pilha de processo CDMA2000 1X.

Os processadores *ip*, *ip_encap*, *tcp*, *rsvp*, *udp*, *tpal*, *cpu* e *application* são modelos da biblioteca do OPNET. O processador *application* permite a utilização da metodologia padrão do OPNET para caracterização do perfil de tráfego, utilizando nós de rede do tipo *Applications* e *Profiles* vistos na Figura 4.3. O modelo também possui um par de transceptores (*rx_BS* e *tx_BS*) para a interface de rádio que está ligada ao processador *CDMA_MAC*. Este, por sua vez, está interligado aos demais processadores da camada CDMA2000 1X.

O modelo de nó da MS incorpora atribuição dinâmica dos endereços IP privados. A rotina de atribuição dinâmica foi implementada para que os endereços IP sejam do tipo “192.168.x.x”.

Este modelo possui os seguintes atributos relacionados com protocolo CDMA2000 1X :

- ESN;
- BASE_ID;
- Base Index;

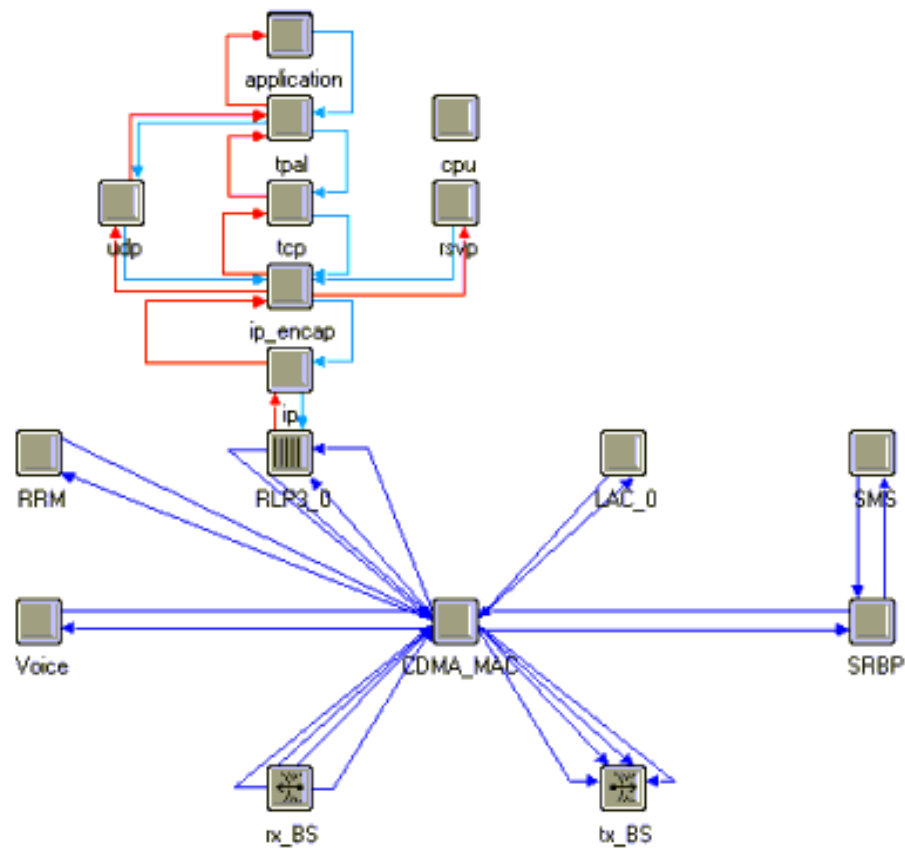


Figura 4.6: Diagrama do modelo de nó da *mobile station*.

- *Rate Set* ;
- *MO SMS Length* ;
- *MO Arrival Time* ;
- *MT SMS Length* ;
- *MT Arrival Time* ;
- *Service Start Time*.

O ESN é um número inteiro que identifica um determinado terminal. A atribuição dinâmica do ESN é exclusiva, isto é, um determinado número é atribuído apenas a um determinado terminal.

O atributo BASE_ID é um número inteiro que identifica a BS ou o nó BS onde um terminal está registrado. Dado que o modelo não permite *handoff*, ao longo da simulação um

terminal se comunica com apenas uma estação rádio base, especificada pelo `BASE_ID`.

O atributo Índice da *Base Station* (*Base Index*) é um número inteiro que identifica qual a instância (dos protocolos da camada CDMA2000 1X) da estação rádio base corresponde a um determinado terminal móvel.

O Conjunto de Taxas (*Rate Set*) define o conjunto de especificações sobre as taxas de transmissão, que podem ser múltiplos de 9600 bps (*Rate Set 1*) ou 14400 bps (*Rate Set 2*).

O atributo Tempo de Chegada (*Arrival Time*) especifica o tempo médio entre mensagens SMS para o tráfego originado no móvel (MO) e terminado no móvel (MT).

O atributo tamanho da SMS (*SMS length*) especifica o tamanho médio de mensagens SMS para o tráfego originado no móvel (MO) e terminado no móvel (MT).

E o atributo *Service Start Time* indica o instante em que inicia o tráfego SMS.

4.4.2 Modelo de Nó do *Handset*

O modelo de nó do *handset*, apresentado na Figura 4.7, é uma simplificação do modelo de nó da MS.

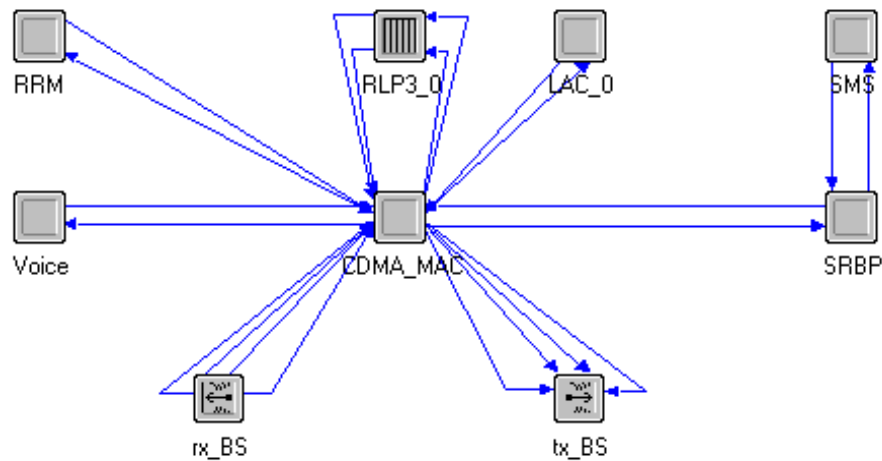


Figura 4.7: Diagrama do modelo de nó *handset*.

Como o modelo pretende simular terminais utilizados apenas para o serviço de voz, a pilha TCP/IP foi eliminada do modelo (e conseqüentemente os atributos correspondentes).

Os terminais de voz possuem os mesmos atributos do modelo de nó da *mobile station*, acrescido dos atributos *Traffic* e *Holding Time*. Estes dois atributos especificam o tráfego de voz, em milierlangs, e o tempo médio de duração das chamadas.

4.4.3 Modelo de Nó da *Base Station*

O modelo de nó da BS, apresentado na Figura 4.8, possui uma interface para um enlace tipo PPPtunnel (par de transceivers `ppp_tx_PDSN` e `ppp_rx_PDSN`). Esta interface está ligada ao processador PPPMUX que tem como função multiplexar os pacotes recebidos das filas RLP3 e distribuir os pacotes recebidos do túnel PPP aos processadores RLP3.

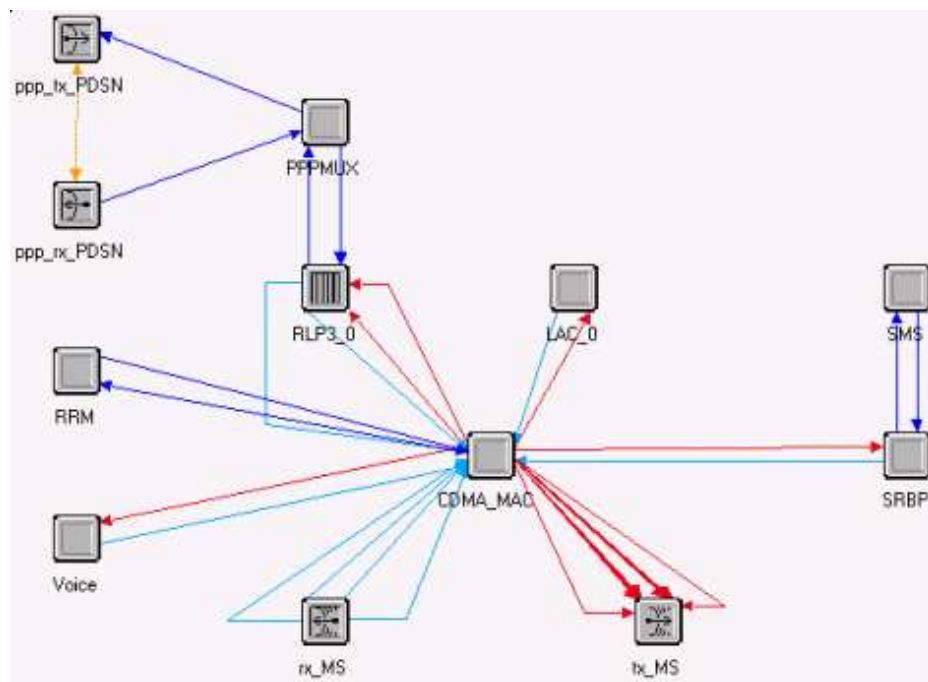


Figura 4.8: Diagrama do modelo de nó da *base station*.

O modelo de nó da *base station* simula o comportamento de um único nó que integra as funções BTS e BSC descritas nas especificações do sistema CDMA2000 1X. O modelo de simulação suporta apenas células do tipo omni-direcional.

O modelo também possui um par de transceptores (`rx_MS` e `tx_MS`) para a interface de rádio. Essa interface está ligada ao processador `CDMA_MAC`, que está interligado aos

demais processadores da camada CDMA2000 1X. O modelo de nó da BS, como consequência do tunelamento PPP, não possui nenhum elemento da camada IP.

4.4.4 Modelo de Nó da PDSN

A Figura 4.9 apresenta o modelo de nó da PDSN. O modelo é uma adaptação de um roteador IP padrão e tem um processador PPPMUX ligado a um número variável de transceptores para interligação com um número variável de estações rádio base e um procesador IP para interligação com um número variável de servidores.

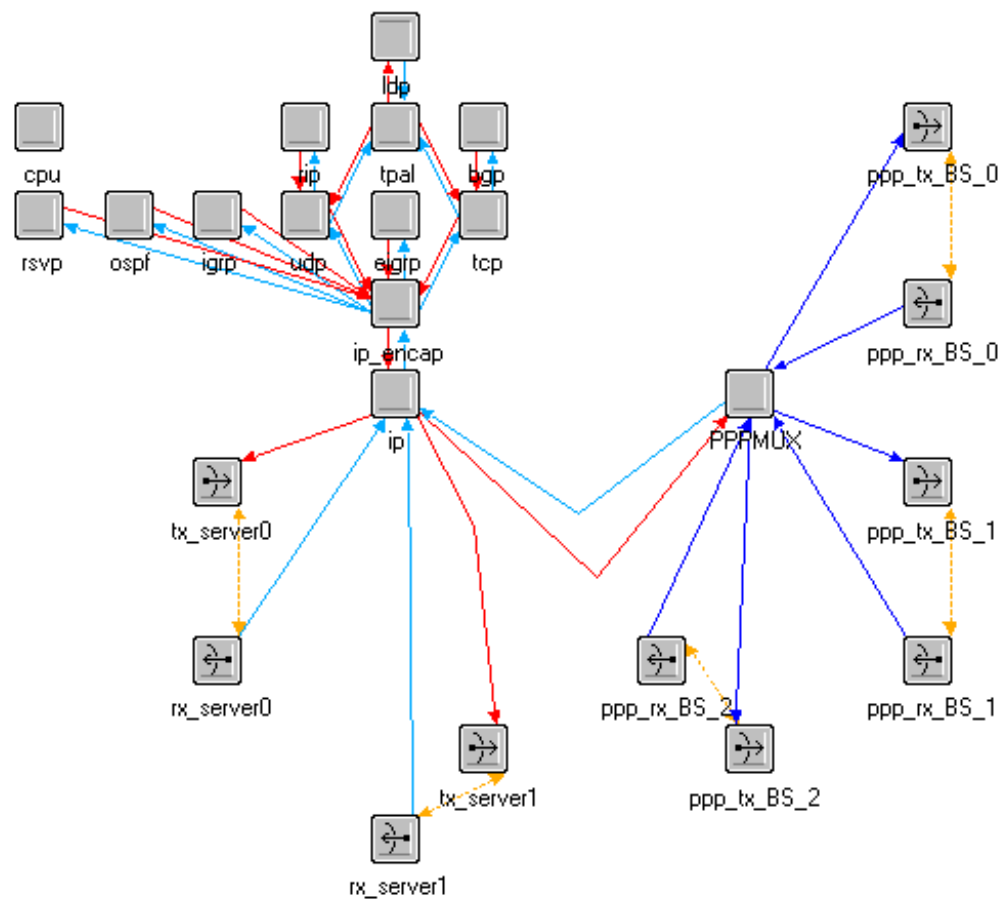


Figura 4.9: Diagrama do modelo de nó da PDSN.

4.5 Modelos de Processos

Neste item são apresentados os modelos de processos dos processadores RLP3, MAC MUX, LAC, SRBP, Voice, SMS, PPP MUX e RRM e o *radio transceiver pipeline* da camada CDMA2000 1X.

4.5.1 Modelo de Processo RLP3 (*Radio Link Protocol 3*)

O RLP3 é um protocolo que fornece um serviço orientado a conexão para transmissão de dados com as seguintes características [TIA/EIA/IS-707-A-2] :

- Protocolo da camada de enlace do modelo de referência OSI-ISO (*Open System Interconnect-International Standards Organization*);
- Permite que os dados transmitidos sejam recebidos na ordem em que foram transmitidos;
- Utiliza um protocolo de janelas deslizantes.

O protocolo RLP3 garante a transmissão dos dados sem erros, mesmo no ambiente de rádio com elevada taxa de erro. O RLP3 recebe a informação a ser transmitida e a segmenta em quadros RLP que serão transmitidos pela camada física. A segmentação é uma forma de reduzir a probabilidade de erro de pacote. Em caso de erro, o protocolo RLP3 possui um mecanismo de retransmissão. O modelo de processo RLP3 representa de forma bastante aproximada o protocolo RLP3 especificado na norma [TIA/EIA/IS-707-A-2].

O algoritmo foi implementado com auxílio de seis listas, três utilizadas na recepção e três utilizadas na transmissão, conforme mostrado na Figura 4.10.

O modelo de processo possui duas filas de quadros RLP, que são os *buffers* de segmentação e remontagem especificados na norma.

Os pacotes IP são segmentados em quadros RLP, que são armazenados na fila de transmissão. À medida que vão sendo transmitidos pela interface de rádio, os quadros que chegam ao receptor são enviados para a camada superior (no caso a camada IP). Se algum quadro

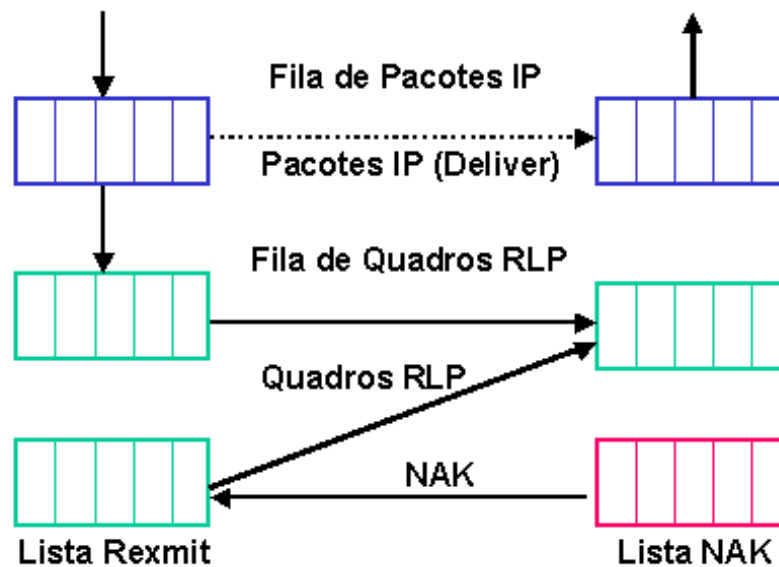


Figura 4.10: Estrutura de listas do modelo de processo RLP3.

for perdido por causa da elevada taxa de erro, a recepção deve realizar o procedimento de envio de uma mensagem tipo NAK (*Non Acknowledgement*), solicitando retransmissão do quadro. Há uma lista especial, a Lista NAK, que gerencia o envio de pedidos de retransmissão. O transmissor, por sua vez armazena os pedidos de retransmissão numa outra lista (Lista Rexmit), até que seja possível processar a informação.

O protocolo RLP3 transporta bytes, sem conhecer seu significado. Entretanto, não basta receber os bytes no lado do receptor, mas também é preciso recuperar a estrutura de dados dos pacotes IP. Para contornar esta situação, o modelo do RLP3 utiliza duas listas adicionais, onde são armazenados os pacotes IP. Quando um pacote IP começa a ser segmentado para transmissão, uma cópia do pacote é colocada na fila IP na recepção utilizando a função *deliver* da biblioteca do OPNET.

A Figura 4.11 apresenta o diagrama de estados do modelo de processo RLP3.

No início da simulação, o processo passa pelo estado Init, que executa a rotina de iniciação do protocolo RLP3. Em seguida, o processo passa para o estado Idle, em que permanece durante o restante da simulação. Este estado reage a quatro tipos de interrupção :

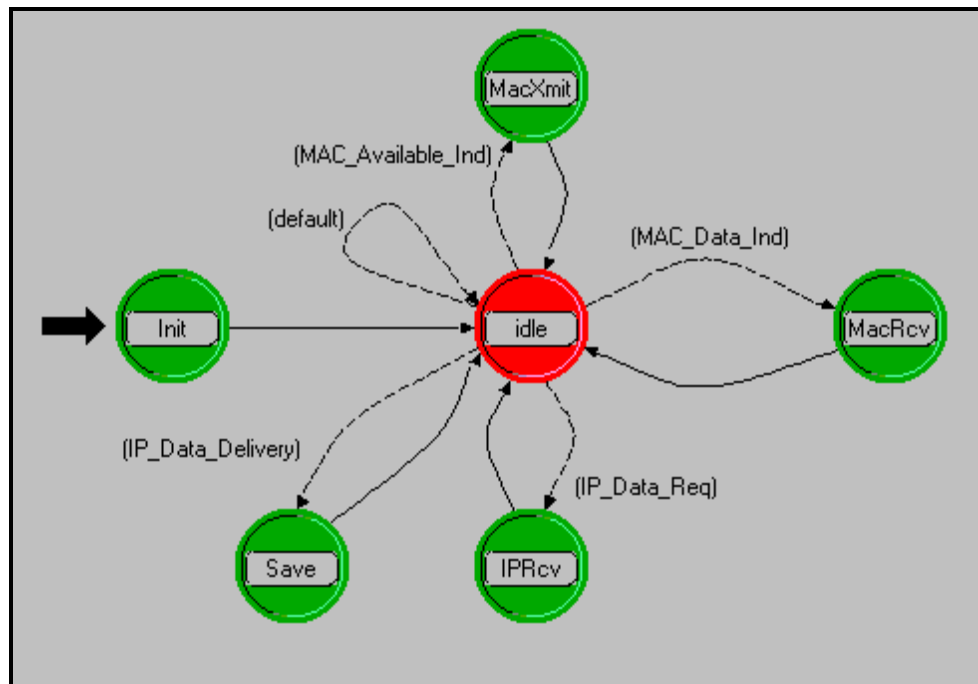


Figura 4.11: Diagrama do modelo de processo RLP3.

1) A interrupção `IP_Data_Delivery` é provocada pelo envio de um pacote IP para o receptor utilizando uma função chamada *deliver*. O modelo de processo RLP3 vai transitariamente para o estado `Save`, que executa uma rotina que armazena o pacote na fila IP de saída.

2) A interrupção `IP_Data_Req` é provocada pela recepção de um pacote IP, recebido da camada IP. O processo passa pelo estado `IPRcv` que executa a rotina que coloca pacote IP na fila de recepção.

3) A interrupção `MAC_Data_Ind` é provocada pela recepção de um quadro RLP do processo MAC MUX, que será o próximo processo a ser apresentado. O processo então realiza uma transição para o estado `MacRcv`, que executa uma rotina que implementa o funcionamento descrito na especificação do sistema CDMA2000 1X [MAC].

4) A transição `MAC_available_Ind` é provocada por uma interrupção forçada remota causada pelo modelo de processo MAC MUX. No início de cada quadro da camada física, o modelo de processo MAC MUX informa a capacidade disponível em cada canal (quantidade

de MUX PDU disponível) e o parâmetro *Mux Option*, no caso de canais de tráfego. MUX PDU e *Mux Option* serão apresentados no Apêndice A. No estado MacXmit é executada uma rotina que verifica que tipo de quadro RLP deve ser transmitido e responde ao processo MAC MUX quantos quadros serão enviados.

O modelo de processo RLP3 possui três interfaces para transmissão e recepção de pacotes. Cada interface é composta por dois *packet streams* (um para transmitir e outro para receber pacotes). A interface 0 é utilizada para a camada IP, a interface 1 é utilizada para o canal fundamental (FCH) e a interface 2 é utilizada para o canal suplementar (SCH). A Tabela 4.1 apresenta a numeração dos *packet streams*.

<i>packet streams</i>	Tipo
0	IP
1	FCH
2	SCH

Tabela 4.1: Mapa de interconexões do processador RLP3.

A estação rádio base precisa trocar pacotes RLP com várias estações móveis simultaneamente. É preciso portanto uma instância do modelo de processo RLP3 para cada móvel. Com o intuito de permitir representar todas as instâncias por apenas um único processador, criou-se o modelo de processo RLP *Master* da estação rádio base. Na iniciação, este processo cria dinamicamente várias instâncias do processo RLP. Durante a simulação, o processo identifica para todas as interrupções qual é a instância correspondente e escala o processo correspondente que trata a interrupção.

4.5.2 Modelo de Processo MAC MUX

O modelo de processo MAC MUX é responsável pela interface da camada CDMA2000 1X e pelo canal de rádio. Suas duas funções principais são encaminhar os pacotes recebidos e controlar a estrutura de quadros da interface de rádio. O modelo de processo possui estados transitórios que realizam os procedimentos de iniciação e registro de dados no *home agent*

(HA). Na iniciação, o modelo de processo MAC MUX executa as rotinas de configuração automática de atributos que identificam uma estação móvel ou uma estação rádio base (ESN, BASE_ID, endereços IP), utilizando o conteúdo dos contadores mantidos no HA, correspondentes a cada atributo. O endereço IP é utilizado também pelos processos da camada IP. Para que estes processos utilizem o endereço IP correto, é preciso que a iniciação do modelo de processo MAC MUX ocorra antes da iniciação dos processos da camada IP.

No início de cada quadro da camada física, o modelo de processo MAC MUX envia interrupções forçadas para o modelo de processo RLP3 e também para os modelos de processos *Voice*, LAC e SRBP, que serão apresentados adiante, para verificar se há alguma informação a ser transmitida. Esta interrupção possui uma estrutura de dados, que permite trocar informações do número de MUX PDUs disponíveis e o tipo de canal.

Quando os modelos de processos tiverem informação para transmitir, enviarão pacotes para o modelo de processo MAC MUX. Este por sua vez irá encapsular estes pacotes num pacote do tipo físico e o transmitirá pela interface de rádio. Este encapsulamento segue a especificação da norma [MAC].

O modelo de processo MAC MUX é o responsável por transmitir o pacote correto no canal adequado. Ele também é responsável por encaminhar corretamente as informações recebidas na interface de rádio. Por exemplo, verificar se a informação recebida no canal de tráfego é uma mensagem de sinalização, que deve ser entregue ao modelo de processo LAC, ou se é que um quadro RLP, que deve ser destinado ao modelo de processo RLP3. Esta função é realizada analisando-se o índice do *packet stream* de origem dos pacotes recebidos e da informação contida na estrutura de dados associada aos pacotes recebidos da interface de rádio.

Juntamente com o modelo de processo SRBP, o modelo de processo MAC MUX implementa integralmente o mecanismo de acesso aleatório, colisão e persistência descrito em [MAC].

Haverá tantos canais de tráfego e instâncias RLP, LAC e SRBP quanto o número máximo

de terminais ativos em um setor de uma célula.

4.5.3 Modelos de Processos LAC, LAC *Master*, SRBP e SRBP *Master*

Os modelos de processos LAC (*Link Access Control*) e SRBP (*Signaling Radio Burst Protocol*) são bastante semelhantes. Os modelos de processos implementam um protocolo de janelas deslizantes para transmissão de mensagens de sinalização [LAC]. O modelo de processo LAC possui uma janela de tamanho 4 pacotes e transmite mensagens nos canais dedicados (FCH). Por sua vez, o modelo de processo SRBP possui janela de tamanho 1 pacote e transmite mensagens nos canais comuns de sinalização ACH e PCH. Os modelos de processos SRBP e SRBP *Master* são utilizados nas estações móveis e estações rádio base, respectivamente, e diferem apenas em relação ao envio de ACKs. As mensagens transmitidas pelo canal de acesso (ACH) sempre exigem um ACK, enquanto que as mensagens enviadas pelo canal de *paging* não necessitam de ACK.

A estação rádio base precisa trocar mensagens com várias estações móveis simultaneamente. É preciso, portanto, uma instância do modelo de processo LAC e SRBP para cada móvel. Com o intuito de permitir representar todas as instâncias por apenas um único processador, foram criados os modelos de processos LAC *Master* e SRBP *Master* da estação rádio base. Na iniciação, estes processos criam dinamicamente várias instâncias do modelo de processo LAC ou SRBP. Durante a simulação, os processos identificam para todas as interrupções qual é a instância correspondente e escalam os processos correspondentes que tratam a interrupção.

4.5.4 Modelo de Processo *Voice*

O modelo de processo *Voice* tem como objetivo representar o comportamento de um serviço de voz. Associados a este modelo de processo existem dois atributos : *Traffic*, que é o tráfego expresso em milierlangs, e *Holding Time* que é o tempo de duração média das chamadas. Este modelo de processo possui dois estados : ativo e inativo. O processo muda de estado devido a auto interrupções programadas em intervalos calculados a partir dos valores

desses dois atributos. Durante o estado ativo, o processo também responde a interrupção provocada pelo modelo de processo MAC MUX, reservando um espaço no quadro da camada física.

4.5.5 Modelo de Processo *Short Message Service* (SMS)

O modelo de processo SMS é utilizado para gerar o tráfego do serviço de mensagens curtas [*Access Network*]. A partir dos atributos configurados pelo usuário, o processo irá criar mensagens e enviá-las para o modelo de processo SRBP para que sejam transmitidas pelo canal comum de sinalização. O modelo de simulação não implementa o envio de mensagens curtas pelo canal dedicado de sinalização (FCH).

O modelo de processo SMS implementa tanto o tráfego originado no móvel como o tráfego terminado no móvel. No caso de tráfego originado no móvel, os pacotes são gerados no processador SMS do móvel originador e enviados diretamente para o processador SRBP do móvel para transmissão no canal ACH. No caso do tráfego terminado no móvel, o pacote correspondente é criado no móvel originador e transferido para o processador SMS da estação rádio base utilizando a função *deliver*. O pacote é então transferido para o processador SRBP da base para transmissão no canal de *paging*.

4.5.6 Modelo de Processo PPP MUX

O modelo de processo PPP MUX é utilizado para representar o efeito do túnel PPP (conexão lógica entre MS e PDSN). Quando um pacote é recebido da camada IP, o processo PPP MUX obtém o endereço IP de destino e consulta uma tabela localizada no nó de rede *home agent* (HA) para obter o *electronic serial number* (ESN) correspondente. Esta tabela é configurada na iniciação da simulação pelo modelo de processo MAC MUX. O modelo de processo PPP MUX consulta então uma segunda tabela no nó de rede HA de onde obtém qual a estação rádio base de destino. O pacote IP é encapsulado num pacote tipo PPP Tunnel com uma estrutura de dados contendo o valor de ESN e enviado à estação rádio base correspondente. Ao receber o pacote, o modelo de processo PPP MUX da estação de

rádio base consulta uma outra tabela no nó de rede HA para determinar qual a instância do modelo de processo RLP que deve tratar aquele pacote.

Na iniciação do modelo de processo PPP MUX de cada estação rádio base é enviado um pacote para o nó de rede PDSN. Este pacote contém informações sobre o `BASE_ID` da estação rádio base e o *packet stream* de interligação com o nó de rede PDSN. Assim, ao receber este pacote, o PPP MUX do nó de rede PDSN associa estas informações e as armazena em um mapa do nó de rede HA no endereço correspondente ao `BASE_ID`. O pacote é destruído para que não seja processado como um pacote de dados. Desta forma, quando for preciso enviar um pacote para uma determinada BS, de posse do `BASE_ID` correspondente, o modelo de processo PPP MUX da PDSN é capaz de determinar para que *packet stream* enviar o pacote.

4.5.7 Modelo de Processo RRM (*Radio Resource Management*)

O modelo de processo RRM tem como função controlar os recursos de rádio e implementar a máquina de estados de sinalização [*Service Options*]. A Figura 4.12 apresenta os três casos de sinalização implementados.

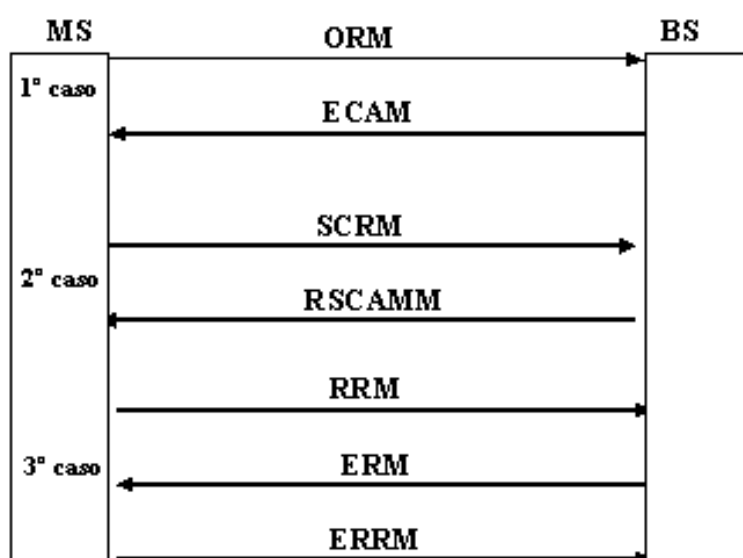


Figura 4.12: Diagrama de sinalização realizado pelo modelo de processo RRM.

No primeiro caso, o móvel envia uma mensagem de originação ORM (*Origination Request Message*). Ao receber esta mensagem, o modelo de processo RRM da estação rádio base ativa o canal fundamental direto e ativa o modelo de processo *Voice*, permitindo que este reserve espaço no quadro da camada física para transmitir o tráfego de voz. O modelo de processo RRM então envia como resposta uma mensagem de atribuição do canal de tráfego ECAM (*Extended Channel Assignment Message*).

No segundo caso, o terminal móvel envia uma mensagem de solicitação de canal suplementar SCRM (*Supplemental Channel Request Message*). Ao receber essa mensagem o modelo de processo RRM da estação rádio base aloca um canal suplementar e responde com a mensagem RSCAMM (*Reverse Supplemental Channel Assignment Mini-Message*).

No terceiro caso, o terminal móvel solicita o término de uma chamada enviando uma mensagem RRM (*Release Request Message*). A estação rádio base responde com a mensagem ERM (*Extended Release Message*). Ao receber a resposta o terminal móvel envia a mensagem ERRM (*Extended Release Mini-Message*) e posteriormente libera o canal de tráfego reverso. Ao receber esta última mensagem a estação rádio base desaloca o canal direto.

Para o serviço de dados foi implementado um algoritmo de alocação de banda, que funciona da seguinte maneira. Periodicamente o modelo de processo RRM verifica a quantidade de informação nas filas de entrada do modelo de processo RLP3. Se essa quantidade ultrapassar o valor de 9600 bits, então o modelo de processo RRM decide que deve alocar um canal suplementar. No caso do modelo de processo RRM da estação rádio base, isto significa simplesmente que o canal será ativado. No caso da estação móvel, o modelo de processo RRM inicia a troca de mensagens de sinalização, apresentado anteriormente, para alocação do canal suplementar.

O modelo de processo RRM possui um algoritmo de alocação de banda para os terminais móveis. O algoritmo possui uma tabela que especifica, para um determinado *Rate Set* e para uma determinada taxa de transmissão (expressa em múltiplos da taxa básica 9600 bps ou 14400 bps), qual a máxima distância permitida entre móvel e estação rádio base. Para

distâncias menores pode-se especificar taxas mais elevadas pois a relação sinal ruído mais interferência (SINR) pode ser melhor.

4.5.8 *Radio Transceiver Pipeline*

O *Radio Transceiver Pipeline* é uma arquitetura do OPNET composta por 14 estágios e desenvolvida em linguagem C/C++ para especificar o comportamento do enlace de comunicação via rádio entre um transmissor e um ou mais receptores. O objetivo do *pipeline* é simular o efeito da propagação no canal de rádio sobre a transmissão de cada pacote.

Para cada pacote transmitido são criadas várias cópias, uma para cada canal de recepção em cada receptor. A cada cópia é associado um conjunto de variáveis denominadas *Transceiver Data Attributes* (TDA). As rotinas modificam os valores destas variáveis e determinam se um pacote é recebido com sucesso ou não em cada receptor.

O modelo de simulação da rede CDMA2000 1X utiliza um *pipeline* específico para representar a interface de rádio CDMA. Este modelo está fundamentado nos estágios *channel match*, *Txdel*, *Ecc* e *Inoise* apresentados a seguir.

- O estágio *channel match* verifica, para cada canal de cada receptor, se uma transmissão será recebida com sucesso. Esta verificação leva em consideração os seguintes parâmetros :

a) Frequência de transmissão (enlace direto ou reverso). O estágio verifica a faixa de transmissão correspondente ao enlace direto ou reverso. Desta forma, as transmissões de uma estação móvel serão recebidas apenas por estações rádio base e vice-versa. Os parâmetros de frequência são atributos dos canais de rádio.

b) Código CDMA. A interface de rádio da rede CDMA 2000 1X possui diversos canais que admitem transmissões simultâneas utilizando a mesma banda. Cada transmissão utiliza um código diferente. A modelagem desta característica foi feita da seguinte maneira. A cada pacote transmitido na interface de rádio é associada uma estrutura de dados que informa qual o canal correspondente àquela transmissão (*Channel*) e qual a estação receptora

a que se destina a transmissão (Rx ID). O modelo compara esses valores com os valores das variáveis TDA. Se os valores forem iguais a transmissão prossegue, caso contrário é considerada inválida.

- O estágio txdel determina o tempo de transmissão de um pacote. Normalmente, os modelos desenvolvidos no OPNET calculam o tempo de transmissão a partir da razão entre o tamanho em bits do pacote transmitido e a taxa de transmissão do canal (que é um atributo do canal, normalmente invariante no tempo). A interface de rádio CDMA2000 1X permite realizar transmissões com taxas variadas. O tempo de transmissão de qualquer pacote é fixo e igual a 20 ms, que é o tempo de transmissão de um quadro da camada física. Taxas variadas de transmissão são obtidas transmitindo-se pacotes com tamanhos em bits diferentes.
- O estágio Inoise é utilizado para detectar colisões no canal de acesso (ACH). Quando um móvel acessa o canal de acesso, é atribuído aleatoriamente um número de canal. Quando há uma transmissão simultânea de pacotes, o estágio Inoise analisa este número. Se ambos pacotes possuem o mesmo número de canal, significa que houve colisão e que ambos pacotes não serão recebidos.
- O estágio Ecc verifica se um quadro da camada física será recebido ou descartado. A quantidade de bits em erro é calculada através da BER (*Bit Error Rate*) e do tamanho do quadro em bits. Se esta quantidade for menor ou igual à capacidade do código corretor de erros, o quadro é recebido. Se for maior, o quadro é descartado.

4.6 Avaliação do Modelo de Simulação

4.6.1 Depuração e Validação do Código

O modelo de simulação da rede CDMA200 1X foi utilizado em vários cenários de simulação e os resultados obtidos foram analisados e comparados com valores calculados por modelos analíticos. Também foi realizada uma análise funcional para verificar se todos os elementos

do modelo funcionam corretamente. Esta análise funcional foi realizada por dois métodos : verificação de relatório de erros e depuração direta do código.

Uma parte das funções dos modelos da camada CDMA2000 1X (camada 2 do modelo OSI-ISO) tem como objetivo encaminhar pacotes que representam pacotes IP, quadros RLP ou quadros da camada física. Neste caso, se os pacotes forem encaminhados de forma errada, isto irá provocar uma mensagem de erro na camada de aplicação, além de produzir uma vazão igual a zero nas estatísticas da camada de aplicação. Por meio da observação destes efeitos pode-se testar as funções de encaminhamento dos modelos de processos MAC MUX e PPP MUX.

Uma função do processo MAC MUX é montar adequadamente os quadros físicos e encaminhá-los ao canal físico adequado. Esta função exige uma depuração direta do código. O funcionamento do modelo de processo RLP3, LAC, SRBP e RRM exige depuração direta. Isto quer dizer que o modelo de simulação deve ser executado no modo de depuração (*debug*) do OP-NET, que permite visualizar passo-a-passo todos os eventos da simulação. Adicionalmente, deve-se incluir no código instruções para enviar para a tela informações complementares, como tipo de quadro transmitido e valores de seus campos principais. Utilizando este procedimento todas as funções descritas acima foram depuradas e validadas.

4.6.2 Teste de Retransmissão de Quadros RLP

O principal teste de validação do protocolo RLP3 é a verificação do mecanismo de retransmissão, que ocorre com a falha de transmissão de quadros na interface de rádio. Foram realizados diversos testes em que ocorrem retransmissões e o funcionamento do RLP3 foi validado a partir de comparação dos resultados da simulação com valores esperados calculados analiticamente. Também foram realizadas algumas simulações observando-se especificamente a troca de quadros do protocolo RLP3.

A seguir será apresentado um caso específico em que foi utilizado um cenário de teste que simula o tráfego UDP com mensagens de tamanho fixo, transmitidas a intervalos constantes

de 1 segundo. O cenário é constituído por uma BS, que representa as funções BTS e BSC de um setor de uma célula do sistema CDMA2000 1X, uma MS, que suporta serviços orientados à conexão (MS-Voz) e serviços de dados orientados a pacotes (MS-IP), um nó de rede PDSN que representa uma central de comutação de pacotes IP e de um servidor. O terminal móvel se comunica com a estação rádio base por meio da interface de rádio. Um enlace PPP_Tunnel interliga a estação rádio base e o nó de rede PDSN, onde os pacotes são transmitidos a uma taxa de 2 Mbps.

O código original do modelo de simulação foi modificado para permitir o teste do protocolo numa situação de erro de transmissão de quadros num dado instante bem conhecido. Foi inserida uma instrução no código do modelo de processo do RLP3 para forçar um erro de transmissão de pacote.

Quando se executa o OPNET no modo *debug*, é possível executar o comando *trace* RLP. Foi implementado este recurso na camada RLP3. Com isto, o programa passa a reportar todos os eventos relacionados com a recepção de pacotes RLP. Pode-se identificar a origem e o destino dos quadros RLP, o tipo de quadro RLP, o instante em que o pacote é transmitido e recebido e também, se o quadro recebido resulta de uma retransmissão.

A Figura 4.13 apresenta um diagrama destas informações. Para reduzir o volume de informações e facilitar o entendimento, foram apresentados os resultados de um pequeno intervalo de tempo de simulação.

A cada 20 ms é transmitido um pacote na interface de rádio representando um quadro da camada física. Cada quadro pode conter 1, 2, 4 ou 8 quadros RLP. Para efeito deste *trace*, os quadros físicos transportam 8 quadros RLP (SCH e *Mux Option* 0x921 do Apêndice A).

Quando há um erro de transmissão do quadro, todos os quadros RLP contidos são perdidos. Cada quadro RLP transmitido recebe um número sequencial. Ao receber o quadro seguinte corretamente, o processo de recepção do RLP analisa a numeração e percebe que os quadros estão fora de ordem e que quadros anteriores foram perdidos. Neste instante o receptor envia um quadro RLP tipo NAK solicitando a retransmissão dos quadros.

Dentro da estratégia ARQ (*Automatic Repeat Request*) de repetição seletiva do protocolo RLP3, cada quadro NAK solicita a retransmissão de até quatro quadros RLPs. A ordem em que os quadros são solicitados segue a própria sequência de numeração dos quadros perdidos.

O protocolo RLP3 estabelece que os quadros NAK são enviados em salvas (*rounds*), cada salva contendo um número específico de quadros NAK enviados em quadros físicos distintos. Na estratégia adotada para o modelo, são enviados até três salvas com até três quadros NAK referentes a um grupo de quadros RLPs. Enquanto não recebe o quadro NAK, o transmissor continua enviando quadros novos. Estes quadros são recebidos pelo receptor, que armazena os quadros (recebidos fora de ordem por causa da perda de quadros) em um *buffer*, até que os quadros perdidos sejam retransmitidos. Dado que o receptor envia até três quadros NAK referente a um grupo de quadros RLPs, o transmissor faz no máximo três retransmissões deste grupo. Os quadros RLPs que já foram recebidos são descartados pelo receptor.

O terminal móvel transmite quadros contendo dados no canal SCH (identificados como TX DATA SCH) que são recebidos na estação rádio base (RX DATA). O diagrama inicia com a falha de transmissão de um quadro físico contendo os quadros RLP numerados de 7709 a 7716. Nos quadros físicos seguintes o móvel transmite os quadros RLP 7717 a 7740. Ao receber o quadro 7717, a estação rádio base percebe que os quadros 7709 a 7716 foram perdidos. Nos três quadros físicos seguintes, a estação rádio base envia um quadro NAK no canal fundamental, solicitando a retransmissão dos quadros 7709 a 7712. Nos três quadros subsequentes, a estação rádio base envia mais três quadros NAK solicitando a retransmissão dos quadros 7713 a 7716. Para cada quadro NAK recebido, a MS envia em um mesmo quadro físico, os quadros solicitados (identificados como REXMIT) e os novos quadros de dados.

Devido ao tempo de transmissão e propagação do quadro físico, há um intervalo de tempo de cerca de 200 ms desde o instante de ocorrência do erro de transmissão (100.040006921 s) até o instante de recebimento do último quadro retransmitido (100.240006921 s). O atraso mínimo de transmissão de um pacote IP é dado pelo número total de quadros físicos transmitidos (novos e retransmitidos) contendo bytes do pacote IP (em forma de quadros RLP)

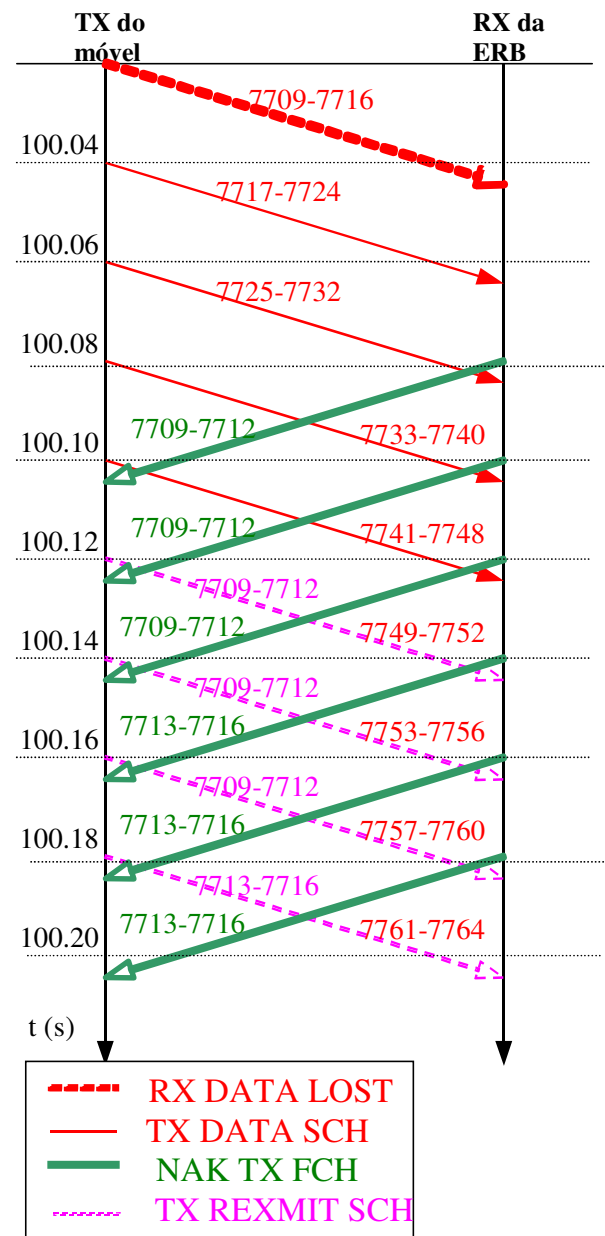


Figura 4.13: Diagrama de envio de quadros RLP de dados e NAK do caso de teste.

multiplicado por 20 ms. O resultado é que o atraso de um pacote IP é fundamentalmente afetado pela taxa de erro e pelos parâmetros selecionados para as salvagens NAK.

4.6.3 Entrada e Saída de Dados

A entrada de dados dos cenários de simulação pode ser classificada em dois grupos : perfil de tráfego e configuração do cenário.

O grupo perfil de tráfego inclui um conjunto de atributos dos terminais móveis que irão determinar como será o tráfego de voz, sinalização e dados de cada cenário. Existem atributos para o tráfego de voz, para o tráfego IP (utilizando toda a sistemática padrão do OPNET) e para o tráfego SMS.

Os parâmetros de configuração de cenário compõem um conjunto de parâmetros que permitem escolher valores para alguns parâmetros configuráveis da rede CDMA2000 1X. Isto permite inclusive avaliar o efeito destes parâmetros em relação ao desempenho das redes. Um exemplo deste tipo de parâmetro é a taxa de erro de quadro (*Frame Error Rate* - FER) no canal de rádio. Outro exemplo é a estrutura de um *slot* do canal de acesso, isto é, quantos quadros formam o preâmbulo e quantos quadros formam a cápsula de mensagem de acesso. A alteração destes atributos é feita cenário a cenário.

Em relação aos resultados do modelo, os dados obtidos satisfazem plenamente as necessidades para avaliação de desempenho do sistema CDMA2000 1X. Podem ser medidos parâmetros de vazão, atraso de transmissão, taxa de erro na interface de rádio e vazão e atraso na camada de aplicação.

4.6.4 Análise do Efeito da Taxa de Erro

A seguir é apresentada uma análise para verificar o desempenho do sistema CDMA2000 1X na presença de taxas de erro de quadro elevadas, utilizando a topologia de simulação apresentada na Figura 4.3.

O elemento de rede *Tasks* [OPNET] da Figura 4.3 foi utilizado para gerar um tráfego unidirecional de mensagens constantes de 8.000 bytes por segundo com FER como atributo

de entrada assumindo valores de 1 %, 5 % e 10 %, permitindo uma análise quantitativa do tráfego. As mensagens foram transmitidas no enlace reverso (da estação móvel para estação rádio base) utilizando o protocolo UDP da biblioteca do OPNET. O UDP é um protocolo da camada de transporte do modelo de referência OSI-ISO e transmite pacotes na rede sem confiabilidade. Não há um mecanismo para assegurar a recepção de pacotes com retransmissão em caso de erro de transmissão. Desta forma, o tráfego existente na rede é simplesmente o tráfego gerado pelas mensagens da aplicação. Isto torna possível comparar os resultados da simulação com valores calculados analiticamente.

A topologia de simulação é constituída pelos nós de rede BS, MS, PDSN e um servidor. A MS se comunica com a BS por meio da interface de rádio. Um link PPP Tunnel interliga a BS a PDSN, onde os pacotes são transmitidos a uma taxa de 2 Mbps.

O mecanismo de retransmissão da camada RLP utilizou três salvos de quadros NAK com três quadros NAK.

Os resultados da simulação foram coletados em forma de gráficos fornecidos pelo OPNET. Em todos os gráficos apresentados, a unidade do eixo y (das ordenadas) está apresentada no centro da parte superior do gráfico em bytes/s e a unidade no eixo x (das abscissas) é em minutos e indica o tempo estipulado para a simulação.

A Figura 4.14 apresenta a vazão (em bytes por segundo) na camada de aplicação (*average of Custom Application.Traffic Received*) para FER=1, FER=5 e FER=10 %.

Quando a FER é pequena (FER = 1 %) a vazão é maior. A taxa de erro introduz um atraso na recepção das mensagens na camada de aplicação, causando diminuição da vazão na camada de aplicação.

A Figura 4.15 apresenta a vazão média (em bits por segundo) no canal SCH do enlace reverso (*average of radio receiver.throughput*) para FER=1, FER=5 e FER=10 %.

A vazão obtida na camada física no OPNET, considera os quadros RLP transmitidos da primeira vez e também os quadros RLP retransmitidos. Pode-se verificar que a medida que a taxa de erro aumenta, a vazão na camada física aumenta também. Embora os quadros

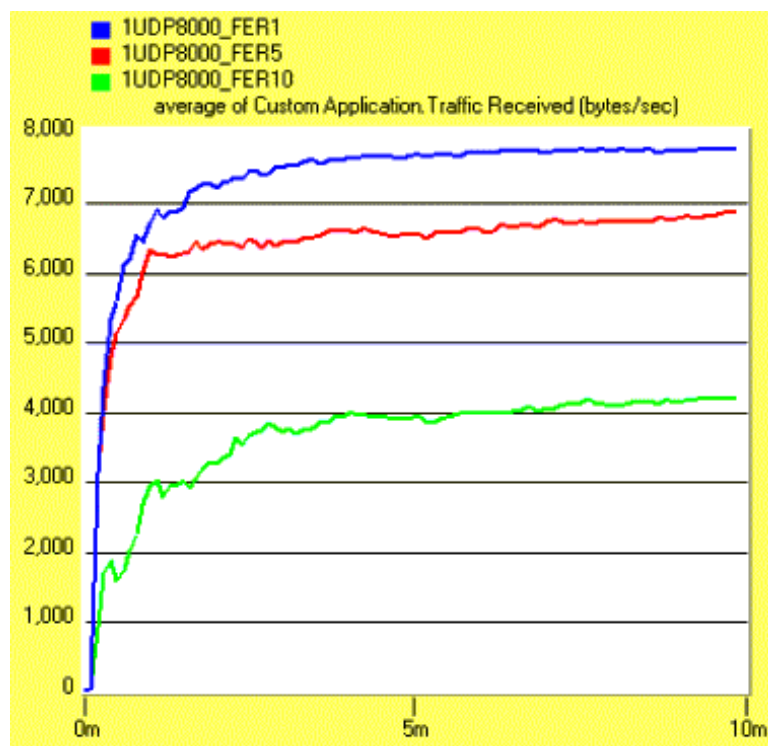


Figura 4.14: Vazão na camada de aplicação para mensagens de 8000 bytes.

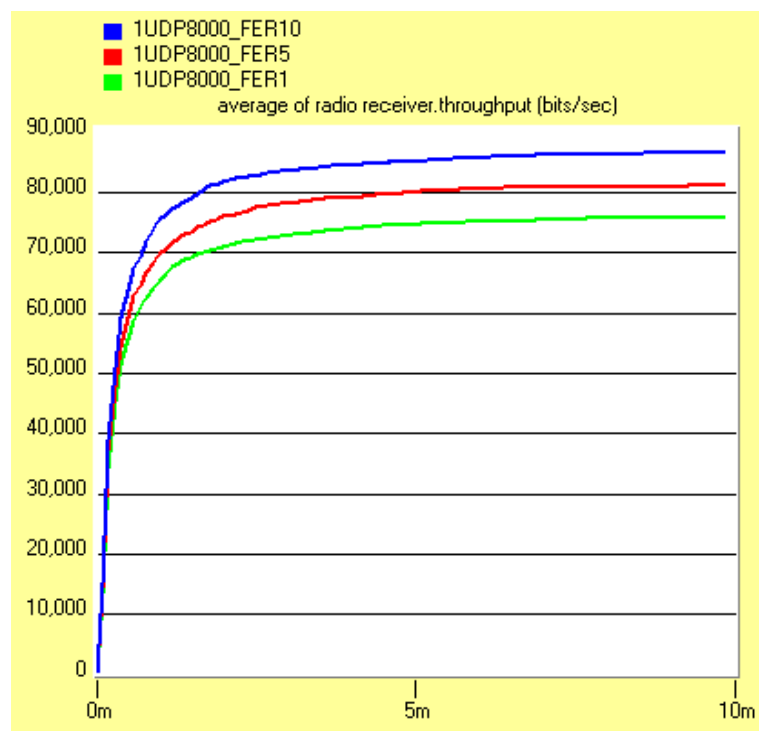


Figura 4.15: Vazão média no canal SCH do enlace reverso para mensagens de 8000 bytes.

retransmitidos com erro não sejam contabilizados na vazão, os quadros RLP da primeira transmissão com erro são retransmitidos três vezes e isto cria o efeito de aumento da vazão na camada física.

A Figura 4.16 apresenta o atraso médio (em segundos) de mensagens na camada da aplicação (*average of Custom Application. Application Response Time*) para FER=1, FER=5 e FER=10 %.

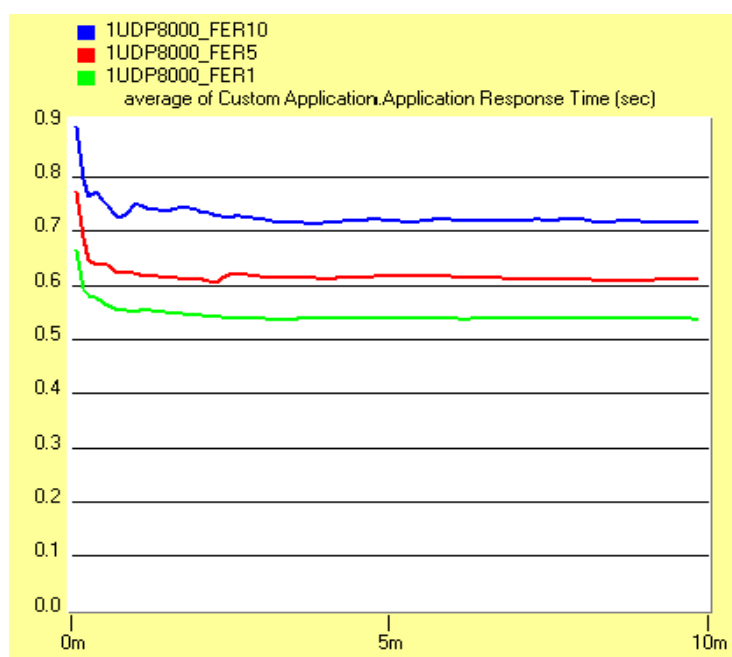


Figura 4.16: Tempo médio de atraso de recepção para mensagens de 8000 bytes.

O atraso é o tempo necessário para transmissão de todos os quadros RLP incluindo os quadros retransmitidos. Assim sendo, quanto maior a taxa de erro, maior o número de quadros retransmitidos e maior o atraso na camada da aplicação, uma vez que se gasta mais tempo para transmitir a mesma mensagem.

Embora os cálculos analíticos exatos da vazão na recepção do canal de tráfego e do tempo de atraso na camada de aplicação sejam complexos, a partir das análises feitas anteriormente pôde-se propor fórmulas analíticas aproximadas para o cálculo destes parâmetros.

A vazão é dada pela soma do tráfego transmitido e retransmitido. Um quadro RLP sempre

será transmitido uma vez e retransmitido um certo número de vezes, dependendo da taxa de erro e dos parâmetros da estratégia de retransmissão (quantidade de salvas e quadros NAK). Adotando-se como hipótese simplificadora que quadros NAK não sofrem erros de transmissão, então a vazão pode ser calculada aproximadamente por

$$S = [(1 - FER) \times A] + [(1 - FER) \times A \times Rtx \times FER], \quad (4.1)$$

em que S é a vazão na camada física, A é a vazão na camada física quando $FER = 0$ e Rtx é o número de retransmissões de quadros RLP, quando a primeira transmissão é mal sucedida.

O valor de Rtx depende da estratégia de retransmissão. Para salvas NAK iguais a 1, 2 ou 3, o valor de Rtx deve ser 1, 2 ou 3, respectivamente. O mecanismo de retransmissão da camada RLP utilizou três salvas de quadros NAK, portanto Rtx é igual a 3.

Considerando a FER de 1 %, taxa de transmissão de 153,6 kbps, *Mux Option* 0x921, mensagem de 8.000 bytes e cabeçalho UDP de 8 bytes e IP de 20 bytes. O pacote resultante da camada IP (8.000 + 28) é dividido por 42 octetos (Apêndice A) que resulta em

$$\left\lceil \frac{8.028}{42} \right\rceil = 192 \text{ quadros RLP}, \quad (4.2)$$

em que $\lceil x \rceil$ representa o menor inteiro maior que x .

Cada oito quadros RLP compõem um quadro da camada física. Portanto 192 quadros RLP resultam em

$$\frac{192}{8} = 24 \text{ quadros da camada física por segundo}. \quad (4.3)$$

Como a taxa de transmissão é de 153,6 kbps e o tamanho em segundos do quadro da camada física é de 20 ms, então um quadro da camada física tem 3.072 bits.

Assim, A pode ser calculada por

$$24 \frac{\text{quadros}}{s} \times 3072 \frac{\text{bits}}{\text{quadro}} = 73.728 \frac{\text{bits}}{s}. \quad (4.4)$$

E a vazão média na recepção do canal de tráfego para mensagens de 8000 bytes pode ser

calculada por

$$S = [(1 - 0,01) \times 73.728] + [(1 - 0,01) \times 73.728 \times 3 \times 0,01] = 75.181 \frac{bits}{s} \quad (4.5)$$

e que está de acordo com o valor de vazão para FER = 1 % apresentado na Figura 4.15.

O volume de tráfego V pode ser calculado por

$$V = [(1 - FER) \times M] + [(1 - FER) \times M \times Rtx \times FER] \quad (4.6)$$

em que M é o tamanho da mensagem em bytes somado dos cabeçalhos UDP e IP.

$$V = [(1 - 0,01) \times 8.028] + [(1 - 0,01) \times 8.028 \times 3 \times 0,01] = 8.187 \text{ bytes}. \quad (4.7)$$

Totalizando

$$\left\lceil \frac{8.187}{42 \times 8} \right\rceil = 25 \text{ quadros da camada física}. \quad (4.8)$$

O tempo de atraso (T_a) da recepção de mensagens na camada de aplicação pode ser calculado por

$$T_a = 25 \times d = 25 \times 0,02 = 0,5 \text{ s} \quad (4.9)$$

em que d é a duração de um quadro da camada física.

É importante citar que erros em quadros NAK, atraso na interface terrestre e o tempo de alinhamento de quadro da camada física não foram considerados nos cálculos analíticos. Isto justifica a pequena diferença de 6 % entre o valor simulado na Figura 4.16 e o valor teórico calculado pela equação 4.9.

4.6.5 Tráfego com o Protocolo TCP

4.6.5.1 Tráfego com um e com cinco terminais móveis

O tráfego com o protocolo TCP na camada de transporte do modelo de referência OSI-ISO foi gerado utilizando a topologia de simulação apresentada na Figura 4.3 e utiliza modelos de tráfego padrão do OPNET, através do elemento de rede *Applications*.

Para simular o tráfego TCP foi definido um perfil de tráfego com as aplicações HTTP e *E-mail*.

A aplicação HTTP foi definida com as seguintes características : O intervalo de tempo entre páginas foi modelado por uma distribuição exponencial com média igual a 720 (s). O número de objetos por página foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 1. O tamanho do objeto foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 500 (bytes). O tipo do serviço foi “o melhor possível” (*best effort*).

A aplicação *E-mail* foi definida com as seguintes características : O intervalo de tempo entre envios e recebimentos de *E-mail* foi modelado por uma distribuição exponencial com média igual a 3.600 (s). O tamanho do grupo de envios e recebimentos de *E-mail* foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 3. O tamanho do *E-mail* foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 500 (bytes). O tipo do serviço foi “o melhor possível” (*best effort*).

A Figura 4.17 apresenta a vazão na camada de aplicação dos cenários 1TCP (com um terminal móvel) e 5TCP (com cinco terminais móveis) para um tráfego HTTP do servidor para o cliente (*download*). O gráfico mostra que o tráfego HTTP é recebido em certos instantes de tempo com valores de vazão correspondente ao perfil de tráfego HTTP estabelecido anteriormente. Para o tráfego HTTP recebido por um terminal móvel, houve um tráfego de aproximadamente 300 bytes nos instantes de tempo correspondente a aproximadamente 15 e 18 minutos de simulação. Para o tráfego HTTP recebido por cinco terminais móveis, houve um tráfego de aproximadamente 300 bytes em vários instantes de tempo de simulação e um valor acumulado dos cinco terminais móveis de aproximadamente 500 bytes no instante de tempo correspondente a aproximadamente 6 minutos de simulação.

A Figura 4.18 apresenta o atraso na camada de aplicação dos cenários 1TCP (com um terminal móvel) e 5TCP (com cinco terminais móveis) para um tráfego HTTP do servidor para o cliente (*download*). O gráfico mostra que como o tráfego HTTP é recebido em certos instantes de tempo, o atraso percebido pelo usuário é apresentado nestes instantes de tempo.

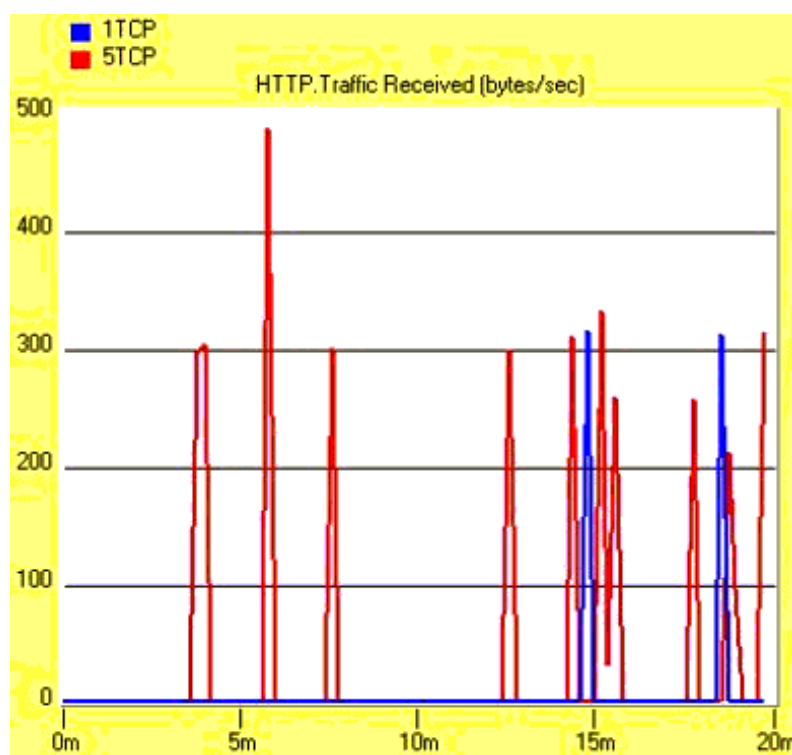


Figura 4.17: Vazão na camada de aplicação do tráfego HTTP Servidor->Cliente.

O pico de atraso de aproximadamente 2,8 s ocorre no tráfego HTTP recebido por cinco terminais móveis nos instantes de tempo correspondentes a aproximadamente 4 e 16 minutos de simulação. O tráfego HTTP recebido por um terminal móvel gera atraso de aproximadamente 1,6 s nos instantes de tempo correspondentes a aproximadamente 15 e 18 minutos de simulação.

A Figura 4.19 apresenta a vazão na camada de aplicação dos cenários 1TCP (com um terminal móvel) e 5TCP (com cinco terminais móveis) para um tráfego de *E-mail* do cliente para o servidor (*upload*). O gráfico mostra que o tráfego de *E-mail* é oferecido em certos instantes de tempo com valores de vazão correspondente ao perfil de tráfego de *E-mail* estabelecido anteriormente. Para o tráfego de *E-mail* gerado por um terminal móvel, houve um tráfego de aproximadamente 250 bytes no instante de tempo correspondente a aproximadamente 2 minutos de simulação e um tráfego de aproximadamente 100 bytes em vários instantes de tempo de simulação. Para o tráfego de *E-mail* gerado por cinco terminais mó-

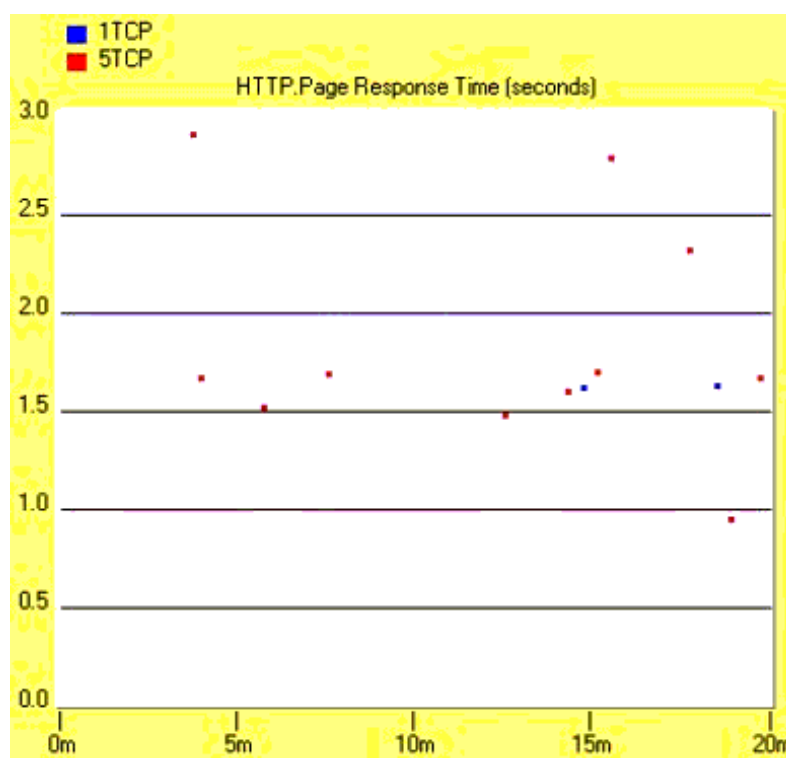


Figura 4.18: Atraso na camada de aplicação do tráfego HTTP Servidor->Cliente.

veis, houve um tráfego de valor acumulado de aproximadamente 1100 bytes no instante de tempo correspondente a aproximadamente 2 minutos de simulação.

A Figura 4.20 apresenta o atraso na camada de aplicação dos cenários 1TCP (com um terminal móvel) e 5TCP (com cinco terminais móveis) para um tráfego de *E-mail* do cliente para o servidor (*upload*). O gráfico mostra que como o tráfego de *E-mail* é oferecido em certos instantes de tempo, o atraso percebido pelo servidor é apresentado nestes instantes de tempo. O pico do atraso de aproximadamente 0,45 s ocorre no tráfego de *E-mail* gerado por um terminal móvel no instante de tempo correspondente a aproximadamente 2 minutos de simulação. O tráfego de *E-mail* gerado por cinco terminais móveis gera atraso de aproximadamente 0,41 s e 0,18 s nos instantes de tempo correspondente a aproximadamente 2 e 4 minutos de simulação, respectivamente.

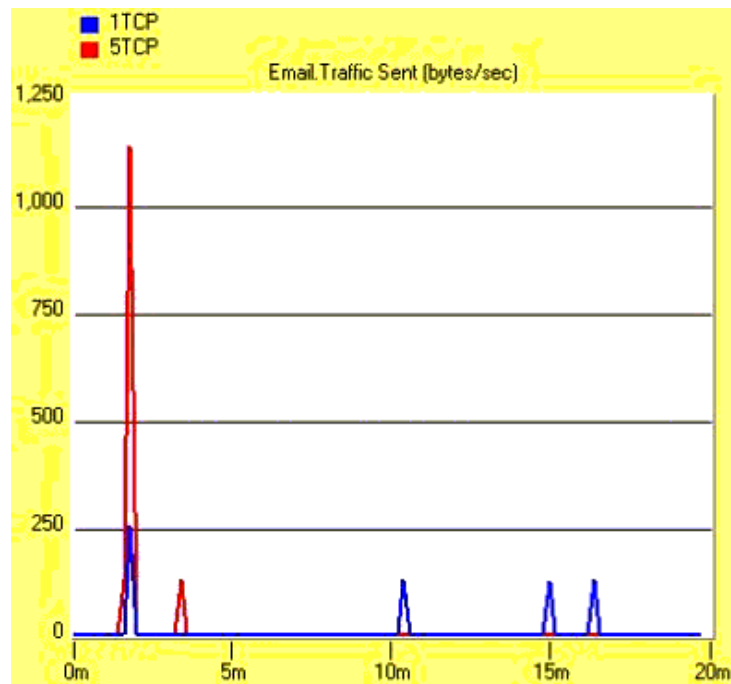


Figura 4.19: Vazão na camada de aplicação do tráfego *E-mail* Cliente->Servidor.

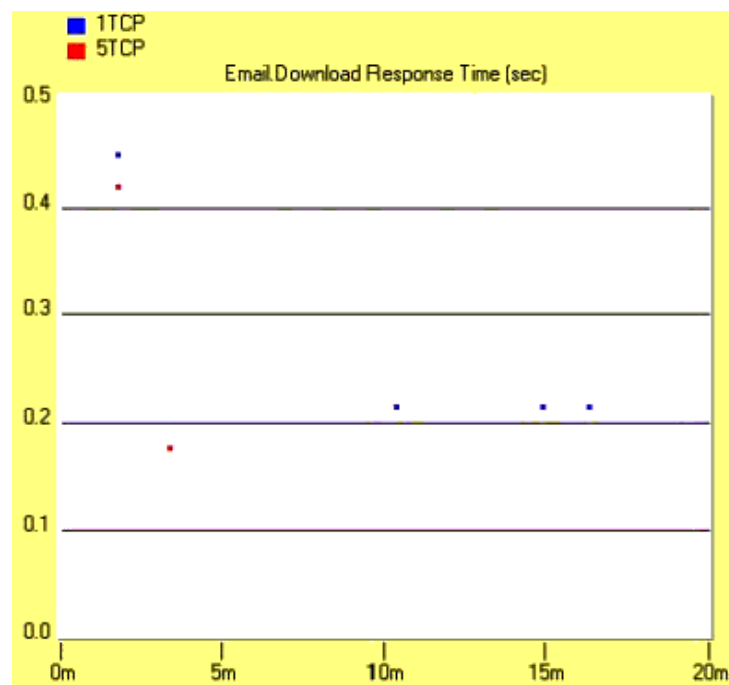


Figura 4.20: Atraso na camada de aplicação do tráfego *E-mail* Cliente->Servidor.

4.6.5.2 Tráfego com trinta terminais móveis

A topologia de simulação apresentada na Figura 4.3 foi utilizada com trinta terminais móveis para verificar a nova qualidade do serviço prestado na condição de alta carga de tráfego em uma célula. A Figura 4.21 mostra que para a aplicação HTTP o atraso médio aumentou de aproximadamente 1,5 s (Figura 4.18) para aproximadamente 15 s, um aumento de 10 vezes. Enquanto que para a aplicação de *E-mail*, o atraso médio aumentou de aproximadamente 0,2 s (Figura 4.20) para aproximadamente 12 s, um aumento de 60 vezes, o que representa um aumento seis vezes maior que o aumento do atraso médio para a aplicação HTTP.

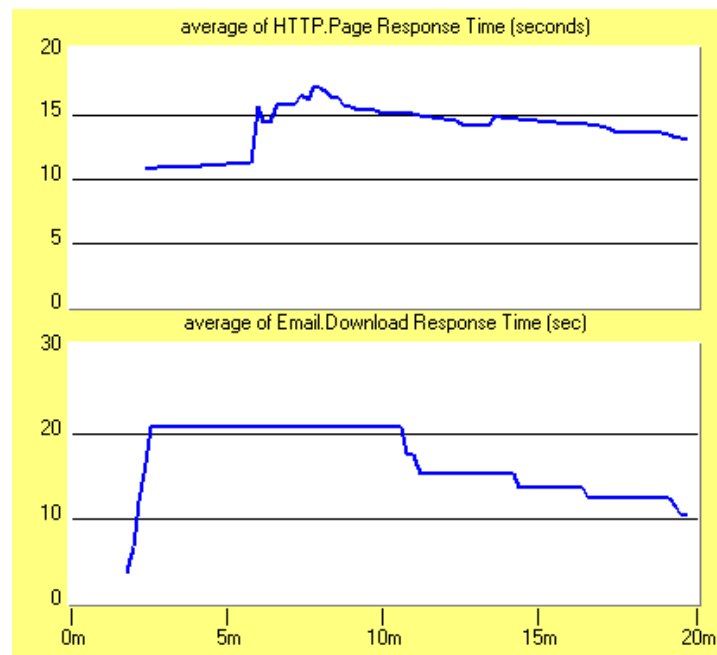


Figura 4.21: Atrasos médios na camada de aplicação para HTTP e *E-mail*.

4.7 Limitações no Modelo e Conclusões

O modelo de simulação da rede CDMA2000 1X possui as seguinte limitações :

- Número de nós PDSN : 1
- Número de terminais móveis ativos por estação rádio base : 35

- Número de estações rádio base por PDSN : 16

O modelo possui as seguintes simplificações :

- A taxa de erro de quadro é um parâmetro de entrada. Não é função da distância do móvel e do perfil topográfico. Alternativamente criou-se um sistema que limita a taxa de transmissão de acordo com a distância entre terminais móveis e estação rádio base ;
- O modelo implementa apenas o funcionamento dos canais básicos ;
- O modelo implementa de forma aproximada os processos de sinalização, utilizando valores arbitrários para os tamanhos de mensagens ;
- O modelo não suporta *handoff* e nem ativação e desativação do terminais de dados (estado dormente enquanto não há tráfego). Estes terminais transmitem continuamente ;
- O mecanismo de registro do terminal móvel é simplificado ;
- A interface entre BTS e BSC não é considerada. BTS e BSC formam um modelo único chamado BS ;
- Serviço de mensagens curtas (SMS) é transmitido apenas no canal comum de sinalização.

O modelo de simulação da rede CDMA2000 1X foi depurado e validado. Diversos resultados produzidos pelo modelo em diferentes cenários de simulação foram avaliados e comparados com valores calculados analiticamente, apresentando os resultados esperados. Foi feita uma análise dos diversos protocolos e comparados com o comportamento especificado nas normas da rede CDMA2000 1X.

O modelo de simulação contribui para auxiliar no estudo da capacidade da rede CDMA2000 1X do ponto de vista do número máximo de usuários que podem ser atendidos para uma determinada qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) desejada e no estudo do desempenho da rede CDMA2000 1X, levando em conta a pilha de protocolos completa em todos os nós da rede, através de diferentes aplicações executadas simultaneamente possibilitando a otimização da rede CDMA2000 1X para uma determinada qualidade de serviço desejada.

Como contribuição complementar, o desenvolvimento do modelo de simulação permitiu a criação de modelos analíticos simplificados, antes inexistentes.

4.8 CDMA2000 1xEVDO

4.8.1 Introdução

O sistema CDMA2000 1xEVDO (*Evolution Data Optimized*), denominado como CDMA2000 HDR (*High Data Rate*) [CDMA2000 HDR], é uma tecnologia de transmissão de dados em alta velocidade para redes de telefonia celular de terceira geração (3G) compatível com redes CDMA já existentes.

Para o estudo do sistema 1xEVDO, foi desenvolvido um modelo de simulação no ambiente OPNET, apresentado na Figura 4.22. O cenário de simulação é composto pelos seguintes elementos de rede :

- Terminal de acesso (*Access Terminal* - AT). Dispositivo através do qual um usuário pode se conectar à rede de acesso. Equivalente a estação móvel de redes celulares ;
- Rede de acesso (*Access Network*). É uma rede que liga os terminais de acesso a uma rede de dados (por exemplo, a Internet). Uma *Access Network* possui dois elementos : *Base Station Controller* (BSC) e *Base Transceiver Station* (BTS). BTS e BSC podem estar fisicamente no mesmo ponto ou em pontos diferentes. Uma BSC pode controlar mais de uma BTS ;
- PDSN (*Packet Data Serving Node*). É o equipamento utilizado para realizar a função de comutação de pacotes e realizar a interface com outras redes de comutação de pacotes ;
- HA (*Home Agent*). É uma base de dados centralizada, consultada pelos elementos de rede AT, BSC, BTS e PDSN. Não é conectado em outro elemento de rede ;
- Servidor (*Server*). Disponível na biblioteca padrão do OPNET para comunicações fim-a-fim ;
- Aplicação (*Applications*). É um servidor de aplicações disponível na biblioteca padrão

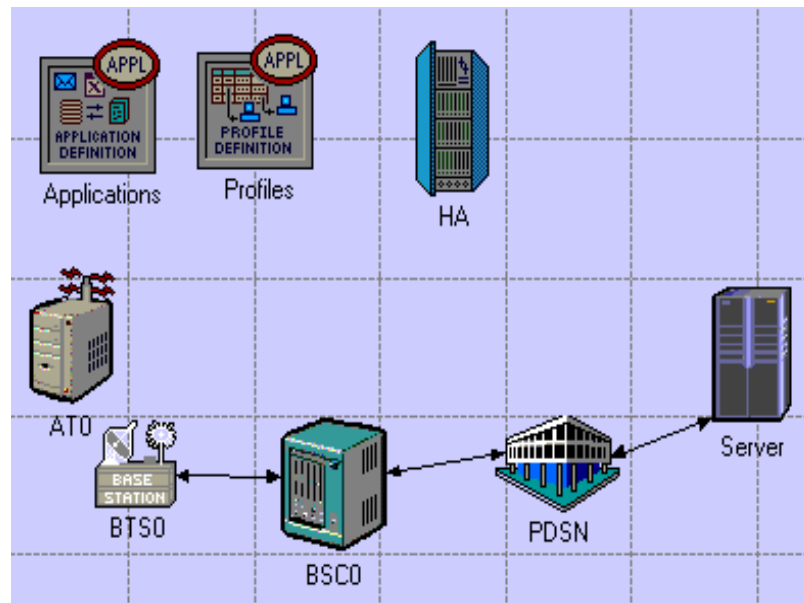


Figura 4.22: Diagrama do cenário de simulação e os elementos da rede 1xEVDO.

do OPNET. Não é conectado em outro elemento de rede;

- Perfil de tráfego (*Profiles*). É um gerador de perfis de tráfego disponível na biblioteca padrão do OPNET. Não é conectado em outro elemento de rede;
- Tarefas (*Tasks*). É um gerador de tráfego definido pelo usuário disponível na biblioteca padrão do OPNET. Não é conectado em outro elemento de rede.

Os elementos da rede 1xEVDO (AT, BTS, BSC, PDSN e HA) foram incorporados à biblioteca de modelos do OPNET, podendo ser utilizados na construção de cenários de simulação, permitindo o estudo desta rede com um número variável de terminais, redes de acesso e equipamentos de comutação.

4.8.2 Potência de Transmissão no Enlace Direto

Diferentemente do enlace direto da rede CDMA IS-95 [*Physical*], onde cada usuário recebe o sinal oriundo de uma parcela da potência total de um setor de uma BTS, o enlace direto da rede 1xEVDO utiliza o método de Multiplexação por Divisão de Tempo (*Time Division Multiplexing* - TDM) para eliminar esta divisão de potência entre os usuários servidos em

um setor de uma BTS alocando toda potência do setor a um único usuário em um certo intervalo de tempo. A Figura 4.23 mostra a forma do uso da potência de um setor de uma BTS na IS-95 e no 1xEVDO. Pode-se perceber que cada canal na IS-95 é transmitido o tempo todo com uma certa parcela da potência total do setor, enquanto que o canal equivalente no 1xEVDO é transmitido com a toda a potência do setor somente durante um intervalo de tempo [IS-856].

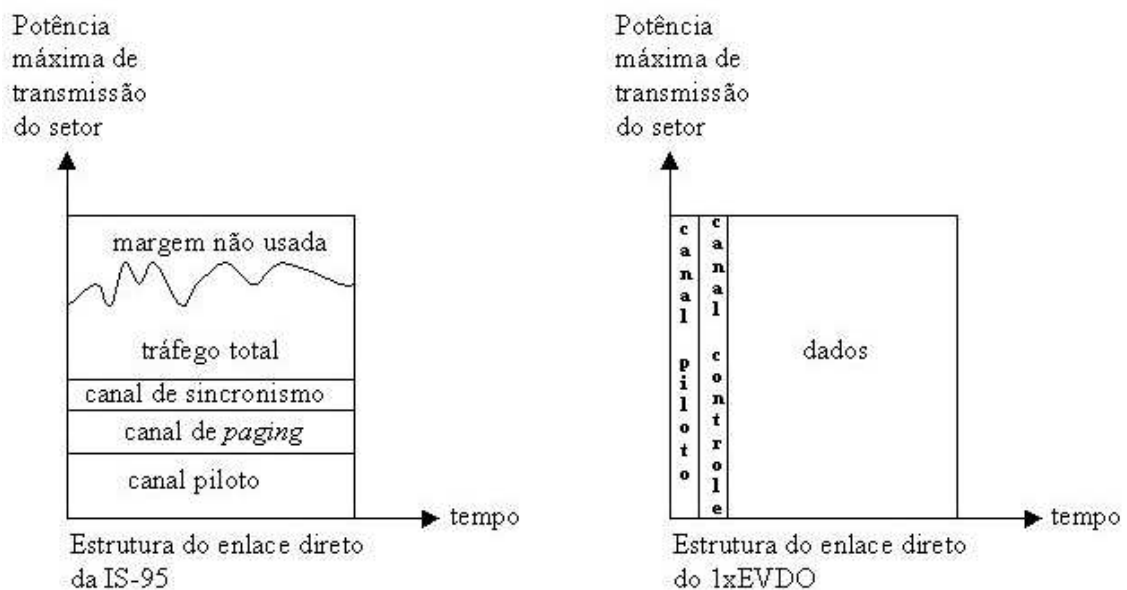


Figura 4.23: Forma de utilização da potência no enlace direto na IS-95 e no 1xEVDO.

O uso da potência total do setor no 1xEVDO não apenas aumenta a cobertura como também melhora a relação sinal ruído mais interferência (*signal-to-interference-plus-noise ratio* - SINR).

4.8.3 Taxas de Dados no Enlace Direto

O enlace direto do 1xEVDO suporta taxas de dados que variam dinamicamente. O terminal informa a condição do sinal para a rede de acesso através de um canal lógico chamado de DRC (*Data Rate Control*). Esta informação pode ser enviada até 600 vezes por segundo, uma vez que o sinal varia bastante dependendo da velocidade de locomoção do terminal.

Através do DRC também são indicados a taxa de transmissão que deve ser utilizada, o tipo de modulação, a taxa de código do corretor de erros e o número de *slots* que deve ser utilizado. Adicionalmente, o DRC também leva a informação de qual o setor de BTS que deve servi-lo, isto é, informa o único setor de BTS que irá transmitir para o terminal. Desta forma, o 1xEV-DO se baseia na rápida seleção de qual setor irá lhe atender de acordo com a potência do sinal que o terminal observa de cada um deles. A Figura 4.24 apresenta o processo de alocação de taxa de dados de forma dinâmica no 1xEVDO [IS-856].

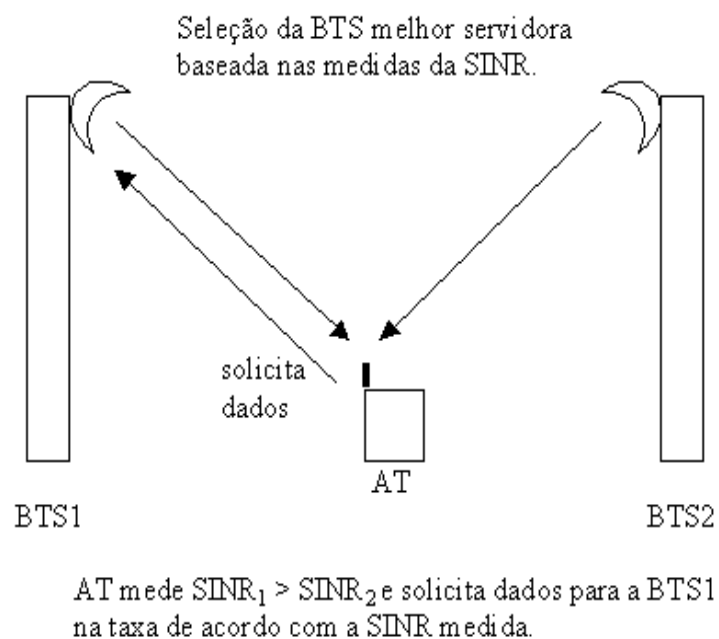


Figura 4.24: Processo de alocação de taxa de dados de forma dinâmica no 1xEV-DO.

A BTS recebe a solicitação do AT e envia no enlace direto a maior taxa possível de acordo com a medida de SINR do AT. Pode-se perceber, desta forma, que a taxa de dados do enlace direto varia dinamicamente de acordo com as variações da SINR do canal na interface aérea. A Tabela 4.2 apresenta as possibilidades de taxas de dados do enlace direto do 1xEVDO em função da SINR e o formato dos quadros da camada física.

4.8.3.1 Redundância Incremental

Uma outra técnica foi adicionada ao sistema 1xEVDO explorando a característica de

taxa de dados (kbps)	SINR (dB)	nº slots	quadro físico (bits)	quadro físico (ms)
38,4	-11,5	16	1.024	26,67
76,8	-9,2	8	1.024	13,33
153,6	-6,5	4	1.024	6,67
307,2	-3,5	2	1.024	3,33
614,4	-0,5	1	1.024	1,67
921,6	2,2	2	3.072	3,33
1.228,8	3,9	1	2.048	1,67
1.843,2	8,0	1	3.072	1,67
2.457,6	10,3	1	4.096	1,67

Tabela 4.2: Taxas de dados variáveis do enlace direto do 1xEVDO.

variação do canal de rádio. Transmissões que utilizam mais de um slot (Tabela 4.2) são transmitidos com um espaçamento de 4 slots, como mostra a Figura 4.25 para um exemplo de transmissão na taxa de 153,6 kbps que utiliza um pacote formado por quatro slots.



Figura 4.25: Técnica de transmissão com espaçamento de 4 slots.

O espaçamento de 4 slots, entre cada um dos quatro slots, provê tempo suficiente para que o terminal decodifique a parte do pacote que chegou e envie um ACK caso já tenha conseguido decodificar completamente a informação do pacote. Para o exemplo anterior, caso a BTS receba um ACK do terminal depois de transmitir o segundo dos quatro slots, a transmissão do pacote é terminada (procedimento conhecido como *early termination*) dobrando efetivamente a taxa de dados percebida pelo usuário, uma vez que gastou-se a metade do tempo para decodificar completamente a informação do pacote. Este procedimento é referenciado como redundância incremental ou *hybrid-ARQ* [Qualcomm] e quando o canal é

bastante imprevisível como em canais com desvanecimento rápido, este esquema de ARQ traz uma melhora substancial na eficiência espectral.

4.8.3.2 Algoritmos de Agendamento

Em geral, mais de um usuário solicita recursos ao mesmo tempo e nestes casos o sistema precisa selecionar como os *slots* serão alocados para os diferentes usuários. A escolha mais simples seria servir um usuário por vez por ordem de chegada em um esquema de agendamento conhecido como *round-robin*. Um novo agendamento foi sugerido para o sistema 1xEVDO que leva em consideração a informação entregue pelo DRC. Este agendamento é referido como *Proportional Fair Algorithm [Qualcomm]*. O conceito é servir um usuário quando este estiver na condição de sinal acima da média observada, ou seja, aproveitar a variação temporal do canal servindo o usuário nos momentos em que está com um bom sinal. Porém o algoritmo mantém também um fator de justiça entre usuários servindo todos de uma maneira igualitária na média. Utilizar este algoritmo implica em uma capacidade de setor maior que um agendamento *round-robin*.

4.8.3.3 Diversidade Multi-Usuário e de Recepção

O processo de selecionar quem irá ser servido explorando a SINR é uma forma de diversidade de seleção chamada de diversidade multi-usuário [Qualcomm]. O ganho multi-usuário aumenta com o número de terminais ativos.

Diversidade de recepção é uma outra técnica para aumentar capacidade e melhorar performance de usuário introduzida no sistema 1xEVDO. Atualmente, terminais podem integrar uma arquitetura com duas antenas a um custo acessível, possibilitando ganhos de diversidade de recepção em vários cenários de mobilidade. Esta implementação aumenta significativamente a experiência de usuário com taxas mais altas de dados em adição à capacidade total do sistema.

4.8.4 Pilha de Protocolos

A transmissão de dados no sistema 1xEVDO utiliza o protocolo IP. Isto permite que a rede 1xEVDO se interligue com a Internet e permite a utilização de aplicações comuns pelos usuários (*browser*, correio eletrônico, etc). Entretanto, a tecnologia IP foi desenvolvida para redes fixas, portanto, diferentes da rede 1xEVDO que possui uma interface de rádio com aspectos especiais, como mobilidade dos terminais e taxas elevadas de erro de transmissão. Para permitir o uso do protocolo IP pela rede de forma eficiente, o sistema 1xEVDO possui uma pilha de protocolos para adaptação do protocolo IP às condições da rede celular, conforme mostrado na Tabela 4.3. É importante observar que em comparação com o modelo de referência OSI-ISO, as camadas de aplicação, de fluxo, de sessão, de conexão, de segurança e MAC da pilha de protocolos do sistema EVDO são sub camadas da camada de enlace de dados [CDMA2000 HDR].

Camada de Aplicação
Camada de Fluxo
Camada de Sessão
Camada de Conexão
Camada de Segurança
Camada MAC
Camada Física

Tabela 4.3: Arquitetura em camadas da rede 1xEVDO.

Cada camada da pilha de protocolos é formada por um conjunto de protocolos que determinam a sua funcionalidade. O foco do modelo de simulação desenvolvido está na reprodução do funcionamento desta pilha de protocolos, uma vez que a capacidade, a qualidade de serviço e o custo do sistema dependem basicamente das características da interface de rádio.

A principal função da pilha de protocolos é transmitir e receber pacotes IP a partir dos terminais móveis. Para que possam ser transmitidos pela interface de rádio, os pacotes IP

são segmentados e encapsulados em pacotes menores. A Figura 4.26 apresenta um diagrama do encapsulamento de um pacote IP em pacotes da camada física, que serão transmitidos pela interface de rádio.

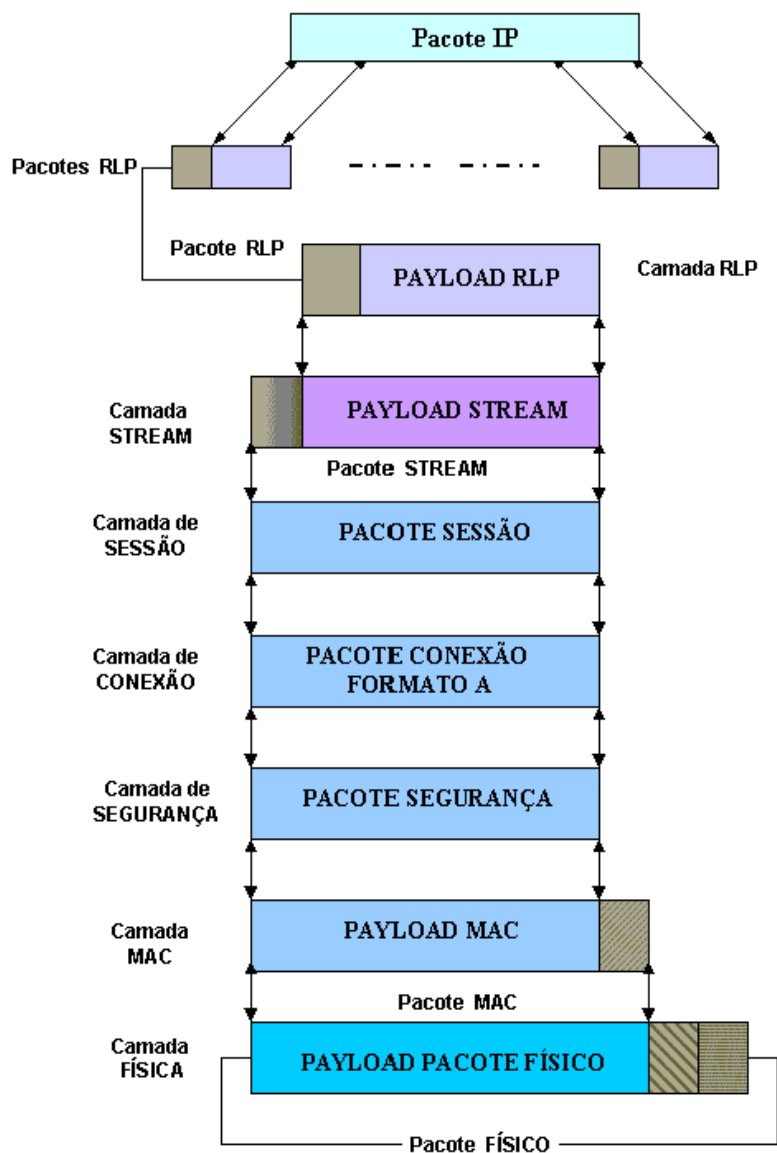


Figura 4.26: Processamento de um pacote IP.

4.8.5 Taxas de Dados no Enlace Reverso

A Tabela 4.4 apresenta as possibilidades de taxas de dados do enlace reverso do 1xEVDO em função da SINR e o formato dos quadros da camada física.

taxa de dados (kbps)	SINR (dB)	pacote RLP (bits)	quadro físico (bits)	quadro físico (ms)
9,6	-14,5	208	256	26,67
19,2	-13,1	464	512	26,67
38,4	-11,7	976	1.024	26,67
76,8	-9,4	2.000	2.048	26,67
153,6	-6,0	4.048	4.096	26,67

Tabela 4.4: Taxas de dados variáveis do enlace reverso do 1xEVDO.

4.8.6 Análise do Efeito da Taxa de Erro

Usando o cenário de simulação mostrado na Figura 4.22, foi possível analisar a performance da rede 1xEVDO sob o ponto de vista da Taxa de Erro de Pacotes (*Packet Error Rate* - PER). No sistema EVDO, as especificações de desempenho são feitas em termos da PER. No entanto, para o enlace reverso e para as taxas de transmissão no enlace direto que utilizam apenas um *slot* (quatro taxas na Tabela 4.2) PER e FER (*Frame Error Rate*) são iguais porque no enlace reverso todos os quadros são de mesma duração de 26,67 ms (Tabela 4.4) e no enlace direto (para quatro taxas na Tabela 4.2) um pacote é formado por apenas um *slot*.

O elemento de rede *Tasks* da Figura 4.22 foi utilizado para gerar um tráfego unidirecional de mensagens constantes de 1000 bytes por segundo com FER de 0 %, 10 % e 20 %, permitindo uma análise quantitativa do tráfego. As mensagens foram unidirecionais transmitidas no enlace reverso (AT para BTS) utilizando o protocolo UDP da biblioteca do OPNET. O protocolo UDP transmite pacotes na rede sem confiabilidade. Não há um mecanismo para assegurar a recepção de pacotes com retransmissão em caso de erro de transmissão.

Desta forma, o tráfego existente na rede é simplesmente o tráfego gerado pelas mensagens da aplicação. Isto torna possível comparar os resultados da simulação com valores calculados analiticamente. Esta foi a razão da escolha do protocolo UDP e não TCP, uma vez que o protocolo TCP, além do tráfego de dados, há pacotes de controle e sinalização adicionais trocados pelas entidades pares da camada TCP, que dificultam um cálculo analítico preciso do tráfego total enviado para a interface de rádio.

Os pacotes devem ser segmentados em pacotes do enlace reverso da camada física. Para cada taxa de transmissão (9,6 ; 19,2 ; 38,4 ; 76,8 ou 153,6 kbps) cada quadro transporta uma quantidade de bits diferente como mostra a Tabela 4.4. O modelo implementado simula o controle dinâmico da taxa de transmissão no enlace reverso. A taxa inicia em 9,6 kbps e aumenta progressivamente segundo o algoritmo estabelecido na norma [CDMA2000 HDR].

A Figura 4.27 apresenta as vazões médias no transmissor do AT para a transmissão de uma mensagem de 1.000 bytes acrescida de 28 bytes de cabeçalho das camadas UDP (8 bytes) e IP (20 bytes). As curvas correspondem a FER de 0 % (1UDP1000), de 10 % (1UDP1000_FER10) e de 20 % (1UDP1000_FER20).

No gráfico da Figura 4.27, 1UDP1000 indica simulação de um AT transmitindo mensagens de 1.000 bytes através do protocolo UDP. 1UDP1000_FER10 e 1UDP1000_FER20 indicam o mesmo que 1UDP1000, mas com FER de 10 % e 20 % respectivamente. A legenda do eixo y está marcada acima das curvas apresentadas e indica as vazões médias no transmissor do AT (*average of radio transmitter.throughput*) e a legenda do eixo x é em minutos de simulação.

Com taxa de transmissão fixada em 19,2 kbps e de acordo com a Tabela 4.4, 1.028 bytes são transmitidos ou em 18 quadros RLP por segundo $[(1028 \times 8) / 464]$ ou em 19 quadros RLP por segundo (devido a espera pelo início de um novo quadro). Isto significa uma taxa de dados de 9216 bits/s na camada física $[18 \text{ (quadros/s)} \times 512 \text{ (bits/quadro)}]$ ou 9728 bits/s na camada física $[19 \text{ (quadros/s)} \times 512 \text{ (bits/quadro)}]$. A vazão média teórica é de 9472 $[(9216 + 9728) / 2]$ bits/s e está de acordo com a vazão média obtida para a simulação sem FER na Figura 4.27. Quando a FER aumenta, a vazão na camada física também aumenta devido

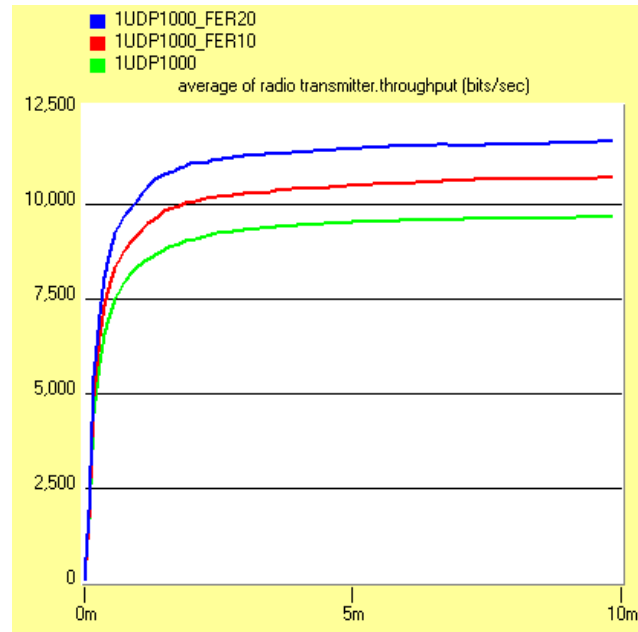


Figura 4.27: Vazões médias no transmissor do AT.

ao mecanismo de retransmissão ARQ (*Automatic Repeat Request*) na camada de aplicação da pilha de protocolos da rede 1xEVDO.

A Figura 4.28 apresenta os tempos médios de atraso na camada de aplicação (*average of Custom Application.Application Response Time*) do modelo de referência OSI-ISO.

O tempo de espera em filas e os tempos de processamento nos elementos de rede são desprezíveis nos cenários de simulação.

O tempo de transmissão no canal de rádio depende basicamente do número de pacotes físicos transmitidos por mensagem. No enlace reverso, cada pacote físico leva 26,67 ms para ser transmitido no canal de rádio. Como a mensagem de 1000 bytes é transmitida em 18 ou 19 quadros na camada física, isto significa um atraso de 480 ms ($18 \times 26,67$ ms) ou 507 ms ($19 \times 26,67$ ms). O atraso médio teórico é de 494 ms $[(480 \text{ ms} + 507 \text{ ms}) / 2]$ e que está de acordo com o atraso médio simulado sem FER da Figura 4.28. Quando a FER aumenta, o tempo de atraso também aumenta devido ao mecanismo de retransmissão ARQ na camada de aplicação da pilha de protocolos da rede 1xEVDO.

A Figura 4.29 apresenta as vazões na camada de aplicação (*average of Custom Applica-*

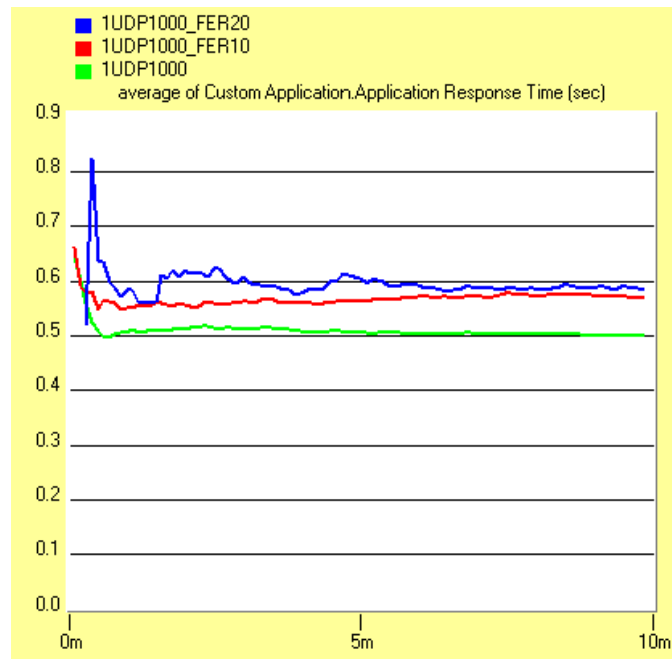


Figura 4.28: Tempos médios de atraso na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.

tion.Traffic Received) do modelo de referência OSI-ISO. Quanto maior é a FER, maior é o atraso da comunicação, devido ao mecanismo de retransmissão, e menor é a vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO (de 1000 bytes/s para um valor menor que 300 bytes/s), uma vez que se gasta mais tempo para transmitir a mesma mensagem.

4.8.7 Tráfego com o Protocolo TCP

O tráfego com o protocolo TCP na camada de transporte utiliza modelos de tráfego padrão do OPNET, através do elemento de rede *Applications* visto na Figura 4.22, que simula o tráfego Internet comum, como navegação na WWW com *browser* (tráfego HTTP), transferência de arquivos (FTP) e envio e recebimento de *E-mails*. No caso do protocolo TCP, além do tráfego de dados, há pacotes de controle e sinalização adicionais trocados pelas entidades pares da camada TCP. O tráfego TCP da biblioteca padrão do OPNET permite uma avaliação qualitativa, verificando se o tráfego está sendo transmitido e recebido no cliente e no servidor, seu atraso e sua vazão.

Foram criados cenários com dois e com trinta ATs que seguem a topologia da Figura 4.22.

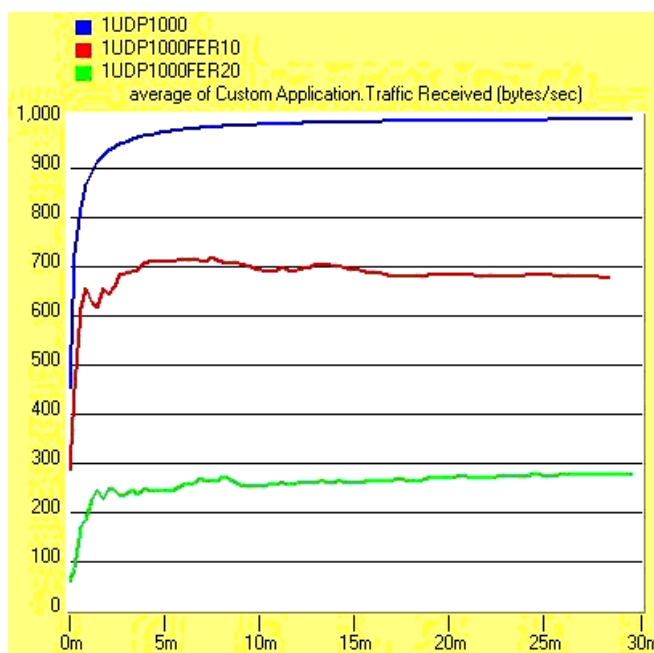


Figura 4.29: Vazões na camada de aplicação do modelo de referência ISO-OSI.

A transmissão foi realizada para FER igual a 0 %, com taxa fixa no enlace direto de 614,4 kbps e no enlace reverso de 38,4 kbps. O perfil do tráfego HTTP é o mesmo apresentado no item 4.6.5.1.

Os três gráficos da Figura 4.30 apresentam os seguintes resultados para o tráfego HTTP simultâneo de dois ATs : O primeiro gráfico (de cima para baixo) apresenta a vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO do tráfego HTTP transmitido pelos ATs dispostos em um único setor de uma BTS (*HTTP.Traffic Sent*). O segundo gráfico apresenta a vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO do tráfego HTTP recebido pelos ATs (*HTTP.Traffic Received*). E o terceiro gráfico apresenta o tempo médio de acesso a uma página para o tráfego HTTP visto pelos ATs (*HTTP.Page Response Time*).

A legenda do eixo y de cada gráfico está marcada acima das curvas apresentadas e a legenda do eixo x é em minutos de simulação.

Os dois ATs possuem o mesmo perfil de tráfego, estabelecido através do elemento de rede

Profiles visto na Figura 4.22, para reproduz o comportamento de um usuário que navega com seu *browser*. Os picos, em torno de 200 bytes, apresentados no primeiro gráfico indicam que naquele instante de tempo houve tráfego HTTP enviado por um dos ATs. Como a geração de tráfego HTTP é um processo estocástico, em um mesmo instante de tempo poderia haver a geração de tráfego HTTP simultâneo dos dois ATs e o pico da vazão seria maior e em torno de 400 bytes. A mesma análise é válida para os picos apresentados no segundo gráfico. A semelhança entre os dois gráficos (o primeiro e o segundo) é devida ao mesmo modelo de tráfego HTTP estabelecido ser utilizado tanto pelo cliente como pelo servidor.

O terceiro gráfico mostra que só há atraso quando há geração de tráfego.

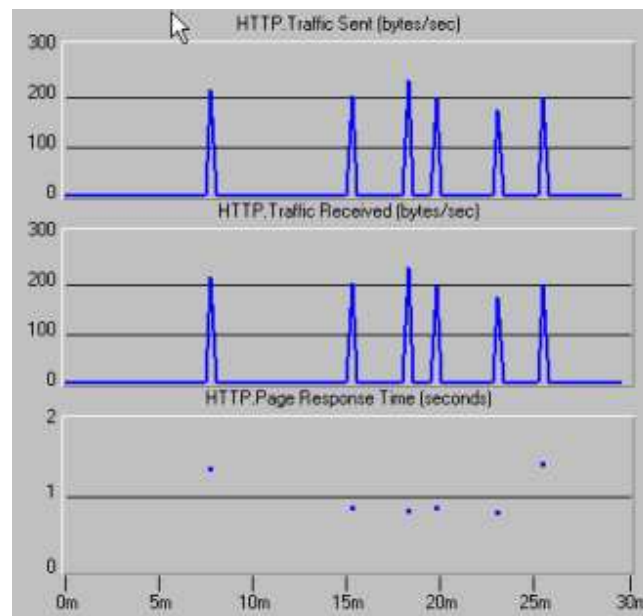


Figura 4.30: Tráfego HTTP do cenário TCP com dois ATs.

Os gráficos da Figura 4.31 apresentam a vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO no enlace direto (tráfego recebido pelo AT) e no enlace reverso (tráfego enviado pelo AT) e o tempo médio de acesso a uma página para o tráfego HTTP visto por trinta ATs dispostos em um único setor de uma BTS. Todos os ATs possuem o mesmo perfil de tráfego, estabelecido através do elemento de rede *Profiles* visto na Figura 4.22, para reprodução do comportamento de um usuário que navega com seu *browser*. A maior

quantidade de oscilações apresentadas nos gráficos das vazões e do atraso da Figura 4.31 em relação aos gráficos apresentados na Figura 4.30, mostra um maior tráfego em função do aumento do número de dois para trinta ATs. A semelhança entre os dois gráficos (o primeiro e o segundo da Figura 4.31) é devido ao mesmo modelo de tráfego HTTP estabelecido ser utilizado tanto pelo cliente como pelo servidor.

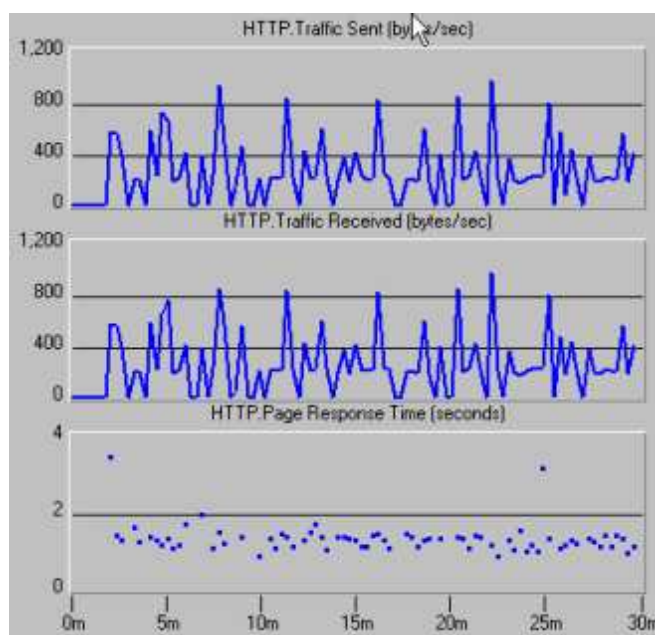


Figura 4.31: Tráfego HTTP do cenário TCP com trinta ATs.

4.8.8 Tráfego com os Protocolos TCP e UDP

Foi estabelecido um novo perfil de tráfego com o protocolo TCP na camada de transporte composto pelas aplicações HTTP e *E-mail* e um perfil de tráfego com o protocolo UDP na camada de transporte, apropriado para aplicações em tempo real, composto pelas aplicações Voz sobre IP (*Voice over IP* - VoIP) e Vídeo Conferência para uma comunicação bidirecional fim-a-fim entre um AT e um servidor e que segue a topologia da Figura 4.22.

A aplicação HTTP foi definida com as seguintes características :

- O intervalo de tempo entre páginas foi modelado por uma distribuição exponencial com média igual a 720 (s).

- O número de objetos (imagens, figuras, textos, etc.) por página foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 1.
- O tamanho dos objetos foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 500 (bytes).
- O tipo do serviço foi “o melhor possível” (*best effort*).

A aplicação *E-mail* foi definida com as seguintes características :

- O intervalo de tempo entre envios e recebimentos de *E-mail* foi modelado por uma distribuição exponencial com média igual a 3.600 (s).
- O tamanho do grupo de envios e recebimentos de *E-mail* foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 3.
- O tamanho do *E-mail* foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 500 (bytes).
- O tipo do serviço foi “o melhor possível” (*best effort*).

A aplicação VoIP foi definida com as seguintes características :

- Esquema de codificação G.729 (8 kbps) com supressão de silêncio e dois quadros de voz por pacote.
- A duração do silêncio do tráfego VoIP de entrada e de saída foi modelada por uma distribuição exponencial com média igual a 0,65 (s).
- A duração da chamada VoIP de entrada e de saída foi modelada por uma distribuição exponencial com média igual a 0,35 (s).
- O tipo do serviço foi com prioridade.

A aplicação Vídeo Conferência foi definida com as seguintes características :

- Quantidade de quadros em 1 segundo : 10 quadros/s.
- Tamanho do quadro : 128 x 120 *pixels* (*display* de um AT).

- Há apenas um byte por *pixel*.
- O tipo de serviço foi *streaming* de vídeo.

O perfil de tráfego da aplicação Vídeo Conferência requer 1,2288 Mbps [10 quadros/s x (128 x 120) pixels/quadro x 8 bits/pixel]. Como se trata de uma comunicação bidirecional, o tráfego oferecido foi maior que a capacidade do canal no enlace reverso (153,6 kbps). Neste caso, o atraso fim-a-fim de pacotes cresceu monotonicamente como mostra o primeiro gráfico da Figura 4.32. O segundo gráfico da Figura 4.32 mostra a utilização da capacidade máxima do enlace reverso do sistema 1xEVDO (153,6 kbps) e terceiro gráfico da Figura 4.32 mostra que a taxa requerida (1,2288 Mbps), dado aquele perfil de tráfego de Vídeo Conferência, foi atendida pela BTS no enlace direto.

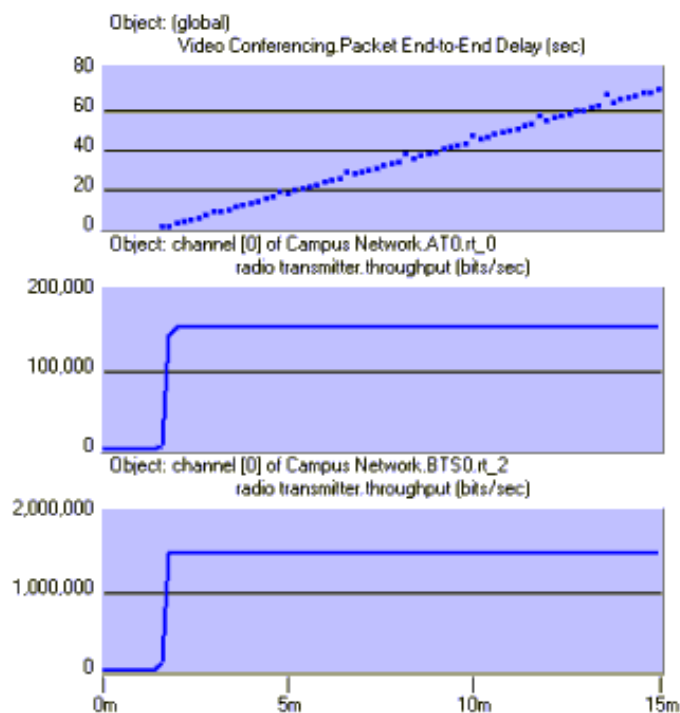


Figura 4.32: Atraso fim-a-fim de pacotes e taxa máxima requerida no AT0 e na BTS0.

As vazões e os atrasos médios na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO e as vazões na camada física das aplicações *E-mail*, HTTP e VoIP, sendo executadas de forma simultânea, são apresentadas nas Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 respectivamente.



Figura 4.33: Vazões na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.

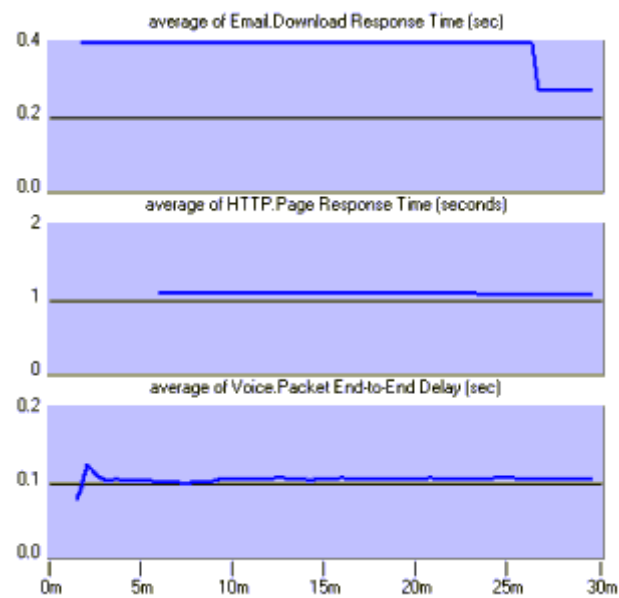


Figura 4.34: Atrasos médios na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.

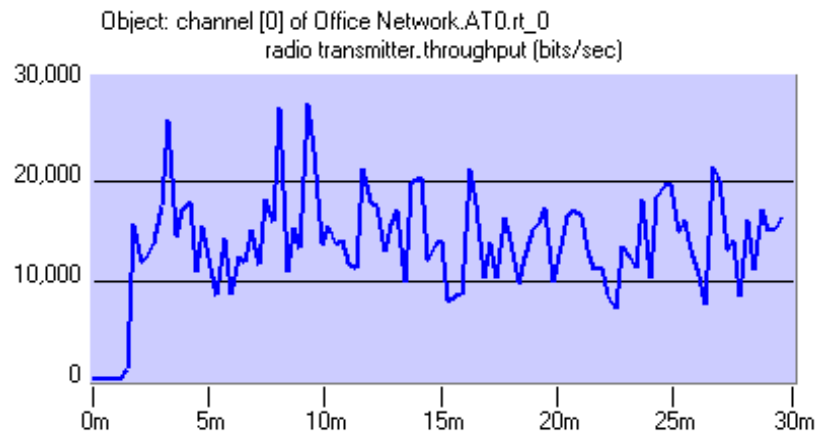


Figura 4.35: Vazão na camada física.

A Figura 4.33 mostra as vazões na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO de acordo com o perfil das aplicações *E-mail*, HTTP e VoIP mencionado anteriormente. O pico de vazão no primeiro gráfico mostra que só houve tráfego de *E-mail* gerado pelo AT no momento do pico. O pico de vazão no segundo gráfico mostra também que só houve tráfego HTTP gerado pelo AT no momento do pico. O terceiro gráfico mostra uma vazão média de VoIP em torno de 800 bytes/s.

A Figura 4.34 mostra os atrasos médios na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO das aplicações *E-mail*, HTTP e VoIP. O primeiro gráfico mostra um atraso médio de 0,3 s no recebimento de um *E-mail* de acordo com o perfil de tráfego estabelecido para *E-mail* e mencionado anteriormente. O segundo gráfico mostra o atraso médio de 1 s na navegação de páginas HTTP de acordo com o perfil de tráfego estabelecido para HTTP e mencionado anteriormente. O terceiro gráfico mostra um atraso médio em torno de 100 ms na comunicação VoIP simultânea com as aplicações *E-mail* e HTTP.

A Figura 4.35 mostra que a vazão no transmissor do AT das aplicações *E-mail*, HTTP e VoIP executadas simultaneamente tem picos menores que 30 kbps e menores que a capacidade do canal no enlace reverso (153,6 kbps).

4.8.9 Detecção Multiusuário

A detecção multiusuário (*Multiuser Detection* - MUD) [Verdú] surgiu como uma ferramenta para melhorar o desempenho dos receptores utilizados nos sistemas CDMA de terceira geração.

Em sistemas CDMA, à medida que o número de usuários aumenta, a interferência de acesso múltiplo (*Multiple Access Interference* - MAI) também aumenta, o que degrada o desempenho do sistema. Sob este aspecto, o objetivo principal da detecção multiusuário é eliminar a MAI.

A detecção multiusuário ótima apresenta complexidade crescente exponencialmente com o número de usuários. Assim, técnicas sub-ótimas de detecção multiusuário foram desenvolvidas permitindo que este tipo de detecção seja utilizado em sistemas comerciais [Almeida].

Entre os detectores sub-ótimos, pode-se destacar pelo seu desempenho, o detector descorrelacionador (*Multiuser Detection Descorrelator* - MUD-D) [Almeida], o MMSE (*Minimum Mean Square Error*) [Verdú] e o de Cancelamento da Interferência [Toskala].

O cenário de simulação mostrado na Figura 4.22 foi utilizado para a geração e transmissão de um tráfego unidirecional com mensagens constantes de 2250 bytes por segundo através de um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) com desvanecimento seletivo em frequência e recepção na BTS através de um detector multiusuário descorrelacionador, com o objetivo de avaliar o novo desempenho do enlace reverso do sistema 1xEVDO em termos de PER e atraso. Os passos para determinação da PER na simulação com detecção convencional (*rake receiver*) e com MUD-D serão apresentados no Apêndice B.

Foram considerados : protocolo da camada de transporte UDP, modulação BPSK, três caminhos resolvíveis, taxa de transmissão de 38,4 kbps no enlace reverso, E_b/N_0 requerido de 3,5 dB e fator de carga de usuário no sistema [Almeida] alto (50 %) para enfatizar o ganho no enlace reverso do uso de MUD-D em relação à detecção convencional (CONV) com *rake receiver* [Almeida 1].

A Figura 4.36 mostra a taxa média de perda de pacotes e mostra que com o uso do

MUD-D a PER diminuiu em torno de 5,8 % em relação à detecção convencional (CONV). A vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO aumentou em torno de 35 %, como mostra a Figura 4.37 e conseqüentemente o atraso na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO diminuiu e aproximadamente 150 ms, como mostra a Figura 4.38.

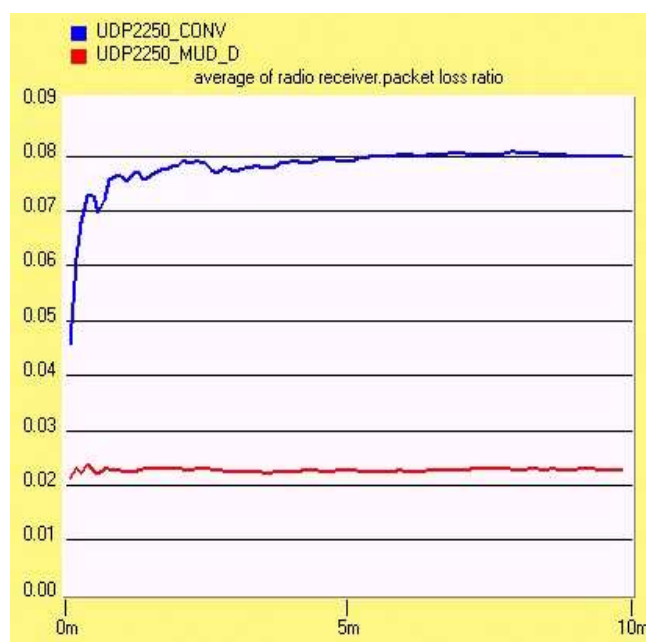


Figura 4.36: PER no enlace reverso.

4.8.10 Antenas Adaptativas

Estações rádio base (ERBs) de sistemas móveis celulares convencionalmente utilizam antenas setorizadas ou omnidirecionais, cujo ganho de antena (azimute) é constante em todas as direções (omnidirecionais), ou dentro do setor (setorizadas). Conseqüentemente, ERBs equipadas com antenas omnidirecionais ou setorizadas desperdiçam potência de transmissão, pois transmitem o sinal desnecessariamente para todas as localidades dentro da célula, e geram interferência co-canal (interferência causada entre canais que utilizam a mesma frequência).

Um sistema de antenas adaptativas é capaz de moldar de maneira adaptativa o padrão de radiação de forma a intensificar e/ou reduzir o ganho da antena em uma dada direção.

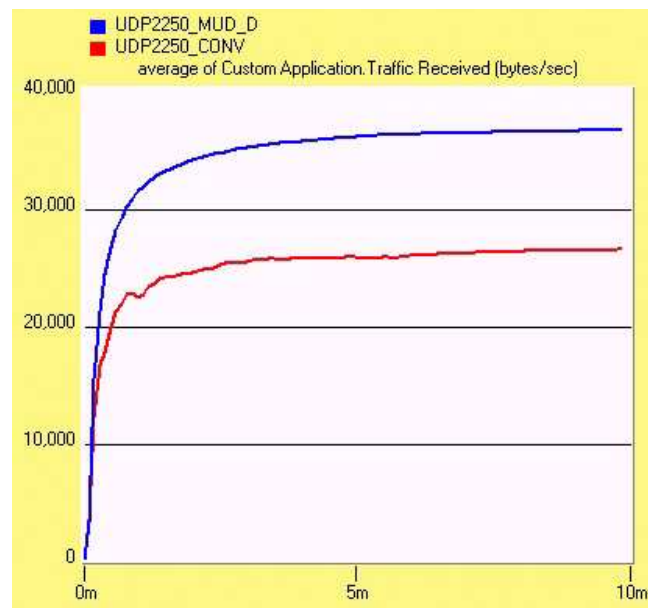


Figura 4.37: Vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.

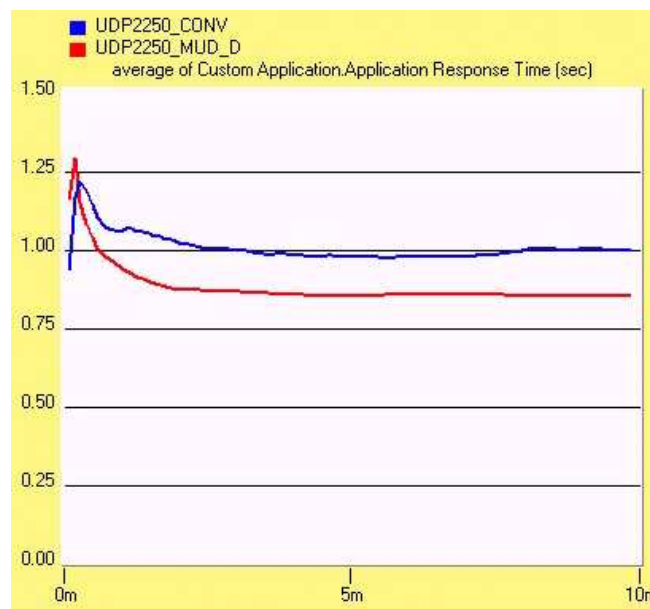


Figura 4.38: Atraso na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.

Desta forma, pelo uso de sistemas de antenas adaptativas em ERBs, pode-se concentrar a potência transmitida em uma dada direção desejada (por exemplo, onde a estação móvel está localizada). Da mesma forma, para a antena de recepção, pode-se reduzir a potência recebida de fontes indesejáveis.

Graças ao caráter adaptativo dos sistemas de antenas adaptativas, um feixe estreito do arranjo de uma ERB pode acompanhar um usuário enquanto este se desloca dentro da célula, minimizando a potência transmitida em outras direções e as recebidas de outras estações móveis que utilizam o mesmo canal de comunicação.

Portanto, a utilização de sistemas de antenas adaptativas em estações rádio base possibilita :

- redução da potência de transmissão : antenas com feixe estreito possuem ganhos maiores do que o ganho de antenas omnidirecionais. Esta propriedade é válida para os enlaces direto (da ERB para o móvel) e reverso (do móvel para a ERB) ;
- redução da interferência co-canal gerada ou recebida pela ERB : a potência transmitida pela ERB e direcionada às regiões onde o móvel alvo não está localizado é menor. Da mesma forma, a potência dos sinais interferentes recebidos na ERB é reduzida.

Sistemas de antenas adaptativas consistem basicamente em um conjunto (*array*) de elementos radiantes posicionados de acordo com uma geometria pré-estabelecida. Várias formas geométricas podem ser utilizadas em antenas adaptativas, sendo as mais comuns a linear, a circular e a triangular.

Os sinais recebidos ou a serem transmitidos por cada elemento são combinados de forma a se criar o padrão de radiação desejado. Diversas técnicas de combinação dos sinais dos elementos e de adaptação do padrão de radiação têm sido propostas nos últimos anos [Litva][Rappaport].

O cenário de simulação mostrado na Figura 4.22 foi utilizado para a geração e transmissão de um tráfego unidirecional com mensagens constantes de 2250 bytes por segundo através de um canal AWGN com desvanecimento seletivo em frequência e recepção através de antenas

adaptativas [Rosa] na BTS, com o objetivo de avaliar o novo desempenho do enlace reverso do sistema 1xEVDO em termos de PER e atraso. Os passos para determinação na simulação da PER com detecção convencional (*rake receiver*) e com antenas adaptativas serão apresentados no Apêndice B.

Foram considerados : protocolo da camada de transporte UDP, modulação BPSK, três caminhos resolvíveis, um arranjo linear de sete antenas na BTS e uma antena omnidirecional no móvel, taxa de transmissão de 38,4 kbps no enlace reverso, E_b/N_0 requerido de 3,5 dB e fator de carga de usuário no sistema [Almeida] alto (50 %) para enfatizar o ganho no enlace reverso do uso de sete antenas adaptativas na BTS em relação à detecção convencional (CONV) com *rake receiver* [Almeida 1].

A Figura 4.39 mostra a taxa média de perda de pacotes e mostra que com o uso de antenas adaptativas a PER diminuiu em torno de 5,9 % em relação à detecção convencional (CONV) com *rake receiver*.

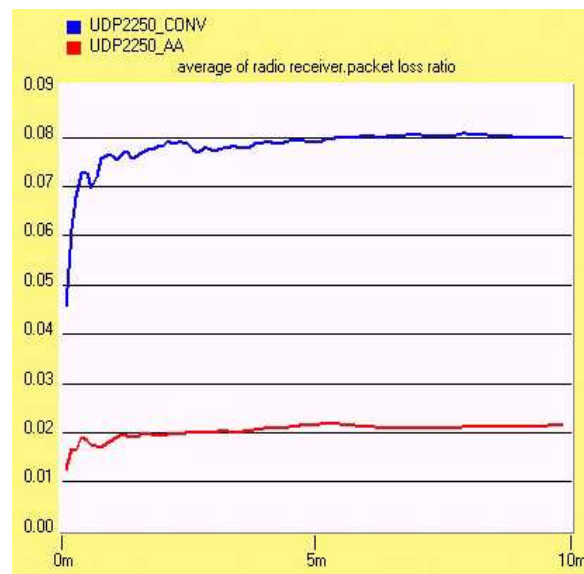


Figura 4.39: PER no enlace reverso.

A vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO aumentou em torno de 36 %, como pode ser visto na Figura 4.40 e conseqüentemente o atraso na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO diminuiu e aproximadamente 150 ms, como mostra a Figura

4.41, que em comparação com o gráfico da Figura 4.38 mostra um desempenho do sistema no enlace reverso semelhante quando com o uso de MUD-D.

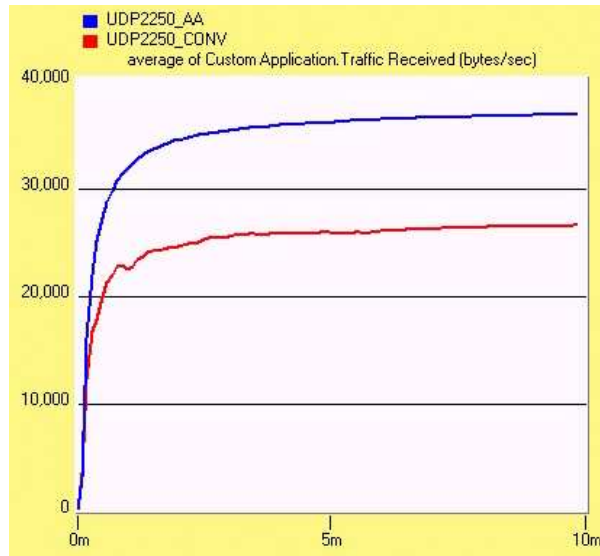


Figura 4.40: Vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.

O cenário de simulação mostrado na Figura 4.22 foi utilizado para um novo perfil de tráfego com o protocolo TCP na camada de transporte composto pelas aplicações HTTP, *E-mail*, Acesso a Banco de Dados (*Database - DB*), Telnet (*Login Remoto*) e Transferência de Arquivos (*File Transfer Protocol - FTP*) executadas simultaneamente para uma comunicação bidirecional fim-a-fim entre um AT e um servidor.

A aplicação HTTP foi definida com as seguintes características :

- O intervalo de tempo entre páginas foi modelado por uma distribuição exponencial com média igual a 60 s ;
- O número de objetos por página foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 1 ;
- O tamanho do objeto foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 1000 bytes ;
- O tipo do serviço foi “o melhor possível” (*best effort*).

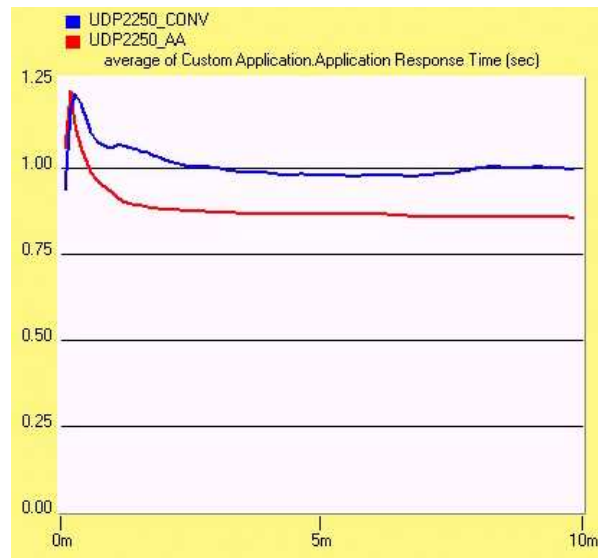


Figura 4.41: Atraso na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO.

A aplicação *E-mail* foi definida com as seguintes características :

- O intervalo de tempo entre envios e recebimentos de *E-mail* foi modelado por uma distribuição exponencial com média igual a 360 s ;
- O tamanho do grupo de envios e recebimentos de *E-mail* foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 3 ;
- O tamanho do *E-mail* foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 2000 bytes. O tipo do serviço foi “o melhor possível” (*best effort*).

A aplicação Acesso a Banco de Dados foi definida com as seguintes características :

- O intervalo de tempo entre transações foi modelado por uma distribuição exponencial com média igual a 30 s ;
- O tamanho da transação foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 16 bytes ;
- O tipo do serviço foi “o melhor possível” (*best effort*).

A aplicação Telnet foi definida com as seguintes características :

- O intervalo de tempo entre comandos foi modelado por uma distribuição normal com média igual a 120 s e desvio padrão de 10 s ;
- O tamanho do comando foi modelado por uma distribuição normal com média igual a 10 bytes e desvio padrão de 4 bytes ;
- O tipo do serviço foi “o melhor possível” (*best effort*).

A aplicação FTP foi definida com as seguintes características :

- O intervalo de tempo entre requisições foi modelado por uma distribuição exponencial com média igual a 3600 s ;
- O tamanho do arquivo foi modelado por uma distribuição constante de média igual a 1000 bytes ;
- O tipo do serviço foi “o melhor possível” (*best effort*).

Foram considerados E_b/N_0 requerido de 3,5 dB, modulação BPSK, três caminhos resolvíveis, um arranjo linear de sete antenas na BTS e uma antena omnidirecional no AT, taxa de transmissão de 614,4 kbps no enlace direto e de 38,4 kbps no enlace reverso e carga do sistema de 50 %. Foram consideradas estas mesmas características para recepção através de um detector multiusuário descorrelacionador (MUD-D) na BTS e no AT. A análise de desempenho será feita separadamente para a operação com antenas adaptativas e para a operação com MUD-D.

Os passos para determinação na simulação da PER com detecção convencional (*rake receiver*), com MUD-D e com antenas adaptativas serão apresentados no Apêndice B.

Verificou-se que tanto com o uso de antenas adaptativas como com o uso do MUD-D, a PER diminuiu em relação a detecção convencional com *rake receiver* tanto no enlace direto, como mostra a Figura 4.42, como no enlace reverso, como mostra a Figura 4.43. A diminuição da PER no enlace reverso tanto com antenas adaptativas quanto com MUD-D foi em torno de 6 % em relação a detecção convencional com *rake receiver*. Para o enlace direto, o MUD-D apresentou uma maior redução de PER, em torno de 5 % em relação a detecção convencional

com *rake receiver*, enquanto que com antenas adaptativas a diminuição foi em torno de 2 %, uma diferença de 3% a menos que com MUD-D. Esta diferença ocorreu porque foi considerada aplicação de antenas adaptativas somente na BTS (ATs com antenas omnidirecionais), enquanto que foi considerada aplicação de MUD-D tanto na BTS como nos ATs. No enlace direto, para o MUD-D proporcionar o cancelamento da interferência de outros ATs no AT de interesse, a BTS conhece a priori todos os códigos de espalhamento dos ATs. No enlace reverso, para o MUD-D proporcionar o cancelamento da interferência, o sistema precisa de alguma forma informar para o AT de interesse os códigos de espalhamento dos outros ATs. Para este item da simulação, partiu-se da premissa que todos os ATs conheciam seus códigos mutuamente. Na prática, há limitantes no uso de MUD-D no enlace reverso devido tanto a capacidade de processamento necessária como o tempo de duração da bateria do AT.

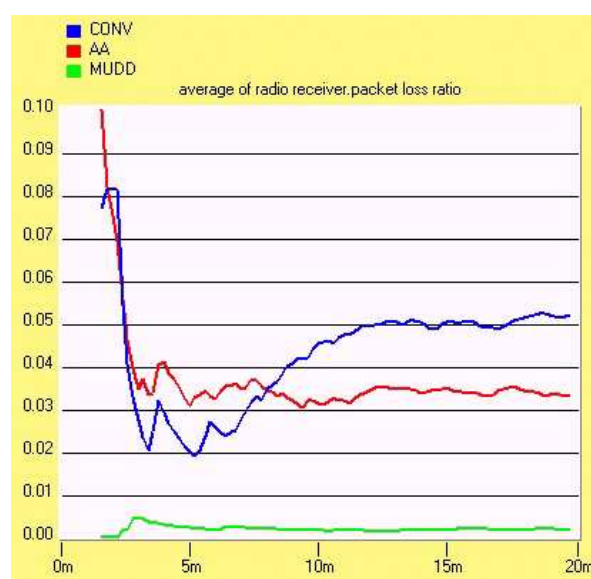


Figura 4.42: PER no enlace direto.

A Figura 4.44 mostra que o atraso da aplicação HTTP na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO diminuiu aproximadamente 8 s com o uso de MUD-D em relação a detecção convencional com *rake receiver*. E que o atraso diminuiu aproximadamente 5 s com o uso de antenas adaptativas em relação a detecção convencional com *rake receiver*. O atraso com o uso de MUD-D foi menor devido a redução da PER no enlace direto ser maior com o

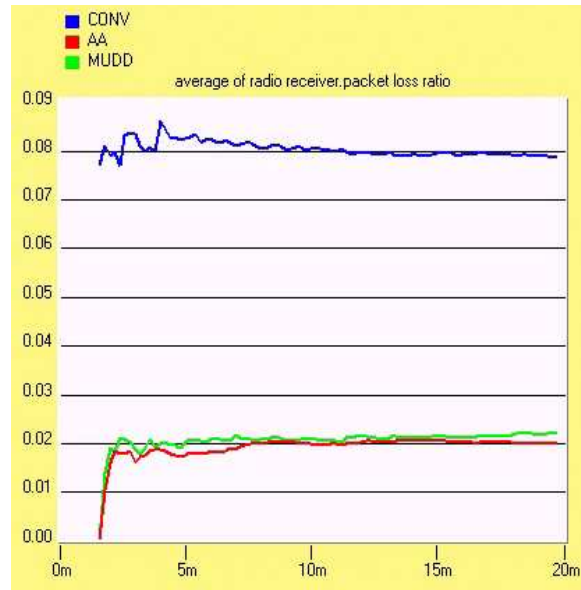


Figura 4.43: PER no enlace reverso.

uso de MUD-D que com o uso de antenas adaptativas.

A Figura 4.45 mostra que o atraso da aplicação *E-mail* na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO diminuiu aproximadamente 10 s com o uso de MUD-D em relação a detecção convencional com *rake receiver*. E que o atraso diminuiu aproximadamente 5 s com o uso de antenas adaptativas em relação a detecção convencional com *rake receiver*. O atraso com o uso de MUD-D foi menor devido à redução da PER no enlace direto ser maior com o uso de MUD-D que com o uso de antenas adaptativas.

A Figura 4.46 mostra que o atraso da aplicação Acesso a Banco de Dados na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO diminuiu aproximadamente 0,6 s com o uso de MUD-D em relação a detecção convencional com *rake receiver*. E que o atraso diminuiu aproximadamente 0,3 s com o uso de antenas adaptativas em relação a detecção convencional com *rake receiver*. O atraso com o uso de MUD-D foi menor devido a redução da PER no enlace direto ser maior com o uso de MUD-D que com o uso de antenas adaptativas.

A Figura 4.47 mostra que o atraso da aplicação Telnet na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO diminuiu aproximadamente 0,4 s com o uso de MUD-D em relação

a detecção convencional com *rake receiver*. E que o atraso diminuiu aproximadamente 0,2 s com o uso de antenas adaptativas em relação a detecção convencional com *rake receiver*. O atraso com o uso de MUD-D foi menor devido a redução da PER no enlace direto ser maior com o uso de MUD-D que com o uso de antenas adaptativas.

A Figura 4.48 mostra que o atraso da aplicação FTP no sentido direto (*download*) na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO diminuiu aproximadamente 1,7 s com o uso de MUD-D em relação a detecção convencional com *rake receiver*. E que o atraso diminuiu aproximadamente 1,5 s com o uso de antenas adaptativas em relação a detecção convencional com *rake receiver*. O atraso com o uso de MUD-D foi menor devido a redução da PER no enlace direto ser maior com o uso de MUD-D que com o uso de antenas adaptativas.

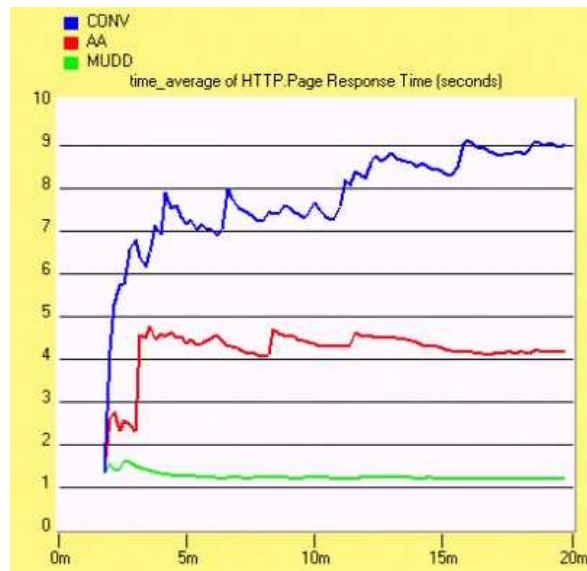


Figura 4.44 : Atraso na camada de aplicação do modelo de referência ISO-OSI para a aplicação HTTP.

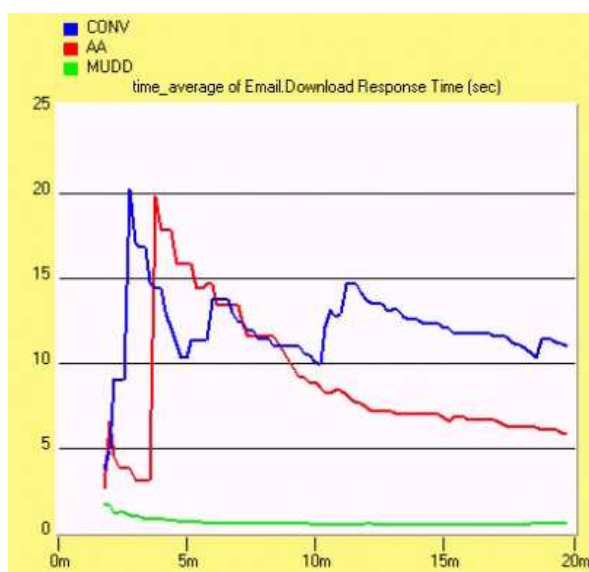


Figura 4.45 : Atraso na camada de aplicação do modelo de referência ISO-OSI para a aplicação *E-mail*.



Figura 4.46 : Atraso na camada de aplicação do modelo de referência ISO-OSI para a aplicação Acesso a Banco de Dados no sentido direto.

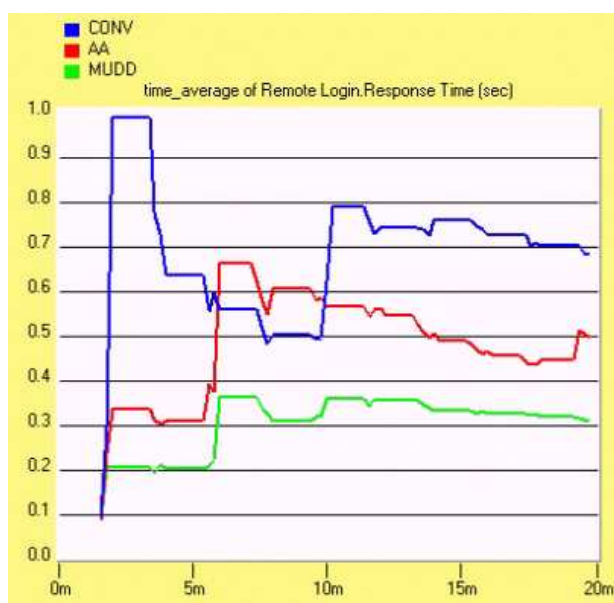


Figura 4.47 : Atraso na camada de aplicação do modelo de referência ISO-OSI para a aplicação Telnet.

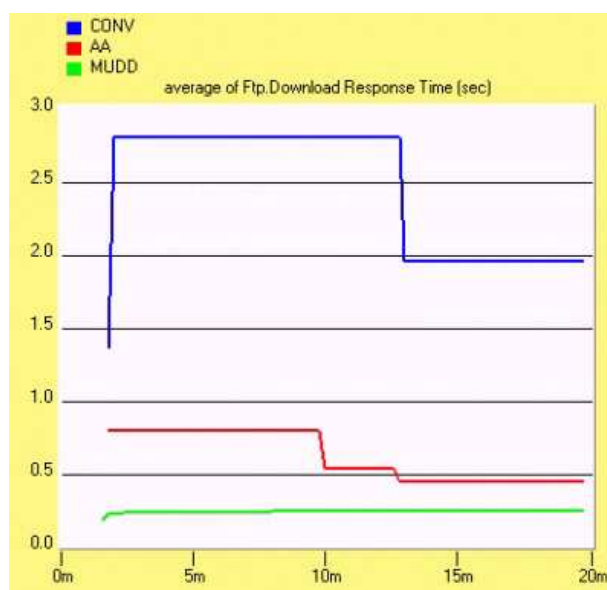


Figura 4.48 : Atraso na camada de aplicação do modelo de referência ISO-OSI para a aplicação FTP no sentido reverso.



Figura 4.49 : Vazão na camada de aplicação do modelo de referência ISO-OSI para a aplicação HTTP.

Com a diminuição da PER e consequentemente das retransmissões, as vazões na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO aumentaram como mostra a Figura 4.49 para a aplicação HTTP. A vazão na camada de aplicação com o uso de MUD-D foi maior devido a redução da PER no enlace direto ser maior que com o uso de antenas adaptativas.

4.8.11 Conclusões do Modelo de Simulação

Pelos gráficos da Figuras 4.28 e 4.29, verifica-se que a perda de pacotes afeta o desempenho do sistema 1xEVDO tanto em termos de vazão como em termos do atraso de transmissão.

Pelo gráfico da Figura 4.32 verifica-se que o sistema 1xEVDO não suporta a aplicação de Vídeo Conferência para o perfil estabelecido anteriormente (1,2288 Mbps) devido ao limite de capacidade de transmissão do enlace reverso (153,6 kbps), a menos que alguma técnica de compressão de vídeo seja aplicada.

Os parâmetros de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS), vazão e atraso para as aplicações *E-mail*, HTTP e VoIP foram apresentadas nos gráficos das Figuras 4.33, 4.34 e 4.35. O atraso médio de 100 ms da aplicação VoIP apresentado no terceiro gráfico da Figura

4.34 indica possibilidade de qualidade de voz satisfatória na comunicação VoIP simultânea com as aplicações *E-mail* e HTTP. De acordo com a Figura 4.35, a vazão na camada física necessária para suportar as aplicações VoIP, HTTP e *E-mail* sendo executadas simultaneamente apresenta picos inferiores a 30 kbps e não excede a capacidade do enlace reverso de 153,6 kbps.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.44, 4.45, 4.46, 4.47 e 4.48 mostraram que o desempenho do sistema 1xEVDO, do ponto de vista de atraso na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO, foi melhor para as aplicações HTTP, *E-mail*, Acesso a Banco de Dados, Telnet e FTP utilizando MUD-D do que utilizando antenas adaptativas, ambas em relação a detecção convencional com *rake receiver*, devido a redução da PER no enlace direto ter sido maior com o uso de MUD-D que com o uso de antenas adaptativas.

O modelo de simulação da rede CDMA2000 1xEVDO foi depurado e validado. Diversos resultados produzidos pelo modelo em diferentes cenários de simulação foram avaliados e comparados com valores calculados analiticamente, apresentando os resultados esperados. Foi feita uma análise dos diversos protocolos, comparados com o comportamento especificado nas normas da rede CDMA2000 1xEVDO e validados.

O modelo de simulação contribui para auxiliar no estudo da capacidade da rede CDMA2000 1xEVDO do ponto de vista do número máximo de usuários que podem ser atendidos e no estudo do desempenho da rede CDMA2000 1xEVDO, levando em conta a pilha de protocolos completa em todos os nós da rede, através de diferentes aplicações executadas simultaneamente possibilitando a otimização da rede CDMA2000 1X para uma determinada qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) desejada. Como contribuição complementar, o desenvolvimento do modelo de simulação permitiu a criação de modelos analíticos simplificados, antes inexistentes.

Capítulo 5

Conclusões Finais e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões e Comentários

Na primeira parte deste trabalho de tese foi abordada a questão do compartilhamento dos recursos rádio entre as redes GSM e GPRS e o impacto que este compartilhamento causa na qualidade dos serviços prestados por ambas as redes, sendo o serviço de voz comutado por circuito na rede GSM e o serviço de dados comutado por pacotes na rede GPRS. Verificou-se que alocar parte dos canais de tráfego exclusivo ao serviço GPRS implica diretamente na degradação da qualidade de serviço de voz, uma vez que chamadas bloqueadas são descartadas (Erlang B), enquanto que, para o serviço GPRS, a falta de um canal extra para a transmissão de dados não degrada significativamente a qualidade do serviço de dados devido a possibilidade de uso estratégias de filas, com a ressalva de que esta comunicação de dados não seja em tempo real, como por exemplo voz sobre IP (VoIP), uma vez que este tipo de tráfego é bem menos tolerante a atrasos.

Das estratégias de compartilhamento dos mesmos recursos de rádio utilizados pelos sistemas GSM e GPRS, verificou-se que a melhor estratégia de compartilhamento é utilizar os canais de comunicação para o sistema GPRS nos momentos em que estes canais não são usados pelo sistema GSM. A análise do compartilhamento dos recursos rádio entre as redes GSM e GPRS foi viabilizada através de um simulador programado utilizando linguagem C/C++.

Na segunda parte desta tese foi analisado o desempenho de duas redes de terceira geração

(3G) : CDMA2000 1xRTT e CDMA2000 1xEVDO, do ponto de vista da qualidade do serviço (QoS) prestado por estas redes comutadas por pacotes. Os principais parâmetros de QoS analisados foram o atraso e a vazão na camada de aplicação do modelo de referência OSI-ISO e a vazão na camada física do mesmo modelo de referência. Verificou-se o desempenho destas redes para as aplicações HTTP, *E-mail*, VoIP e Vídeo Conferência, sendo executadas de forma simultânea e o efeito da utilização das técnicas de detecção multiusuário e antenas adaptativas na qualidade do serviço prestado pela rede 1xEVDO. A análise de desempenho das redes CDMA2000 1xRTT e CDMA2000 1xEVDO foi feita através de modelos de simulação desenvolvidos no ambiente OPNET, que é um poderoso *software* comercial de simulação capaz de modelar redes com e sem fio.

Modelos de simulação das redes CDMA2000 1xRTT e CDMA2000 1xEVDO foram desenvolvidos e validados para o estudo destas redes. A rede CDMA2000 1xRTT apresentou bom desempenho em termos de qualidade de serviço, analisada pelos parâmetros vazão e atraso, na passagem de tráfego das aplicações HTTP e *E-mail*. A rede CDMA2000 1xEVDO apresentou bom desempenho em termos de qualidade de serviço na passagem de tráfego das aplicações HTTP, *E-mail*, VoIP, FTP, Telnet e Acesso a Banco de Dados. A exceção do bom desempenho na rede 1xEVDO se deu na aplicação Vídeo Conferência porque a mesma requer que um mecanismo de compressão de vídeo seja utilizado. O desempenho da rede CDMA2000 1xEVDO melhorou com a utilização tanto da técnica de detecção multiusuário como com a técnica de antenas adaptativas possibilitando a entrada de novas aplicações ou mesmo a entrada de novos usuários. Esta melhoria variou entre as aplicações, sendo mais expressiva para o *E-mail* com decaimento do atraso na camada de aplicação em torno de dez vezes com detecção multiusuário e em torno de duas vezes com antenas adaptativas, ambas em relação a detecção convencional com *rake receiver*.

Os simuladores apresentados neste trabalho de tese foram desenvolvidos com a participação de outros pesquisadores do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) dentro do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento intitulado “Gestão da Rede Móvel

Celular para suporte à Serviços e Qualidade” financiado pelo Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações (FUNTTEL).

5.2 Trabalhos Futuros

Como propostas para trabalhos futuros sugerimos :

- Análise do impacto na qualidade do serviço prestado pela rede GPRS para serviços de dados por pacotes em tempo real, como por exemplo, voz sobre IP (VoIP), com a alocação dinâmica dos canais compartilhados pelas redes GSM e GPRS ;
- Análise de desempenho, do ponto de vista da qualidade de serviço, do sistema CDMA2000 1xEVDO com uso de detecção multiusuário e antenas adaptativas para aplicações de dados comutados por pacotes como, por exemplo, HTTP, *E-mail*, VoIP, FTP e Vídeo Conferência, levando-se em conta controle não-ideal de potência e interferência de outras células.
- Análise de desempenho, do ponto de vista da qualidade de serviço, do sistema europeu 3G de comunicação móvel celular, o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) com acesso WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) para aplicações de dados comutados por pacotes como, por exemplo, HTTP, *E-mail*, VoIP, FTP e Vídeo Conferência ;
- Análise de desempenho, do ponto de vista da qualidade de serviço, do sistema WLAN com aplicações de dados comutados por pacotes nos padrões 802.11a, 802.11b e 802.11g ;
- Análise do ganho no uso da técnica OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) em um sistema com padrão 802.11g em relação a um sistema com padrão 802.11b para as mesmas aplicações e taxas de transmissão em ambientes sem linha de visada ;
- Análise de desempenho, do ponto de vista da qualidade de serviço, do sistema WiMAX com aplicações de dados comutados por pacotes ;

- Análise de desempenho, do ponto de vista da qualidade de serviço, dos sistemas UMTS e 1xEVDO com o uso da técnica de antenas adaptativas no formato MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) com múltiplas antenas na transmissão e na recepção.

Apêndice A

Empacotamento RLP

O tráfego de dados da camada IP é transmitido pelo canal fundamental (FCH) e pelo canal suplementar (SCH) da interface de rádio. A interface física permite a transmissão de blocos de informação (RLP *Data Blocks*) de tamanho relativamente pequeno vindos da camada MAC de acordo com as *Mux Options* apresentadas na Figura A.1.

Mux Option			MUX PDU/ Quadro 20 ms		RLP Data Block (bits)	
Option	Rate Set	Taxa (bps)	Single	Double	Tráfego Primário	Tráfego Secundário
0x1	1	9.600	1		170	170
0x809	1	19.200	2		170	170
0x811	1	38.400	4		170	170
0x821	1	76.800	8		170	170
0x2	2	14.400	1		266	266
0x80A	2	28.800	2		266	266
0x812	2	57.600	4		266	266
0x822	2	115.200	8		266	266
0x905	1	19.200		1	346	346
0x909	1	38.400		2	346	346
0x911	1	76.800		4	346	346
0x921	1	153.600		8	346	346
0x906	2	28.800		1	538	538
0x90A	2	57.600		2	538	538
0x912	2	115.200		4	538	538
0x922	2	230.400		8	538	538

Figura A.1: Composição de MUX PDUs de acordo com as MUX Options.

O tamanho dos blocos de informação está relacionado com a taxa de erro elevada da interface de rádio. Os pacotes IP possuem um tamanho mínimo de 26 octetos e podem chegar até 64.000 octetos. Por esta razão é preciso segmentar os pacotes IP para que sejam transmitidos pela interface de rádio. Esta função é realizada pela camada MAC, conforme mostrado na Figura A.2.

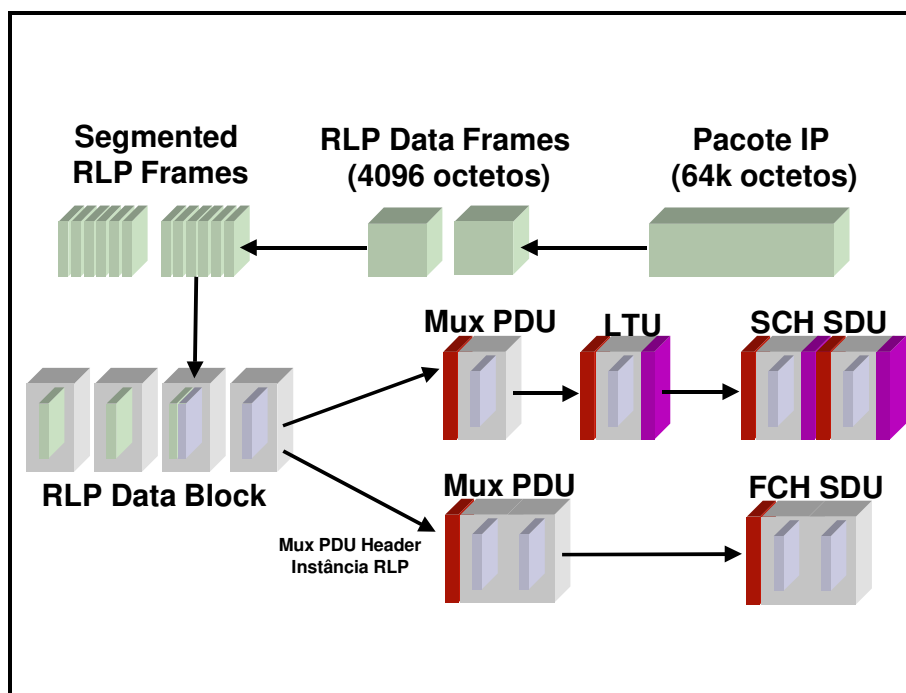


Figura A.2: Segmentação de um pacote IP em frames RLPs na camada MAC.

Inicialmente, a informação recebida da camada IP é dividida em quadros RLP (*RLP Data Frames*), que são numerados sequencialmente. A numeração sequencial permite que a transmissão de dados na interface de rádio seja feita de forma segura, com a retransmissão de quadros recebidos com erro. Um quadro RLP pode ter um tamanho de até 32.768 bits (4096 octetos). Neste caso, cada quadro RLP também deve ser segmentado, dado que seu tamanho é maior que os RLP Data Blocks apresentados na Figura A.1. Um ou mais quadros RLP são concatenados em um RLP *Data Block*, que pode conter até 17 quadros RLP.

Cada RLP *Data Block* é enviado para a sub-camada MAC MUX dando origem a uma MUX PDU. Uma MUX PDU é composta por um ou dois RLP *Data Blocks*. No canal

fundamental (FCH), uma MUX PDU é também a própria SDU que será transportada pela camada física. No caso do canal suplementar (SCH), uma MUX PDU pode receber um campo CRC, transformando-se numa LTU. As MUX PDUs ou LTUs são concatenadas para formar uma SDU.

De acordo com a Figura A.1, um MUX PDU é formado em função da *Mux Option* utilizada, que depende da configuração de rádio (*Rate Set*) e da taxa de transmissão. Por exemplo, se a *Mux Option* utilizada é 0x1, tem-se *Rate Set* 1, taxa de transmissão de 9.600 bps e um MUX PDU formado por um RLP *Data Block* que é formado por apenas um quadro RLP.

Apêndice B

Passos para determinação da PER (*Packet Error Rate*)

A seguir, serão apresentados os passos para determinação da PER com detecção convencional (*rake receiver*), com MUD-D e com antenas adaptativas nos enlace direto e reverso na camada física do modelo de simulação da rede CDMA2000 1xEVDO.

Foram consideradas uma célula e mobilidade do móvel a uma velocidade de 3 km/h (mobilidade de pedestre). Foi escolhida uma trajetória em zig-zag a partir da borda da célula a uma distância de 2,3 km da BTS variando entre pontos além da borda da célula a uma distância de 2,46 km da BTS e pontos na borda da célula, representando uma condição bastante crítica do canal (baixas SINRs).

O *link budget* apresentado na Figura B.1 com modelo de propagação de Hata em ambiente urbano [Lee] mostra que para E_b/N_0 requerida de 3,5 dB, a distância de cobertura do enlace reverso é de 2,3 km. Para E_b/N_0 requerida de 2,5 dB, a distância de cobertura do enlace reverso é de 2,46 km.

O *link budget* apresentado na Figura B.2 com modelo de propagação de Hata em ambiente urbano [Lee] mostra que para E_b/N_0 requerida de 3,5 dB, a distância de cobertura do enlace direto é de 2,98 km, o que garante a cobertura do enlace reverso.

Os passos para determinação da PER são :

1. Determinar a distância via par de coordenadas (latitude, longitude) do OPNET ;
2. Calcular MPL (*Maximum Path Loss*) pela fórmula de Hata (ambiente urbano) ;

Reverse Link Budget (Modelo de propagação de Hata ambiente urbano)					
Transmissor do móvel					
Potência de transmissão (dBm)	24	a			
Receptor da BTS					
Densidade de ruído térmico (dBm/Hz)	-174	b			
Figura de ruído (dB)	5	c			
Densidade de ruído recebido (dBm/Hz)	-169	d=b+c			
Potência de ruído recebido N (dBm)	-108,03	e=d+10*log(1250000)			
Margem de interferência recebida I (dB)	3	f			
N + I (dB)	-105,03	g=e+f			
Ganho de processamento (dB)	15,05	h	38400		
Eb/No requerido (dB)	3,5	i			
Sensibilidade do receptor (dBm)	-116,58	j=i-h+g			
Ganho antena BTS (dBi)	17,15	k			
Ganho de <i>softer handoff</i> (dB)	3	l			
Log-normal <i>Fade Margin</i> (dB)	10,25	m	para 90% de edge		
<i>Building Penetration Loss</i> (dB)	10	n	coverage com sigma = 8 dB		
Perdas em cabo e conectores (dB)	3	o			
MPL (dB)	137,48	p=a-j+k+l-m-n-o			
Cálculo da distância					
f (MHz)	850				
Altura antena da BTS h1 (m)	30				
Altura antena do móvel h2 (m)	2				
Distância (km)	2,30				

Figura B.1: *Link budget* do enlace reverso.

3. Calcular a potência do sinal recebido (S) pela fórmula :

$$S = PEIRP + \text{Ganho}_{\text{antena}_{rx}} - \text{Perdas}_{\text{cabos e conectores}} - \text{MPL} - \text{Fading Margin (Fast and Slow)} - \text{Perda de penetração em edifício} + G_{\text{softer handoff}}$$

4. Calcular a densidade espectral de potência de ruído térmico $N_o = KT + NF$ (*Noise Figure*);

5. Calcular a potência de ruído térmico $N = N_o \times BW$ (*Band Width*);

6. Considerar fator de carga (f_c) igual a 0,5;

7. Calcular a margem de interferência $I = 1 / (1 - f_c)$;

8. Calcular o ruído total $N_t = N + I$;

9. Calcular $S / (N_t)$;

10. Calcular ganho de processamento $G = T_c / T_b$, em que T_c é a taxa de chip e T_b é a

Forward Link Budget (Modelo de propagação de Hata ambiente urbano)					
Transmissor da BTS					
Potência de transmissão (dBm)	40	a			
Ganho antena BTS (dBi)	17,15	a'			
Perdas em cabo e conectores (dB)	3	a''			
Receptor do móvel					
Densidade de ruído térmico (dBm/Hz)	-174	b			
Figura de ruído (dB)	5	c			
Densidade de ruído recebido (dBm/Hz)	-169	d=b+c			
Potência de ruído recebido N (dBm)	-108,03	e=d+10*log(1250000)			
Margem de interferência recebida I (dB)	3	f			
N + I (dB)	-105,03	g=e+f			
Ganho de processamento (dB)	3,01	h	614400		
Eb/No requerido (dB)	3,5	i			
Sensibilidade do receptor (dBm)	-104,54	j=i-h+g			
Ganho de <i>softer handoff</i> (dB)	3	l			
Log-normal <i>Fade Margin</i> (dB)	10,25	m	para 90% de edge		
Building Penetration Loss (dB)	10	n	coverage com sigma = 8 dB		
MPL (dB)	141,44	o=(a+a'-a'')-j+l-m-n			
Cálculo da distância					
f (MHz)	850				
Altura antena da BTS h1 (m)	30				
Altura antena do móvel h2 (m)	2				
Distância (km)	2,98				

Figura B.2: *Link budget* do enlace direto.

taxa de bit ;

11. Calcular $E_b/N_o = S/(N_t) + G$;

12. Calcular o número de usuários interferentes (N_u) pela fórmula :

$$N_u = G \cdot f_c + 1 ;$$

13. Considerar três caminhos resolvíveis ($L = 3$) ;

14. Considerar código convolucional com taxa de codificação 1/3 para enlace direto e 1/4 para enlace reverso.

Para detecção convencional (*rake receiver*) :

- Entrar com os valores E_b/N_o , L , G e N_u e calcular BER para enlace direto e enlace reverso com as fórmulas deduzidas em [Almeida 1] ;
- Com BER e o tamanho do pacote em bits, determinar a quantidade de bits em erro

(chamada aqui de Erro);

- Cálculo da PER : Erro menor ou igual à potencialidade de correção do código convolucional (apresentada no próximo item) indica pacote recebido com sucesso, senão pacote é descartado.

Para MUD-D :

- Entrar com os valores E_b/N_0 , L , e f_c e calcular BER para enlace direto e enlace reverso com as fórmulas deduzidas em [Almeida];

- Com BER e o tamanho do pacote em bits, determinar a quantidade de bits em erro (Erro);

- Cálculo da PER : Erro menor ou igual à potencialidade de correção do código convolucional (apresentada no próximo item) indica pacote recebido com sucesso, senão pacote é descartado.

Para antenas adaptativas, considerar arranjo linear de sete antenas na BTS ($M=7$) e uma antena omni no móvel :

- Entrar com os valores E_b/N_0 , L , G , N_u e M e calcular BER para enlace direto e enlace reverso com as fórmulas deduzidas em [Rosa];

- Com BER e o tamanho do pacote em bits, determinar a quantidade de bits em erro (Erro);

- Cálculo da PER : Erro menor ou igual à potencialidade de correção do código convolucional (apresentada no próximo item) indica pacote recebido com sucesso, senão pacote é descartado.

B.1 Potencialidade de correção do código convolucional

Enlace direto : Taxa de codificação igual a $1/3$, d_{free} igual a 18 e comprimento de restrição (K) igual a 9.

Como trata-se de um código de taxa de codificação de $1/3$, cada uma das três saídas apresentará 9 bits, totalizando 27 bits de saída. A potencialidade de correção (t) de um

código convolucional é dada por

$$t = \left\lfloor \frac{dfree - 1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{18 - 1}{2} \right\rfloor = 8, \quad (\text{B.1})$$

em que $\lfloor x \rfloor$ representa o maior inteiro menor que x .

Portanto, a potencialidade de correção para este código convolucional é dada por

$$t(\%) = \frac{8}{27} = 29,63\%. \quad (\text{B.2})$$

Enlace reverso : Taxa de codificação igual a 1/4, dfree igual a 24 e comprimento de restrição (K) igual a 9.

Como trata-se de um código de taxa de codificação de 1/4, cada uma das quatro saídas apresentará 9 bits, totalizando 36 bits de saída. A potencialidade de correção (t) é dada por

$$t = \left\lfloor \frac{dfree - 1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{24 - 1}{2} \right\rfloor = 11. \quad (\text{B.3})$$

Portanto, a potencialidade de correção para este código convolucional é dada por

$$t(\%) = \frac{11}{36} = 30,55\%. \quad (\text{B.4})$$

Apêndice C

Artigos Publicados e Submetido

Artigos Publicados

“Simulation Model for CDMA2000 1XRTT”, Oliveira, C.H.R., Budri, A., Pimentel, H.P.B., Macedo, P.E.O, Petry, R., & Rosa, S.R.C. *Proceedings of The International Conference on Wireless Network*, 23-26 June, Las Vegas, U.S.A., 2003.

“E2E Simulation Model for CDMA2000 1xEVDO”, Oliveira, C.H.R., Budri, A., & Filho, R.B., *Proceedings of The International Conference on Wireless Network*, 21-24 June, Las Vegas, U.S.A., 2004.

Artigo Submetido

“Performance Analysis of the CDMA2000 1xEVDO Network using Multiuser Decorrelating Detector and Antenna Array in the detection of Packet Data Applications”, Oliveira, C.H.R. & Filho, R.B., *IEEE Communications Magazine*, February 2006/Emerging Technologies for 3G Cellular Wireless Communications Systems.

Bibliografia

- [1] Relatório do Projeto de Pesquisa Aplicada intitulado “Modelo de Simulação de Redes GSM/GPRS”, Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Telecomunicações CPqD, 30-Julho-2003.
- [2] Relatório do Projeto de Pesquisa Aplicada intitulado “Modelo de Simulação de Redes CDMA2000 1xRTT”, Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Telecomunicações CPqD, 01-Novembro-2002.
- [*Access Network*] Access Network Interfaces Interoperability Specification, 3GPP2 A.S0001-A, Version 2.0, June 2001.
- [Almeida] Almeida, C., & Silva, G.M. “On the Performance of CDMA Systems with Multiuser Decorrelating Detectors for Random Sequences on AWGN and Rayleigh Fading Channels”, www.decom.fee.unicamp.br/~celso/cdma/mud_ing.pdf.
- [Almeida 1] Almeida, C. Apostila intitulada “Comunicações Móveis Celulares”, Capítulo 11. www.decom.fee.unicamp.br/~celso/cdma/cdma_intro.pdf.
- [Banks] Banks, J., & Carson II, J.S. *Discrete-Event System Simulation*, Prentice-Hall, 1984.
- [Braden] R.Braden, “Requirements for Internet Hosts - Communication Layers”, RFC 1122, IETF, October 1989.
- [CDG] <http://www.cdg.com>

- [CDMA2000 HDR] CDMA2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification, 3GPP2 C.S0024, Version 4.0, October 25, 2002.
- [Qualcomm] Wu Q. & Esteves E. “The CDMA2000 High Rate Packet Data System”, in Qualcomm 80-H0593-1, Revision A, Mar. 2002.
- [Dahlman] Dahlman, E., Gudmundson, B., Nilsson M., & Sköld, J. “UMTS/IMT-2000 Based on Wideband CDMA”, *IEEE Communications Magazine*, September 1998, pp. 70 - 80.
- [Donahue] Donahue, J., & Lisle, P. “GPRS network infrastructure dimensioning and performance”, *GPRS Congress*, Lisbon, November, 2001.
- [Faruque] Faruque, S. *Cellular Mobile Systems Engineering*, Artech House, 1996.
- [Harte] Harte, L.J., Smith, A.D., & Jacobs, C.A. *IS-136 TDMA Technology, Economics, and Services*, Artech House, 1998.
- [Heine] Heine, G. *GPRS, EDGE, HSCSD, and the Path to 3G*, Artech House, 2000.
- [http1] <http://ntia.its.bldrdoc.gov/>
- [http2] <http://www2.uwindsor.ca/~hlynka/queue.html>
- [http3] <http://www.nttdocomo.com/>
- [http4] <http://www.cdg.org/index.asp>
- [http5] <http://www.itu.int/home/imt.html>
- [http6] <http://www.4g.co.uk/PR2004/Oct2004/2042.htm>
- [IS-856] 1xEV : 1x EVolution, IS-856 TIA/EIA Standard. QUALCOMM, Inc., November, 2001, Revision 7.2.
- [Kalden] R. Kalden, I. Meirick, and M. Meyer, “Wireless Internet Access Based on GPRS,” *IEEE Personal Communications Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 8-18, April 2000.

- [Kleinrock] Kleinrock, L. *Queueing Systems, Vol. 2 : Computer Applications*, J. Wiley and Sons, 1976.
- [Knisely] Knisely, D. N., Kumar, S., Laha, S., & Nanda, S. "Evolution of Wireless Data Services : IS-95 to cdma2000", *IEEE Communications Magazine*, October 1998, pp. 140 - 149.
- [LAC] Signaling Link Access Control (LAC) Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems, 3GPP2 C.S0004-C, Version 1.0.
- [Lee] Lee, J.S., & Miller, L.E. *CDMA Systems Engineering Handbook*, Artech House, 1998.
- [Litva] Litva, J., & Lo, T. *Digital Beamforming in Wireless Communications*, Artech House, 1996.
- [MAC] Medium Access Control (MAC) Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems, 3GPP2 C.S0003-C, May 2002.
- [Mehrotra] Mehrotra, A. *GSM System Engineering*, Artech House, 1997.
- [ON/OFF 1] Shankaranarayanan, N.K., & Jiang, Z., & Mishra, P. "User Perceived Performance of Web-Browsing and Interactive Data Applications in TDMA Packet Wireless Networks", AT&T Labs - USA.
- [ON/OFF 2] Introduction to Networking - Flow Fluid Systems, Class Notes Roch Guérin, University of Pennsylvania.
- [OPNET] The Custom Application Model, OPNET MODELER Technologies Inc.
- [Papoulis91] Papoulis, A. *Probability, random variables, and stochastic processes*. New York : McGraw-Hill, 1991.
- [Physical] Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems, May 2002, 3GPP2 C.S0002-C.
- [Pro95] Proakis, J.G. *Digital Communications*. Nova Iorque : McGraw-Hill, 3^{ed.}, 1995.

- [Rappaport] Liberti, J.C., & Rappaport, T.S. *Smart Antennas for Wireless Communications : IS-95 and Third Generation CDMA Applications*. Prentice Hall PTR, 1999.
- [Redl] Redl, S., Weber, M., & Oliphant, M. *GSM and Personal Communications Handbook*, Artech House Publishers, Norwood, 1998.
- [Reyes] Reyes-Lecuona, A., González-Parada, E., Casilari, E., Casasola, J.C., & Díaz-Estrella, A. . “A page-oriented WWW traffic model for wireless system simulations”, *Proceedings of 16th International Teletraffic Conference*, Edinburgh, June, 1999, pp. 1271-1280.
- [Richard] Richard, K. W. “UMTS overview”, *IEE Electronics and Communication Engineering Journal*, Vol. 12, No. 3, June 2000, pp. 93 - 100.
- [Rosa] Rosa, S.R.C. Tese de Mestrado FEEC UNICAMP, 2002.
- [Service Options] Data Service Options for Spread Spectrum Systems, 3GPP2 C.S0017-0 Version 5.0.
- [Spread Spectrum] Introduction to cdma2000 Standards for Spread Spectrum Systems, 3GPP2 C.S0001-B, Version1.0, April, 2002.
- [Stein66] Schwartz, M., Bennett, W. R., & Stein, S. *Communications Systems and Techniques*. Nova Iorque : McGraw-Hill, pp. 395-403, 1966.
- [Steinbugl] Steinbugl, J.J. “Evolution Toward Third Generation Wireless Networks”.
- [TCP] High Speed Networks : TCP/IP and ATM Design Principles, 1/e.
- [TIA/EIA/IS-707-A-2] Data Service Options for Spread Spectrum Systems, TIA/EIA/IS-707-A-2, November 2000.
- [Toskala] Homa H. and Toskala A., *WCDMA for UMTS : Radio Access For Third Generation Mobile Communications*. Wiley, 2001.
- [Verdú] Verdú, S. *Multiuser Detection*. Cambridge University Press, 1998.

- [*Wireless* IP] Wireless IP Network Standard, 3GPP2 P.S0001-A, Version 3.0.0, July, 2001.
- [Yacoub] Yacoub, M. D. *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, Inc., 1993.