



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Telemática



Algoritmos de Escalonamento e de *Handoff* Para Redes 3G e 4G

Autor: Leandro Bento Sena Marques

Orientador: Prof. Dr. Shusaburo Motoyama

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Telecomunicações e Telemática.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Shusaburo Motoyama - DT/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Carlos Roberto dos Santos - INATEL
Profa. Dra. Magda Patrícia Caldeira Arantes - UNIFIAN
Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub - DECOM/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Paulo Cardieri - DECOM/FEEC/UNICAMP

Campinas, SP
04 de Outubro de 2010

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

M348a Marques, Leandro Bento Sena
Algoritmos de escalonamento e de handoff para redes
3G e 4G / Leandro Bento Sena Marques. – Campinas,
SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Shusaburo Motoyama.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Sistemas de comunicação móvel. 2. Algoritmos.
3. Telecomunicações - Tráfego. 4. Telefonia celular -
Simulação por computador. 5. Redes de computadores.
I. Motoyama, Shusaburo. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação. III. Título

Título em Inglês: Scheduling and handoff algorithms for 3G and 4G networks
Palavras-chave em Inglês: Mobile communication systems, Algorithms,
Telecommunications - Traffic, Cellular telephony -
Computer simulation, Computer networks
Área de concentração: Telecomunicações e Telemática
Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica
Banca Examinadora: Carlos Roberto dos Santos, Magda Patrícia Caldeira Arantes,
Michel Daoud Yacoub, Paulo Cardieri
Data da defesa: 04/10/2010
Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Leandro Bento Sena Marques

Data da Defesa: 4 de outubro de 2010

Título da Tese: "Algoritmos de Escalonamento e de Handoff Para Redes 3G e 4G"

Prof. Dr. Shusaburo Motoyama (Presidente): Shusaburo Motoyama

Prof. Dr. Carlos Roberto dos Santos: Carlos Roberto dos Santos

Profa. Dra. Magda Patrícia Caldeira Arantes: Magda Patrícia Caldeira Arantes

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub: Michel Daoud Yacoub

Prof. Dr. Paulo Cardieri: Paulo Cardieri

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de desempenho dos enlaces diretos dos sistemas CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA e WiMAX com ênfase em escalonadores de dados e nos novos critérios de aceitação de tráfego *handoff* horizontal e vertical para redes 3G e 4G. Estes novos critérios de aceitação de tráfego *handoff* horizontal e vertical levam em conta a ocupação do enlace, a ocupação do *buffer*, a potência do sinal recebido (RSS) e o tamanho do quantum (DRR) como parâmetros para a decisão do processo de *handoff*. Além disso, o estudo considera os escalonadores de dados Max C/I (*Maximum Carrier Interference*), DRR (*Deficit Round Robin*), PF (*Proportional Fair*), Pr (Prioritário) e a nova proposta Pr/PF (*Priority Proportional Fair*). Os critérios combinados aos escalonadores são avaliados por meio de métricas de QoS em função da chegada de tráfego HTTP interno ou em *handoff*. Os resultados mostraram que conforme o critério e o escalonador adotados, podem assegurar a QoS dos sistemas móveis e ainda aceitar uma boa quantidade de tráfego *handoff*. O estudo é baseado em simulações computacionais através da ferramenta de software Matlab.

Palavras-chave: CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA, WiMAX, *handoff* horizontal, *handoff* vertical, tráfego HTTP, escalonador Pr/PF.

Abstract

This work presents a performance study of the forward links of CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA and WiMAX systems with emphasis on data schedulers and new criteria for horizontal and vertical handoff traffic acceptance in the 3G and 4G networks. These new criteria for horizontal and vertical handoff traffic acceptance take into account the link occupation, the buffer occupation, the received signal strength (RSS) and the size of quantum (DRR) as inputs for decision of handoff process. Moreover, the study considers the data schedulers Max C/I (Maximum Carrier Interference), DRR (Deficit Round Robin), PF (Proportional Fair), Pr (Priority) and the new proposal Pr/PF (Priority Proportional Fair). The criteria combined with the data schedulers are evaluated using QoS metrics in function of internal HTTP traffic or handoff traffic. The results showed that depending on the chosen criterion and scheduler, it is possible to assure the QoS of mobile systems and still accept a good amount of handoff traffic. The study is based on computer simulations through Matlab software tool.

Keywords: CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA, WiMAX, horizontal handoff, vertical hand-off, HTTP traffic, Pr/PF scheduler.

Aos meus pais, esposa, irmã, avós e tios

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Shusaburo Motoyama, sou grato pela orientação.

Aos colegas do departamento de telemática, pelas críticas e sugestões.

À minha família e à minha esposa Débora pelo apoio durante esta jornada.

A Deus pela saúde e a oportunidade de concluir este doutorado.

Ao Centro de Inovação Tecnológica Venturus, pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

"Bem-aventurado o homem que encontra sabedoria, e o homem que adquire conhecimento, pois é mais valiosa do que ouro e prata." (Provérbios 3,13)

Sumário

Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
Glossário	xxiii
Lista de Símbolos	xxix
Trabalhos Publicados Pelo Autor	xxxii
1 Introdução	1
2 Redes 3G e 4G e os seus Problemas de Escalonamento e de <i>Handoff</i>	5
2.1 Redes 3G	5
2.1.1 Sistema CDMA 1xEV-DO RA (IS-856)	5
2.1.2 Sistema UMTS/HSDPA (3GPP Release 5)	12
2.1.3 WiMAX (IEEE 802.16e)	20
2.2 Conceitos 4G	28
2.3 Revisão de Artigos de Escalonamento e de <i>Handoff</i>	29
2.3.1 Escalonamento de Dados	29
2.3.2 <i>Handoff</i> Horizontal	31
2.3.3 <i>Handoff</i> Vertical	34
2.4 Conclusões	35
3 Escalonamento de Dados	37
3.1 Introdução	37
3.2 Escalonadores de Dados	38
3.2.1 Prioritário (Pr)	38
3.2.2 <i>Maximum Carrier Interference</i> (Max C/I)	38
3.2.3 <i>Deficit Round Robin</i> (DRR)	38
3.2.4 <i>Proportional Fair</i> (PF)	40
3.2.5 <i>Priority Proportional Fair</i> (Pr/PF)	42
3.3 Plataforma de Simulação	42
3.3.1 Fonte de Tráfego HTTP	42
3.3.2 Simulador de Eventos Discretos	51

3.4	Avaliação dos Algoritmos de Escalonamento no Sistema UMTS/ HSDPA	57
3.4.1	Modelo de Simulação	57
3.4.2	Cenário de Avaliação de Desempenho	58
3.4.3	Análise dos Resultados	59
3.5	Avaliação dos Algoritmos de Escalonamento no Sistema WiMAX	63
3.5.1	Modelo de Simulação	63
3.5.2	Cenário de Avaliação de Desempenho	64
3.5.3	Análise dos Resultados	65
3.6	Conclusões	71
4	Algoritmos de <i>Handoff</i> Horizontal	73
4.1	Introdução	73
4.2	Algoritmos de <i>Handoff</i> Horizontal	73
4.2.1	Critério 1 de Aceitação de Tráfego <i>Handoff</i>	74
4.2.2	Critério 2 de Aceitação de Tráfego <i>Handoff</i>	74
4.3	Modelo de Simulação	76
4.3.1	Modelo <i>Handoff</i> 3G	76
4.4	Avaliação dos Algoritmos de <i>Handoff</i> Horizontal no Sistema 1xEV-DO RA	79
4.4.1	Cenário de Avaliação de Desempenho	79
4.4.2	Análise dos Resultados	80
4.5	Avaliação dos Algoritmos de <i>Handoff</i> Horizontal no Sistema UMTS/HSDPA	88
4.5.1	Cenário de Avaliação de Desempenho	88
4.5.2	Análise dos Resultados	88
4.6	Conclusões	93
5	Algoritmos de <i>Handoff</i> Vertical	95
5.1	Introdução	95
5.2	Algoritmos de <i>Handoff</i> Vertical	96
5.2.1	Potência do Sinal Recebido	96
5.2.2	Potência Equivalente	96
5.2.3	Ocupação de <i>Buffer</i>	97
5.2.4	Ocupação de Enlace	97
5.2.5	Ocupação Mix	97
5.2.6	Ocupação de Enlace & Potência Mix	98
5.2.7	<i>Deficit Round Robin</i>	99
5.3	Modelo de Simulação	100
5.4	Cenários de Avaliação de Desempenho	101
5.4.1	Cenário I	101
5.4.2	Cenário II	102
5.5	Análise dos Resultados	105
5.5.1	Cenário I	105
5.5.2	Cenário II	112
5.6	Conclusões	117

6	Conclusões	119
	Referências bibliográficas	121
A	Fontes de Tráfego	127
A.1	Fontes de Tráfego de Poisson	127
A.1.1	Método da Transformação Inversa	127
A.1.2	Código Fonte	128
A.1.3	Gráficos	129
A.2	Fontes de Tráfego HTTP	130
A.2.1	Código Fonte	130
A.2.2	Gráficos	139
B	Fluxograma do Simulador de Eventos Discretos	143
B.1	Programa Principal	143

Lista de Figuras

2.1	Arquitetura de Rede IS-856	6
2.2	Protocolos IS-856	7
2.3	O sistema 1xEV-DO RA maximiza a vazão através do uso eficiente da potência[1]	9
2.4	Estrutura do Enlace Direto 1xEV-DO e a sua Divisão em <i>Time-Slots</i>	10
2.5	Arquitetura de Rede UMTS	13
2.6	Arquitetura de Protocolos para UMTS[2]	15
2.7	Arquitetura de Protocolos de Interface de Rádio UTRA FDD[3]	16
2.8	Esquema de transmissão simplificado HSDPA[4]	18
2.9	Modelo Referência de Rede WiMAX[5]	21
2.10	Arquitetura de Rede WiMAX Baseada em IP[5]	22
2.11	Pilha de Protocolos do IEEE 802.16[6]	23
2.12	Topologia PMP[7]	24
2.13	Estrutura da Subportadora OFDM[5]	24
2.14	Estrutura do Quadro OFDMA WiMAX[5]	25
2.15	<i>Hard Handoff</i> WiMAX[8]	27
2.16	Esquemas de <i>Handoff</i> 4G[9]	28
3.1	Rodada 1a - DRR	39
3.2	Rodada 1b - DRR	39
3.3	Rodada 2a - DRR	40
3.4	Rodada 2b - DRR	40
3.5	Rodada 3a - DRR	41
3.6	Rodada 3b - DRR	41
3.7	Rodada 4 - DRR	41
3.8	Escalonador de dados Pr/PF	42
3.9	Segmentos de Controle em uma Conexão TCP[10]	44
3.10	Controle de Fluxo TCP Durante a Partida Lenta[10]	45
3.11	Processo de Chegada de Pacotes na ERB para <i>Download</i> de um Objeto Via TCP[10]	46
3.12	Seção de Navegação Web[10]	47
3.13	Uma Típica Página Web e seu Conteúdo[10]	48
3.14	Comparativo Modelo Referência OSI	48
3.15	Modelagem do <i>Download</i> de uma Página Web[10]	50
3.16	<i>Download</i> de um Objeto no Modo HTTP/1.0 <i>Burst</i> [10]	52
3.17	<i>Download</i> de um Objeto no Modo HTTP/1.1 Persistente[10]	53

3.18	Modelo de Simulação de Redes Básico	55
3.19	Modelo UMTS/HSDPA	58
3.20	Vazão do sistema UMTS/HSDPA sob diversos escalonadores	60
3.21	Atraso médio do sistema UMTS/HSDPA sob diversos escalonadores	61
3.22	Atraso médio Pr4 do sistema UMTS/HSDPA sob diferentes estratégias para a limitação do <i>buffer</i>	62
3.23	Percentual de perda do sistema UMTS/HSDPA sob diversos escalonadores	62
3.24	Modelo de Simulação WiMAX	63
3.25	Vazão Pr1 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace	66
3.26	Vazão Pr4 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace	66
3.27	Atraso Médio Pr1 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace	67
3.28	Atraso Médio Pr2 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace	67
3.29	Atraso Médio Pr3 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace	68
3.30	Atraso Médio Pr4 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace	69
3.31	Percentual de Perda Pr1 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace	69
3.32	Percentual de Perda Pr2 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace	70
3.33	Percentual de Perda Pr3 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace	70
3.34	Percentual de Perda Pr4 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace	71
4.1	Critério 1 de Aceitação de Tráfego <i>Handoff</i>	74
4.2	Critério 2 de Aceitação de Tráfego <i>Handoff</i>	75
4.3	Modelo <i>Handoff</i> 3G	76
4.4	Modelo 3G	78
4.5	Vazão do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no <i>Buffer</i> 1 da Célula 1xEV-DO RA	81
4.6	Vazão do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no <i>Buffer</i> 2 da Célula 1xEV-DO RA	82
4.7	Vazão do Tráfego <i>Handoff</i> de Pacotes Pr4 no <i>Buffer</i> 2 da Célula 1xEV-DO RA	82
4.8	Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no <i>Buffer</i> 1 da Célula 1xEV-DO RA	83
4.9	Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no <i>Buffer</i> 2 da Célula 1xEV-DO RA	84
4.10	Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no <i>Buffer</i> 2 da Célula 1xEV-DO RA	85
4.11	Atraso Médio do Tráfego <i>Handoff</i> de Pacotes Pr4 no <i>Buffer</i> 2 da Célula 1xEV-DO RA	85
4.12	Percentual de Perda do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no <i>Buffer</i> 1 da Célula 1xEV-DO RA	86
4.13	Percentual de Perda do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no <i>Buffer</i> 2 da Célula 1xEV-DO RA	87
4.14	Percentual de Perda do Tráfego <i>Handoff</i> de Pacotes Pr4 no <i>Buffer</i> 2 da Célula 1xEV-DO RA	87
4.15	Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no <i>Buffer</i> 1 da Célula HSDPA	90
4.16	Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no <i>Buffer</i> 2 da Célula HSDPA	90
4.17	Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no <i>Buffer</i> 2 da Célula HSDPA	91
4.18	Percentual de Perda do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no <i>Buffer</i> 1 da Célula HSDPA	92
4.19	Percentual de Perda do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no <i>Buffer</i> 1 da Célula HSDPA	93
4.20	Percentual de Perda do Tráfego <i>Handoff</i> de Pacotes Pr4 no <i>Buffer</i> 2 da Célula HSDPA	93
5.1	Modelo de Simulação 4G	101

5.2	Vazão HSDPA Pr1 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	106
5.3	Vazão HSDPA Pr4 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	106
5.4	Vazão 1xEV-DO RA Pr1 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	107
5.5	Vazão 1xEV-DO RA Pr4 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	108
5.6	Atraso Médio HSDPA Pr1 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	108
5.7	Atraso Médio HSDPA Pr4 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	109
5.8	Atraso Médio 1xEV-DO RA Pr1 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	110
5.9	Atraso Médio 1xEV-DO RA Pr4 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	110
5.10	Percentual de Perda HSDPA Pr4 em Função do Tráfego Handoff Vertical	111
5.11	Percentual de Perda 1xEV-DO RA Pr4 em Função do Tráfego Handoff Vertical	111
5.12	Vazão HSDPA Pr1 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	112
5.13	Vazão 1xEV-DO RA Pr1 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	113
5.14	Atraso Médio HSDPA Pr1 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	114
5.15	Atraso Médio HSDPA Pr4 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	114
5.16	Atraso Médio 1xEV-DO RA Pr1 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	115
5.17	Atraso Médio 1xEV-DO RA Pr4 em Função do Tráfego de <i>Handoff</i> Vertical	116
5.18	Percentual de Perda HSDPA Pr4 em Função do Tráfego Handoff Vertical	116
5.19	Percentual de Perda 1xEV-DO RA Pr4 em Função do Tráfego Handoff Vertical	117
A.1	Código Fonte da Chegada de Pacotes Segundo o Processo de Poisson	128
A.2	Código Fonte Para a Geração de Pacotes com Comprimento Médio de 1.500 <i>bytes</i>	129
A.3	Chegada de Pacotes Segundo o Processo de Poisson	129
A.4	Histograma do Comprimento dos Pacotes Conforme a Distribuição de Poisson	130
A.5	Tempo de Chegada de Pacotes IP das Fontes HTTP	140
A.6	Histograma do Comprimento dos Pacotes IP das Fontes HTTP	141
B.1	Fluxograma do Programa Principal do Simulador	144

Lista de Tabelas

2.1	Tipos de Modulação por Taxas de Dados - Enlace Direto 1xEV-DO RA	10
2.2	Tipos de Modulação por Taxas de Dados - Enlace Direto HSDPA	19
2.3	Tipos de Modulação por Taxas de Dados - Enlace Direto WiMAX	26
3.1	Parâmetros do Modelo de Tráfego HTTP	49
3.2	Funções Densidades das Distribuições	50
3.3	Distribuição de probabilidade pela taxa de dados	59
3.4	Cenário de Avaliação UMTS/HSDPA	59
3.5	Distribuição de Probabilidade x Taxa de Dados	64
3.6	Cenário de Avaliação WiMAX	64
3.7	Proporção de Serviços x Tamanho do <i>Buffer</i>	65
4.1	Distribuição de Probabilidade pela Taxa de Dados 1xEV-DO RA	77
4.2	Distribuição de Probabilidade pela Taxa de Dados HSDPA	77
4.3	Distribuição de Prioridades X Tamanho dos <i>Buffers</i> 1xEV-DO RA	79
4.4	Cenário Avaliado CDMA 1xEV-DO RA	80
4.5	Distribuição de Prioridades X Tamanho dos <i>Buffers</i> HSDPA	88
4.6	Cenário Avaliado UMTS/HSDPA	89
5.1	Mapeamento das Potências Equivalentes	97
5.2	Distribuição de Prioridades X Tamanho do <i>Buffer</i>	102
5.3	Cenário Avaliado I - UMTS/HSDPA	103
5.4	Cenário Avaliado I - CDMA 1xEV-DO RA	103
5.5	Distribuição de Prioridades X Tamanho do <i>Buffer</i>	104
5.6	Cenário Avaliado II - UMTS/HSDPA	104
5.7	Cenário Avaliado II - CDMA 1xEV-DO RA	104

Glossário

- 1G - Primeira Geração de Sistema de Celular
- 2G - Segunda Geração de Sistema de Celular
- 3G - Terceira Geração de Sistema de Celular
- 3GPP - 3rd Generation Partnership Project
- 3GPP2 - 3rd Generation Partnership Project 2
- 4G - Quarta Geração de Sistema de Celular
- AAA - Authentication Authorization Accounting
- ALCAP - Access Link Control Application Part
- AMC - Adaptive Modulation and Coding
- AMPS - Advanced Mobile Phone Service
- ARQ - Automatic Repeat Request
- ASN - Access Services Network
- ATM - Asynchronous Transfer Mode
- AuC - Authentication Center
- BE - Best Effort
- BMC - Broadcast/Multicast Control Protocol
- BSC - Base Station Controller
- CDM - Code Division Multiplexing
- CDMA - Code Division Multiple Access
- CDMA 1xEV-DO - CDMA 1x Evolution Data Optimized
- CN - Core Network

CP - Control Plane

CPS - Common Part Sublayer

CQI - Channel Quality Indicator

CRC - Cyclic Redundancy Check

CS - Convergence Sublayer

CSN - Connectivity Service Network

DRC - Data Rate Control

DRR - Deficit Round Robin

DSC - Data Source Control

DSL - Digital Subscriber Line

EDGE - Enhanced Data Rates for GSM Evolution

EIR - Equipment Identity Register

ERB - Estação Rádio Base

FBSS - Fast Base Station Switching

FCS - Fast Cell Selection

FDD - Frequency Division Duplexing

FDMA - Frequency Division Multiple Access

GGSN - Gateway GPRS Support Node

GMSC - Gateway Mobile Services Switching Center

GPRS - General Packet Radio Service

GSM - Global System for Mobile

H-ARQ - Hybrid Automatic Repeat Request

HHO - Hard Handoff

HLR - Home Location Register

HS-DPCCH - High Speed Dedicated Physical Control Channel

HS-DSCH - High Speed Downlink Shared Channel

HS-SCCH - High Speed Shared Control Channel

HSDPA - High Speed Downlink Packet Access

HSPA - High Speed Packet Access

HSPA+ - HSPA Evolution

HSUPA - High Speed Uplink Packet Access

HTML - Hyper Text Markup Language

HTTP - Hypertext Transfer Protocol

IMEI - International Mobile Equipment Identity

IMT-2000 - International Mobile Telecommunications-2000

IP - Internet Protocol

IPv6 - Internet Protocol version 6

ITU - International Telecommunications Union

LTE - Long Term Evolution

MAC - Medium Access Control

Max C/I - Maximum Carrier Interference

MDHO - Macro Diversity Handover

MDP - Markov Decision Process

MIMO - Multiple Input, Multiple Output

MS - Mobile Station

MSC - Mobile Switching Center

MSC/VLR - Mobile Services Switching Center/Visitor Location Register

mSCTP - mobile Stream Control Transmission Protocol

MTU - Maximum Transmission Unit

NAS - Network Access Server

NMT - Nordic Mobile Telephone

nrtPS - Non-Real-Time Polling Service

NWG - Network Working Group

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access

PCF - Packet Control Function

PDCP - Packet Data Convergence Protocol

PDN - Packet Data Network

PDSN - Packet Data Serving Node

PDU - Protocol Data Unit

PF - Proportional Fair

PMP - Point-to-Multipoint

PPP - Point-to-Point Protocol

Pr - Prioritário

Pr/PF - Priority Proportional Fair

PSR - Packet Successfully Received

QPPQ - Quality Prediction Priority Queuing

RANAP - Radio Access Network Application Part

RLC - Radio Link Control

RLP - Radio Link Protocol

RNC - Radio Network Controller

RNL - Radio Network Layer

RR - Round Robin

RRC - Radio Resource Control

RSS - Radio Signal Strength

RTG - Receive Transition Gap

rtPS - Real-Time Polling Service

SAP - Service Access Point

SDU - Service Data Units

SF - Spread Factor

SGSN - Serving GPRS Support Node

SINR - Signal-to-Interference-and-Noise-Ratio

SMS - Short Message Service

SS - Subscriber Station

TACS - Total Access Communications System

TCP - Transmission Control Protocol

TCP/IP - Transmission Control Protocol/Internet Protocol

TDD - Time Division Duplexing

TDM - Time Division Multiplexing

TDMA - Time Division Multiple Access

TFRC - TCP Friendly Rate Control

TL - Tempo de Leitura

TNCP - Transport Network Control Plane

TNL - Transport Network Layer

TNUP - Transport Network User Plane

TS - Time-Slot

TTG - Transmit Transition Gap

TTI - Transmission Time Interval

UDP - User Datagram Protocol

UE - User Equipment

UGS - Unsolicited Grant Service

UMTS - Universal Mobile Telecommunications System

UP - User Plane

USIM - UMTS Subscriber Identity Module

UTRA FDD - UMTS Terrestrial Radio Access Frequency Division Duplex

UTRAN - UMTS Terrestrial Radio Access Network

VLR - Visitor Location Register

VoD - Video on Demand

VoIP - Voice over Internet Protocol

WCDMA - Wideband CDMA

WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access

WMAN - Wireless Metropolitan Area Network

Lista de Símbolos

$R_{azao(i)}$ razão da taxa de dados instantânea sob a vazão média do usuário (i)

$R_{inst(i)}$ a taxa de dados instantânea do usuário (i)

$R_{media(i)}$ a vazão média do usuário (i)

τ_{rt} *round-trip time*

τ_c representa a soma dos seguintes tempos: o tempo levado por um pacote ACK propagar do cliente para o servidor, mais o tempo de processamento deste pacote pelo servidor e o tempo gasto pelo segmento de dado TCP propagar do servidor para a ERB

τ_1 representa o tempo de transmissão de um segmento de dados TCP da ERB para o dispositivo móvel por meio da interface aérea

Trabalhos Publicados Pelo Autor

1. L.B.S. Marques, S. Motoyama. “Vertical Handoff Algorithms for Heterogeneous 3G Networks”. *International Telecommunications Symposium (ITS’10)*, Manaus, Amazonas, Brasil, Setembro 2010.
2. L.B.S. Marques, S. Motoyama. “Critérios de Aceitação de Tráfego Handoff com Garantia de QoS para o Sistema CDMA 1xEV-DO RA”. *Revista IEEE América Latina*, pg. 205-213, Junho 2010.
3. L.B.S. Marques, S. Motoyama. “Vertical Handoff Algorithms with QoS Guarantee for 4G Networks”. *IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM’09)*, Medellín, Antioquia, Colômbia, Setembro 2009.
4. L.B.S. Marques, S. Motoyama. “The Forward Link Performance Study of the WiMAX System Under Different Schedulers”. Versão Estendida, *Revista TELECOMUNICAÇÕES - INATEL*, 2009.
5. L.B.S. Marques, S. Motoyama. “The Forward Link Performance Study of the WiMAX System Under Different Schedulers”. *International Workshop on Telecommunications (IWT’09)*, Centro Ericsson São Paulo, São Paulo, Brasil, pg. 194-199, Fevereiro 2009.
6. L.B.S. Marques, S. Motoyama. “Impacto do Tráfego Handoff no Sistema 3G UMTS/HSDPA Sob Vários Critérios de Aceitação e Escalonadores”. *XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT’08)*, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Setembro 2008.
7. L.B.S. Marques, S. Motoyama. “Critérios de Aceitação de Tráfego Handoff e Escalonadores de Dados para Garantia de QoS no Sistema CDMA 1xEV-DO RA”. *Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação (WPerformance’08)* no CSBC’08 (Congresso da Sociedade Brasileira de Computação), Belém do Pará, Pará, Brasil, pg. 76-94, Julho 2008.
8. L.B.S. Marques, S. Motoyama. “Análise de Desempenho do Sistema UMTS/HSDPA Utilizando Escalonador de Dados Híbrido”. *Congresso Tecnológico InfoBrasil (INFOBRASIL’08)*, Fortaleza, Ceará, Brasil, Maio 2008.
9. L.B.S. Marques, S. Motoyama. “The Forward Link Performance Study of the 1xEV-DO System Under Different Schedulers”. *International Workshop on Telecommunications (IWT’07)*, Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais, Brasil, pg. 183-188, Fevereiro 2007.

Capítulo 1

Introdução

A necessidade natural do ser humano de comunicar-se sempre exigiu esforços na tentativa de prover a comunicação a qualquer momento em qualquer lugar. Inicialmente, a maior demanda era pela comunicação de voz com mobilidade uma vez que a telefonia fixa não permitia a mobilidade do usuário, pois, estava atrelada a cabos. Com a evolução dos sistemas celulares houve uma mudança de foco para comunicação de dados na qual são agregados novos serviços a comunicação de voz como a identificação de chamadas, o envio e o recebimento de imagens e mensagens, o acesso à internet, entre outros.

A primeira geração de sistema de celular (1G) surgiu no final da década de 1970 com o objetivo de prover serviços de voz aos usuários móveis. A 1G utiliza modulação em frequência analógica para voz e a arquitetura de múltiplo acesso FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) [2]. Pela primeira vez foi introduzido o conceito de células em que uma cidade ou região é dividida em áreas menores denominadas células. Além disso, há a possibilidade da migração de usuários entre células vizinhas com conexões em andamento sem interrupção das mesmas. Este mecanismo é conhecido como *handoff* ou *handover*. Várias redes de 1G foram desenvolvidas no mundo, sendo que as mais importantes são: AMPS (*Advanced Mobile Phone Service*), NMT (*Nordic Mobile Telephone*) e TACS (*Total Access Communications System*).

Com a rápida escassez de recursos da 1G deu-se início ao desenvolvimento da segunda geração de sistemas celulares (2G). A operação comercial das redes 2G iniciou-se no começo da década de 1990 baseada na tecnologia digital e na comutação de circuitos. Esta geração provê uma melhor eficiência espectral, voz, serviços de dados de baixa velocidade e mecanismos de autenticação. Os maiores representantes desta geração são: o CDMA IS-95 (*Code Division Multiple Access*), o TDMA IS-136 (*Time Division Multiple Access*) e o GSM (*Global System for Mobile*) [11]. Além disso, foi introduzido um novo tipo de *handoff* pelo sistema CDMA IS-95 conhecido como *soft handoff* em que um terminal pode comunicar-se com mais de uma estação rádio base (ERB) ao mesmo tempo

[12].

Com o advento da internet a demanda por dados dos dispositivos móveis cresceu rapidamente e excedeu a capacidade dos sistemas 2G. A grande demanda impulsionou o desenvolvimento de uma geração intermediária (2,5G) antes da chegada da terceira geração (3G). Esta geração destaca-se pelo uso da tecnologia de comutação de pacotes como base para a transmissão de dados com taxas de dados mais altas e melhor qualidade de serviço (QoS) em relação à geração anterior. As tecnologias mais difundidas baseadas no princípio 2,5G são: o IS-2000, o GPRS (*General Packet Radio Service*) e o EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*).

A exigência de banda larga dos novos serviços multimídia impulsionou a indústria de telecomunicações representada pelo *International Telecommunications Union* (ITU) a desenvolver o padrão global *International Mobile Telecommunications-2000* (IMT-2000) para a terceira geração de sistemas celulares (3G). Nesta geração, assim como na geração anterior é utilizada a tecnologia digital associada à comutação de pacotes e de circuitos, provendo altas taxas de dados e suporte para tráfego de voz, dados e multimídia [13]. Como principais representantes desta geração destacam-se: o CDMA 1xEV-DO (*1x Evolution Data Optimized*) [14] e o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) [15].

O sistema CDMA 1xEV-DO R0 também conhecido como padrão IS-856 [14] foi desenvolvido a partir do CDMA2000 pelo grupo 3GPP2 (*Third Generation Partnership Project 2*) a fim de prover serviços com altas taxas de dados no enlace direto (ERB para o terminal). Esta solução contempla a alta eficiência espectral em razão da introdução de muitas técnicas para a otimização da transmissão de dados [16]. A partir da revisão R0 é adotado um novo mecanismo de *handoff* denominado *virtual soft handoff* via seleção adaptativa do servidor (ERB).

Anos mais tarde o mesmo grupo lançou comercialmente o sistema CDMA 1xEV-DO RA [17] na qual possibilita taxas de dados de até 3,1 Mbps no enlace direto e 1,8 Mbps no enlace reverso (terminal para ERB) em condições favoráveis. Em particular nesta revisão RA destaca-se o aumento da eficiência espectral no enlace reverso em que praticamente duplicou o número de usuários simultâneos de aplicações sensíveis ao tempo no sistema [18].

O outro grupo de padronização 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) adotou o sistema UMTS como o sucessor 3G dos sistemas GSM, GPRS e EDGE. Este grupo padronizou em seu *Release 5* a nova tecnologia HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) que representa a evolução da interface WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) provendo taxas de até 14,4 Mbps no enlace direto [15] e taxas de até 5,7 Mbps no enlace reverso (terminal para ERB) com a tecnologia HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) [19]. A junção destas duas tecnologias HSDPA e HSUPA é também conhecida como *High Speed Packet Access* (HSPA). Recentemente, houve a liberação dos *Releases 7 e 8* da especificação WCDMA e deles nasceu o sistema HSPA Evolution ou HSPA+ em

que através de novas técnicas como o *Multiple Input, Multiple Output 2X2* (MIMO), a modulação de 64QAM, entre outras, alcança-se até 42 Mbps e 11 Mbps no enlace direto e reverso respectivamente.

Como alternativa aos sistemas 3G anteriores vem sendo desenvolvido o padrão IEEE 802.16-2001 [6] mais conhecido como *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) por um consórcio de indústrias, com liderança da Intel, visto como um padrão concorrente dos padrões anteriormente citados. Este novo padrão é definido como uma tecnologia 3,5G ou pré-4G e possui como grande diferencial a promessa de atender áreas metropolitanas com taxas de dados de até 75 Mbps.

A revolução promovida pelas imagens e serviços multimídia de alta definição novamente estimulou a indústria de telecomunicações a conduzir o desenvolvimento da quarta geração de sistemas celulares (4G). Como principais requisitos da nova geração destacam-se: a integração de redes *wireless* heterogêneas, a adoção do protocolo IPv6, a redução de custo por bit em comparação às redes 3G e as altas taxas de dados de 100 Mbps no enlace direto. Atualmente, duas tecnologias são apontadas como representantes da 4G: o WiMAX e o *Long Term Evolution* (LTE) [20]. Além disso, a partir desta geração nasceu um novo conceito de *handoff* conhecido como *handoff* vertical em que há a possibilidade do usuário migrar entre diferentes redes de acesso, por exemplo, a migração de usuários do sistema CDMA 1xEV-DO para o sistema UMTS/HSDPA.

Recentemente, ao final de 2009 foi lançado comercialmente a primeira rede LTE em Estocolmo e Oslo pela operadora Telia Sonera. O sistema LTE caracteriza-se por oferecer: altas taxas de dados de 100 Mbps no enlace direto, portadoras com largura de banda variável de 5 MHz a 20 MHz e suporte a uma grande gama de dispositivos eletrônicos. Além disso, são adotadas novas técnicas de otimização para transmissão de dados. As mais relevantes são: a utilização de antenas avançadas com a tecnologia MIMO 2X2 e 4X4, o uso de modulações de alta ordem como, por exemplo, a de 64QAM, e a nova técnica de acesso ao meio baseada em *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) [21].

Objetivos e Contribuições

As redes 4G focam a integração de uma grande diversidade de tecnologias *wireless* heterogêneas baseadas no conceito de acesso ao sistema a qualquer momento e em qualquer lugar com alguma tecnologia. Para atender este novo requisito foram criados novos conceitos de *handoff* conhecidos como *handoff* horizontal (intra-sistema) e *handoff* vertical (inter-sistema).

Nestes ambientes multi-redes um dos principais desafios é selecionar qual a melhor rede disponível do ponto de vista de QoS em determinado momento para atender o terminal na qual encontra-se em *handoff* uma vez que esta decisão não depende apenas de um simples fator. Assim, a questão natural que se levanta é quais fatores devem ser considerados na decisão *handoff* a fim de aumentar a confi-

abilidade do *handoff* horizontal e vertical das redes 3G e 4G. O objetivo deste estudo é propor novos algoritmos de *handoff* horizontal e vertical em que são considerados diversos parâmetros de QoS de cada sistema para a tomada de decisão no processo *handoff* a fim de melhorar a QoS das conexões em andamento das redes 3G e 4G.

Além disso, este estudo avalia o desempenho do enlace direto dos sistemas CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA e WiMAX em função de fontes de tráfego HTTP propostas pelo 3GPP2 [10] e de fontes de tráfego segundo o modelo de Poisson em alguns cenários de avaliação de desempenho. Igualmente são avaliados os escalonadores de dados Max C/I (*Maximum Carrier Interference*), DRR (*Deficit Round Robin*), PF (*Proportional Fair*), Pr (Prioritário) e a nova proposta Pr/PF (*Priority Proportional Fair*).

O cenário em estudo consiste em avaliar a coexistência dos sistemas 3G e 4G. Nesse cenário, um sistema 3G, como por exemplo o CDMA 1xEV-DO RA, deverá receber tráfegos provenientes de outros sistemas 3G. Dessa forma, a estratégia de aceitação de tráfego em *handoff* de outros sistemas em um sistema 3G torna-se de alta importância.

Por fim, este estudo baseia-se em simulações computacionais dos algoritmos avaliados através de um simulador de eventos discretos desenvolvido na ferramenta de software Matlab.

Organização e Estrutura

Esta tese está organizada em 6 capítulos descritos a seguir. No Capítulo 2 é apresentada uma visão geral dos sistemas 3G CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA e WiMAX do ponto de vista de arquitetura, protocolos e a estrutura dos enlaces diretos dos respectivos sistemas. Além disso, são apresentados os principais conceitos das redes 4G e uma revisão bibliográfica acerca dos trabalhos disponíveis na literatura. O Capítulo 3 descreve de forma sucinta os algoritmos dos escalonadores de dados adotados neste estudo assim como a plataforma de simulação utilizada. Ainda neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados alcançados pelos algoritmos de escalonamento de dados. Nos Capítulos 4 e 5 são apresentados e analisados os resultados obtidos pelos algoritmos de *handoff* horizontal e vertical propostos para as redes 3G e 4G. Finalmente, o Capítulo 6 traz as principais conclusões obtidas por este estudo e faz alguns comentários sobre possíveis trabalhos futuros. Ao final desta tese encontram-se os apêndices e as referências bibliográficas.

Capítulo 2

Redes 3G e 4G e os seus Problemas de Escalonamento e de *Handoff*

2.1 Redes 3G

2.1.1 Sistema CDMA 1xEV-DO RA (IS-856)

Introdução

A primeira versão do sistema 1xEV-DO R0 também conhecida IS-856 foi padronizada pelo grupo 3GPP2 (*Third Generation Partnership Project 2*) como uma solução 3G para prover serviços com altas taxas de dados a redes sem fio móvel e fixa [14]. Esta solução contempla a alta eficiência espectral em razão da introdução de muitas técnicas para a otimização da transmissão de dados [16].

A segunda versão do sistema 1xEV-DO, a revisão 1xEV-DO RA [17], possibilita taxas de dados de até 3,1 Mbps no enlace direto e 1,8 Mbps no enlace reverso (terminal para ERB) em condições favoráveis. Em particular nesta revisão destaca-se o aumento da eficiência espectral no enlace reverso, onde praticamente dobrou o número de usuários de aplicações sensíveis ao tempo que podem ser suportados no sistema simultaneamente [18]. Através das melhorias introduzidas nesta revisão tornou-se possível uma redução significativa da latência e melhoria das aplicações sensíveis ao tempo como, por exemplo, as aplicações de VoIP, navegação na Web, vídeo sob demanda para uma grande quantidade de usuários.

Nesta subsecção são apresentadas em maiores detalhes algumas características técnicas do sistema CDMA 1xEV-DO RA a fim de se entender o funcionamento do sistema e esclarecer os principais conceitos utilizados ao longo da tese.

Arquitetura de Rede

O sistema CDMA 1xEV-DO RA baseia-se na arquitetura de rede da família CDMA2000. No entanto, como o sistema 1xEV-DO RA suporta somente a comutação de pacotes os elementos de rede legados *Mobile Switching Center (MSC)*, *Home Location Register (HLR)* e *Visitor Location Register (VLR)* não são mais necessários na nova arquitetura, pois, estes elementos eram utilizados pelas redes de voz para a comutação de circuitos.

Desta forma, os elementos de rede presentes nesta nova arquitetura de rede são: os terminais móveis, as estações rádio base (ERB), as controladoras de ERB conhecidas como *Base Station Controller (BSC)*, o *Packet Control Function (PCF)* que normalmente está agregado a BSC e o *Packet Data Serving Node (PDSN)* [22]. A Figura 2.1 ilustra esta arquitetura de rede.

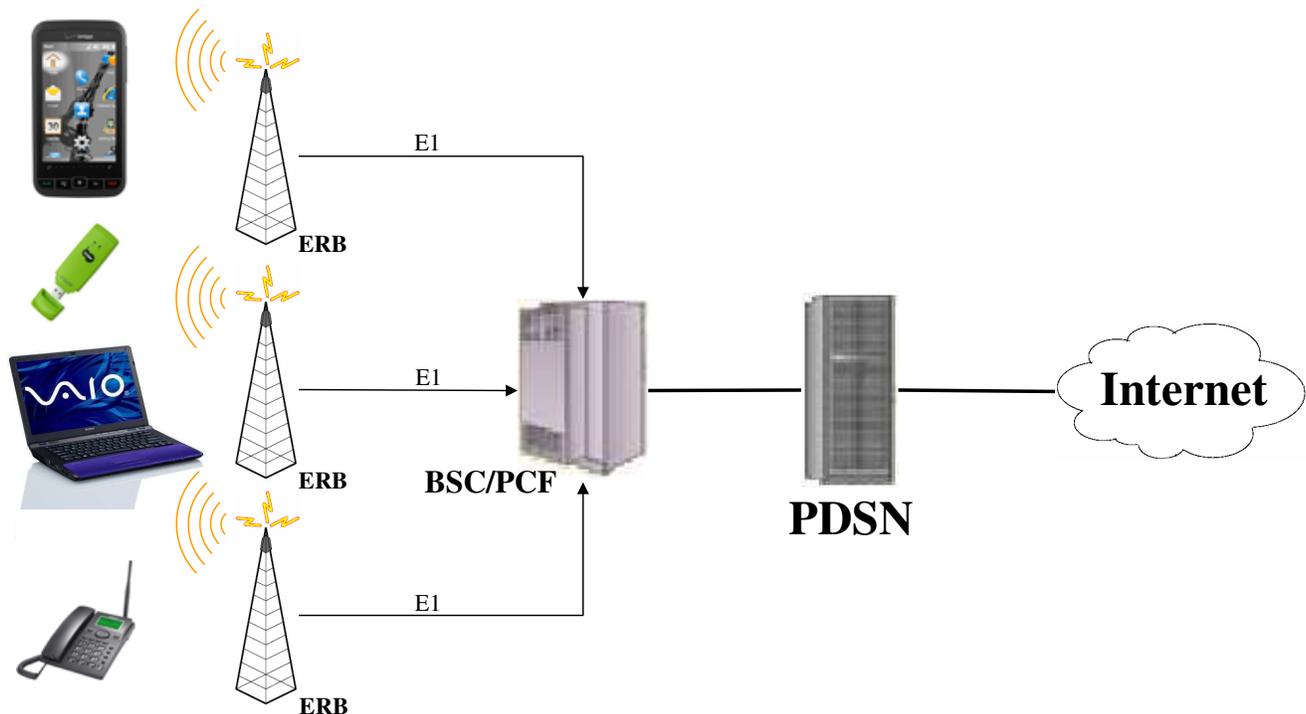


Fig. 2.1: Arquitetura de Rede IS-856

Todos elementos de rede descritos acima são utilizados numa conexão fim-a-fim do sistema 1xEV-DO RA. No enlace reverso todo tráfego de dados originado pelo terminais móveis trafega pelos elementos de rede até alcançar o servidor de alguma aplicação na rede IP. No enlace direto ocorre o inverso, os dados provenientes de uma aplicação qualquer localizados na rede núcleo são propagados através dos elementos de rede até chegar no terminal móvel via interface aérea da ERB.

A BSC é capaz de gerenciar um grupo de até dez ERBs. No momento em que os usuários migram

de uma ERB para outra, a BSC é a responsável por gerenciar os *handoffs* com a finalidade de manter as sessões de dados e de controlar as conexões de cada terminal sob uma taxa de erros aceitável [22].

A função do PCF, normalmente incorporada à BSC, adiciona a capacidade de suportar tráfego de pacotes. Este elemento também é responsável por administrar as interfaces entre PSDN e BSC, selecionar o PDSN, monitorar todos os temporizadores de inatividade de usuários, e fornecer essa informação à BSC.

O PDSN tem como funcionalidade básica o NAS (*Network Access Server*) na qual estabelece as sessões de usuários com o protocolo PPP (*Point-to-Point Protocol*). Ambos os serviços nos sistemas IS-2000 e 1xEV-DO RA utilizam o mesmo PDSN na rede.

Protocolos de Rede

O sistema 1xEV-DO adota o IP (*Internet Protocol*) como protocolo de rede e desta forma suporta todas as aplicações e protocolos que são compatíveis com IP [23]. A Figura 2.2 mostra a pilha de protocolos utilizada no sistema 1xEV-DO.

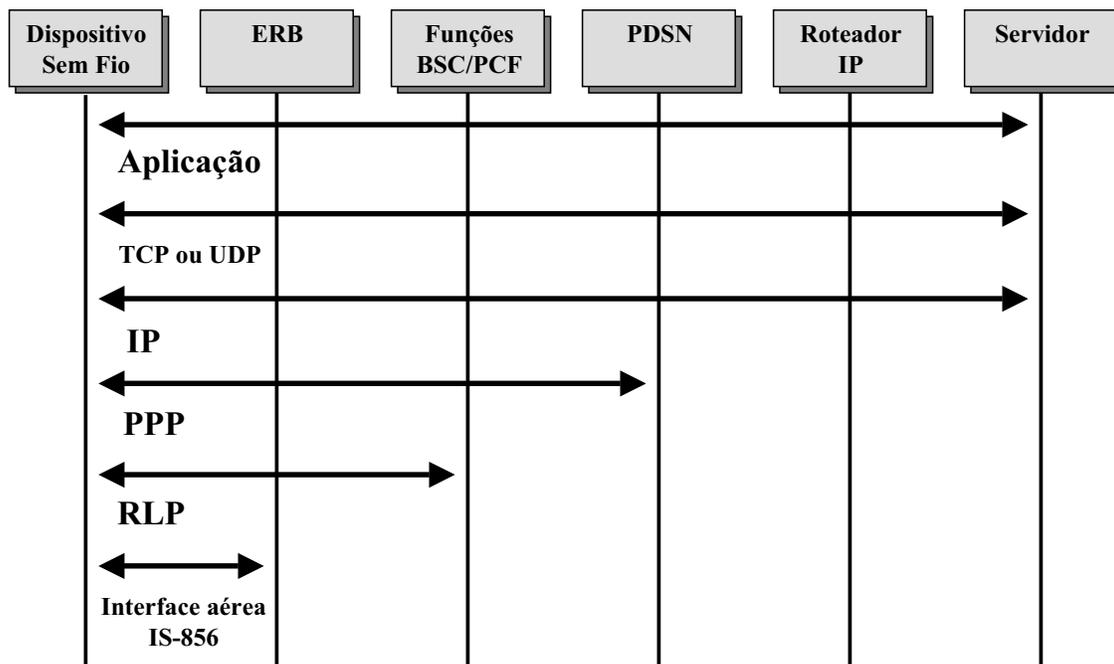


Fig. 2.2: Protocolos IS-856

A seguir são descritas de forma sucinta as principais características da pilha de protocolos do sistema 1xEV-DO.

A camada física do sistema 1xEV-DO é representada na Figura 2.2 pela interface aérea IS-856. Esta camada física baseia-se na tecnologia CDMA e também é otimizada para serviços de dados e

internet. Além disso, esta camada contempla alta eficiência espectral e provê altas taxas de dados de até 3,1 Mbps no enlace direto e 1,8 Mbps no enlace reverso.

Acima da interface aérea do sistema 1xEV-DO está o *Radio Link Protocol* (RLP) cujo objetivo é detecção e correção de erros da interface aérea. O protocolo RLP visa reduzir a taxa de erros a 10^{-6} de maneira que os protocolos existentes nas camadas superiores possam operar efetivamente. Nesta camada é feito o seqüenciamento de pacotes em fluxos de *bytes* e monitoramento dos mesmos de forma a retransmití-los em uma eventual falha.

O *Point-to-Point Protocol* (PPP) representa a camada de enlace usada para carregar o IP. O protocolo PPP e os outros protocolos das camadas superiores desconhecem o uso de uma camada física sem fio de modo que para eles a interface aérea é transparente, ou seja, comportam-se da mesma maneira como se estivessem sobre uma rede fixa. Durante o estabelecimento de uma sessão PPP são negociados os parâmetros de conexão e compressão de cabeçalhos *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) além da alocação de um endereço IP. O PPP também inclui *Cyclic Redundancy Check* (CRC) a fim de identificar erros na transmissão.

Na camada de rede é adotado o protocolo IP não orientado a conexão, isto é, cada pacote IP percorre seu próprio caminho até chegar ao seu destino. No entanto, os pacotes IP podem chegar fora de ordem e serem re-ordenados no seu destino pelas camadas superiores.

Na camada de transporte, uma aplicação pode optar por dois protocolos: o *User Datagram Protocol* (UDP) e o *Transmission Control Protocol* (TCP). O protocolo UDP é um protocolo de transporte do tipo melhor esforço sendo indicado para situações em que a confiabilidade não é necessária. Por outro lado, o protocolo TCP assegura a confiabilidade das comunicações entre usuário e servidor. Cada conexão TCP é única sendo identificada pela combinação do endereço IP e porta TCP. Além disso, o TCP provê mecanismos de detecção e correção de erros.

A seguir é apresentado o exemplo proposto em [23] sobre o fluxo de tráfego no enlace direto para esta pilha de protocolos. Os pacotes originados por uma aplicação qualquer chegam ao PDSN com destino ao endereço IP de um determinado usuário. O PDSN encapsula o pacote IP dentro do cabeçalho PPP. Na seqüência, o PDSN roteia o pacote através do protocolo UDP para o PCF. O PCF remove o cabeçalho UDP, lê a informação do cabeçalho PPP e verifica se o dispositivo está no modo ativo ou inativo; se ativo, encaminha os pacotes para o BSC. O BSC lê o cabeçalho PPP, verifica qual é o destino daquele pacote, isto é, qual a ERB e o setor destino, então encapsula o pacote PPP dentro do RLP que por sua vez é encapsulado em um cabeçalho UDP e este é encaminhado para a ERB e o setor desejado. Finalmente, a ERB remove o cabeçalho UDP e lê a informação RLP e encaminha o pacote para o dispositivo destino por meio da interface aérea 1xEV-DO.

Interface Aérea - Enlace Direto

A interface aérea do sistema CDMA 1xEV-DO RA é designada para otimização de dados [1]. Esta interface possui alta eficiência espectral e provê picos de dados de até 9,2 Mbps por célula com uma portadora de largura de banda de 1,25 MHz.

A técnica básica de acesso do sistema 1xEV-DO RA é o CDMA. Entretanto, para otimizar a velocidade de transmissão é utilizada também a multiplexação por divisão de tempo (TDM), presente no enlace direto. O objetivo da utilização de TDM é maximizar a potência da ERB para um único usuário em um dado instante de tempo. Além desta técnica é empregada a multiplexação por divisão de códigos (CDM) existente nas outras gerações CDMA. Assim, é possível resumir o sistema 1xEV-DO RA como um sistema de técnicas combinadas de TDM e CDM. A Figura 2.3 mostra uma comparação da potência usada por setor para os padrões IS-95 e IS-856.

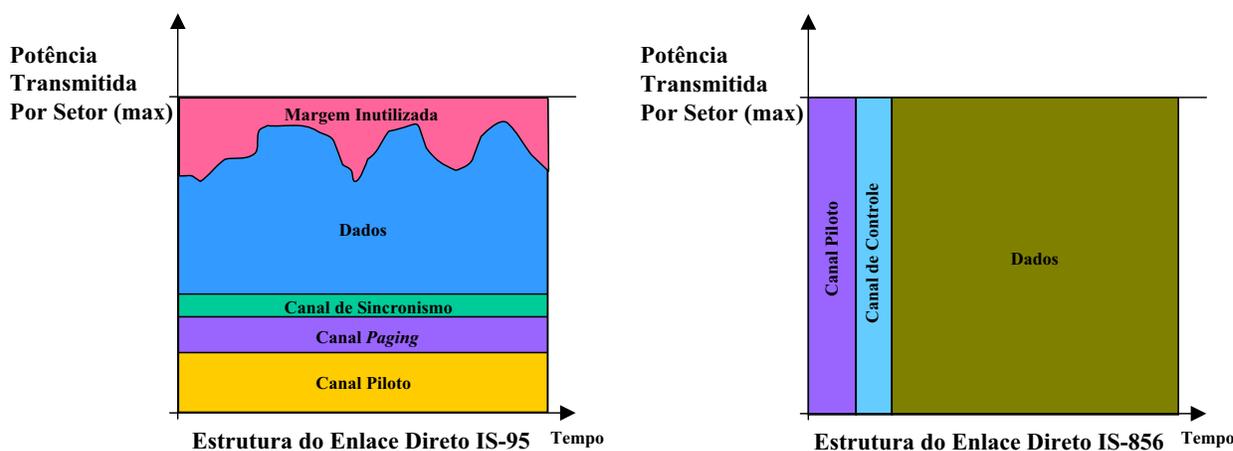


Fig. 2.3: O sistema 1xEV-DO RA maximiza a vazão através do uso eficiente da potência[1]

Cada canal (Piloto, Sincronismo, *Paging* e Dados) no sistema IS-95 é transmitido durante todo o tempo, pois, neste sistema não é utilizada a técnica de compartilhamento de recursos TDM. Além disso, a cada um dos canais é reservada uma certa fração do total de potência do setor. Por outro lado, nos canais equivalentes no sistema IS-856 são transmitidos em um certo intervalo de tempo porém, com toda a potência. O uso eficiente dos recursos de potência permite não somente aumentar a área de cobertura da célula, mas também aumentar a relação sinal interferência e ruído SINR (*Signal-to-Interference-and-Noise-Ratio*) para um número limitado de usuários [24].

A estrutura do enlace direto é definido em termos de quadros de comprimento de 26,67 ms. Cada quadro 1xEV-DO é composto por 16 *Time-Slots* (TSs) cujo comprimento de cada um é de 1,67 ms conforme mostrado na Figura 2.4.

A condição do canal é determinada pela transmissão de pilotos no enlace direto e o terminal

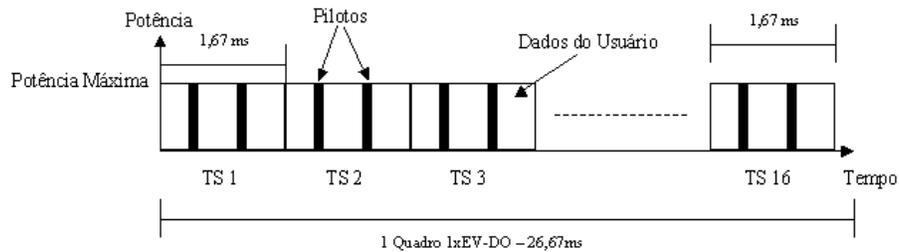


Fig. 2.4: Estrutura do Enlace Direto 1xEV-DO e a sua Divisão em *Time-Slots*

informa a condição do canal através do canal lógico chamado de *Data Rate Control* (DRC) presente no enlace reverso (terminal para a ERB). Os pilotos são transmitidos em intervalos pré-determinados dentro de cada TS como pode ser visto na Figura 2.4.

As taxas de dados alcançadas pelo enlace direto na revisão CDMA 1xEV-DO RA variam de 38,4 kbps a 3072,0 kbps por setor de uma célula. Um dos três esquemas de modulação QPSK, 8PSK e 16QAM é utilizado dependendo da taxa de dados. Além disso, diferentes quantidades de TSs são alocados para cada taxa de dados. A Tabela 2.1 exhibe em detalhes as diferentes taxas de dados em função da modulação, dos TSs e o tamanho dos pacotes.

Tab. 2.1: Tipos de Modulação por Taxas de Dados - Enlace Direto 1xEV-DO RA

Classe de Cobertura	Taxa (kbps)	Bits por Pacote	Time Slots	Modulação	Fator de Código	Duração/Pacote (ms)
1	38,4	1024	16	QPSK	1/5	26,67
2	76,8	1024	8	QPSK	1/5	13,33
3	153,6	1024	4	QPSK	1/5	6,67
4	307,2	1024	2	QPSK	1/5	3,33
5	614,4	1024	1	QPSK	1/3	1,67
6	921,6	3072	2	8PSK	1/3	3,33
7	1228,8	2048	1	QPSK	1/3	1,67
8	1536,0	5120	2	16QAM	1/3	3,33
9	1843,2	3072	1	8PSK	1/3	1,67
10	2457,6	4096	1	16QAM	1/3	1,67
11	3072,0	5120	1	16QAM	1/3	1,67

A quantidade de TSs alocados varia de acordo com a taxa de dados. Desta forma, para manter um desempenho equilibrado entre as vazões de todos os usuários ativos sob diversas condições de canais são alocados mais TSs para taxas menores e menos TSs para taxas maiores. Por exemplo, na Tabela 2.1 são alocados 16 TSs para a taxa de 38,4 kbps e 1 TS para a taxa de 2457,6 kbps.

Além disso, sob as condições de um ambiente móvel sem fio, o sinal de rádio frequência pode variar significativamente. Assim, de acordo com a potência do sinal recebido o terminal pode suportar esquemas de modulação de mais alta ordem (mais bits por símbolo) e corretores de erro mais fracos ou utilizar esquemas de modulação mais robustos e corretores de erros mais fortes.

O mecanismo corretor de erro adotado no sistema 1xEV-DO RA trata-se do código convolucional concatenado do tipo turbo em que são introduzidas redundâncias na informação em vários níveis de complexidade [25]. Os dados do usuário são codificados no enlace direto a uma taxa de 1/5 ou 1/3 de acordo com os tamanhos dos pacotes. O codificador turbo é constituído de dois codificadores convolucionais em paralelo com um *interleaver* responsável pelo embaralhamento de informações para que o erro ocorrido em uma seqüência de bits não atrapalhe a comunicação com o receptor das informações do usuário. Na saída deste codificador turbo os dados codificados são concatenados e repetidos até atingir o nível desejado de símbolos dependendo do fator de repetição exibido na Tabela 2.1. Maiores informações sobre o codificador turbo podem ser obtidas em [26].

Escalonador de Equidade Proporcional

O padrão do sistema 1xEV-DO RA [17] não especifica o escalonador de dados a ser utilizado no gerenciamento de recursos do sistema [18]. Assim, várias propostas tem sido sugeridas e uma das mais aceitas pela indústria trata-se do escalonador de dados *Proportional Fair* (PF) ou Equidade Proporcional [27]. Este escalonador visa atender o usuário que estiver com uma condição do sinal acima da média observada, ou seja, aproveita a variação temporal do canal atendendo o usuário nos momentos em que está com boas condições de canal, porém o algoritmo mantém o critério de equidade entre usuários servindo a todos de uma maneira igualitária na média. Maiores detalhes deste escalonador podem ser encontrados no Capítulo 3.

Soft Handoff Virtual

O sistema 1xEV-DO adota o mecanismo de *handoff* conhecido como *soft handoff virtual* via seleção adaptativa de servidor. Este mecanismo elimina o *overhead* existente do *soft handoff* nas gerações CDMA anteriores uma vez que apenas uma ERB serve o terminal durante o processo de *handoff*. Os terminais indicam a mudança de ERB via o canal DRC. Quando a rede detecta uma mudança de ERB no canal DRC, ela passa por uma fase de transição e na seqüência roteia os dados do terminal para a nova ERB. No entanto, na nova versão do sistema 1xEV-DO RA é eliminada a fase de transição via o uso do canal *Data Source Control* (DSC) [18]. Através deste canal é informado com antecedência o exato instante de tempo em que ocorrerá a troca ERBs. Desta forma, o *handoff* ocorre no instante de tempo informado sem a fase de transição o que garante o aumento da eficiência no processo *handoff* do sistema 1xEV-DO.

2.1.2 Sistema UMTS/HSDPA (3GPP Release 5)

Introdução

O termo *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) é adotado pelo grupo 3GPP para designar um sistema celular global 3G. O sistema UMTS é o sucessor 3G da linha GSM para as operadoras de sistemas móveis. Neste sistema, a primeira interface aérea padronizada foi o WCDMA [3] (*Wideband CDMA*) contido no 3GPP Release 99 em que são atingidas taxas de dados de até 384 kbps para áreas de grande cobertura.

Anos mais tarde surgiu a nova interface aérea HSDPA [15] também padronizada pelo grupo 3GPP sendo esta capaz de transmitir dados com taxas de até 14,4 Mbps no enlace direto em uma portadora de largura de banda de 5 MHz. Além disso, esta interface mantém a compatibilidade com o WCDMA além de introduzir avanços significativos no sistema UMTS por meio de novas capacidades técnicas que quando combinadas oferecem aos seus usuários finais altas taxas de dados e baixas latências. Tais avanços são obtidos através dos mecanismos rápidos e complexos de controle de canais baseados em quadros de curta duração, modulação adaptativa, codificação dos canais, mecanismos de retransmissão como o ARQ híbrido (H-ARQ) e rápidos escalonadores de dados que possibilitam o aumento da eficiência do sistema UMTS/HSDPA [28].

Além desta interface foi proposto no 3GPP Release 6, o HSUPA [19] (*High Speed Uplink Packet Access*) para o enlace reverso (terminal para ERB). Nesta interface foram adicionadas novas melhorias no enlace reverso sendo possível a transmissão de dados com taxas de até 5,76 Mbps. Neste trabalho foi adotado como objeto de estudo a interface aérea HSDPA referente ao enlace direto do sistema UMTS/HSDPA.

Nesta subseção serão detalhados alguns aspectos chaves do sistema UMTS/HSDPA para uma melhor compreensão das suas características utilizadas ao longo da tese.

Arquitetura de Rede

A arquitetura da rede 3G UMTS pode ser agrupada em três elementos principais: o *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) na qual gerencia toda funcionalidade relacionada ao rádio, a rede núcleo ou em inglês *Core Network* (CN) que é a responsável pela comutação, roteamento das chamadas e as conexões de dados para as redes externas e finalmente o elemento *User Equipment* (UE) na qual corresponde ao terminal móvel e o seu módulo de identificação do usuário *UMTS Subscriber Identity Module* (USIM) [3]. A Figura 2.5 exhibe a arquitetura do sistema UMTS.

O UTRAN consiste basicamente de dois elementos de rede distintos: Nó B e *Radio Network Controller* (RNC).

O Nó B é uma entidade que suporta a transmissão e recepção em rádio frequência. Ele executa a

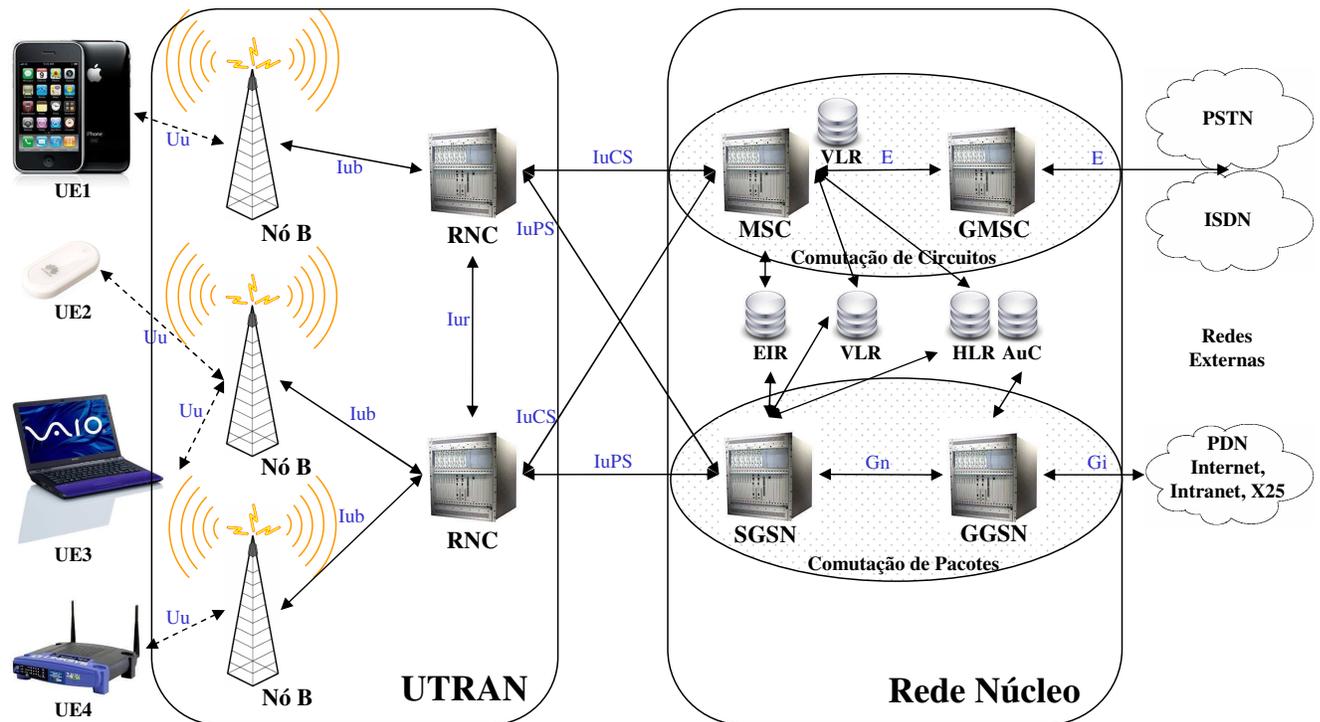


Fig. 2.5: Arquitetura de Rede UMTS

codificação de canal, o embaralhamento de informações, o gerenciamento dos recursos de rádio e o controle de potência entre outras atividades. Este elemento também é conhecido pelo termo genérico ERB.

A RNC por sua vez controla os recursos de rádio dentro do seu domínio, isto é, todos os Nós B conectados a ela. Além disso, a RNC exerce o papel de ponto de acesso para a rede núcleo. Este elemento corresponde logicamente à BSC.

Os principais elementos das redes núcleo são: *Home Location Register (HLR)*, *Mobile Services Switching Center/Visitor Location Register (MSC/VLR)*, *Equipment Identity Register (EIR)*, *Authentication Center (AuC)*, *Gateway MSC (GMSC)*, *Serving GPRS Support Node (SGSN)* e *Gateway GPRS Support Node (GGSN)*.

O HLR é uma base de dados onde são armazenadas cópias dos perfis de serviços dos usuários. Este perfil de serviço consiste em informações sobre os serviços permitidos para o usuário, áreas de *roaming* proibidas e informações sobre serviços suplementares como, por exemplo, o status do encaminhamento da chamada e o seu respectivo número de encaminhamento. Estas informações são armazenadas quando novos usuários são cadastrados no sistema e enquanto estes usuários permanecerem com suas contas ativas no sistema.

Associado ao HLR o elemento AuC é responsável pelos processos de autenticação dos usuários e

o gerenciamento dos parâmetros de segurança.

O elemento combinado MSC/VLR é composto pelo elemento de comutação MSC e também pela base dados VLR. O MSC executa funções de comutação e coordena as chamadas e as rotinas de roteamento dentro da rede. Na base de dados VLR associada ao MSC são armazenadas informações sobre o perfil de serviços do usuário visitante assim como a localização do usuário dentro da rede.

Além das bases de dados anteriormente citadas, a base de dados EIR armazena os números de identidade internacional dos terminais móveis, ou seja, armazena os *International Mobile Equipment Identities* (IMEIs), os quais são únicos por EIR.

O elemento GMSC é o ponto de acesso do sistema UMTS para as redes de comutação de circuitos. Neste elemento todas conexões de entrada ou de saída que envolvam comutação de circuitos passam por este elemento.

O outro elemento SGSN possui funcionalidade semelhante ao MSC/VLR porém é utilizado em serviços de comutação de pacotes. Este elemento age como uma interface lógica para o UTRAN sendo responsável pela entrega dos pacotes para o Nó B correto.

Por fim, o elemento GGSN atua como uma interface lógica para redes de dados externas ou *Packet Data Network* (PDN). Por exemplo, para uma rede IP externa, o GGSN é visto como um roteador IP. Além disso, o GGSN pode incluir *firewall* e outros mecanismos de filtragem de pacotes. O GGSN também possui funcionalidades semelhantes ao GMSC, no entanto, aplicável somente a serviços baseados na comutação de pacotes.

Além dos elementos de rede descritos, várias interfaces entre os elementos de rede estão definidas. As principais interfaces abertas são: a interface Cu, a interface Uu, a interface Iub, a interface Iur, a interface IuCS usada na comutação de circuitos e a interface IuPS utilizada na comutação de pacotes conforme é ilustrado na Figura 2.5.

As redes externas podem ser divididas em dois grupos de acordo com a arquitetura UMTS: as redes comutadas por circuitos como por exemplo as tradicionais redes de telefonia fixa, e as redes comutadas por pacotes como a internet.

Arquitetura de Protocolos

Um modelo de protocolo geral, como mostrado na Figura 2.6, é definido para todas as interfaces UMTS. Esta arquitetura caracteriza-se pela sua modularidade sendo composta de várias camadas e planos que são independentes logicamente um do outro [2]. Há duas camadas principais definidas: *Radio Network Layer* (RNL) e *Transport Network Layer* (TNL). Além disso, existe quatro planos definidos: *Control Plane* (CP), *User Plane* (UP), *Transport Network Control Plane* (TNCP) e *Transport Network User Plane* (TNUP).

O plano CP é responsável por todo controle da sinalização UMTS, compreendendo o protocolo

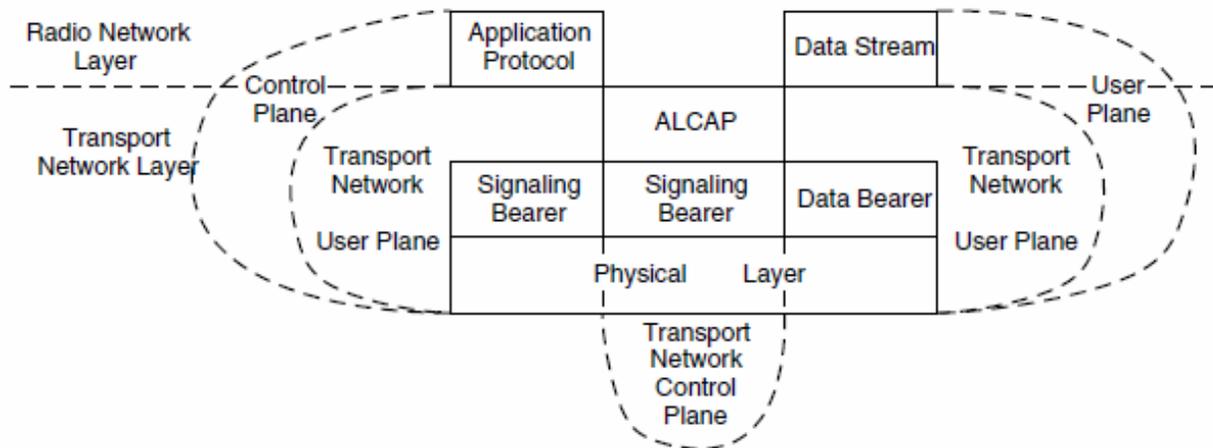


Fig. 2.6: Arquitetura de Protocolos para UMTS[2]

de aplicação e a sinalização do *bearer*. O outro plano UP gerencia toda a transmissão e a recepção de informações relacionadas ao usuário como a codificação de voz numa chamada de voz ou o fluxo de dados envolvido numa conexão internet. No plano TNCP são executadas funções relacionadas ao controle de sinalização na camada TNL, o que corresponde as transações executadas entre CP e UP. Este plano isola o CP do UP de modo que a comunicação entre o protocolo de aplicação, no CP, e os dados do *bearer*, no UP, sejam intermediados pelo *Access Link Control Application Part* (ALCAP) no TNCP. Por fim, o plano TNUP é responsável pelo transporte da sinalização do usuário e das informações compreendendo os dados do *bearer*, no UP, e a sinalização do *bearer*, no CP.

Protocolos de Interface de Rádio

Os protocolos de interface de rádio são responsáveis por estabelecer, reconfigurar e liberar os serviços de *bearer* de rádio [3]. Estes protocolos estão organizados em camadas assim como ilustra a Figura 2.7. Esta figura contém somente os protocolos que são visíveis no UTRAN. Acima da camada física estão a camada de enlace de dados (Camada 2) e a camada de rede (Camada 3). Na interface de rádio UTRA FDD, a camada 2 é dividida em subcamadas. No plano CP, a camada 2 contém duas subcamadas: *Medium Access Control* (MAC) e *Radio Link Control* (RLC). No outro plano UP, há mais dois protocolos: *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP) e *Broadcast/Multicast Control Protocol* (BMC). Finalmente, a camada 3 possui apenas um único protocolo chamado de *Radio Resource Control* (RRC) que pertence ao plano CP.

A camada física oferece serviços para a camada MAC via canais de transporte.

A camada MAC por sua vez provê serviços para a camada RLC através de canais lógicos.

A camada RLC fornece serviços para as camadas superiores via *Service Access Point* (SAP) que

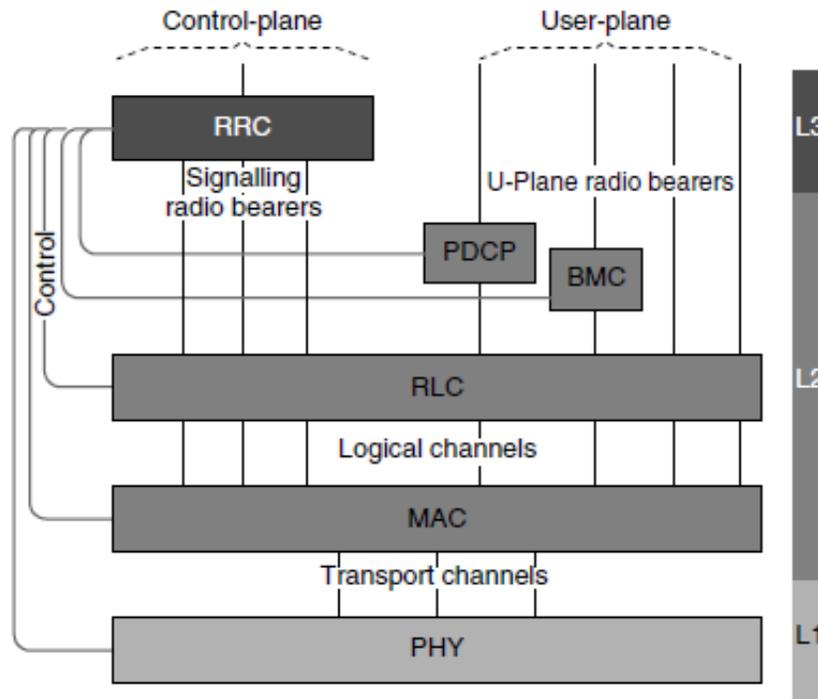


Fig. 2.7: Arquitetura de Protocolos de Interface de Rádio UTRA FDD[3]

descreve como a RLC deve manipular os pacotes de dados e se, por exemplo, a função *Automatic Repeat Request* (ARQ) será usada. No plano CP, os serviços RLC são utilizados pelo protocolo RRC para a sinalização de transporte. No plano UP, os serviços RLC são usados pelos protocolos PDCP, BMC ou ainda pelos protocolos de camadas superiores. O protocolo RLC pode operar em três modos: transparente, não confirmado e confirmado. No modo transparente as *Protocol Data Units* (PDUs) das camadas superiores são transmitidas sem a inclusão de informações extras, com exceção das informações de segmentação e remontagem de pacotes [2]. No modo não confirmado as PDUs das camadas superiores são transmitidas sem a garantia de entrega. Por fim, no modo confirmado as PDUs das camadas superiores são transmitidas com garantia de entrega e no caso de insucesso da transmissão a entidade envolvida é notificada.

O protocolo PDCP existe somente no domínio de comutação de pacotes. Sua principal função é a compressão de cabeçalhos.

O outro protocolo BMC é utilizado para transmitir mensagens sobre a interface de rádio originadas do *Cell Broadcast Center*, incluindo as mensagens relacionadas ao serviço de *Short Message Service* (SMS).

Por fim, o protocolo RRC oferece serviços para as camadas superiores via SAP. Estes serviços são utilizados pelos protocolos das camadas superiores no lado UE e pelo protocolo *Iu Radio Access*

Network Application Part (RANAP) no lado UTRAN. Toda a sinalização das camadas de alto nível (gerenciamento da mobilidade, controle da chamada, gerenciamento de sessão, e assim por diante) é encapsulada em mensagens RRC para a transmissão na interface de rádio. O controle das interfaces entre RRC e as camadas inferiores são utilizadas para transmitir informações e comandos para executar configurações dos protocolos das camadas inferiores (canais lógicos, canais de transporte, canais físicos), realizar medições, gerar relatórios das medições, e outros.

Características Chaves HSDPA

Várias melhorias foram incluídas no sistema UMTS/WCDMA versão R'99 e padronizadas pelo grupo 3GPP sob a sigla HSDPA [15]. O principal objetivo do HSDPA nas redes UMTS é prover taxas de dados de até 14,4 Mbps no enlace direto para serviços do tipo melhor esforço, isto é, o HSDPA vai além do requisito 3G de 2 Mbps determinado pelo ITU [29]. As principais melhorias introduzidas no sistema UMTS são:

- um novo canal comum *High Speed Downlink Shared Channel* (HS-DSCH), que pode ser compartilhado simultaneamente por múltiplos usuários;
- um curto *Transmission Time Interval* (TTI) de 2ms, na qual possibilita transmissões de alta velocidade na camada física;
- escalonador de dados rápido;
- *Adaptive Modulation and Coding* (AMC);
- rápidas retransmissões baseadas na técnica *Hybrid Automatic Repeat reQuest* (H-ARQ).

Interface Aérea - Enlace Direto

A nova interface aérea HSDPA [15] estabelecida pelo grupo 3GPP adiciona três novos canais ao sistema UMTS. Estes canais são: o canal HS-DSCH (*High Speed Downlink Shared Channel*), o canal HS-SCCH (*High Speed Shared Control Channel*) e o canal HS-DPCCH (*High Speed Dedicated Physical Control Channel*).

O canal HS-DSCH é compartilhado com um SF (*Spread Factor*) de 16 códigos CDMA. Em cada TTI de 2 ms, um SF fixo de 16 é usado com o máximo de 15 códigos paralelos no canal HS-DSCH. O número de códigos em uma célula HSDPA é configurado no Nó B. Estes códigos podem ser associados a um único usuário ou divididos entre vários usuários HSDPA [30]. Além disso, não há mais o controle de potência no HSDPA pois, o canal HS-DSCH é transmitido numa potência constante

enquanto a modulação (16QAM, QPSK), a codificação e o número de códigos pode variar conforme as condições do canal.

A alocação dinâmica dos recursos antes do começo de cada TTI é sinalizada para os usuários no novo canal de controle presente no enlace direto chamado de HS-SCCH. Através deste canal são informados: o esquema de modulação, a codificação e as informações relacionadas à retransmissão H-ARQ para cada usuário UE (*User Equipment*). Um único usuário pode monitorar até 4 HS-SCCHs.

O canal HS-DPCCH é responsável pela sinalização no enlace reverso do sistema UMTS/HSDPA através das mensagens ACK e NACK. Além disso, a condição instantânea do canal também é informada por meio do CQI (*Channel Quality Indicator*), isto é, o CQI reflete a SINR do canal. Com base no CQI, a ERB (Nó B) pode determinar a cada TTI os esquemas de modulação, a codificação e o número de códigos durante a comunicação [28]. A Figura 2.8 mostra de maneira simplificada os dados e as sinalizações trocadas durante a transmissão UMTS/HSDPA.

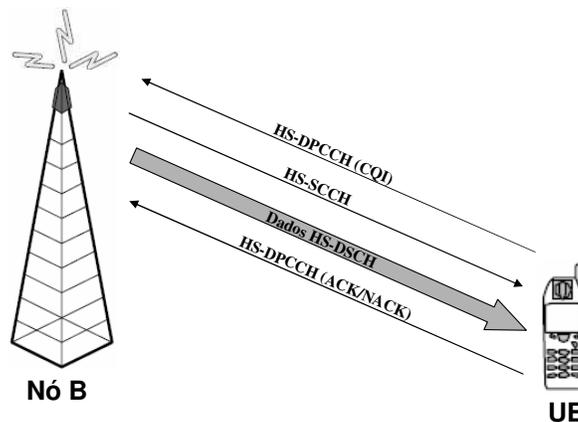


Fig. 2.8: Esquema de transmissão simplificado HSDPA[4]

Além dos novos canais, outra idéia chave do HSDPA para aumentar a vazão de dados, segundo o 3GPP Release 5 [15], trata-se dos esquemas de modulação e codificação adaptativa (AMC), da retransmissão de dados via H-ARQ e dos quadros de transmissão de curta duração. Vários esquemas AMCs são propostos incluindo as modulações QPSK e 16QAM e as taxas de codificação 1/4 a 3/4. Dependendo da condição do canal informada via canal CQI pelo terminal, o Nó B seleciona o esquema AMC mais adequado para a transmissão do pacote naquele momento. Se o usuário apresentar condição de canal favorável, ele poderá receber pacotes em altas taxas dados através da modulação 16QAM e a taxa de codificação 3/4. As taxas de dados ainda podem ser mais altas quando o número de códigos utilizados for igual a 15. Em resumo, a Tabela 2.2 mostra as principais características do enlace direto do sistema UMTS/HSDPA conforme o 3GPP Release 5. Na coluna Inter TTI cada unidade equivale a 2 ms.

Por fim, o mecanismo HARQ possibilita a retransmissão de pacotes com erros em até 10 ms, em

Tab. 2.2: Tipos de Modulação por Taxas de Dados - Enlace Direto HSDPA

Categoria HS-DSCH	Taxa (Mbps)	Bits por Pacote	Inter TTI	Modulação	Nº de Códigos
Cat. 1	1,2	7300	3	QPSK/16QAM	5
Cat. 2	1,2	7300	3	QPSK/16QAM	5
Cat. 3	1,8	7300	2	QPSK/16QAM	5
Cat. 4	1,8	7300	2	QPSK/16QAM	5
Cat. 5	3,6	7300	1	QPSK/16QAM	5
Cat. 6	3,6	7300	1	QPSK/16QAM	5
Cat. 7	7,2	14600	1	QPSK/16QAM	10
Cat. 8	7,2	14600	1	QPSK/16QAM	10
Cat. 9	10,2	20432	1	QPSK/16QAM	15
Cat. 10	14,4	28776	1	QPSK/16QAM	15
Cat. 11	0,9	3650	2	QPSK	5
Cat. 12	1,8	7300	1	QPSK	5

diferentes codificações, estas ortogonais entre si. O terminal, ao receber um pacote corrompido, o salva e depois o combina com suas retransmissões.

Escalonador de Dados

Uma das principais melhorias introduzidas no HSDPA em relação ao WCDMA R'99 [15] foi a mudança de localização do escalonador de dados da RNC para o Nó B ficando mais próximo da interface aérea. Através desta mudança o escalonador de dados pode obter mais rapidamente as informações sobre as condições do canal do terminal via canal CQI e desta forma, adaptar a alocação da taxa de dados.

O padrão 3GPP Release 5 [19] não especifica o escalonador de dados a ser adotado no sistema UMTS/HSDPA uma vez que isto é naturalmente uma questão de implementação específica de cada fabricante de telecomunicações [3]. Entretanto, os escalonadores de dados mais aceitos pela indústria são: o *Round Robin* (RR), o *Maximum Carrier to Interference* (C/I) e o *Proportional Fair* (PF). O escalonador de dados RR baseia-se no atendimento por ordem de chegada independente das condições de canal. Os outros escalonadores C/I e PF tomam vantagem das oscilações de canal para prover alocações de recursos. Maiores detalhes sobre os escalonadores de dados utilizados neste estudo podem ser vistos no Capítulo 3.

Hard Handoff

No sistema HSDPA o mecanismo *soft handoff* não é utilizado, pois isto implicaria em mais códigos nos canais de alta velocidade para executar o processo *handoff* o que causaria interferências adicionais. Assim, optou-se por utilizar o mecanismo de *hard handoff* no sistema HSDPA. Em complemento a este mecanismo o conceito de *Fast Cell Selection* (FCS) é empregado no sistema HSDPA de forma a diminuir a interferência e aumentar a capacidade do sistema [3]. Através da técnica FCS o terminal monitora a SINR de um conjunto de ERBs chamado de *active set*. No momento em que uma outra ERB apresenta uma SINR maior do que a ERB atual, o terminal é transferido para a respectiva ERB.

2.1.3 WiMAX (IEEE 802.16e)

Introdução

Nos últimos anos, o crescimento de novos serviços baseados em aplicações multimídia como VoIP, videoconferência e VoD (*Video on Demand*) aumentaram de forma significativa a demanda por banda larga e também por novas tecnologias de redes de acesso sem fio. Uma destas novas tecnologias criadas para este fim trata-se do padrão IEEE 802.16[6], também conhecido como WiMAX (*Worldwide interoperability for Microwave Access*).

O padrão IEEE 802.16 definido pelo IEEE especifica uma interface aérea para redes metropolitanas do tipo WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*). Este padrão já possui um *framework* de QoS pré-definido e oferece altas taxas de dados no enlace direto de até 40 Mbps. Além disso, o sistema WiMAX apresenta-se como uma alternativa de baixo custo quando comparadas à redes de acessos cabeadas como o DSL (*Digital Subscriber Line*) uma vez que permite conectar grandes áreas geográficas sem a necessidade de investimentos em infra-estruturas de alto custo.

Uma outra versão mais recente o padrão IEEE 802.16e[31] introduz novas melhorias e atributos para o suporte à mobilidade. Em relação às novas melhorias destacam-se: o acesso baseado em OFDM com o suporte de canais com largura de banda variáveis de 1,25 MHz a 20 MHz, a nova modulação de alta ordem 64QAM, a utilização da tecnologia de múltiplas antenas MIMO e o mecanismo de retransmissão automática H-ARQ.

Nesta subseção serão detalhadas algumas características técnicas relevantes do sistema WiMAX para melhor compreensão dos conceitos utilizados ao longo deste trabalho.

Arquitetura de Rede

O padrão IEEE 802.16e[31] provê a interface aérea para o WiMAX com especificações nas camadas física e MAC, porém, não define completamente a rede WiMAX fim-a-fim. Desta forma, o Fórum WiMAX criou o *Network Working Group* (NWG), na qual é responsável pelo desenvolvimento da arquitetura e dos protocolos além dos requisitos de rede para o sistema WiMAX, usando o padrão IEEE 802.16e como interface aérea [5].

O WiMAX NWG desenvolveu um modelo referência de rede para servir como um *framework* da arquitetura no desenvolvimento WiMAX e assim garantir a interoperabilidade entre vários fornecedores de equipamentos WiMAX[5]. A Figura 2.9 ilustra o modelo referência de rede na qual consiste das seguintes entidades lógicas com suas respectivas interfaces (R1-R5): *Mobile Station* (MS), *Access Services Network* (ASN) e *Connectivity Service Network* (CSN).

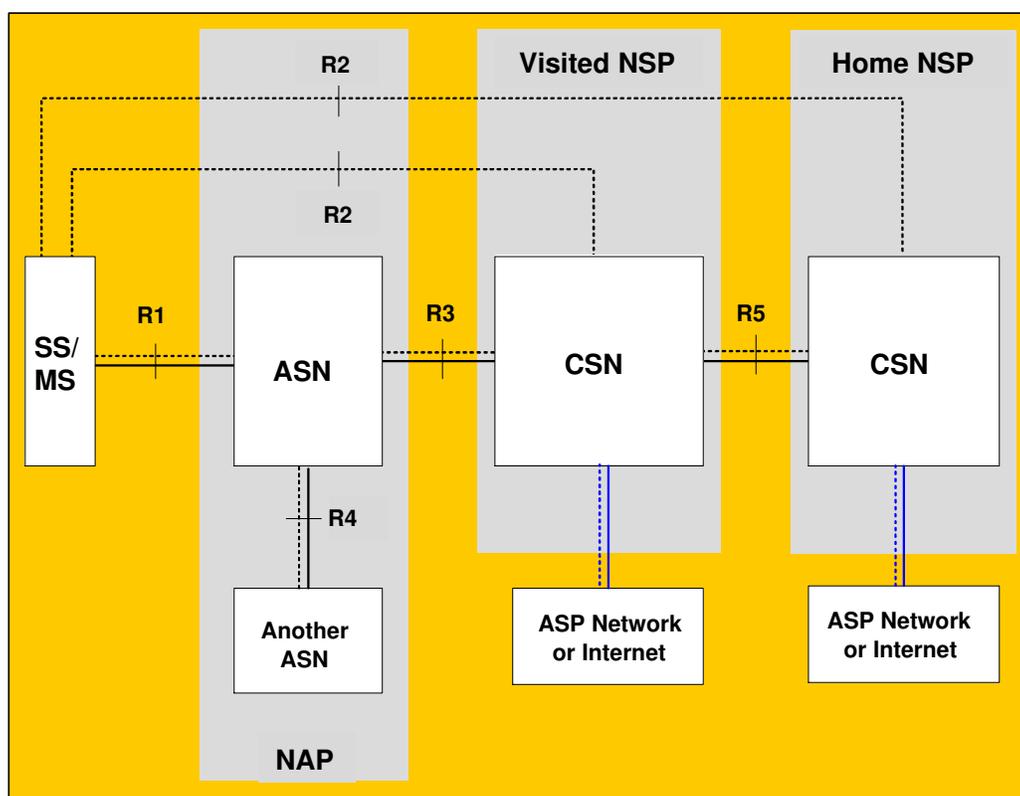


Fig. 2.9: Modelo Referência de Rede WiMAX[5]

A entidade lógica *Subscriber Station* (SS)/MS representa o usuário final para a rede de acesso.

A outra entidade lógica ASN é composta por *Base Stations* (BS) e *gateways* de acesso chamados de ASN-GW[32]. A BS é responsável por prover a interface aérea ao MS. Enquanto, o ASN-GW age como ponto de agregação de tráfego de camada 2. As funções adicionais do ASN-GW incluem

o gerenciamento de recursos de rádio, *paging*, o controle de admissão, o *cache* de perfis de usuário, a encriptação de chaves, o estabelecimento e o gerenciamento de tunelamento com as BSs, o roteamento para o CSN selecionado e etc.

A última entidade lógica CSN é definida como um conjunto de funções de rede que oferece serviços de conectividade IP para os usuários WiMAX[5]. O CSN pode conter várias funcionalidades de elementos de redes como roteadores, servidores *Authentication, Authorization e Accounting* (AAA), bases de dados de usuários e mecanismos de *interworking* entre outras funcionalidades.

A Figura 2.10 mostra a arquitetura de rede WiMAX em maior nível de detalhe das entidades lógicas ASN e CSN.

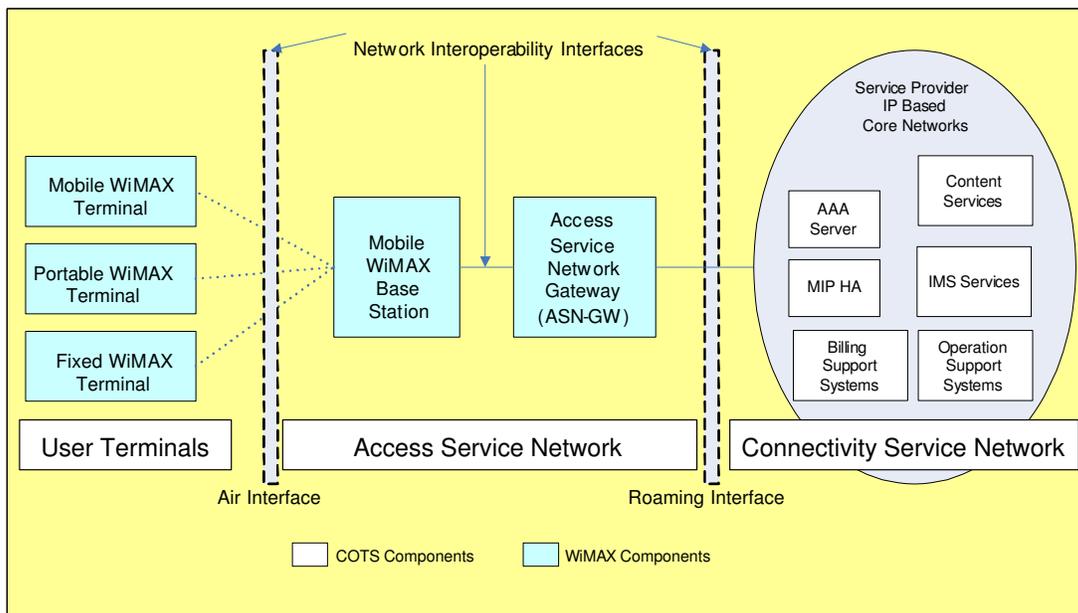


Fig. 2.10: Arquitetura de Rede WiMAX Baseada em IP[5]

Arquitetura de Protocolos

A arquitetura de protocolos definida no padrão IEEE 802.16 é mostrada na Figura 2.11. O padrão IEEE 802.16 define somente as camadas física e MAC. A camada MAC é dividida em três subcamadas: a *Convergence Sublayer* (CS), a *Common Part Sublayer* (CPS) e a *Security Sublayer*. Abaixo da camada MAC, existe a camada física.

A camada física (PHY) possui diversas especificações, onde cada uma delas é apropriada a uma dada faixa de frequência.

A *Security Sublayer* é responsável pela autenticação, criptografia, descryptografia e gerenciamento de chaves.

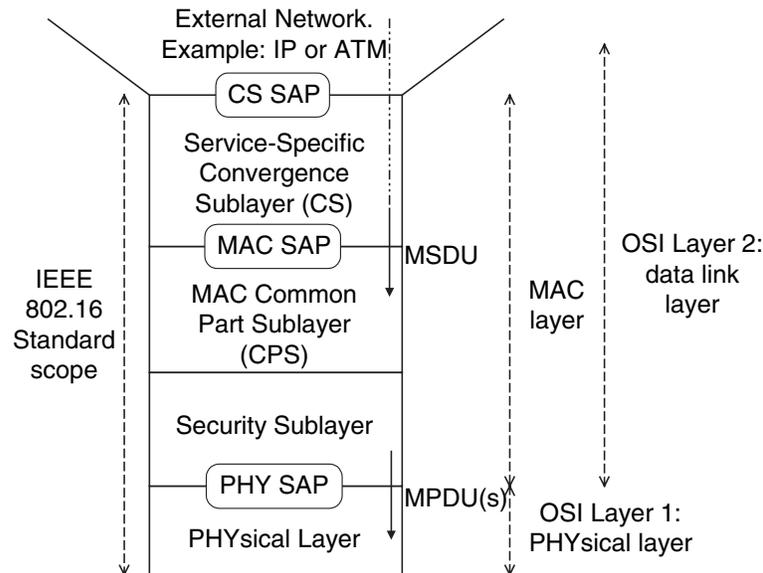


Fig. 2.11: Pilha de Protocolos do IEEE 802.16[6]

A outra subcamada CPS contém as principais funcionalidades da camada MAC como a alocação de largura de banda, o estabelecimento e a manutenção de conexões [7].

A última subcamada CS faz o mapeamento de dados da rede externa em *Service Data Units* (SDU). Atualmente, a CS oferece suporte ao *Asynchronous Transfer Mode* (ATM) e também para protocolos baseados em pacotes como o IPv4, IPv6 e Ethernet.

Interface Aérea - Enlace Direto

O padrão IEEE 802.16e[31] define duas possíveis topologias de rede: a topologia *Point-to-Multipoint* (PMP) e a topologia *Mesh*. Na topologia PMP, os elementos são organizados como uma estrutura celular, isto é, uma BS atende a um conjunto de SSs dentro do mesmo setor de antena com transmissões *broadcast*. Toda a comunicação que parte do SS/MS é direcionada e controlada pela BS [33]. A Figura 2.12 ilustra a topologia PMP. Por outro lado, na topologia *Mesh* os elementos de rede são organizados como nas redes *ad hoc* e o escalonamento é distribuído entre os elementos de rede. Neste estudo somente a topologia PMP é considerada.

O caminho de comunicação entre SS/MS e BS possui duas direções: o enlace direto da BS para o SS/MS e o enlace reverso do SS/MS para a BS. A interface aérea é baseada na técnica de multiplexação OFDM em que a banda é dividida em um conjunto de subcanais modulados por subportadoras de banda estreita ortogonais entre si conforme mostrado na Figura 2.13. A estrutura da subportadora OFDM consiste basicamente em três tipos de subportadoras: subportadora de dados para a transmissão de dados, subportadora piloto para propósitos de sincronização e estimativas e subportadoras

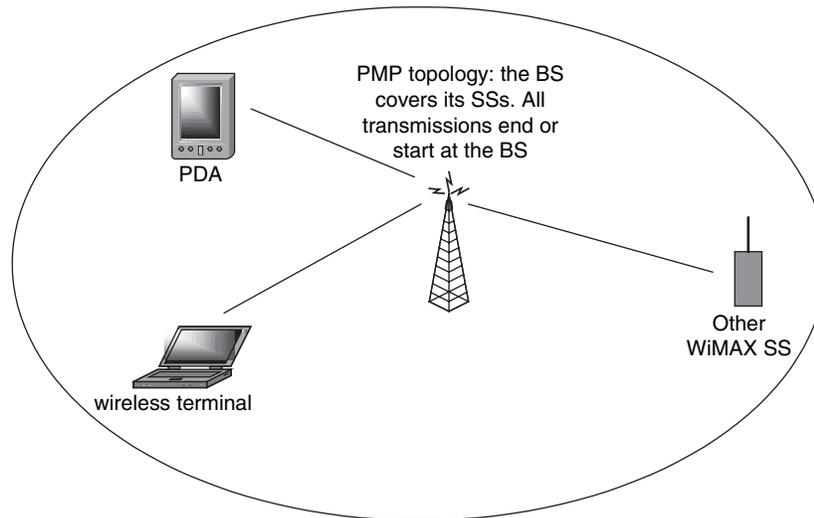


Fig. 2.12: Topologia PMP[7]

nulas para banda de guarda e DC.

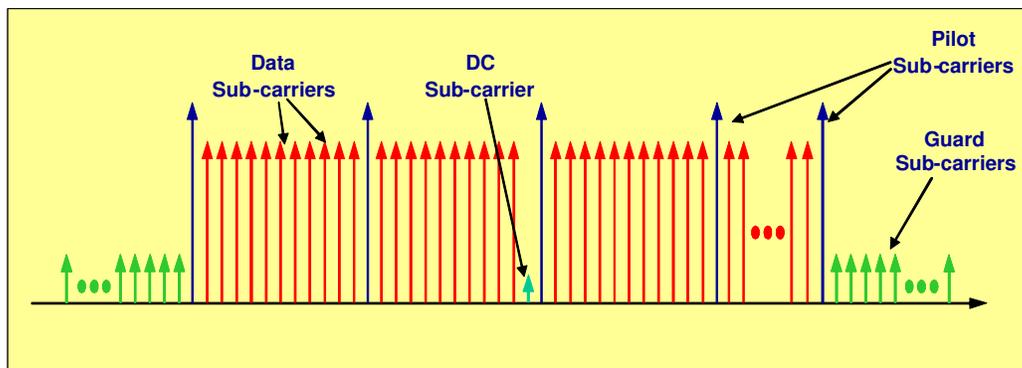


Fig. 2.13: Estrutura da Subportadora OFDM[5]

Os recursos no sistema WiMAX estão disponíveis no domínio de tempo através de símbolos OFDM e no domínio de frequência por meio de subportadoras. Os recursos podem ser organizados em subcanais para a alocação de usuários individuais. O *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) é um esquema de múltiplo acesso que provê a multiplexação dos fluxos de dados de múltiplos usuários em subcanais dos enlaces direto e reverso [5].

A unidade mínima de recurso corresponde a um *slot* que é composto por 48 subportadoras de dados, 24 subportadoras piloto em 3 símbolos OFDM [5]. Um grupo de subportadoras contíguas formam um subcanal. A subcanalização é suportada via modo *Adaptive Modulation and Coding* (AMC) que permite alocar fisicamente subportadoras contíguas. Atualmente, existem quatro dimensões de

subcanais diferentes. As dimensões permitidas são: [(6 bins, 1 símbolo), (3 bins, 2 símbolo), (2 bins, 3 símbolo), (1 bin, 6 símbolos)]. Um bin consiste de 9 subportadoras contíguas, sendo 8 destas associadas a dados e uma associada ao piloto. Neste estudo é considerado somente a combinação de 2 bins e 3 símbolos para simplificação das simulações computacionais.

No WiMAX dois tipos de duplexação são especificadas: *Time Division Duplexing* (TDD) e *Frequency Division Duplexing* (FDD). Este estudo preocupa-se somente com a técnica TDD onde cada quadro é dividido em subquadros DL e UL respectivamente enlace direto e enlace reverso. A estrutura do quadro conforme a técnica TDD é mostrada na Figura 2.14. Cada quadro é dividido em subquadros DL e UL separados pelos *Transmit Transition Gap* (TTG) e *Receive Transition Gap* (RTG) a fim de prevenir colisões nas transmissões.

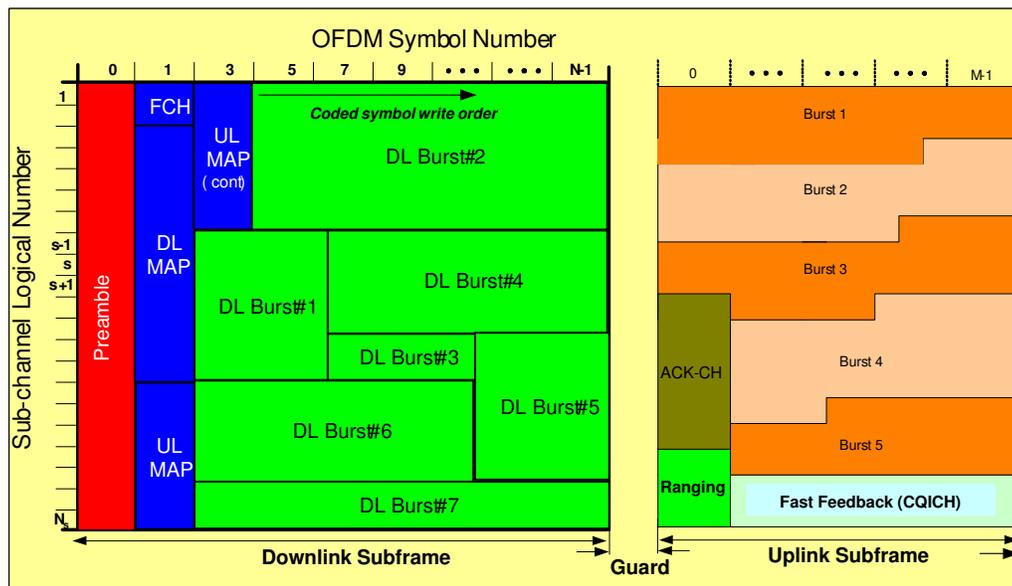


Fig. 2.14: Estrutura do Quadro OFDMA WiMAX[5]

A BS determina dinamicamente a duração dos subquadros. Cada subquadro consiste em um número de *slots*. Os SS/MS e BS devem estar sincronizados para transmitir dados em *slots* pré-determinados. Uma vez que todos os usuários estão sincronizados com o relógio da BS, a BS pode transmitir dados em cada *slot* ao usuário destino. O SS/MS envia uma requisição para a BS através do UL. No DL a BS utiliza uma combinação das mensagens ACK e GR para confirmar a requisição do usuário e fornecer o acesso ao *slots* de dados.

A Tabela 2.3 exibe um resumo das taxas de picos teóricas assumindo um canal de largura de banda de 10 MHz, um quadro com duração de 5 ms e 44 símbolos de dados OFDM de um total de 48 símbolos OFDM [5]. As taxas de dados suportadas no enlace direto podem variar de 1,06 Mbps

até 31,68 Mbps por setor de célula. Um dos três esquemas de modulação QPSK, 16QAM e 64QAM podem ser utilizados dependendo das condições do canal.

Tab. 2.3: Tipos de Modulação por Taxas de Dados - Enlace Direto WiMAX

Modulação	DL(Mbps)	UL(Mbps)
QPSK	1,06	0,78
QPSK	1,58	1,18
QPSK	3,17	2,35
QPSK	6,34	4,70
QPSK	9,50	7,06
16QAM	12,67	9,41
16QAM	19,01	14,11
64QAM	19,01	14,11
64QAM	25,34	18,82
64QAM	28,51	21,17
64QAM	31,68	23,52

Arquitetura de QoS

No padrão IEEE802.16e há uma arquitetura de QoS em que são definidos quatro tipos de serviços: o *Unsolicited Grant Service* (UGS), o *Real-Time Polling Service* (rtPS), o *Non-Real-Time Polling Service* (nrtPS) e o serviço *Best Effort* (BE). O UGS é adequado para serviços que demandam taxas de dados constantes como o T1/E1. O rtPS pode ser utilizado em serviços que permitem taxas de dados variáveis como vídeo MPEG. O nrtPS é designado para serviços que precisam de um desempenho melhor que o BE, como por exemplo, a transferência de arquivos. Por fim, para o serviço BE não há reserva de recurso.

Escalonador de Dados

O escalonador de dados no sistema WiMAX é localizado na BS a fim de garantir rápidas respostas aos requisitos de tráfego e as variações das condições de canal. Assim, o escalonador é responsável por determinar as taxas de dados apropriadas para cada conexão com base no tamanho do *buffer* e nas condições de canal do terminal. As condições de canal do usuário são informadas pelo canal CQICH e de acordo com estas informações o escalonador de dados escolhe a modulação e a codificação adequadas a cada *slot*[5].

O padrão IEEE 802.16e [31] não especifica o algoritmo de escalonamento a ser utilizado. Contudo, os escalonadores de dados mais aceitos pela indústria são: o *Round Robin* (RR), o *Maximum*

Carrier to Interference (C/I) e o *Proportional Fair (PF)*. O escalonador de dados RR faz o atendimento por ordem de chegada desconsiderando as condições de canal do usuário. Por outro lado, os outros escalonadores C/I e PF tomam proveito da variabilidade do canal para fazer o atendimento dos usuários. Maiores detalhes sobre os escalonadores de dados adotados neste estudo podem ser conferidos no Capítulo 3.

Hard Handoff

No padrão IEEE 802.16e [31] são definidos três mecanismos de *handoff*: *Hard Handoff (HHO)*, *Fast Base Station Switching (FBSS)* e *Macro Diversity Handover (MDHO)*. Destes, o mecanismo HHO é mandatório enquanto os outros mecanismos de *soft handoff* FBSS e MDHO são opcionais [7]. O Fórum WiMAX desenvolveu várias técnicas para otimizações no HHO dentro do padrão IEEE 802.16e. Estas melhorias foram implementadas com o objetivo de manter os atrasos causados pelo *handoff* inferiores a 50 ms.

Durante o HHO o MS/SS comunica-se somente com uma BS por vez. A conexão com a BS atual é quebrada antes de estabelecer uma nova conexão com BS vizinha. O *handoff* é executado após a potência do sinal da célula vizinha exceder a potência da célula atual [34]. Na Figura 2.15 é ilustrado o momento em que acontece o *hard handoff* entre duas células WiMAX.

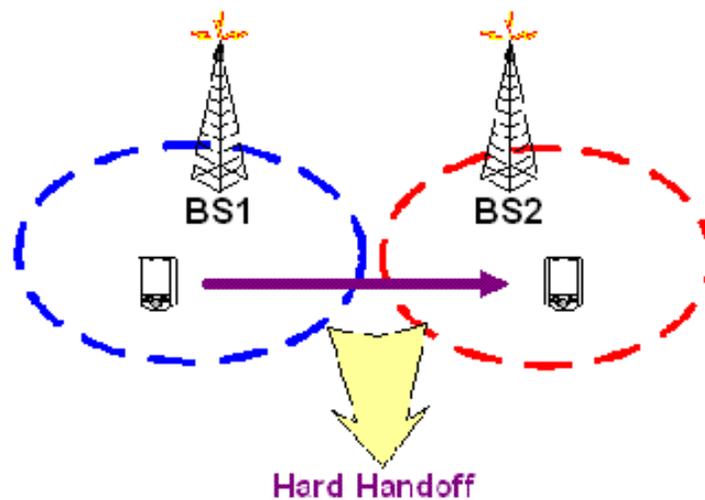


Fig. 2.15: *Hard Handoff* WiMAX[8]

2.2 Conceitos 4G

A futura geração de sistemas móveis visa o atendimento de aplicações multimídia em tempo real, a qualquer hora e em qualquer lugar com estritos requisitos de QoS. Estas aplicações multimídia aumentam de forma significativa a demanda por altas taxas de dados e como consequência poderiam degradar consideravelmente o desempenho das atuais redes 3G. Desta forma, para atender aos estritos requisitos de QoS esperam-se altas taxas de dados nos sistemas 4G com picos de dados superiores a 100 Mbps no enlace direto (ERB para o terminal), ou seja, um aumento na capacidade de pelo menos 10 vezes a capacidade dos sistemas 3G [35].

Um dos conceito-chave dos sistemas 4G trata-se do *roaming* entre diferentes tecnologias de acesso através de uma nova forma de *handoff* conhecida como *handoff* vertical. A Figura 2.16 ilustra os novos conceitos *handoff* vertical e *handoff* horizontal. A diferença básica entre eles está diretamente relacionada ao fato do *handoff* acontecer entre sistemas heterogêneos ou homogêneos. O *handoff* vertical ocorre nas situações em que o terminal sofre *handoff* entre sistemas heterogêneos, por exemplo, o *handoff* entre os sistemas WLAN e GSM [36]. Enquanto o *handoff* horizontal assim como o *handoff* convencional ocorre quando o terminal move-se de uma célula para outra célula dentro do mesmo sistema, por exemplo, de uma célula GSM para uma outra célula GSM.

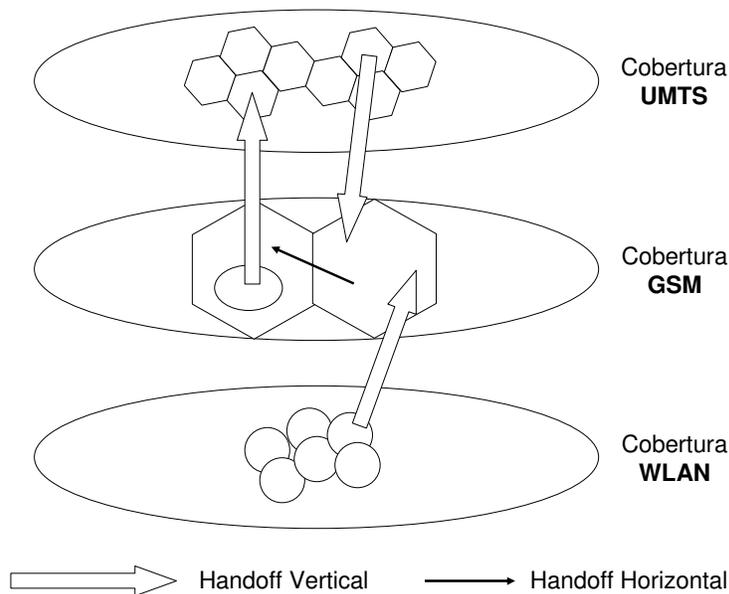


Fig. 2.16: Esquemas de *Handoff* 4G[9]

Na quarta geração dos sistemas móveis são esperados vários níveis de QoS em conjunto com a nova versão do protocolo IPv6 (*Internet Protocol Version 6*) abrindo espaço para o uso de endereços IPs em incontáveis dispositivos que proporcionariam comunicações entre homem-máquina e também

máquina-máquina. No aspecto relacionado a arquitetura dos sistemas 4G a rede IP desempenhará um papel fundamental ao ser o elo entre as aplicações e os vários meios de acesso (CDMA, UMTS, WiMAX, WLAN, etc).

Os principais desafios em relação às redes 4G são: a mobilidade dos terminais, a infraestrutura de rede e QoS, a segurança e a tolerância à falha [9].

O desafio pertinente a mobilidade dos terminais está em localizar e atualizar as posições dos terminais dentro de cada célula em vários sistemas. Além de executar *handoff* verticais e horizontais com o mínimo de atrasos e perda de pacotes.

Outro desafio é integrar redes não baseadas em IP com redes IP a fim de prover QoS fim-a-fim em sistemas heterogêneos. Muitas das redes não baseadas em IP existentes hoje são altamente otimizadas para a entrega de voz como GSM, cdma2000 e UMTS [9]. Por outro lado, sistemas baseados em IP são na maioria das vezes otimizados para dados a exemplo das redes 802.11 e HiperLAN. Assim, para integração destas redes provavelmente serão requeridos mecanismos relacionados à camada 3 para assegurar a integração entre as redes.

Por fim, outra área não menos desafiante que as demais será a segurança dos sistemas. Área em que atualmente são feitos altos investimentos a fim de preservar principalmente a confidencialidade dos dados. Entre as possíveis soluções para a segurança destaca-se os mecanismos de segurança reconfiguráveis.

2.3 Revisão de Artigos de Escalonamento e de *Handoff*

2.3.1 Escalonamento de Dados

UMTS/HSDPA

A crescente demanda de aplicações por altas taxas de dados tem impulsionado a área de telecomunicações a desenvolver novas tecnologias de comunicações móveis. Dentre estas novas tecnologias, destaca-se o sistema celular UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*).

Para suprir a demanda por altas taxas de dados o grupo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) padronizou uma nova interface aérea para o sistema UMTS conhecida como HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) [15]. Esta nova interface aumentou de forma significativa o desempenho do sistema UMTS em relação à interface aérea anterior WCDMA (*Wideband CDMA*) [3]. Por meio desta nova interface o sistema UMTS/HSDPA provê altas taxas de dados de até 14,4 Mbps no enlace direto (ERB para o terminal).

Um dos aspectos chave para a evolução do WCDMA para o HSDPA refere-se à mudança do escalonador de dados do RNC (*Radio Network Control*) para o Nó B, ou seja, a ERB [37]. Em

virtude desta mudança o sistema UMTS/HSDPA pode selecionar com melhor eficiência o esquema de codificação e modulação que se melhor adapta à condição do canal a cada TTI (*Transmission Time Interval*) de 2 ms. Assim, não somente melhora o desempenho do sistema como também permite assegurar a QoS do sistema HSDPA em termos de atrasos, descarte de pacotes, etc.

Vários escalonadores têm sido propostos para o sistema HSDPA, dentre os principais destacam-se o *Round Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF) e *Maximum C/I*. Em [29] os três escalonadores foram avaliados em iguais condições, e os resultados conferem o melhor desempenho ao escalonador *Maximum C/I* em relação aos outros escalonadores avaliados quando considerado o tempo de transferência, porém injusto com usuários que apresentam condições de canal desfavoráveis.

Em um outro estudo [37], são apresentados algoritmos em que são consideradas as condições dos canais obtidas dos terminais e as informações sobre o estado da fila de espera. A principal contribuição obtida em [37] está relacionada ao aumento da vazão por célula ao custo da redução do critério de equidade entre os usuários quando comparados ao esquema PF.

Nesta tese é feita a avaliação de desempenho do enlace direto do sistema UMTS/HSDPA através da proposta de um novo escalonador que utiliza uma estratégia híbrida entre PF e o esquema prioritário Pr denominado Pr/PF. Todos os escalonadores são avaliados pelas seguintes métricas de QoS: a vazão, o atraso médio dos pacotes e o percentual de perda de pacotes e a ocupação do enlace. O escalonador proposto Pr/PF é avaliado e comparado com os escalonadores tradicionais: prioritário e PF[27]. O estudo é feito através de simulação, utilizando a ferramenta de software Matlab.

WiMAX

O padrão IEEE 802.16[6] também conhecido como WiMAX provê altas taxas de dados, um *framework* pré-definido de QoS e um baixo custo quando comparado com outras tecnologias baseadas em cabo como o DSL (*Digital Subscriber Line*). Além disso, este padrão pode ser utilizado para conectar as redes locais à internet [38]. A versão do IEEE 802.16e [31] adicionou novas características e atributos necessários para o suporte a mobilidade.

Muitos estudos na literatura têm sido feitos com foco na avaliação de desempenho do sistema WiMAX [33], [38], [39], [40], [41], [42]. Em [39] avalia-se o padrão 802.16-2004 em que é permitido somente o acesso fixo ou nômade, isto é, não permite a mobilidade dos usuários. A principal contribuição deste estudo diz respeito a capacidade do sistema WiMAX na qual é fortemente dependente da sua configuração, isto é, do tamanho do canal, da duração do quadro, da taxa de codificação e etc.

Em um outro estudo apresentado em [40], o sistema IEEE 802.16e é comparado com o 3GPP UMTS HSDPA através de simulações. Os resultados mostram que o sistema IEEE 802.16e ao utilizar a técnica TDD provê aproximadamente a mesma vazão de dados no enlace direto quando comparado

ao HSDPA, porém, com eficiência espectral aproximadamente 40% a 50% maior. Entretanto, o *overhead* do canal de controle e a capacidade limitada do enlace reverso permanecem como questões abertas. Além disso é considerado somente o escalonador de dados PF (*Proportional Fair*) como alternativa para melhoria de QoS no sistema.

Em [33], é apresentado um estudo de simulação do sistema IEEE 802.16 através da interface aérea WirelessMAN-OFDM e o uso de estações *full duplex*. Os resultados mostram que o desempenho do sistema (enlace direto e reverso), em termos de atraso e vazão de dados, dependem de vários fatores. Estes fatores incluem a duração do quadro, mecanismos para requisição de banda larga no enlace reverso e a distribuição da carga. Os escalonadores adotados neste estudo são: DRR (*Deficit Round Robin*) como escalonador no enlace direto e WRR (*Weighted Round Robin*) como escalonador no enlace reverso.

Os trabalhos apresentados em [41] e [42] enfatizam melhorias no escalonador de dados do enlace reverso e na arquitetura de QoS do sistema WiMAX. Em [38] é proposto um esquema de alocação de largura de banda no enlace reverso baseado em filas. Neste esquema a alocação de largura de banda é adaptada de acordo com o estado da fila. Contudo, no contexto das atuais redes IP os resultados apresentados pelo estudo são pouco precisos devido ao uso de fontes de tráfego poissonianas nas simulações computacionais.

Neste estudo, o sistema IEEE 802.16e é avaliado através de fontes de tráfego HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) propostas em [10]. A vazão de dados, o atraso médio dos pacotes e o percentual de perda de pacotes são estudados em função da carga de tráfego. O desempenho do enlace direto é avaliado por meio dos escalonadores de dados PF (*Proportional Fair*), Max C/I (*Maximum Carrier Interference*) e Pr/PF (*Priority Proportional Fair proposed*) proposto em [43]. O estudo é feito através de simulações computacionais, utilizando a ferramenta de software Matlab.

2.3.2 *Handoff* Horizontal

Os mecanismos de *handoff* são empregados nos sistemas celulares a fim de permitir a transferência de conexões das estações móveis (terminais) de uma estação rádio base (ERB) para uma outra ERB quando os terminais rompem ou aproximam-se dos limites da célula. Estes mecanismos asseguram mobilidade sem interrupção dos serviços. Basicamente, há dois tipos de *handoff*: *soft handoff* e *hard handoff*. No mecanismo *soft handoff* o terminal estabelece uma conexão com mais de uma ERB ao mesmo tempo a fim de assegurar uma transição mais suave entre as ERBs. No caso de *hard handoff*, o terminal encerra a conexão antiga antes de estabelecer uma nova em outra ERB.

Os mecanismos de *handoff* tradicionais consideram a potência do sinal [44], a distância do usuário em relação à estação rádio base (ERB) e a relação SINR (*Signal-to-Interference-and-Noise-Ratio*) para tomada de decisão no processo de *handoff*. Entretanto, devido a crescente demanda das apli-

cações sensíveis ao tempo os fatores anteriormente citados tornam-se insuficientes para a tomada de decisão num processo de *handoff*. Assim, novos algoritmos de *handoff* tem sido propostos na literatura para os sistemas 3G UMTS/HSDPA e CDMA 1xEV-DO RA.

UMTS/HSDPA

Em 2005 o grupo 3GPP padronizou uma nova interface aérea para o sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) conhecida como HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) [15]. Por meio desta nova interface o sistema UMTS/HSDPA provê altas taxas de dados de até 14,4 Mbps no enlace direto (estação rádio base, ERB, para o terminal). Neste sistema adotou-se o mecanismo *hard handoff* uma vez que o *soft handoff* não é adequado a canais de alta de velocidade porque requerem mais códigos e causam interferências adicionais [3], [45].

Desta forma, novos mecanismos de *handoff* têm sido propostos na literatura [45], [46], [47] na tentativa de aumentar a QoS das atuais e futuras gerações de redes móveis durante o *handoff*. Em [45] é proposto um modelo de fila no enlace direto de sistemas 4G em duas camadas. Na camada de rede são atribuídas prioridades aos fluxos *handoff* de acordo com seus respectivos estados no sistema. Na camada física é proposto um escalonador na qual considera-se a prioridade do fluxo, a condição do canal e a condição do *buffer* para a alocação de recursos. Os resultados deste estudo mostraram que a troca de informações entre as duas camadas permite um melhor gerenciamento dos recursos reduzindo o número de pacotes descartados no sistema.

Em um outro estudo apresentado em [46] é proposto o mecanismo de *handoff* QPPQ (*Quality Prediction Priority Queuing*) com base na taxa de pacotes recebidos com sucesso (PSR) para comunicações multimídia em redes sem fio. A tomada de decisão deste algoritmo baseia-se na atual PSR, taxa de degradação PSR e os requisitos mínimos de PSR para classe de serviço do pacote. Os resultados demonstraram que este mecanismo reduz a probabilidade de descarte de pacotes em comunicações multimídia. Entretanto, neste estudo o algoritmo *handoff* proposto é avaliado através de uma rede sem fio qualquer através de fontes poissonianas o que limita a aplicação prática dos resultados existentes neste artigo nas atuais redes de dados IP.

Por fim, no estudo [47] o mecanismo *handoff* no sistema HSDPA é analisado pelo modelo matemático de Stackelberg. Os resultados demonstraram que através deste modelo os recursos da rede foram utilizados com maior eficiência.

Neste trabalho, são propostos dois novos critérios de aceitação de tráfego *handoff* que levam em conta a qualidade de serviço dos tráfegos. Além destes critérios é proposto o novo escalonador de dados Pr/PF a fim de garantir a QoS do sistema HSDPA durante o aumento de tráfego *handoff* presente no sistema. Nos critérios de aceitação de tráfego *handoff* os tráfegos são discriminados em classes de serviços e são tratados separadamente para satisfazerem a QoS individuais. A aceitação de

tráfego *handoff* é baseada em potência do sinal e na ocupação do *buffer* e de forma a não degradar o tráfego interno de uma célula. Os critérios propostos são avaliados em conjunto com escalonadores Max C/I, PF e a nova proposta Pr/PF que podem afetar o desempenho do sistema HSDPA.

CDMA 1xEV-DO RA

No sistema 3G CDMA 1xEV-DO R0 [14] é adotado no enlace direto (ERB para o terminal) o mecanismo *virtual soft handoff* via seleção adaptativa do servidor (ERB). Contudo, no momento em que ocorre a transição de ERBs pode ocorrer atrasos na transmissão de pacotes na qual não impactam o serviço de melhor esforço, mas limitam o desempenho das aplicações sensíveis ao tempo [18]. Entre os avanços implementados no sistema CDMA 1xEV-DO RA [17], destaca-se a melhoria da seleção adaptativa do servidor no enlace direto do sistema. Nesta atualização, cada terminal utiliza o canal DSC (*Data Source Control*) para sinalizar com antecedência o exato instante de tempo em que acontece a troca de ERBs e desta forma eliminar os atrasos que ocorrem no 1xEV-DO R0.

Vários estudos disponíveis na literatura tem sido direcionados para a análise e otimização de algoritmos *handoff* [12], [46], [48], [49]. Em [12], o mecanismo de *handoff* no sistema 1xEV-DO RA é avaliado através de aproximação teórica e simulações computacionais nas quais são considerados o desvanecimento Rayleigh, a filtragem de sinais e os atrasos durante o *handoff*. A aproximação teórica avalia a probabilidade de erro no *slot* de tempo do sistema 1xEV-DO RA, enquanto as simulações determinam a taxa de erro dos pacotes e o número de *handoffs*. Os resultados do estudo mostram que esta análise pode ser usada para selecionar os parâmetros de *handoff* de acordo com a taxa de erro e o número de *handoffs* desejado. Em [49] são apresentados modelos analíticos sofisticados de *hard handoff* e *soft handoff* para o sistema celular CDMA IS-95. Estes modelos *handoff* são estudados em função da indisponibilidade do sistema e a potência média envolvida neste processo.

Numa outra linha de estudo os modelos estocásticos apresentados em [48], simulam o comportamento dos protocolos TCP e TFRC (*TCP Friendly Rate Control*) no processo de *handoff* entre redes heterogêneas como WLAN, celular ou WMAN. O modelo TCP baseia-se no modelo de Bernoulli na qual é considerada a taxa média de pacotes descartados. Através deste modelo é avaliado como parâmetros específicos relacionados ao *handoff* afetam taxa de perda de pacotes e a vazão TCP. Entretanto, os modelos apresentam pouca precisão em alguns casos, e não trata os casos de *handoffs* entre as células do mesmo sistema.

Neste estudo, são propostos novos critérios para a aceitação de tráfego *handoff* no sistema 1xEV-DO RA. Além destes critérios também é proposto um novo algoritmo de escalonamento de dados Pr/PF como forma de melhorar ainda mais a QoS do sistema 1xEV-DO RA. Nos critérios de aceitação de tráfego *handoff* os tráfegos são classificados em quatro classes de serviços em concordância com a arquitetura DiffServ. A aceitação de tráfego *handoff* é baseada na potência do sinal e na ocupação do

buffer a fim de não degradar o tráfego interno da célula. Os critérios de aceitação de tráfego *handoff* são avaliados em conjunto com os escalonadores de dados Max C/I, PF e a nova proposta Pr/PF que podem alterar o desempenho do sistema.

2.3.3 *Handoff* Vertical

UMTS/HSDPA e CDMA 1xEV-DO RA

A quarta geração (4G) de sistemas móveis promove a conectividade de diferentes tecnologias de acesso, a fim de prover serviços multimídia aos seus usuários a qualquer hora, em qualquer lugar. Dentre as tecnologias de acesso existentes espera-se integrar vários sistemas móveis como o CDMA 1xEV-DO RA (*Code Division Multiple Access 1x Evolution Data Optimized*) [17], o UMTS/HSDPA (*Universal Mobile Telecommunications System / High Speed Downlink Packet Access*) [15] e o WiMAX (*Worldwide interoperability for Microwave Access*) [6].

Para alcançar este novo objetivo das redes 4G propõe-se criar um novo mecanismo de *handoff*, em prol da comunicação entre os usuários independentes das redes de acesso utilizadas. Este mecanismo é conhecido como *handoff* vertical [36] que viabiliza ao usuário migrar entre redes de acesso heterogêneas, por exemplo, a migração de usuários do sistema CDMA 1xEV-DO RA para o sistema UMTS/HSDPA.

Nas redes celulares homogêneas, os mecanismos de *handoff* existentes consideram a RSS (*Radio Signal Strength*), a distância do usuário em relação à estação rádio base (ERB) e a relação SINR (*Signal-to-Interference-and-Noise-Ratio*) para tomada de decisão no processo de *handoff* dentro da mesma rede acesso. Entretanto, no âmbito 4G os fatores anteriormente citados são insuficientes para a inicialização e decisão do processo de *handoff* [50].

O processo de *handoff* vertical em sistemas heterogêneos tem sido alvo de grande interesse por parte dos pesquisadores [50], [51], [52], [53], [54] e [55].

Em [53], é proposto um novo algoritmo de *handoff* vertical que avalia a SINR das diferentes redes de acesso (WLAN, WCDMA) para a tomada de decisão no processo de *handoff* vertical conforme algumas restrições de QoS. Os resultados analíticos e numéricos demonstraram que o algoritmo baseado em SINR provê vazões mais altas do que o algoritmo de *handoff* vertical com base em RSS. Em um outro estudo [50], é apresentado um algoritmo de seleção de redes baseado em técnicas analíticas a fim de garantir aos usuários sempre a escolha da melhor rede disponível. Contudo, os resultados mostram que este algoritmo não apresentou um desempenho eficiente para a integração dos sistemas UMTS/WLAN. Em [51] é proposto um novo algoritmo para o *handoff* vertical entre os sistemas WiFi e WiMAX. Este algoritmo combina a taxa de dados e a ocupação de enlace de forma a obter um balanceamento mais justo entre os sistemas.

No estudo apresentado em [54] foi introduzido o protocolo mSCTP a fim de reduzir o atraso do *handoff* vertical e além disso foi proposto um critério de decisão *handoff* com base numa função de custo que avalia várias métricas de QoS para a tomada de decisão no *handoff* 4G. Os resultados mostram a redução dos atrasos na execução do *handoff* quando se usa a característica *multi-streaming* do protocolo mSCTP. Entretanto, a função de custo proposta poderia aumentar os atrasos. Por fim, em [52] é proposta uma arquitetura baseada em agentes cujos principais benefícios estão atrelados aos perfis dos usuários uma vez que é possível agregar serviços personalizados além de economizar potência e recursos computacionais.

Em um outro estudo apresentado em [55] é proposta uma abordagem analítica do algoritmo de RSS. Esta abordagem baseia-se na seleção de rede ótima para o *handoff* vertical das redes *wireless* heterogêneas. O custo do *handoff* é baseado na análise MDP em que a rede candidata com o menor custo *handoff* é selecionada como rede ótima. Os resultados numéricos mostram que a abordagem proposta supera outros métodos equivalentes em número de *handoffs* verticais, enquanto aumenta a utilização da rede e diminui o descarte de conexões.

Nesta tese, novos algoritmos de *handoff* vertical são propostos com o intuito de distribuir o tráfego *handoff* vertical entre os sistemas 3G de maneira a não sobrecarregar ou subutilizar os sistemas e ainda assegurar a QoS de cada sistema 3G. Os algoritmos são propostos levando-se em consideração a RSS, a ocupação do *buffer*, a ocupação do enlace e o tamanho da cota de dados para transmitir dos respectivos sistemas. A eficiência dos algoritmos propostos é verificada através dos sistemas 3G CDMA 1xEV-DO RA e UMTS/HSDPA. São utilizadas fontes de tráfego HTTP para alimentar os sistemas. As seguintes métricas de QoS são avaliadas: a vazão, o atraso médio dos pacotes e o percentual de perda dos pacotes, todos em função da chegada de tráfego *handoff* vertical. O escalonador de dados PF (*Proportional Fair*) é adotado nos dois sistemas 3G para prover igual distribuição de recursos a todos usuários. O estudo é feito através de simulações computacionais utilizando a ferramenta de software Matlab.

2.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as características técnicas mais relevantes dos sistemas CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA e WiMAX sob o ponto de vista deste estudo. Todos os sistemas foram detalhados em função da arquitetura, pilha de protocolos, enlace direto, mecanismos de *handoff* e escalonamento de dados.

Além disso, foram abordados os principais conceitos 4G adotados ao longo deste estudo bem como a revisão bibliográfica de trabalhos disponíveis na literatura relacionados aos seguintes temas: algoritmos de escalonamento de dados, algoritmos de *handoff* horizontal e algoritmos de *handoff*

Capítulo 3

Escalonamento de Dados

3.1 Introdução

Os algoritmos de escalonamento de dados exercem grande importância nas redes de comunicação uma vez que estes permitem assegurar a QoS diferenciada por categorias de serviços, isto é, classes de tráfego, oferecendo garantias de desempenho as aplicações e ao mesmo tempo o compartilhamento de recursos de acordo com critérios de equidade. Assim, vários algoritmos têm sido propostos na literatura com o objetivo de aumentar a QoS dos sistemas móveis. Neste capítulo são avaliados os escalonadores de dados: *Deficit Round Robin* (DRR) [56], *Maximum Carrier Interference* (Max C/I) [19], *Proportional Fair* (PF) [27], Prioritário (Pr) e a nova proposta *Priority Proportional Fair* (Pr/PF) [43].

Além disso é apresentada a plataforma de simulação utilizada nas simulações computacionais dos sistemas móveis avaliados. Todo o estudo baseia-se na simulação de eventos discretos. O simulador é constituído de *scripts* desenvolvidos na ferramenta de *software* Matlab. Através deste simulador os sistemas móveis são avaliados por meio de métricas de QoS como o atraso médio, a vazão de dados e o percentual de descarte de pacotes. Por fim, as fontes de tráfego que alimentam os sistemas seguem o modelo de processo Poisson e o modelo HTTP proposto em [10].

Finalmente, são analisados os resultados provenientes das simulações dos sistemas UMTS/HSDPA e WiMAX por meio de métricas de QoS. A análise é feita com base na variação do escalonador de dados adotado no enlace direto do respectivo sistema. Os escalonadores de dados considerados são: Max C/I, Pr, PF e a nova proposta híbrida denominada Pr/PF.

3.2 Escalonadores de Dados

Os grupos 3GPP, 3GPP2 e IEEE responsáveis pela padronização dos sistemas UMTS/HSDPA, CMDA 1xEV-DO RA e WiMAX optaram por deixar em aberto a escolha do escalonador de dados utilizado no enlace direto dos respectivos sistemas, uma vez que se trata de uma questão de implementação para a indústria de telecomunicações. Desta forma, muitos algoritmos para escalonamentos de dados tem sido propostos no meio acadêmico e profissional com o objetivo de melhorar a QoS dos sistemas. A seguir são detalhados alguns destes algoritmos de escalonamento de dados adotados neste trabalho.

3.2.1 Prioritário (Pr)

O escalonamento com prioridade atende aos pacotes de acordo com as prioridades atribuídas aos mesmos. Estas prioridades são associadas aos pacotes em algum determinado momento antes destes chegarem ao servidor do sistema. Neste esquema os pacotes da fila de menor prioridade somente são atendidos após os pacotes da fila de maior prioridade serem atendidos primeiro.

3.2.2 *Maximum Carrier Interference (Max C/I)*

No esquema de atendimento Max C/I, a cada *time slot* é atendido o usuário com a maior taxa de dados instantânea. Esta característica do escalonador assegura ao sistema móvel altas taxas de vazão de dados uma vez que são atendidos os usuários em melhores condições de canal. Por outro lado, os usuários em piores condições de canal como, por exemplo, os que estão na borda da célula são penalizados com maiores atrasos e indisponibilidade de serviço.

3.2.3 *Deficit Round Robin (DRR)*

O escalonador de dados DRR atribui a cada fila de pacotes, ou seja, a cada fluxo de dados, uma largura de banda diferenciada. Cada fluxo de dados pode possuir um saldo diferenciado, isto é, de tamanhos distintos na qual determina a quantidade de bits a serem transmitidos a cada rodada. Este saldo é zerado no momento em que não houver mais pacotes na fila em questão. A cada rodada é atribuído um quantum com valor fixo para cada saldo do fluxo de dados. Os pacotes do fluxo dados ativo no momento do escalonamento são transmitidos pelo sistema enquanto houver saldo suficiente para transmiti-los. Quando um pacote é liberado, o saldo da fila é reduzido de forma equivalente. Caso o saldo não seja utilizado em uma rodada é acumulado para a rodada seguinte. Desta forma, os saldos são monitorados e os fluxos de dados desfavorecidos em uma rodada são compensados na próxima rodada.

Exemplo DRR

No exemplo a seguir é aplicado o escalonamento DRR para duas filas de pacotes, ou seja, dois fluxos de dados. Cada fila possui seus próprios quantum e saldo para a transmissão de pacotes. Na primeira rodada são atribuídos os quantums 6.000 bits e 9.500 bits respectivamente às filas 1 e 2. O primeiro pacote da fila 1 não é transmitido na primeira rodada, pois, o saldo da fila 1 neste momento é insuficiente para transmitir o pacote. Desta forma, o saldo da fila 1 é acumulado para a próxima rodada. No caso da fila 2 ainda na primeira rodada ocorre a transmissão dos dois primeiros pacotes de 4.608 bits uma vez que o saldo era de 9.500 bits. Em razão da transmissão destes dois pacotes o saldo da fila 2 ao final da primeira rodada ficou com valor remanescente de 284 bits. As Figuras 3.1 e 3.2 ilustram a primeira rodada.

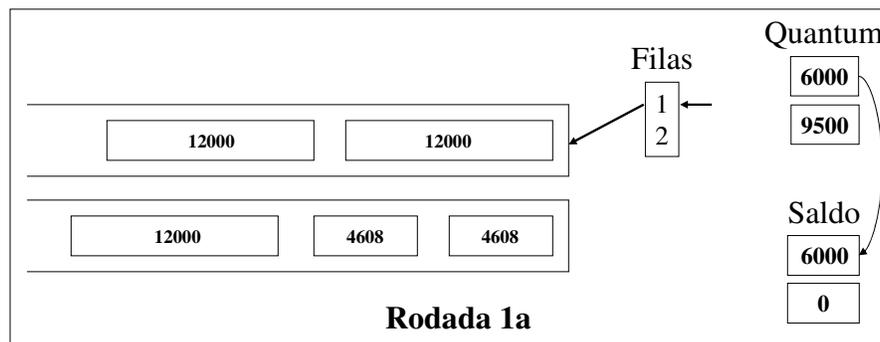


Fig. 3.1: Rodada 1a - DRR

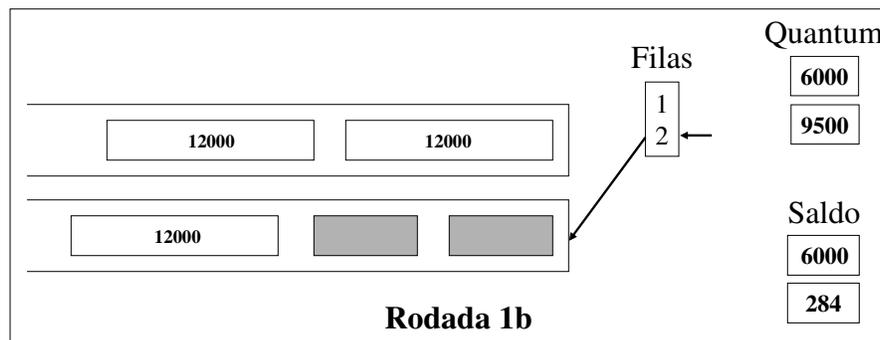


Fig. 3.2: Rodada 1b - DRR

Na segunda rodada novamente o quantum é adicionado aos saldos das filas 1 e 2. Na fila 1 após a verificação do saldo o pacote de 12.000 bits é transmitido e o saldo zerado. Na outra fila não é transmitido nenhum pacote na segunda rodada devido ao comprimento do próximo pacote ser de

12.000 bits e como consequência o saldo acumula para 9.784 bits. As Figuras 3.3 e 3.4 mostram a segunda rodada.

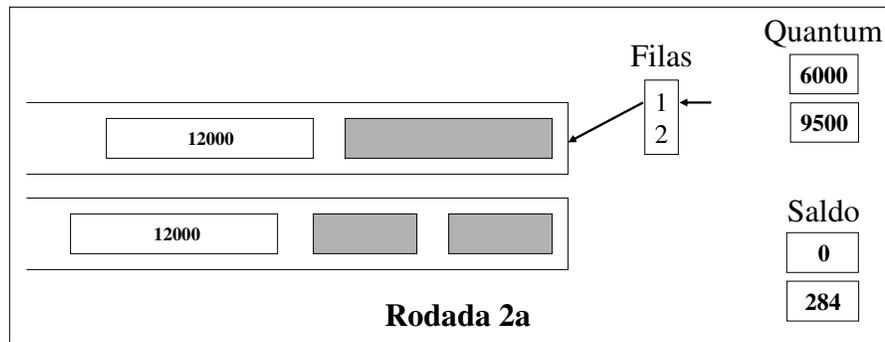


Fig. 3.3: Rodada 2a - DRR

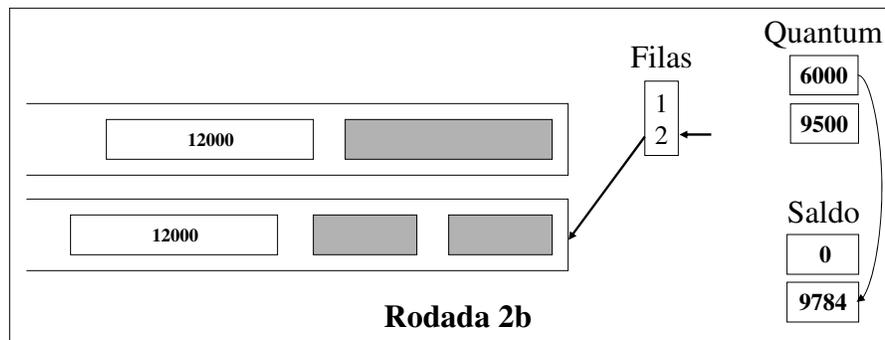


Fig. 3.4: Rodada 2b - DRR

Na terceira rodada após a atualização dos saldos das filas somente o pacote de 12.000 bits da fila 2 é transmitido uma vez que havia saldo suficiente para a sua transmissão. Após a transmissão do último pacote da fila 2 o saldo é zerado enquanto na fila 1 o saldo é acumulado para a próxima rodada. As Figuras 3.5 e 3.6 exibem a terceira rodada.

Finalmente, na quarta e última rodada somente a primeira fila permanece ativa, pois, ainda há um pacote a ser transmitido. Após a atualização do saldo o pacote de 12.000 bits é transmitido e o saldo zerado. A Figura 3.7 ilustra a rodada final. Todo o escalonamento de pacotes reinicia-se novamente a partir do momento em que houver pacotes em alguma das filas do sistema.

3.2.4 Proportional Fair (PF)

O escalonador PF provê um bom balanceamento entre a vazão e a equidade dos seus usuários. Neste método, o usuário com a maior razão entre a taxa de dados instantânea e a taxa média de dados

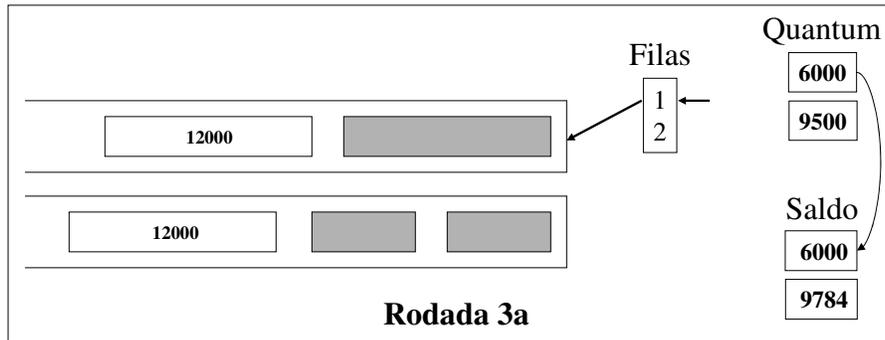


Fig. 3.5: Rodada 3a - DRR

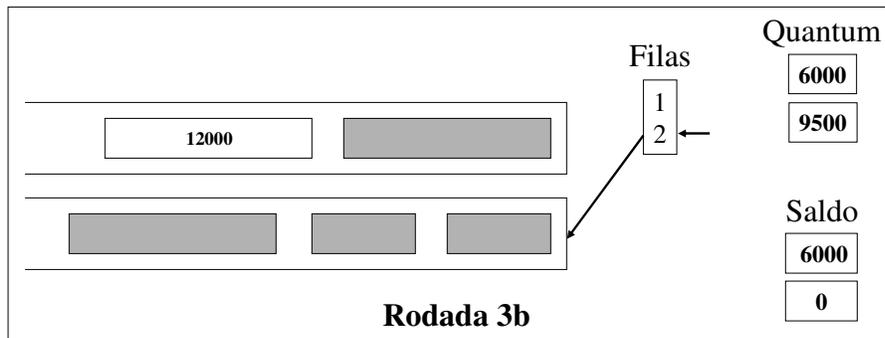


Fig. 3.6: Rodada 3b - DRR

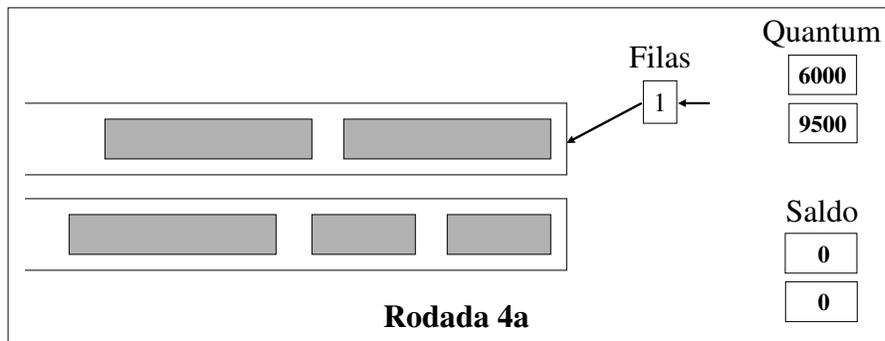


Fig. 3.7: Rodada 4 - DRR

transmitidos é selecionado para a transmissão. Por meio deste esquema todos os usuários possuem probabilidades iguais de atendimento mesmo que cada usuário tenha diferentes condições de canal. A Equação 3.1 mostra o cálculo da razão do escalonador PF onde (i) denota o usuário, $R_{inst(i)}$ a taxa de dados instantânea do usuário i e $R_{media(i)}$ a vazão média do usuário i . Ambas as taxas instantânea e média são determinadas dinamicamente durante as simulações.

$$Razao_{(i)} = \frac{R_{inst(i)}}{R_{media(i)}} \quad (3.1)$$

3.2.5 Priority Proportional Fair (Pr/PF)

O escalonador híbrido Pr/PF proposto neste estudo combina o escalonador prioritário com o PF. Neste esquema os pacotes com prioridades mais altas Pr1 (Prioridade 1) e Pr2 são atendidos primeiro enquanto os pacotes Pr3 e Pr4 são atendidos conforme o escalonador PF. Esta divisão dos pacotes em quatro prioridades está em concordância com a arquitetura DiffServ, em que os usuários de serviços podem ser classificados de acordo com a qualidade de serviço (QoS) ouro, prata, bronze ou o melhor esforço. A Figura 3.8 mostra o escalonador proposto Pr/PF. Desta forma, esta estratégia contempla os usuários que requerem atendimento diferenciado e dispõem a pagar mais pelo serviço e também aqueles usuários com baixas restrições de QoS que toleram maiores atrasos durante a comunicação.

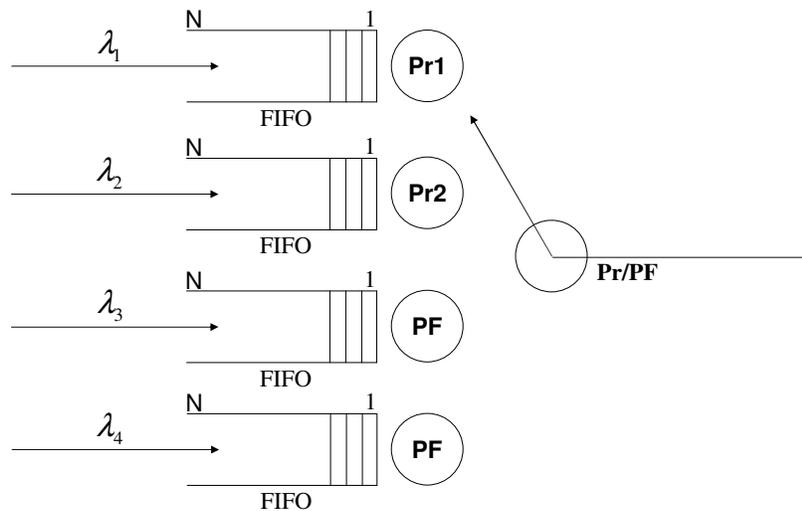


Fig. 3.8: Escalonador de dados Pr/PF

3.3 Plataforma de Simulação

3.3.1 Fonte de Tráfego HTTP

A maior parte dos estudos de modelagem de tráfego HTTP baseia-se em modelos matemáticos complexos de tráfego auto-similar o que dificulta a análise dos resultados provenientes destes modelos quando aplicados aos sistemas móveis. Neste estudo, é adotado o modelo de tráfego HTTP proposto

em [10] em que toda a modelagem é direcionada à aplicação em sistemas móveis, neste caso o modelo é aplicado ao sistema CDMA 1xEV-DV. Assim, através deste modelo de fontes de tráfego HTTP espera-se facilitar a análise dos resultados obtidos nas simulações dos sistemas móveis CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA e WiMAX.

O tráfego HTTP representa mais de 70% do total de tráfego na internet segundo estimativas do estudo [57]. Desta forma, torna-se de relevada importância a escolha de um modelo preciso desta importante fonte de tráfego, pois, além de simular o desempenho de novos sistemas também auxilia na escolha da melhor alternativa de projeto, isto é, qual implementação de projeto trará os melhores resultados sob o ponto de vista do tráfego HTTP.

Modelo TCP

Com o objetivo de representar de forma mais precisa o tráfego de dados, o protocolo TCP é considerado no modelo de fontes de tráfego HTTP. O protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*) assim como o protocolo UDP são utilizados como protocolos da camada de transporte das redes IP. Porém, neste modelo é considerado somente o protocolo TCP como protocolo de transporte.

O estabelecimento de conexões TCP e o encerramento de conexões TCP obedecem ao mecanismo *three-way handshake* descrito na Figura 3.9. A quantidade de dados que pode ser enviada sem receber mensagens ACK é determinada pelo tamanho da janela de congestionamento. Após o estabelecimento completo da conexão, a transferência de dados inicia-se no modo partida lenta com tamanho inicial da janela de congestionamento igual a um segmento. O tamanho da janela de congestionamento é acrescido em um segmento a cada mensagem ACK recebida pelo remetente. Isto resulta em um crescimento exponencial da janela de congestionamento. Este processo é ilustrado pela Figura 3.10.

O tempo total (*round-trip time*) gasto pelos segmentos TCP nos sistemas CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA e WiMAX é dado pela seguinte expressão 3.2:

$$\tau_{rt} = \tau_c + \tau_1 \quad (3.2)$$

Onde:

τ_c representa a soma dos seguintes tempos: o tempo levado por um pacote ACK propagar do cliente para o servidor, mais o tempo de processamento deste pacote pelo servidor e o tempo gasto pelo segmento de dado TCP propagar do servidor para a ERB representada na Figura 3.10 como roteador.

τ_1 representa o tempo de transmissão de um segmento de dados TCP da ERB para o dispositivo móvel por meio da interface aérea.

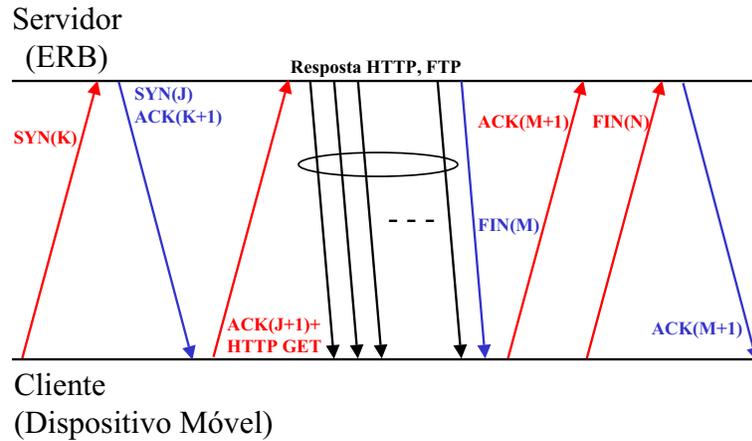


Fig. 3.9: Segmentos de Controle em uma Conexão TCP[10]

Neste modelo TCP, τ_c é representado por uma variável aleatória distribuída exponencialmente com média de 50 ms enquanto τ_1 é modelado por uma variável determinística definida dinamicamente pelas taxas de transmissões de dados presentes nas Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3.

Conforme pode ser observado na Figura 3.10 durante o processo de partida lenta para cada pacote ACK recebido pelo servidor são gerados dois segmentos de dados e estes são enviados de volta a ERB. Assim, na estação base, após um pacote ter sido transmitido com sucesso, dois segmentos de dados vão chegar de volta após um intervalo τ_c em resposta ao pacote transmitido. Baseado nesta observação, o processo de chegada de pacotes na ERB para o *download* de um objeto é ilustrado pela Figura 3.11. Este processo é descrito pelo algoritmo de passos abaixo.

1. Seja S o tamanho do objeto dado em *bytes* e W o tamanho inicial da janela de congestionamento TCP. Calcula-se o número de pacotes do objeto, $N = \lceil S / (MTU - 40) \rceil$.
2. Se $N > W$, então W pacotes são colocados na fila para transmissão; caso contrário, todos os pacotes do objeto são colocados na fila para transmissão de acordo com a ordem de chegada. Seja P o número de pacotes restantes para serem transmitidos. Se $P == 0$, vá para o passo 6.
3. Aguarde a transmissão de um pacote do objeto sobre a interface aérea.
4. Escalone a chegada dos próximos dois pacotes (ou último pacote se $P == 1$) do objeto após um intervalo de tempo τ_c . Se $P == 1$, então $P = 0$, senão $P = P - 1$.
5. Se $P > 0$ vá para o passo 3.
6. Mantenha $PW = N + W$, como o tamanho da janela de congestionamento para ser utilizado pelas conexões TCP persistentes.

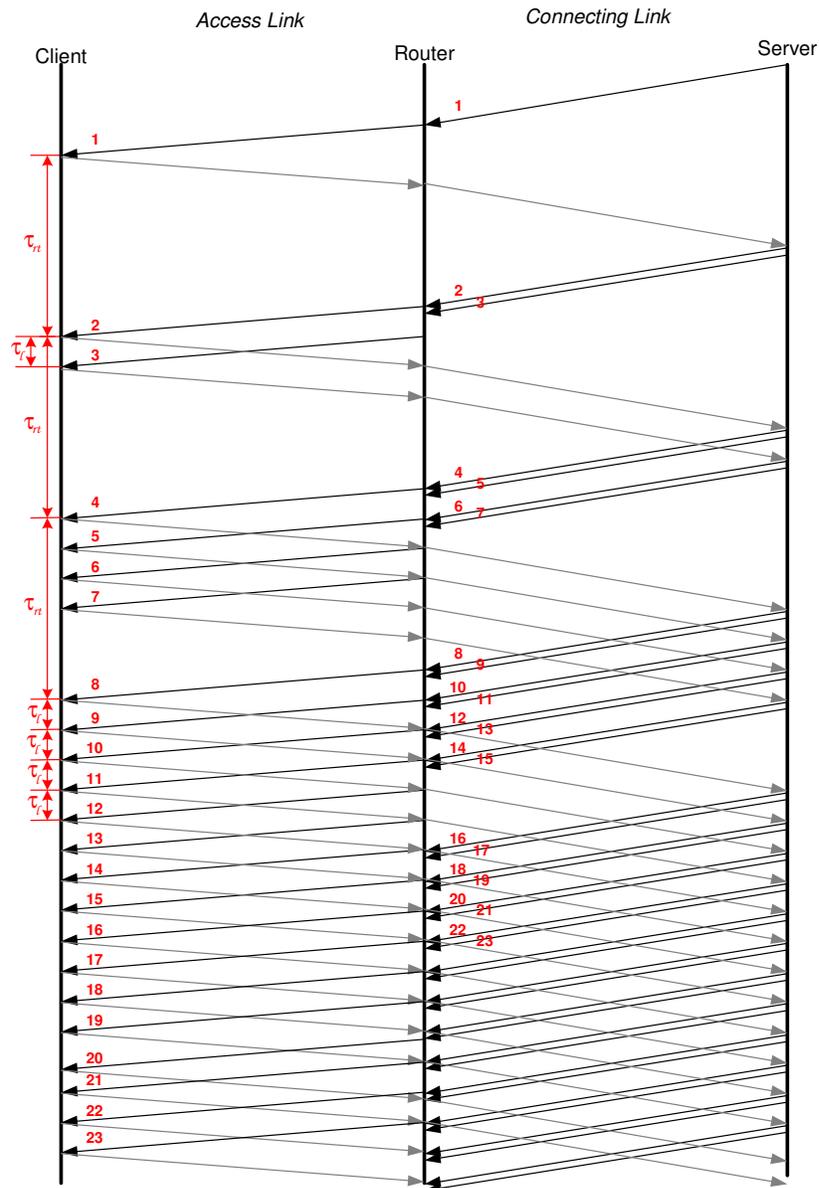


Fig. 3.10: Controle de Fluxo TCP Durante a Partida Lenta[10]

7. Retorne.

Os segmentos de dados TCP possuem unidade máxima de transferência MTU (*Maximum Transmission Unit*) de 1.500 bytes ou de 576 bytes. Estes segmentos apresentam *payloads*, ou seja, carga útil de 1.460 bytes ou 536 bytes considerado segmentos com MTU de 1.500 bytes e 576 bytes respectivamente, identificados em [10] como MTU-40. Os outros 40 bytes de cada MTU são destinados a códigos de redundância e cabeçalhos TCP e PPP. Desta forma, os segmentos de dados TCP possuem um *overhead* percentual de 2,7% para um MTU de 1.500 bytes e 7% para um MTU de 576 bytes.

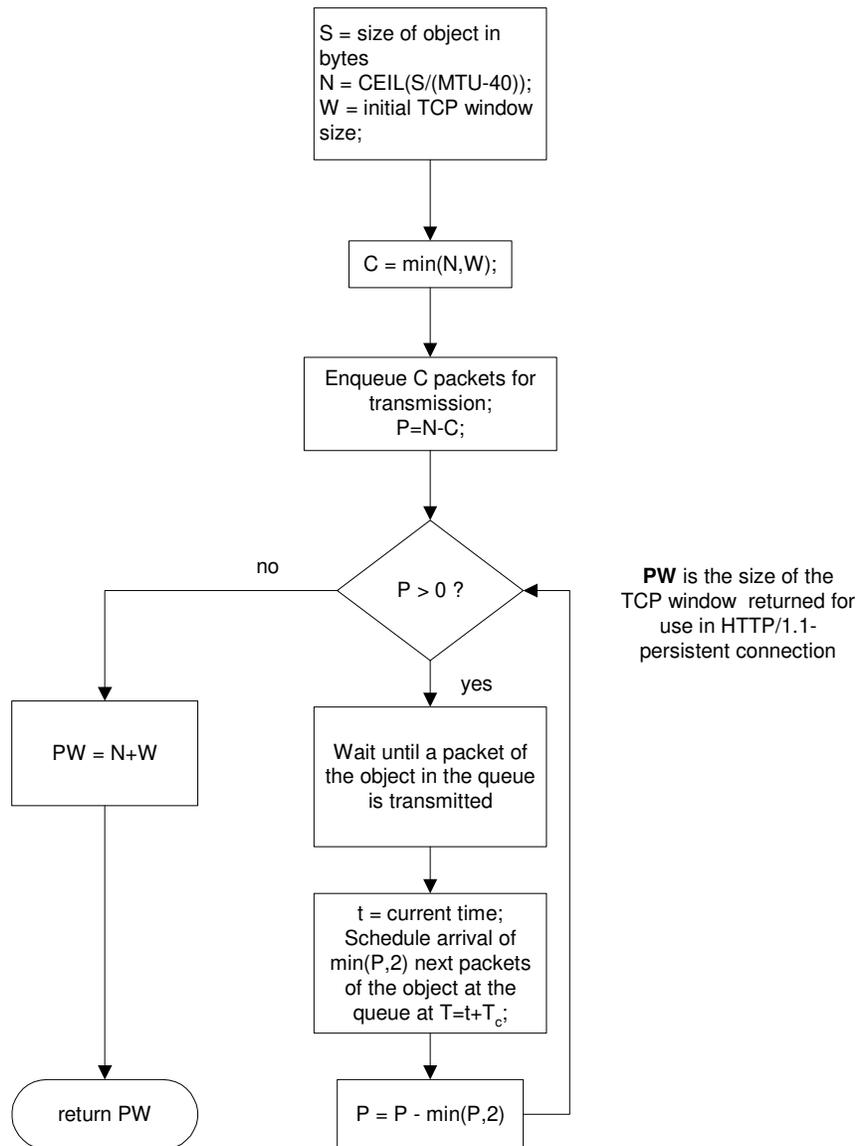


Fig. 3.11: Processo de Chegada de Pacotes na ERB para *Download* de um Objeto Via TCP[10]

Modelo HTTP

Características do Modelo de Tráfego HTTP

A Figura 3.12 mostra o traçado de pacotes de uma típica seção de navegação web. Esta seção caracteriza-se por apresentar períodos *ON/OFF*, isto é, períodos de *downloads* de páginas web e períodos de tempo de leitura destas páginas web. Esta divisão em períodos *ON/OFF* do tráfego HTTP é resultado da interação homem máquina. Além disso, outra característica importante do tráfego web é a auto-similaridade, isto é, estatísticas similares em diferentes escalas de tempo [10].

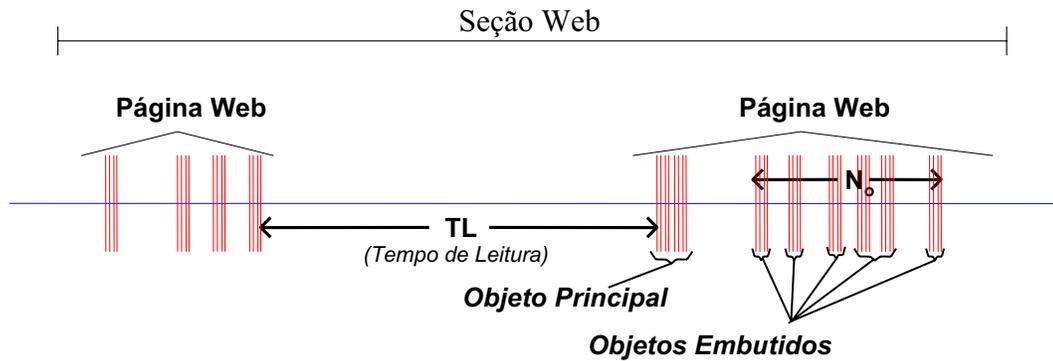


Fig. 3.12: Seção de Navegação Web[10]

Uma página web é composta por um único objeto principal e vários objetos embutidos. Inicialmente, o navegador busca o objeto principal da página HTML (*Hyper Text Markup Language*) usando uma requisição HTTP GET. Após receber o objeto principal, o navegador determina o *layout* da página web para introduzir objetos embutidos como, por exemplo, as figuras, os botões entre outros objetos. O tempo gasto para a determinação do *layout* da página web é chamado tempo *parsing*. Em seguida, o navegador baixa os objetos embutidos e o usuário inicia a leitura desta página web. A busca e o *download* dos objetos principal e embutidos são representados pelo período *ON* enquanto o tempo de leitura desta página web e o tempo *parsing* representam o período *OFF*. A Figura 3.13 mostra o objeto principal e seus respectivos objetos embutidos da página web do jornal *Wall Street*.

Na Figura 3.14 é feita uma comparação do modelo HTTP utilizado neste estudo com os modelos de referência OSI e TCP/IP. Pode-se observar pela figura que a página web e seus objetos principais e embutidos representam a camada de aplicação do modelo OSI. A camada de transporte é representada pelo TCP no modelo HTTP, onde os mecanismos de sincronismo e controle de pacotes são implementados. Na camada de rede, os objetos principais e embutidos são segmentados em pacotes IP de 1.500 *bytes* e de 576 *bytes*. Por fim, a camada de interface de rede representa a interface aérea dos sistemas CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA ou WiMAX.

As características do tráfego de pacotes dependem da versão do protocolo HTTP utilizado pelos servidores e navegadores web. Atualmente, as duas versões do protocolo HTTP mais utilizadas pela maioria dos servidores e navegadores são: o HTTP/1.0 e o HTTP/1.1. Estas duas versões diferenciam-se pela forma como usam as conexões TCP para transferir os objetos principais e embutidos.

No HTTP/1.0, para cada *download* de objeto principal ou embutido de uma página web é usada uma conexão TCP diferente. Esta versão também conhecida como *HTTP/1.0-burst mode transfer* é a mais popular entre os navegadores web. O número máximo de conexões TCP simultâneas permitidas, N , é configurável, porém, a maioria dos navegadores permite até 4 conexões TCP simultâneas.

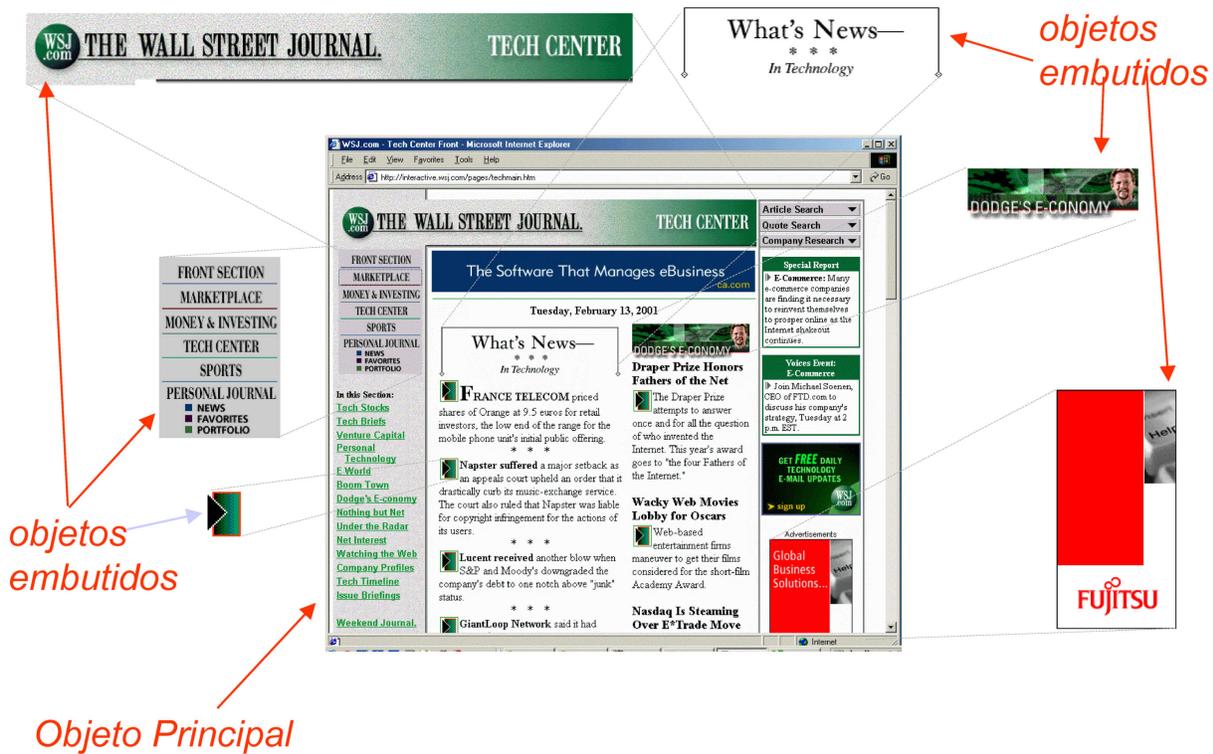


Fig. 3.13: Uma Típica Página Web e seu Conteúdo[10]

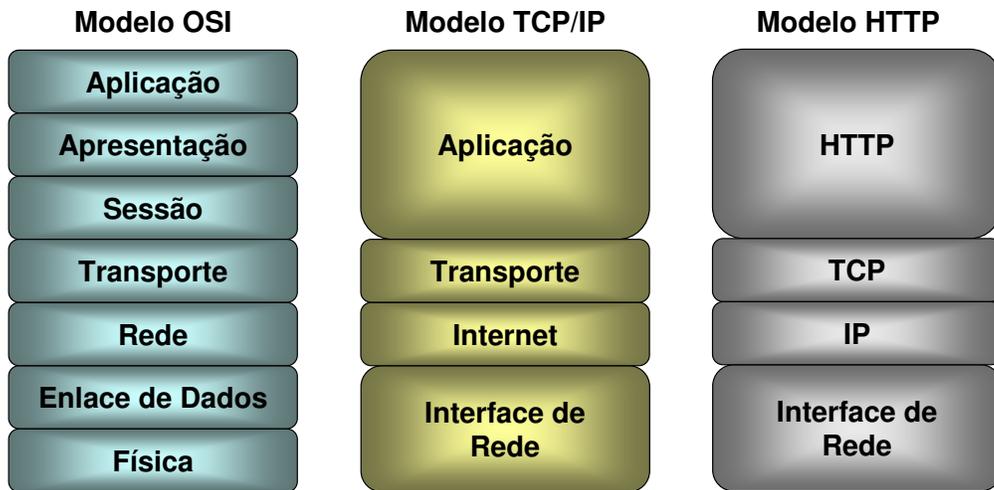


Fig. 3.14: Comparativo Modelo Referência OSI

Se houver mais objetos embutidos do que N conexões TCP simultâneas, uma nova conexão TCP é inicializada somente quando uma conexão TCP existente é fechada.

No HTTP/1.1, também conhecido como *HTTP/1.1-persistent mode transfer* são utilizadas conexões TCP persistentes em que os objetos são baixados serialmente por meio de uma única conexão TCP.

Parâmetros do Modelo de Tráfego HTTP

As distribuições dos parâmetros do modelo de tráfego HTTP foram baseadas em uma pesquisa rigorosa na literatura e propostas em [10]. Os parâmetros seguem as distribuições de probabilidade lognormal, pareto e exponencial conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tab. 3.1: Parâmetros do Modelo de Tráfego HTTP

Parâmetros		Média	Mínimo	Máximo	Distribuição
Tamanho do Objeto	Principal	10710 bytes	100 bytes	2 Mbytes	Lognormal Truncada
	Embutido	7758 bytes	50 bytes	2 Mbytes	Lognormal Truncada
Nº de Objetos Embutidos p/pág. (N_o)		5,64		53	Pareto Truncada
Tempo de Leitura (TL)		30 s			Exponencial
Tempo <i>Parsing</i>		0,13			Exponencial

Uma página web é representada por um único objeto principal e vários objetos embutidos. O tamanho do objeto principal segue uma distribuição lognormal truncada com o tamanho mínimo de 100 *bytes*, máximo de 2 *Megabytes* e média de 10.710 *bytes* com os parâmetros σ valendo 1,37 e μ sendo 8,35 (vide Tabela 3.2). Da mesma forma, os objetos embutidos possuem distribuição lognormal truncada com tamanho médio de 7.758 *bytes*, mínimo de 50 *bytes* e máximo de 2 *Megabytes* com os parâmetros σ valendo 2,36 e μ sendo 6,17.

O número de objetos embutidos (N_o) por página web obedece à distribuição Pareto truncada com média de 5,64 objetos e máximo de 53 objetos com os parâmetros k com valor 2, α sendo 1,1 e m valendo 55.

O tempo de leitura (TL) conforme o próprio nome sugere é o tempo em que o usuário gasta para fazer a leitura de uma página web entre o *download* desta página web e o *download* da próxima página web. Este tempo entre duas requisições de página web é distribuído exponencialmente com média 30 segundos.

Por fim, o tempo *parsing* é o tempo gasto para determinar o *layout* da página web após a busca do objeto principal. Este tempo segue uma distribuição exponencial com média 0,13 segundos [57].

Segundo o estudo em [58], a maioria das páginas web é baixada através dos modos HTTP/1.0-*burst* ou HTTP/1.1-*persistent*. As estatísticas apresentadas em vários estudos mostram que a distribuição de 50%-50% dos modos HTTP/1.0-*burst* e HTTP/1.1-*persistent* aproxima-se muito do com-

portamento real do tráfego web na internet. Além disso, baseado em alguns estudos sobre o tamanho dos pacotes na internet verificou-se que os MTUs de 576 bytes e 1.500 bytes representam a maioria dos tamanhos dos pacotes IP utilizados na internet. A proporção de 24%-76% dos MTUs 576 bytes e 1.500 bytes em conjunto com os segmentos de controle TCP de 40 bytes representam com boa precisão o tamanho dos pacotes IP no enlace direto. Assim, o processo de geração de tráfego web pode ser descrito pela Figura 3.15.

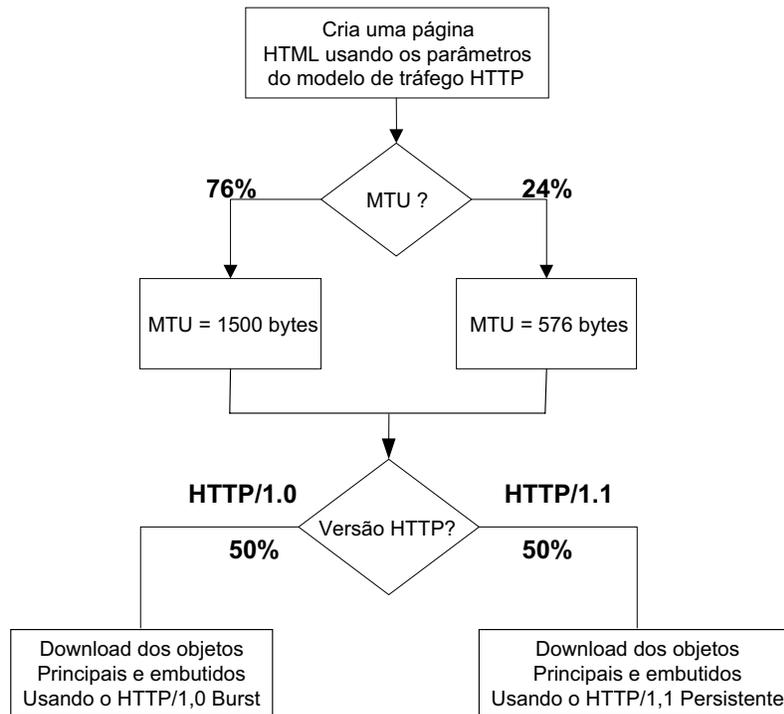


Fig. 3.15: Modelagem do *Download* de uma Página Web[10]

Tab. 3.2: Funções Densidades das Distribuições

Distribuição	PDF	Parâmetros
Lognormal Truncada	$f_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right], x \geq 0$	σ, μ
Pareto Truncada	$f_x = \frac{\alpha k^\alpha}{x^{\alpha+1}}, k \leq x < m$ $f_x = \left(\frac{k}{m}\right)^\alpha, x = m$	α, k, m
Exponencial	$f_x = \lambda \exp(-\lambda x), x \geq 0$	λ

A Tabela 3.2 apresenta todas as funções densidades probabilísticas (PDF) utilizadas no modelo de tráfego HTTP. No entanto, para a geração de números aleatórios com as distribuições lognormal,

pareto e exponencial foi adotado neste estudo o método da transformação inversa em que as distribuições podem ser invertidas analiticamente com exceção da distribuição lognormal. Este método foi aplicado em todos os modelos de tráfego estudados. Entretanto, para a geração dos números aleatórios com as distribuições citadas acima grande parte já estava implementada no *toolbox stat* da ferramenta de *software* Matlab com exceção da distribuição Pareto obtida em [59].

Modelo de Chegada de Pacotes Para HTTP/1.0-Modo *Burst*

A Figura 3.16 exibe o fluxograma adotado como modelo de chegada de pacotes para a versão do protocolo HTTP/1.0-Modo *Burst*. O modo *burst* caracteriza-se pelo *download* de até 4 objetos embutidos simultaneamente.

Modelo de Chegada de Pacotes Para HTTP/1.1-Modo Persistente

A Figura 3.17 ilustra o fluxograma adotado como modelo de chegada de pacotes para a versão do protocolo HTTP/1.1-Modo Persistente. No modo persistente os objetos embutidos de cada página web são baixados serialmente um após o outro.

3.3.2 Simulador de Eventos Discretos

A simulação de eventos discretos é uma das mais poderosas ferramentas disponíveis para modelagem e análise de problemas. Esta técnica é aplicada em diversas áreas do conhecimento, entre elas destaca-se o uso de simuladores de eventos discretos para simular redes de comunicação de dados.

A simulação é de grande importância em todas as áreas em que o número de variáveis aleatórias torna qualquer modelagem analítica inviável. Após a modelagem e a simulação do sistema em estudo, a simulação permite a avaliação do mesmo e o estudo de configurações alternativas para a implementação deste sistema. Uma vantagem importante da simulação é a flexibilidade de avaliar situações, pelo mesmo modelo, pois a avaliação de vários cenários "reais" levaria muito mais tempo e seria excessivamente dispendiosa.

De uma forma geral, um sistema de eventos discretos pode ser definido como um sistema dinâmico cujas variações de estado são estritamente condicionadas pela ocorrência de eventos. Em vez de fazer a simulação em tempo real, o programa utiliza o conceito de "tempo simulado" ou "tempo de simulação".

O que caracteriza a simulação de eventos discretos é o fato de o tempo de simulação ser descontínuo, isto é, o relógio do sistema é sempre atualizado com o evento que está na iminência de acontecer. Por exemplo, suponha que um evento e_1 ocorreu no instante t_1 do tempo simulado e foi

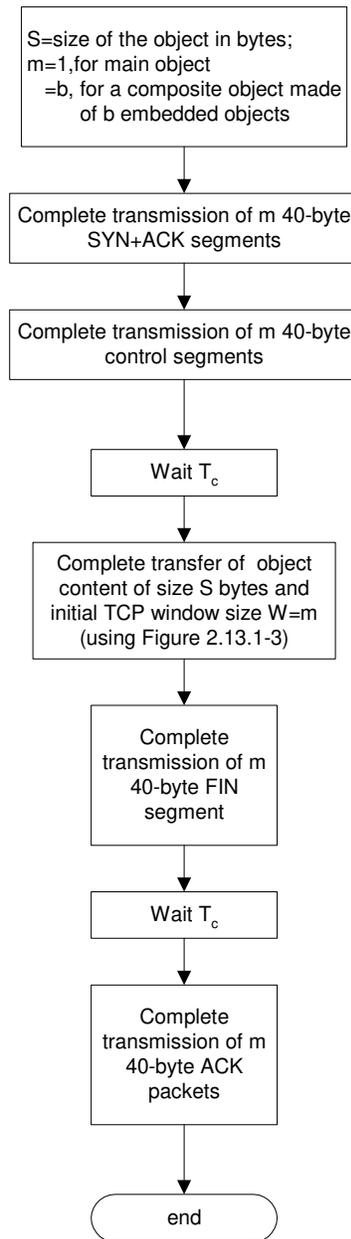


Fig. 3.16: *Download* de um Objeto no Modo HTTP/1.0 *Burst*[10]

sucedido pelo evento e_2 , o qual ocorreu no instante t_2 do tempo simulado. Se não aconteceu nenhum evento de interesse entre e_1 e e_2 então o tempo simulado pulou de t_1 diretamente para t_2 .

A ocorrência de eventos determina as mudanças de estado no simulador. Cada evento está associado a um tempo simulado. Os eventos que ainda não foram tratados pelo simulador (ou, em outras palavras, que ainda não aconteceram no tempo simulado) são mantidos numa fila denominada fila de eventos.

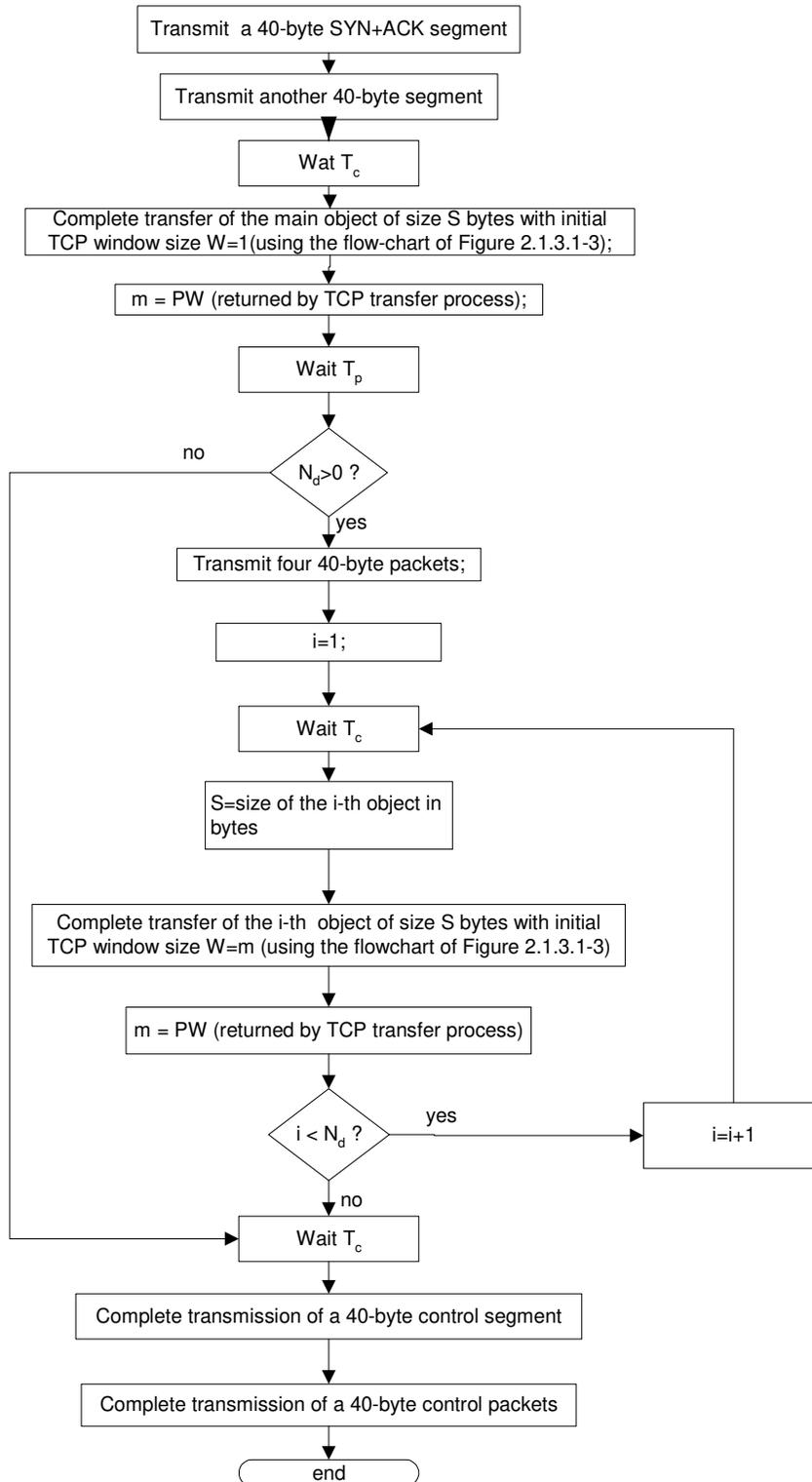


Fig. 3.17: *Download* de um Objeto no Modo HTTP/1.1 Persistente[10]

Segundo [60], um bom modelo de simulação de eventos discretos deve possuir certas características, como ser válido no sentido de representar satisfatoriamente a realidade e de incluir no mínimo somente os elementos que influenciam no problema a ser solucionado.

Aplicação em Redes de Comunicação de Dados

Neste estudo, os eventos de chegada de pacotes são gerados pelas fontes de tráfego HTTP propostas em [10] ou pelas fontes de tráfego segundo o processo de Poisson. Os eventos de chegada de pacotes destas fontes de tráfego são ordenados numa lista de eventos de chegada antes de serem processados pelo simulador de eventos discretos de acordo com o modelo de simulação implementado neste trabalho.

Após isto, para cada evento de chegada de pacote processado pelo simulador é gerado um evento de saída de pacote. O agendamento dos eventos de chegada e saída de pacotes pelo escalonador do simulador é dado pela ordem temporal dos eventos, ou seja, sempre é escalonado o evento que ocorrer primeiro. Nos eventos de chegada e saída de pacotes são coletadas estatísticas sobre os eventos. Ao final da simulação, são gerados relatórios sobre os eventos processados pelo simulador.

Além dos agendamentos de eventos de chegada e saída do simulador que correspondem à estrutura interna de implementação de um simulador de eventos discretos, há também o escalonamento de pacotes presente nos sistemas móveis CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA e WiMAX. Este escalonamento de pacotes nos sistemas móveis é um dos objetos de estudo desta tese em que são avaliados os algoritmos de escalonamento de dados apresentados na seção 3.2 deste capítulo.

O modelo básico de simulação dos sistemas CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA e WiMAX está estruturado da seguinte forma: no caso das fontes HTTP, o tráfego gerado pelos usuários que navegam na web passam por uma rede núcleo na qual esta direciona este tráfego à ERB destino. Por fim, esta ERB transmite este tráfego sobre a interface aérea e finalmente cada terminal recebe os dados a ele direcionados.

Assim, este modelo simplificado de simulação de apenas um único sistema móvel é ilustrado pela Figura 3.18. Neste modelo, todo o tráfego proveniente da rede núcleo é atendido por um único servidor (ERB) com quatro filas de prioridades em concordância com a arquitetura DiffServ. O servidor realiza o atendimento dos pacotes com taxas de dados variáveis de acordo com as condições de canal em determinado instante de tempo. Maiores detalhes sobre outros modelos de simulação de rede utilizados na avaliação dos algoritmos de escalonamento, *handoff* horizontal e vertical podem ser conferidos nas próximas seções deste capítulo e também nos Capítulos 4 e 5 respectivamente.

A base do simulador de eventos discretos utilizado ao longo deste trabalho está estruturado sob dois procedimentos principais: o de chegada de pacotes e o de saída de pacotes. De acordo com a implementação do simulador de eventos discretos um dos dois procedimentos é escalonado de

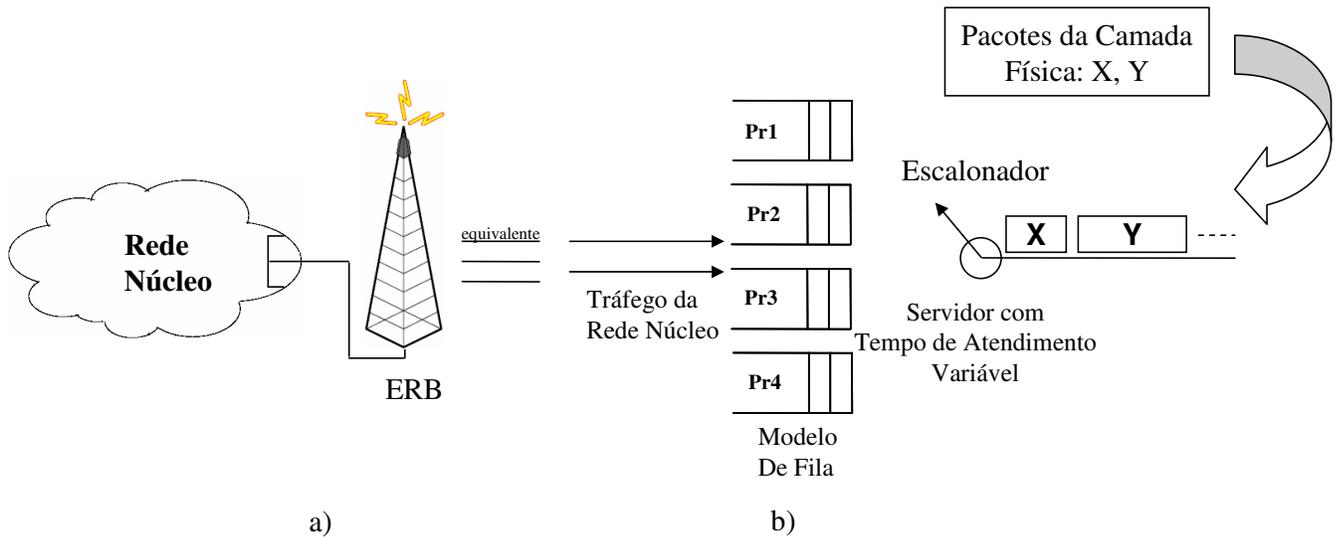


Fig. 3.18: Modelo de Simulação de Redes Básico

acordo com a iminência do evento, isto é, entre dois eventos quaisquer de chegada ou saída é sempre escalonado o que acontecer primeiro.

No procedimento de chegadas de pacotes o primeiro passo é verificar se o servidor, ou neste caso, a própria ERB está livre ou ocupada naquele instante de tempo. Se estiver livre transmite o pacote, acumulam-se estatísticas, calcula-se o tempo de serviço para pacote em questão e muda-se o estado do servidor para ocupado. Caso contrário, se houver espaço no *buffer* o pacote é armazenado no *buffer* para ser atendido posteriormente. De outra forma, o pacote é descartado.

Para o procedimento de saída de pacotes é verificado primeiramente se há pacote no *buffer*. Em caso afirmativo, calcula-se o tempo de espera no *buffer*, o tempo de serviço deste pacote, acumula-se estatísticas, muda-se o estado do servidor para ocupado e atualiza-se o ponteiro da fila para próximo pacote da fila, caso haja mais pacotes na fila. Porém, se o *buffer* estiver vazio muda-se o estado do servidor para livre.

Procedimento de Evento de Chegada

```
Definir o tempo do próximo evento de chegada  
Se o servidor está Ocupado então {  
    Se a fila está cheia então {  
        Descartar o pacote  
    }  
    Somar um ao número de pacotes na fila  
    Armazenar o instante de chegada deste pacote  
}  
Senão { /* realiza o atendimento do pacote */  
    Definir a espera do pacote na fila como sendo "0"  
    Acumular estatísticas  
    Somar 1 ao contador de pacotes atendidos  
    Mudar o estado do servidor para ocupado  
    Definir o tempo de fim de atendimento do pacote  
}  
Retornar  
}
```

Procedimento de Evento de Saída

```
Se a fila esta vazia então {  
    Mudar o estado do servidor para livre  
}  
Senão { /* selecionar um pacote da fila para execução */  
    Subtrair 1 do contador de pacotes na fila  
    Calcular o tempo de espera em fila do pacote  
    Calcular o tempo de serviço do pacote  
    Acumular estatísticas  
    Mudar o estado do servidor para ocupado  
    Somar 1 ao contador de pacotes atendidos  
    Mover o ponteiro para o próximo pacote da fila  
}  
Retornar  
}
```

Por fim, em todos os sistemas móveis avaliados os resultados das simulações computacionais são obtidos através da captação de 10 amostras de 300.000 pacotes. Em cada amostra os primeiros 100.000 pacotes são descartados, pois, ainda encontram-se no período transitório em que os resultados não estão estáveis. Finalmente, calcula-se a média, o desvio padrão e o intervalo de confiança destas 10 amostras de 200.000 pacotes o que perfaz um total de 2.000.000 de pacotes avaliados.

3.4 Avaliação dos Algoritmos de Escalonamento no Sistema UMTS/ HSDPA

3.4.1 Modelo de Simulação

Neste estudo, o desempenho do enlace direto do sistema UMTS/HSDPA é avaliado por meio de simulações feitas em Matlab. O padrão definido pelo 3GPP não especifica o escalonador de dados a ser adotado neste sistema [15]. Assim, neste trabalho os escalonadores de dados Pr e PF são avaliados e comparados com a nova proposta de escalonamento híbrido Pr/PF a fim de verificar a possibilidade de melhoria e garantia de QoS.

Modelo UMTS/HSDPA

No modelo do sistema UMTS/HSDPA os pacotes chegam ao sistema de acordo com processo de Poisson. A parte em estudo do sistema UMTS/HSDPA é mostrada na Figura 3.19a. Os pacotes gerados pela rede núcleo são enviados até o Nó B onde podem ser atendidos ou permanecer numa fila de espera enquanto aguardam o seu atendimento ou ainda serem descartados caso o *buffer* transborde. O servidor UMTS/HSDPA segue um dos esquemas de escalonamento avaliados: Pr, PF ou Pr/PF. Os pacotes são atendidos, ou seja, transmitidos de acordo com a Tabela 2.2 e também conforme a condição do canal no momento do atendimento. O número de TTIs utilizados para transmitir um pacote varia de acordo com a taxa de dados. Além disso, neste modelo de sistema pode haver várias filas infinitas ou finitas de acordo com o cenário avaliado. Assim, o modelo do enlace direto do sistema UMTS/HSDPA pode ser representado conforme a Figura 3.19b.

A suposição de fonte poissoniana é baseada em recentes medições experimentais [61] na qual constataram que num ambiente de tráfego altamente agregado, o tráfego de entrada das redes atuais pode ser modelado conforme a distribuição de Poisson numa pequena escala de tempo. Assim, o modelo de fonte de tráfego poissoniana é utilizado neste estudo.

As seguintes suposições são adotadas. No caso dos escalonadores Pr e Pr/PF em algum momento são associadas prioridades aos pacotes antes deles chegarem ao servidor para serem atendidos. O

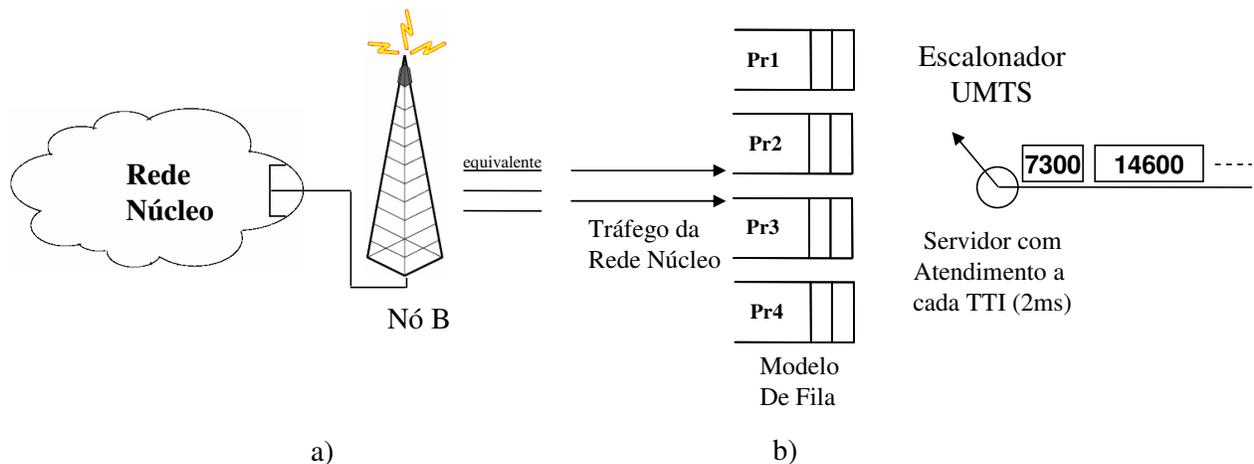


Fig. 3.19: Modelo UMTS/HSDPA

escalonador Pr utiliza o esquema de prioridade sem preempção. Os pacotes da fila de menor prioridade somente são atendidos após o atendimento de todos os pacotes da fila de maior prioridade. O *buffer* de cada fila pode ter tamanho infinito ou finito. No esquema PF os pacotes são atendidos de acordo com a maior razão da taxa de dados instantânea pela taxa média de dados. Por fim, para escalonador Pr/PF é concedido um atendimento diferenciado para os usuários com prioridades mais altas e um atendimento mais uniforme segundo o esquema PF aos outros usuários com prioridades inferiores.

As métricas de QoS avaliadas neste estudo são: a vazão, o atraso médio dos pacotes e o percentual de perda de pacotes, todas em função da carga de tráfego. Para a simulação do sistema foi utilizada a ferramenta de software Matlab.

As classes de coberturas adotadas estão distribuídas conforme a estimativa mostrada na Tabela 3.3. Os valores determinísticos, ou seja, fixos utilizados na distribuição de probabilidade da cobertura (PCobertura) não são dados reais, mas são apenas estimativas que consideram porcentagens de tráfegos maiores nas taxas intermediárias e porcentagens menores nas taxas altas ou baixas.

3.4.2 Cenário de Avaliação de Desempenho

O cenário em estudo consiste em avaliar os escalonadores de dados Pr, PF e Pr/PF face à associação de prioridades 1, 2, 3 e 4 aos pacotes no sistema UMTS/HSDPA, isto é, da prioridade mais alta 1 a prioridade mais baixa 4. Através desta diferenciação é aberta a possibilidade de análise dos benefícios proporcionados pelos escalonadores de dados aos seus usuários.

A Tabela 3.4 exibe a distribuição de prioridades (Pp) dos tráfegos poissonianos e o número de posições disponíveis no *buffers* para cada prioridade de tráfego quando estes possuem tamanhos

Tab. 3.3: Distribuição de probabilidade pela taxa de dados

Categoria	Taxa (Mbps)	PCobertura
1	1,2	3%
2	1,2	3%
3	1,8	4%
4	1,8	13%
5	3,6	12%
6	3,6	14%
7	7,2	18%
8	7,2	15%
9	10,2	8%
10	14,4	4%
11	0,9	2%
12	1,8	4%

finitos. No caso dos *buffers* infinitos a mesma distribuição de probabilidade das prioridades foi adotada durante as simulações.

Tab. 3.4: Cenário de Avaliação UMTS/HSDPA

Prioridade	Probabilidade (Pp)	B. Finito
1	10%	2
2	25%	3
3	30%	3
4	35%	4

Neste cenário são avaliadas as métricas de QoS em função da ocupação do enlace variando de 20% a 80%. Além disso, os impactos com relação ao uso de *buffers* finito e infinito são apresentados na subseção 3.4.3.

3.4.3 Análise dos Resultados

Os resultados foram obtidos por simulações computacionais e estão apresentados nos gráficos a seguir. As legendas destes gráficos estão dispostas na mesma ordem das curvas de dados para facilitar a leitura. As simulações computacionais apresentam em geral um desvio padrão de 3,21% do valor da média enquanto o intervalo de confiança de 95% apresenta 1,98% do valor da média.

As siglas BI e BF referem-se à limitação dos *buffers* sendo *buffer* infinito e *buffer* finito, respectivamente. As siglas PrX, PFX e Pr/PFX identificam o escalonador Pr, PF ou Pr/PF utilizado na avaliação do sistema UMTS/HSDPA. Além disso, o identificador X usado no final de cada sigla dos escalonadores de dados representa a prioridade de cada tráfego variando de 1 a 4, isto é, da prioridade mais alta para a prioridade mais baixa.

A Figura 3.20 mostra a vazão do sistema UMTS/HSDPA para os diversos escalonadores de dados avaliados considerando-se apenas os usuários com prioridades 1 e 4. Nesta figura, a análise é feita levando-se em conta apenas os *buffers* infinitos. Como podem ser observadas, as vazões dos diversos escalonadores avaliados são muito semelhantes tanto para os usuários de prioridade 1 na qual varia de 65 kbps até 260 kbps como para os usuários de prioridade 4 variando de 228 kbps até 910 kbps. Os usuários de prioridade 4 apresentam vazões superiores quando comparados aos usuários de prioridade 1. Este comportamento é resultante da maior proporção do tráfego de pacotes de prioridade 4 que chegam ao sistema UMTS/HSDPA.

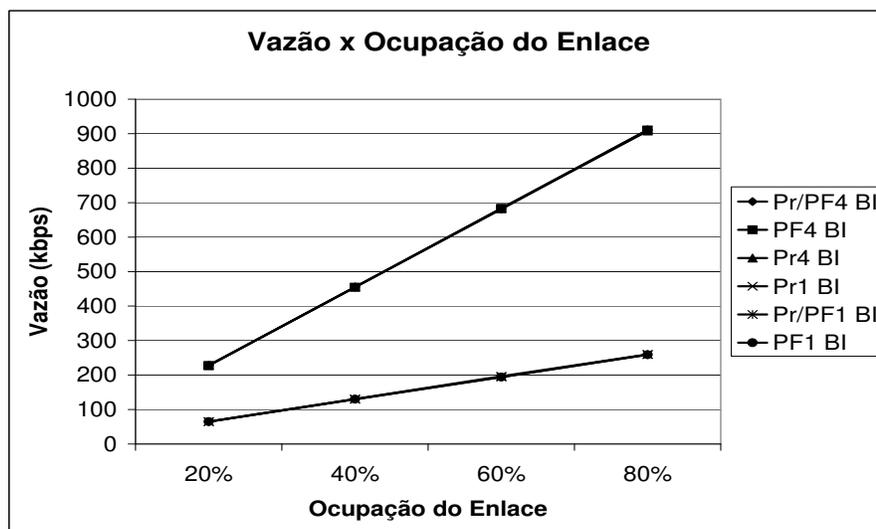


Fig. 3.20: Vazão do sistema UMTS/HSDPA sob diversos escalonadores

Com relação ao atraso médio do sistema UMTS/HSDPA, a Figura 3.21 mostra a comparação entre os escalonadores de dados. A estratégia híbrida Pr/PF1 obtém praticamente os mesmos atrasos do esquema Pr1 durante a variação da ocupação do enlace, ou seja, o escalonador Pr/PF proporcionou aos usuários de prioridade 1 a mesma QoS obtida pelo esquema prioritário. Por outro lado, quando avaliados os usuários de prioridade 4 o esquema PF4 apresenta os menores atrasos enquanto o escalonador híbrido Pr/PF4 possui melhor desempenho em relação ao esquema Pr4.

A Figura 3.22 exhibe o atraso médio dos usuários de prioridade 4 em função das condições de *buffers* BI e BF. As linhas tracejadas na figura identificam os escalonadores com *buffers* finitos. Nota-

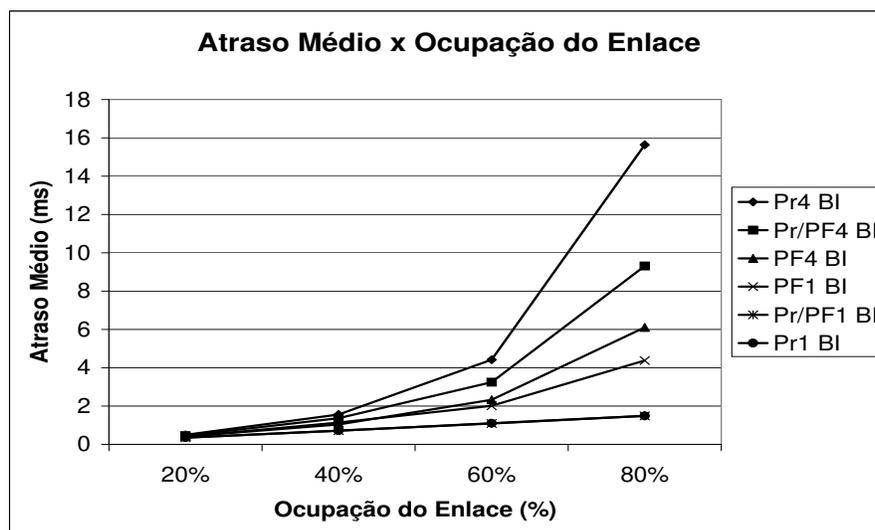


Fig. 3.21: Atraso médio do sistema UMTS/HSDPA sob diversos escalonadores

se que conforme se aumenta a ocupação do enlace do sistema UMTS/HSDPA maiores são as diferenças entre BI e BF. O escalonador Pr4 apresenta o maior ganho quando adotado BF uma vez que para uma ocupação de 80% o atraso reduz de 15 ms para 9,5 ms. O menor ganho é observado na estratégia PF4 em que para a mesma ocupação de 80% do enlace o atraso sofre uma redução de 6,1 ms para 4,9 ms. No caso do escalonamento híbrido é verificada uma redução de 9,3 ms para 7,24 ms para a mesma ocupação do enlace. A aparente melhora de desempenho com índices reduzidos de atraso quando utilizado BF está condicionada a descartes pacotes Pr4 como contrapartida.

Por fim, o percentual de descarte referente a cada escalonador de dados avaliado é mostrado pela Figura 3.23. O descarte mais significativo de pacotes ocorre quando há uma ocupação do enlace superior a 40%. Os esquemas Pr1 e o escalonador híbrido Pr/PF1 apresentam ínfimos índices de descarte em torno de 0,02% mesmo para uma ocupação de 80% do enlace. Estes índices são decorrentes do atendimento diferenciado conferido aos usuários com prioridades mais altas. Por outro lado, para estes mesmos usuários de alta prioridade o escalonador PF1 apresenta percentuais de descarte de 0,30%. No caso dos usuários de baixa prioridade acontece uma inversão de posições. Neste caso, o escalonador PF4 apresenta os menores índices de descarte comparado aos outros esquemas de escalonamento.

Assim, a diferenciação de tráfego, por meio de prioridades atribuídas aos pacotes, o escalonador de dados híbrido Pr/PF apresentou desempenho semelhante aos obtidos pelo esquema prioritário para os usuários com prioridades 1 e 2. Além disso, o esquema Pr/PF mostrou-se mais justo do que esquema Pr quando comparado às medidas de desempenho dos usuários de prioridade 4. Entretanto, o melhor esquema de atendimento para os usuários com baixas prioridades demonstrou ser o

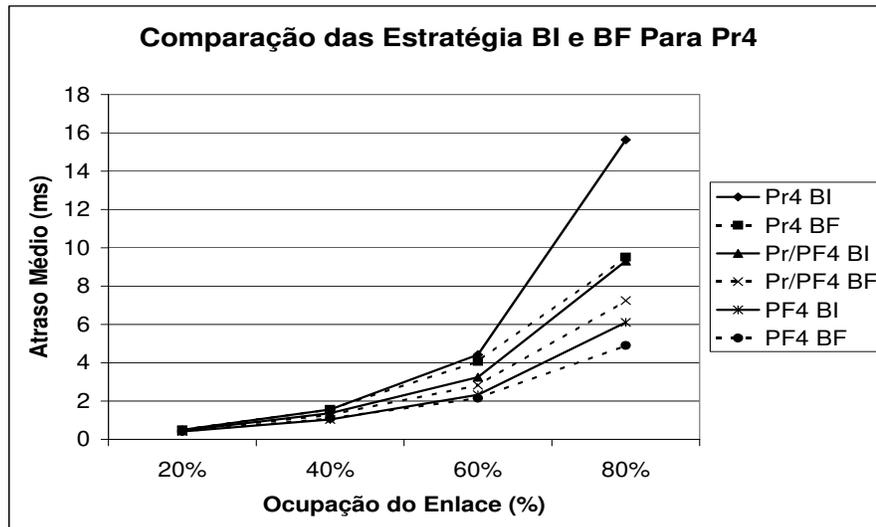


Fig. 3.22: Atraso médio Pr4 do sistema UMTS/HSDPA sob diferentes estratégias para a limitação do *buffer*

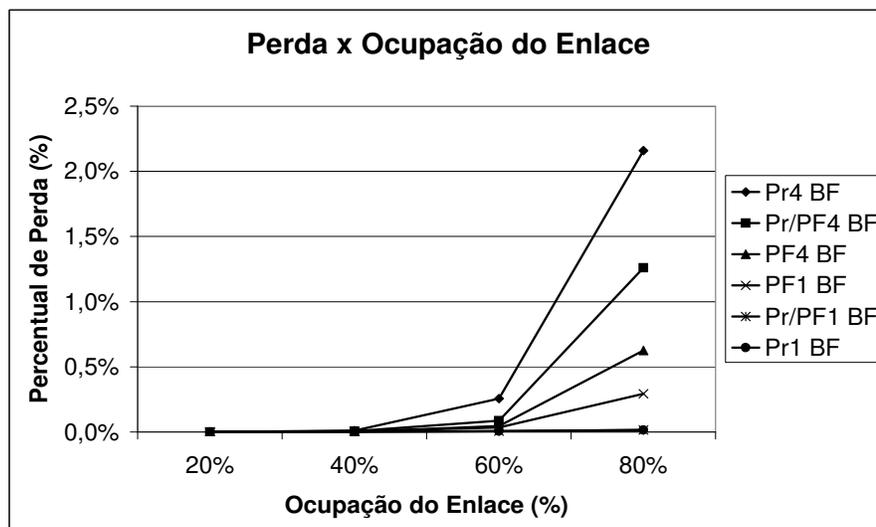


Fig. 3.23: Percentual de perda do sistema UMTS/HSDPA sob diversos escalonadores

escalonador PF em que é realizado um atendimento justo a todos os usuários independente das suas prioridades.

3.5 Avaliação dos Algoritmos de Escalonamento no Sistema WiMAX

3.5.1 Modelo de Simulação

Na Figura 3.24a é mostrada a parte do sistema WiMAX em estudo na qual se compreende a rede núcleo e a ERB. Os pacotes IP gerados pelo tráfego das aplicações web alcançam a rede núcleo e esta por sua vez os envia para o *buffer* da ERB. Neste ponto os pacotes são divididos em quatro filas (UGS, rtPS, nrtPS e BE) de acordo com as prioridades dos pacotes e ficam aguardando na fila até serem atendidos. Os pacotes IP (1.500 bytes e 576 bytes) podem ser eventualmente segmentados em vários pacotes da camada física do sistema WiMAX para poderem ser totalmente transmitidos. Assim, o modelo de simulação do enlace direto do sistema WiMAX pode ser representado conforme ilustrado na Figura 3.24b.

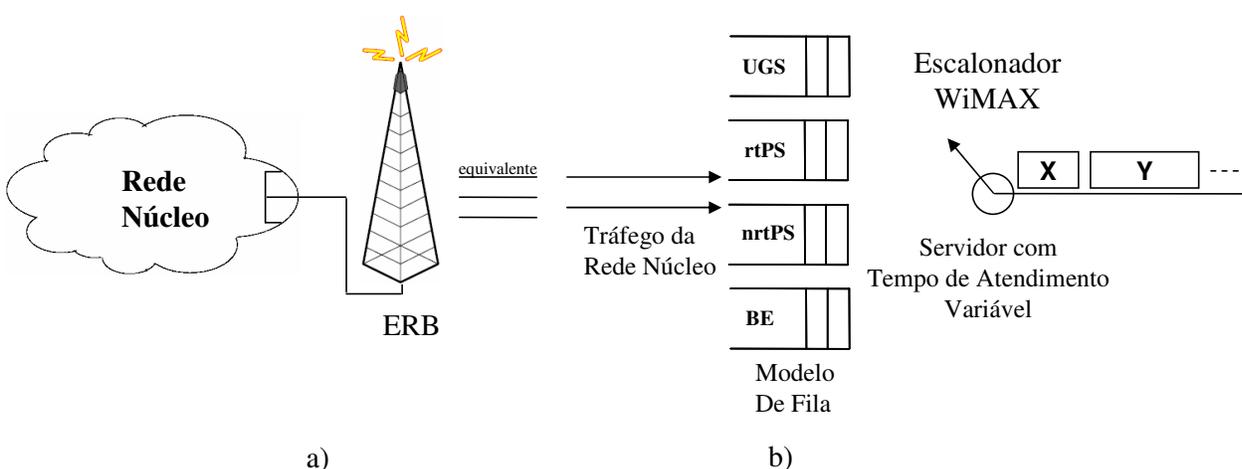


Fig. 3.24: Modelo de Simulação WiMAX

As seguintes suposições são adotadas. Os pacotes IP gerados pelas fontes HTTP propostas em [10] são classificados em quatro tipos de serviços definidos na arquitetura de QoS WiMAX, isto é, os serviços UGS, rtPS, nrtPS e BE. O escalonador de dados utiliza os algoritmos PF [27], Max C/I [19] ou o algoritmo Pr/PF proposto em [43]. O *buffer* de cada fila tem tamanho finito. Os tamanhos das filas são definidos na subseção 3.5.2. Um *slot* WiMAX compreende 48 subportadoras de dados e 24 subportadoras piloto em 3 símbolos OFDM de acordo com [5]. Assim, considera-se um total de 16 *slots* em um quadro WiMAX na qual pode ser dividido na proporção *DownLink/UpLink* (DL/UL) de 3:1 no esquema MIMO 2x2, isto é, 1 *slot* de *overhead*, 3 *slots* para o UL e 12 *slots* para o DL.

Na Tabela 3.5 é mostrada a distribuição das taxas de dados adotada nesta simulação. A distribuição adotada é hipotética e é considerada uma vazão de dados concentrada em 12,67 Mbps.

Tab. 3.5: Distribuição de Probabilidade x Taxa de Dados

DL(Mbps)	Probabilidade
1,06	3%
1,58	4%
3,17	6%
6,34	10%
9,50	12%
12,67	17%
19,01	16%
19,01	14%
25,34	9%
28,51	5%
31,68	4%

3.5.2 Cenário de Avaliação de Desempenho

O cenário avaliado consiste em aumentar o número de fontes HTTP variando de 152 (20% de ocupação de enlace) até 675 (80% de ocupação de enlace) conforme exibido na Tabela 3.6. O número de fontes HTTP foi obtido através de estimativas baseadas em simulações computacionais. Vários escalonadores de dados são utilizados a fim de avaliar qual escalonador PF, Max C/I e Pr/PF garante a melhor QoS para seus usuários. No escalonador Pr/PF o serviço UGS possui a prioridade mais alta seguido do serviço rTPS com a segunda prioridade mais alta enquanto os outros serviços nrtPS e BE são atendidos de acordo com escalonador PF. O comportamento do sistema WiMAX é analisado através de duas filas finitas: uma com tamanho pequeno de 10 pacotes e outra com tamanho grande de 100 pacotes. A distribuição de probabilidade, a proporção de tráfego, e os tamanhos dos *buffers* adotados neste estudo são exibidos na Tabela 3.7.

Tab. 3.6: Cenário de Avaliação WiMAX

Ocupação do Enlace	Fontes HTTP
20%	152
40%	310
60%	470
80%	675

As métricas de QoS consideradas neste estudo são: atraso médio dos pacotes, a vazão de dados e o percentual de perda, todos em função da carga de tráfego.

Tab. 3.7: Proporção de Serviços x Tamanho do *Buffer*

Prioridade	Proporção	Buffer1	Buffer2
UGS	10%	1	10
rtPS	25%	3	25
nrtPS	30%	3	30
BE	35%	3	35
Total	100%	10	100

3.5.3 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos através de simulações estão organizados e apresentados em gráficos. Nestes gráficos o acrônimo BX representa o *buffer* finito 1 ou 2. O *buffer* 1 é ilustrado como uma linha contínua enquanto o *buffer* 2 como linha tracejada. Além disso, os acrônimos PFX, MaxCIX e Pr/PFX referem-se aos escalonadores PF, Max C/I e Pr/PF, e X representa o nível de prioridade. O nível 1 é a prioridade mais alta, isto é, o tráfego gerado pelo serviço UGS. Por outro lado, o nível 4 representa a prioridade mais baixa, ou seja, o serviço de melhor esforço e assim por diante. As simulações computacionais apresentam um desvio padrão de 3,32% do valor da média enquanto o intervalo de confiança de 95% apresenta 2,06% do valor da média.

As vazões dos usuários Pr1 e Pr4 apresentam o mesmo comportamento para todos os escalonadores avaliados conforme mostrado nas Figuras 3.25 e 3.26. As vazões de dados são normalmente maiores quando utilizado o *buffer* 2 com capacidade de 100 pacotes IP e menores quando utilizado o *buffer* 1 com capacidade de 10 pacotes IP, pois, ao utilizar o *buffer* 2 há menos descartes de pacotes enquanto no *buffer* 1 ocorre o inverso com mais pacotes descartados. Em relação ao comportamento das vazões, os escalonadores PF, Max C/I e Pr/PF apresentaram pouca influência sob as mesmas em relação aos usuários com prioridade 1 ou 4. Entretanto, é possível notar uma pequena vantagem do escalonador Pr/PF1 na Figura 3.25 devido à prioridade absoluta dos usuários. Na outra Figura 3.26 pode ser observado o melhor desempenho dos usuários PF4 em razão do escalonador PF direcionar mais recursos aos usuários com baixa prioridade. Os outros usuários Pr2 e Pr3 apresentam desempenhos similares.

A Figura 3.27 ilustra o atraso médio dos usuários Pr1 em função da ocupação do enlace variando de 20% até 80%. Conforme pode ser observado nesta figura os atrasos obtidos pelo o escalonador Pr/PF1 são muito pequenos e independente do esquema de *buffer* adotado devido a prioridade absoluta dos usuários Pr1. O escalonador Max C/I apresenta um desempenho intermediário com atrasos entre 0,16 ms e 1,9 ms. O escalonador PF1 apresenta o pior desempenho com atraso máximo de 2,5 ms em razão do escalonador tentar manter a equidade entre os usuários.

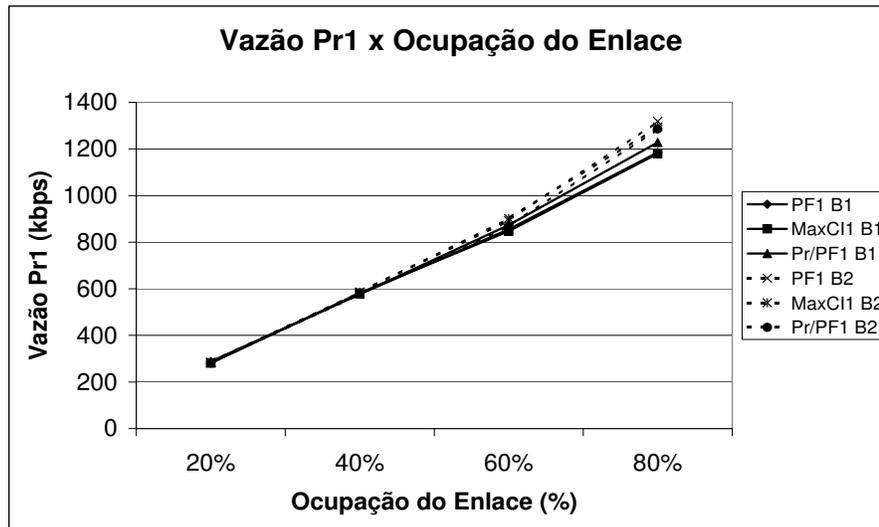


Fig. 3.25: Vazão Pr1 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace

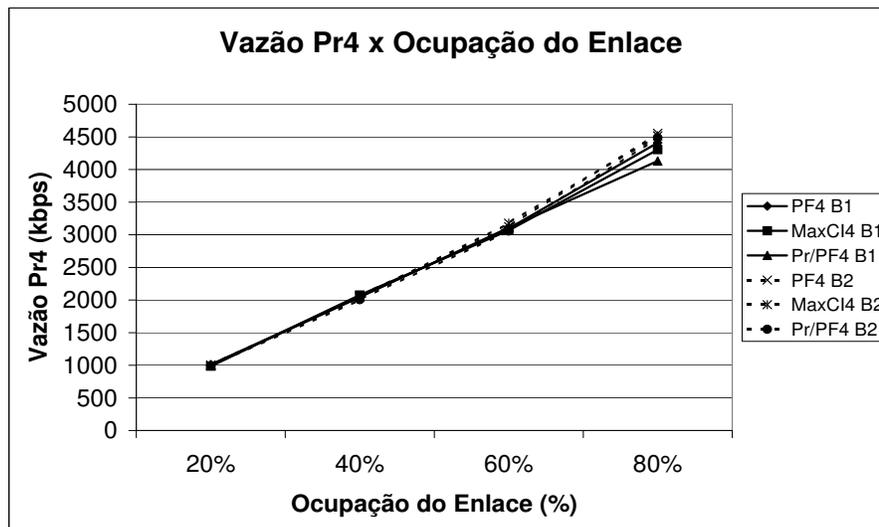


Fig. 3.26: Vazão Pr4 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace

Na Figura 3.28 é apresentado atraso médio dos usuários Pr2 em função da ocupação do enlace. O comportamento da curva de dados é similar a Figura 3.27. Contudo, devido a prioridade intermediária dos usuários Pr2 os atrasos médios observados em todos escalonadores aumentaram aproximadamente 0,5 ms em relação aos usuários Pr1. O melhor desempenho está associado ao escalonador Pr/PF2 independente do tamanho do *buffer* escolhido variando de 0,2 ms até 1 ms. Para os outros escalonadores quando utilizado o *buffer* 1 o atraso médio é reduzido para o máximo de 2 ms no pior caso.

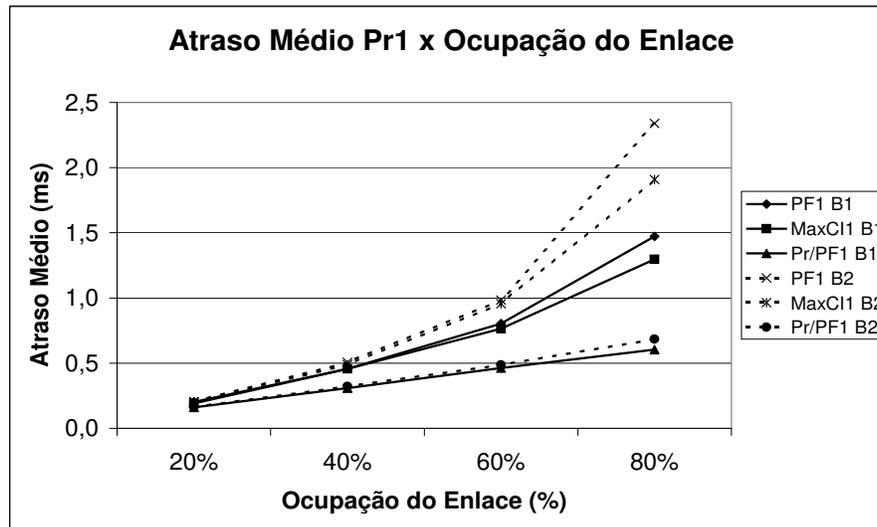


Fig. 3.27: Atraso Médio Pr1 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace

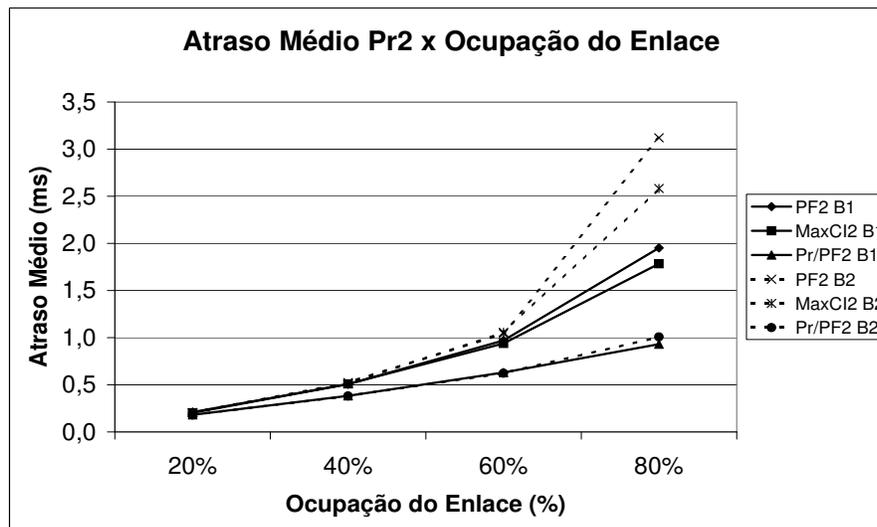


Fig. 3.28: Atraso Médio Pr2 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace

O atraso médio dos usuários Pr3 em função da ocupação do enlace é mostrado na Figura 3.29. A maioria dos escalonadores de dados avaliados apresentam atrasos médios menores do que 4 ms para ambos tamanhos de *buffer*. Todavia, há uma exceção no caso do escalonador Pr/PF3 quando utilizado o *buffer 2* com ocupação de enlace de 60%, pois, neste ponto ocorre uma saturação do sistema WiMAX em virtude do excesso de usuários com baixa prioridade. O escalonador Pr/PF3 apresenta o pior desempenho mesmo quando considerado o *buffer 1* com tamanho reduzido variando de 0,2 ms até 2,98 ms. Os melhores resultados são obtidos pelos escalonadores Max C/I e PF com

atraso médio de 3,74 ms.

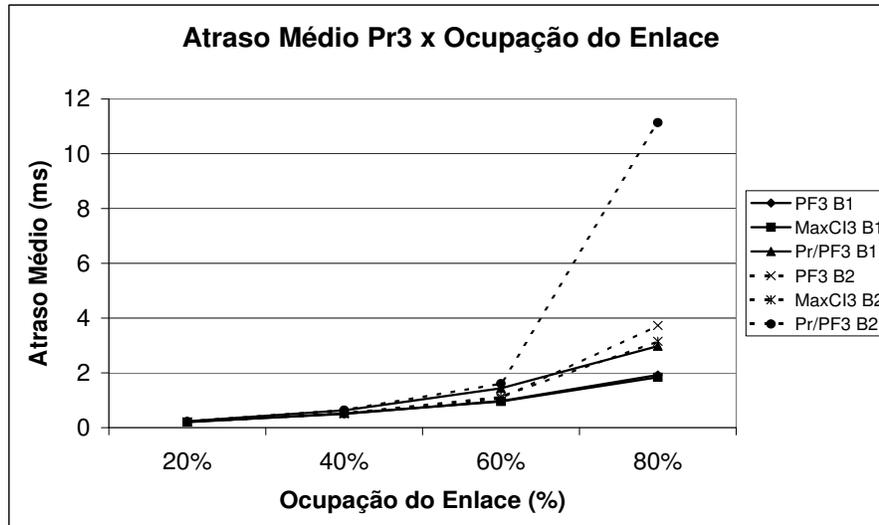


Fig. 3.29: Atraso Médio Pr3 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace

Na Figura 3.30, o atraso médio dos usuários Pr4 é mostrado em função da ocupação do enlace variando de 20% até 80%. O escalonador Pr/PF4 apresenta a pior média de atraso entre os escalonadores avaliados com atrasos variando de 0,2 ms até 12 ms para o *buffer 2*. No caso do *buffer 1*, o atraso médio é reduzido para a faixa de 0,2 ms até 2,85 ms. Contudo, esta redução está associada com um alto percentual de perda de pacotes. Em relação aos outros escalonadores PF4 e MaxCI4, os resultados mostram atrasos tolerantes com no máximo 4 ms no pior caso.

O percentual de perda de pacotes IP dos usuários Pr1 em função ocupação do enlace no sistema WiMAX é mostrado na Figura 3.31. Mais uma vez pode ser observado que o escalonador Pr/PF1 obtém o menor percentual de perda de pacotes IP durante a simulação em razão da alta prioridade dos seus usuários Pr1. Os outros escalonadores PF1 e MaxCI1 apresentam no máximo 1% de perda no pior caso. No caso do percentual de perda do *buffer 2*, as perdas são desprezíveis devido a grande capacidade do *buffer* de 100 pacotes IP.

Na Figura 3.32 é exibido o percentual de perda de pacotes dos usuários Pr2 em função da ocupação do enlace. Os percentuais de descarte de pacotes mais altos são os obtidos pelo escalonador MaxCI2 B1 variando de 0% até 0,87% durante as simulações computacionais. O escalonador PF2 B1 apresenta um desempenho intermediário com máximo de 0,57% de perda no pior caso devido a boa distribuição de recursos no sistema WiMAX entre os seus usuários. Os melhores resultados são verificados pelo escalonador Pr/PF2 como resultado da prioridade absoluta dos usuários Pr2 variando de 0% até 0,08%. Nos outros casos quando é adotado o *buffer 2* o percentual de perda é insignificante.

O percentual de perda dos usuários Pr3 em função da ocupação do enlace é exibido na Figura 3.33.

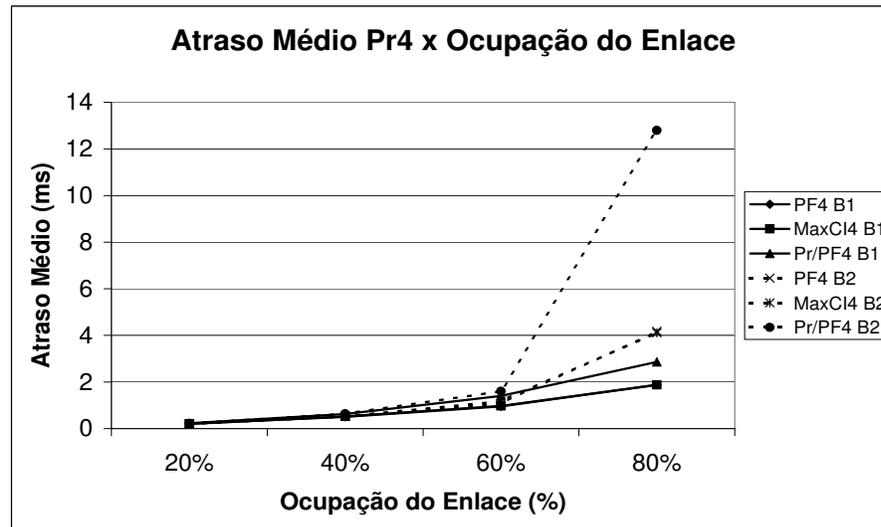


Fig. 3.30: Atraso Médio Pr4 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace

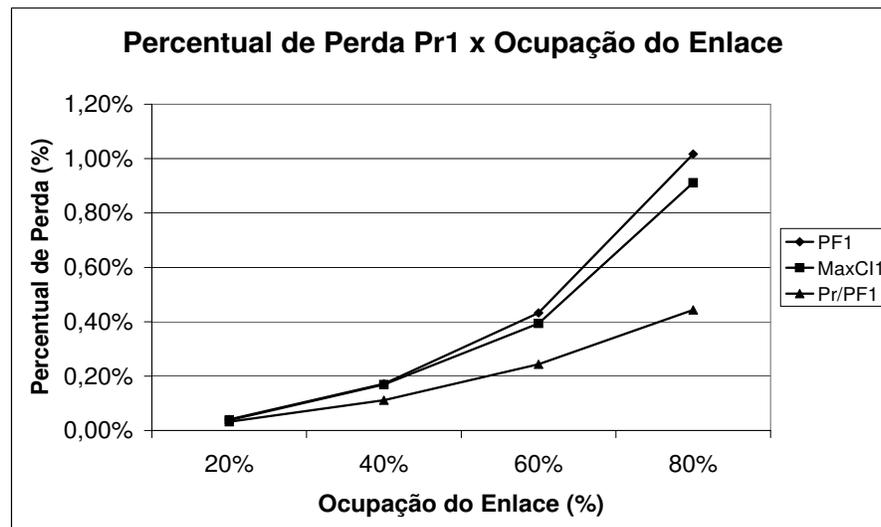


Fig. 3.31: Percentual de Perda Pr1 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace

Neste caso devido a baixa prioridade dos usuários e ao tamanho pequeno do *buffer* o escalonador Pr/PF3 B1 apresenta o maior percentual de perda entre os escalonadores avaliados. Os escalonadores PF3 B1 e MaxCI3 apresentam desempenhos semelhantes com o máximo de 0,92% de perda para uma ocupação de enlace de 80%. No caso do *buffer* 2 o percentual de perda de todos os escalonadores foram reduzidos significativamente em razão da grande capacidade do *buffer*. Entretanto, o escalonador Pr/PF3 B2 apresenta um pequeno percentual de perda de 0,15% para uma ocupação de enlace de 80%.

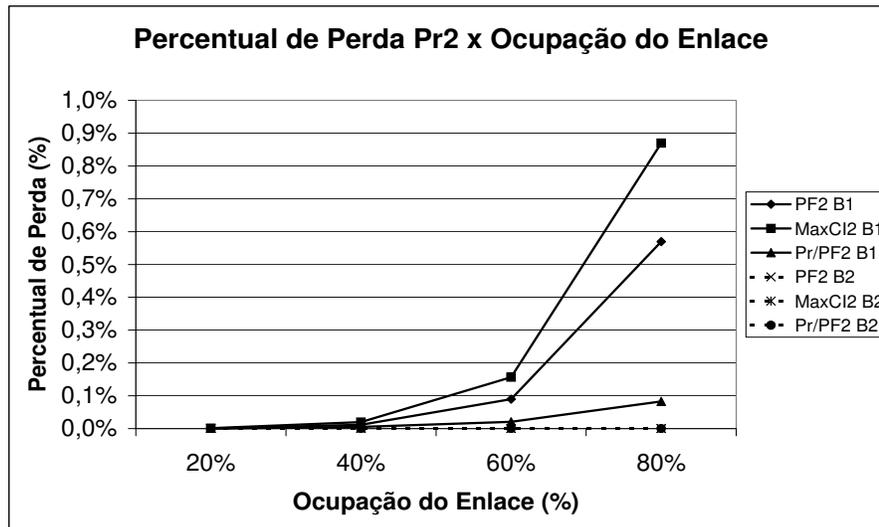


Fig. 3.32: Percentual de Perda Pr2 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace

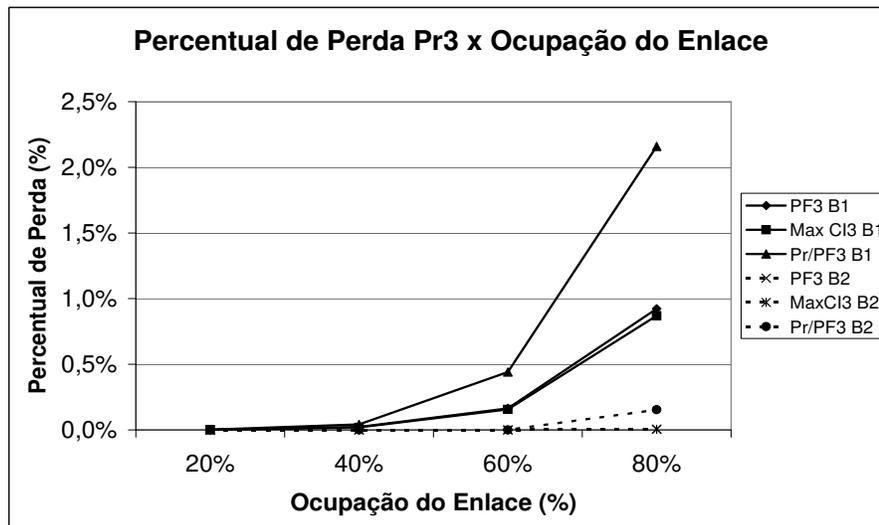


Fig. 3.33: Percentual de Perda Pr3 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace

Finalmente, a Figura 3.34 exibe o percentual de perda de pacotes IP para o usuários Pr4 em função da ocupação do enlace. Conforme pode ser observado o escalonador Pr/PF4 apresenta um alto índice de descarte de pacotes em razão da baixa prioridade dos usuários. O percentual de perda atinge até 3% de descarte para uma ocupação de enlace de 80%. Os outros escalonadores PF4 e MaxCI4 apresentam pequenos percentuais de perda com uma pequena vantagem para o escalonador PF4.

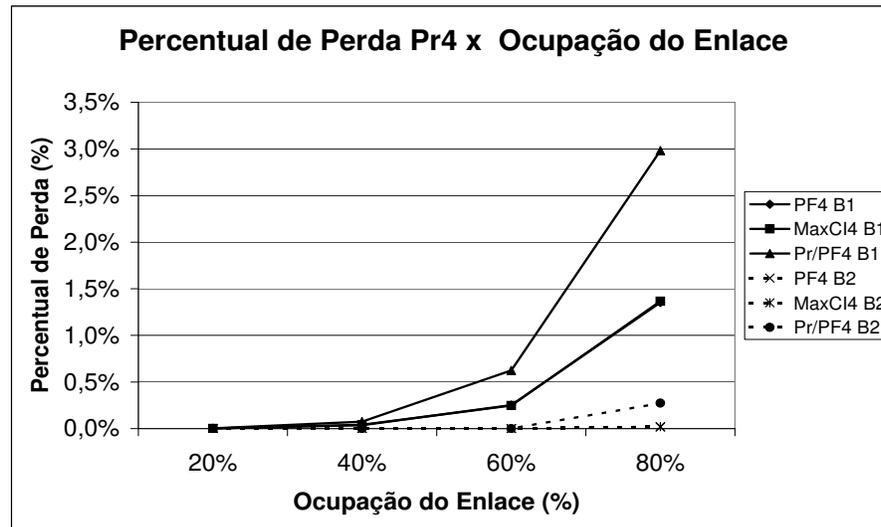


Fig. 3.34: Percentual de Perda Pr4 no Sistema WiMAX em Função da Ocupação do Enlace

3.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os algoritmos de escalonamento de dados DRR, Max C/I, PF, Pr e a nova proposta Pr/PF utilizados ao longo desta tese. Além dos algoritmos é detalhada a plataforma de simulação adotada neste estudo. A plataforma baseia-se num simulador de eventos discretos aplicado às redes de comunicação de dados. Desta forma, através deste simulador são avaliados os sistemas UMTS/HSDPA, CDMA 1xEV-DO RA e WiMAX. Em adição à plataforma de simulação também foi descrito em detalhes o modelo das fontes de tráfego HTTP adotado durante as simulações computacionais.

Além disso, o desempenho do enlace direto dos sistemas UMTS/HSDPA e WiMAX foi avaliado através de simulações computacionais levando-se em consideração os modelos de tráfegos HTTP e Poisson e também de vários escalonadores de dados como Pr, PF, Max C/I e Pr/PF. As seguintes métricas de QoS foram estudadas: a vazão, o atraso médio e o percentual de perda, todos em função da ocupação do enlace.

Em suma, o escalonador de dados PF garantiu atendimento mais justo a todos os usuários com pequenos percentuais de perda de pacotes e baixos atrasos. Desta forma, do ponto de vista dos usuários de melhor esforço, o escalonador PF apresenta o melhor desempenho uma vez que distribui os recursos do sistema igualmente entre todos usuários do sistema.

Por outro lado, o escalonador híbrido Pr/PF ofereceu aos usuários com altas prioridades a mesma QoS do escalonador prioritário. Além disso, quando considerados os usuários com prioridades inferiores permitiu assegurar a QoS em níveis próximos aos obtidos pelo escalonador PF. Em outras

Capítulo 4

Algoritmos de *Handoff* Horizontal

4.1 Introdução

O mecanismo de *handoff* tradicional também conhecido como *handoff* horizontal considera a potência do sinal [44] recebido, a distância do usuário em relação à ERB e a relação SINR para tomada de decisão no processo de *handoff*. Entretanto, devido à crescente demanda de aplicações sensíveis ao tempo, os fatores anteriormente citados tornam-se insuficientes para a tomada de decisão num processo de *handoff*.

Neste Capítulo são propostos dois novos critérios de aceitação de tráfego *handoff* horizontal que levam em conta a qualidade de serviço dos tráfegos. Nos critérios de aceitação de tráfego *handoff* os tráfegos são discriminados em classes de serviços e são tratados separadamente para satisfazerem as QoS individuais. A aceitação de tráfego *handoff* é baseada na potência do sinal e também na ocupação do *buffer* e de forma a não degradar o tráfego interno de uma célula. Os critérios propostos são avaliados em conjunto com escalonadores Max C/I, PF e a nova proposta Pr/PF que podem afetar o desempenho do sistemas HSDPA e 1xEV-DO RA.

4.2 Algoritmos de *Handoff* Horizontal

Os algoritmos de *handoff* horizontal propostos neste estudo baseiam-se em critérios de aceitação de tráfego *handoff*. Estes critérios visam atender aos estritos requisitos de QoS (baixos atrasos, *jitter* com variação reduzida e o pequeno percentual de perda de pacotes) das aplicações em tempo real e promover a integração entre as células da maneira mais suave possível. Para alcançar estes objetivos os critérios consideram além da potência do sinal recebido também o percentual de ocupação dos *buffers* como fatores determinantes para a tomada de decisão num processo de *handoff*.

4.2.1 Critério 1 de Aceitação de Tráfego *Handoff*

No critério 1 de aceitação, os pacotes são divididos em quatro tipos de prioridades e discriminados em diferentes *buffers*, um para cada prioridade. Esta divisão dos pacotes em quatro prioridades está em concordância com a arquitetura DiffServ, em que os usuários dos serviços podem ser classificados de acordo com a qualidade de serviço (QoS) ouro, prata, bronze ou o melhor esforço. Neste critério os pacotes internos das células do sistema 1xEV-DO RA ou HSDPA somente são descartados quando o *buffer* estiver cheio. No caso dos pacotes *handoff* ocorrem descartes nas situações em que o *buffer* esteja cheio ou quando o pacote *handoff* pertencer às classes de cobertura inferiores 1, 2, 3 e 4 (vide as Tabelas 2.1 e 2.2), isto é, as classes que se caracterizam por apresentar sinais de baixa potência. A Figura 4.1 ilustra este critério em que λ_{pix} representa a taxa de perda de pacotes internos em razão do *buffer* estar cheio e $(\lambda_{phx} + \lambda_{phci x})$ simboliza a taxa de perda de pacotes *handoff* devido ao transbordamento do *buffer* e também ao descarte das classes de cobertura inferiores.

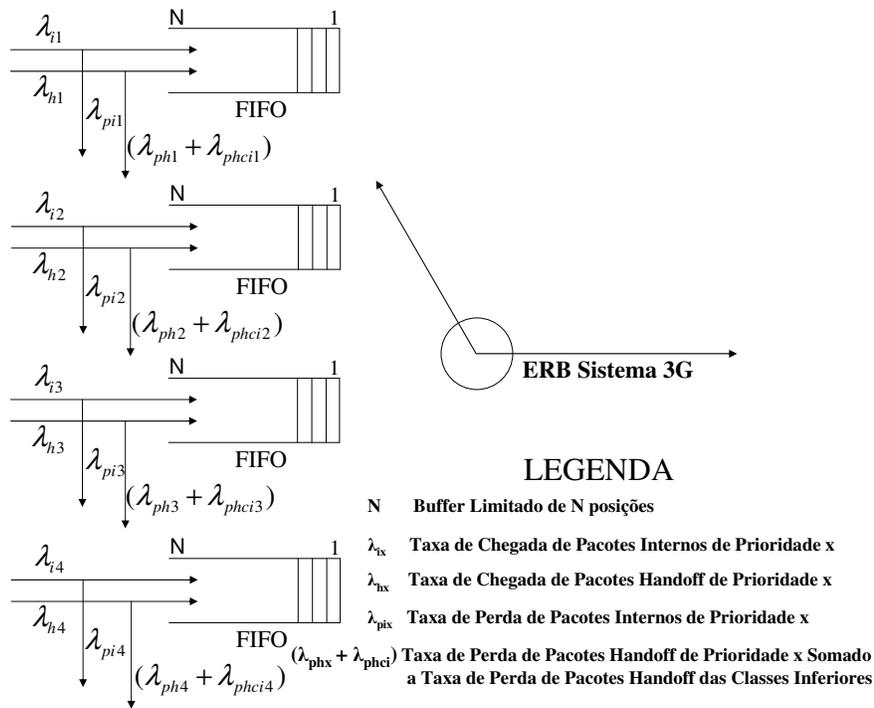


Fig. 4.1: Critério 1 de Aceitação de Tráfego *Handoff*

4.2.2 Critério 2 de Aceitação de Tráfego *Handoff*

O critério 2 de aceitação de tráfego *handoff* utiliza a seguinte estratégia: até 30% de ocupação do *buffer* aceitam-se ambos os tráfegos interno e *handoff*, em outras palavras, não ocorrem descartes de

pacotes. Quando o nível de ocupação do *buffer* está entre 30% e 50% ocorre somente o descarte dos pacotes *handoff* no caso destes pacotes pertencerem às classes de coberturas inferiores 1, 2, 3 e 4 no sistema 1xEV-DO RA ou HSDPA. Finalmente, na situação em que há mais de 50% de ocupação do *buffer* descartam-se os pacotes em *handoff* e também os pacotes internos das células sem distinção. Os pacotes internos e em *handoff* somente serão aceitos novamente no sistema quando a ocupação do *buffer* for inferior a 50%. Neste critério a ocupação do *buffer* é consultada a todo instante em que chega algum pacote ao sistema 1xEV-DO RA ou HSDPA e o servidor está ocupado. O principal objetivo deste critério é garantir QoS das conexões já em andamento. A Figura 4.2 exibe o último critério para a aceitação de tráfego *handoff*.

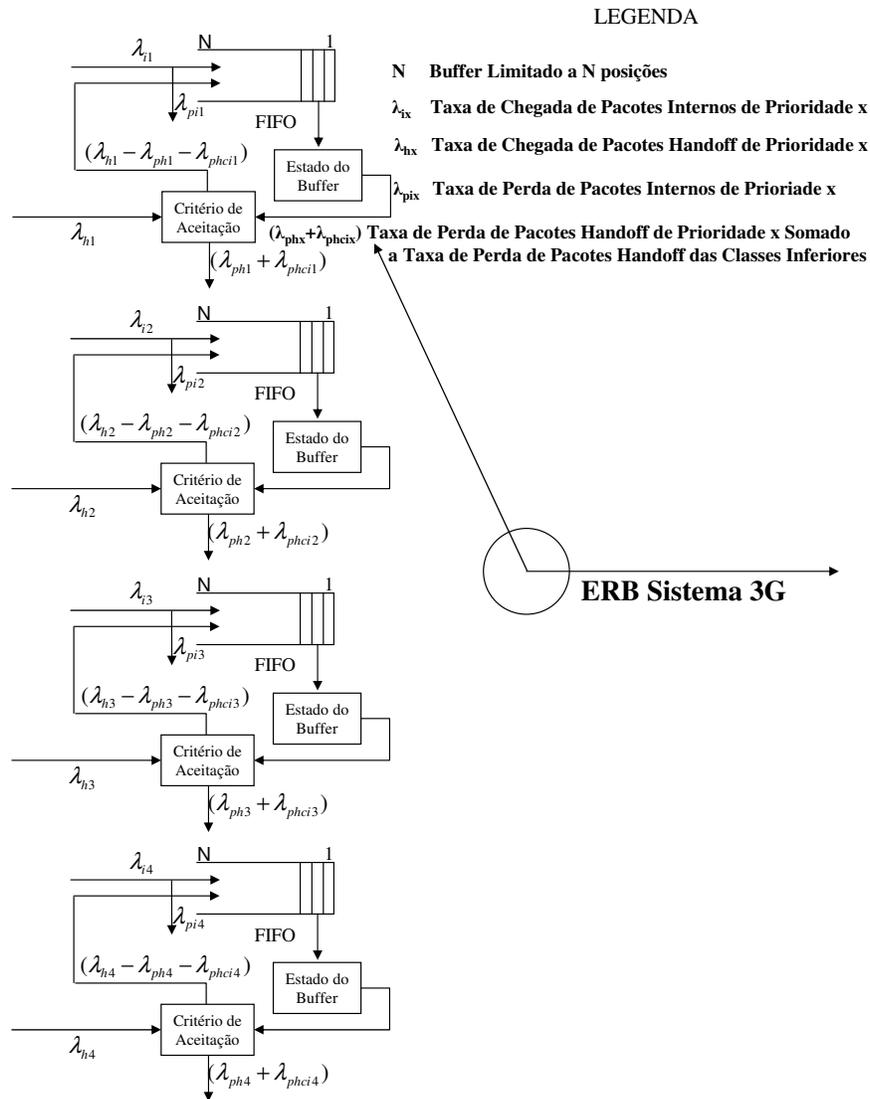


Fig. 4.2: Critério 2 de Aceitação de Tráfego *Handoff*

4.3 Modelo de Simulação

Neste estudo, o desempenho dos sistemas 1xEV-DO RA e HSDPA são avaliados durante o processo de *handoff*, isto é, além do tráfego interno da célula 1xEV-DO RA ou HSDPA são incorporados nesta célula tráfegos *handoff* provenientes de outras n células vizinhas. A fim de assegurar a QoS do tráfego interno das células durante o processo *handoff* dos sistemas 1xEV-DO RA e HSDPA são propostas estratégias para aceitação de tráfego *handoff* em conjunto com a escolha dos escalonadores de dados Max C/I, PF e a nova proposta Pr/PF.

4.3.1 Modelo *Handoff* 3G

O modelo *handoff* simplificado adotado neste estudo considera o impacto da entrada de tráfego *handoff* proveniente de várias ERBs numa única ERB, ou seja, os terminais de outras células adjacentes movem-se de uma ERB N para a ERB 1 como ilustra a Figura 4.3. Desta forma, um terminal que partiu de uma ERB em direção a ERB destino pode ser atendido de acordo com a distribuição de probabilidade da taxa de dados da Tabela 4.1 ou 4.2, isto é, dependendo da proximidade da ERB destino, da velocidade do terminal, da condição do canal naquele instante de tempo entre outros fatores. O terminal em *handoff* pode ser atendido por qualquer taxa de dados segundo a distribuição de probabilidade presente nas Tabelas 4.1 ou 4.2.

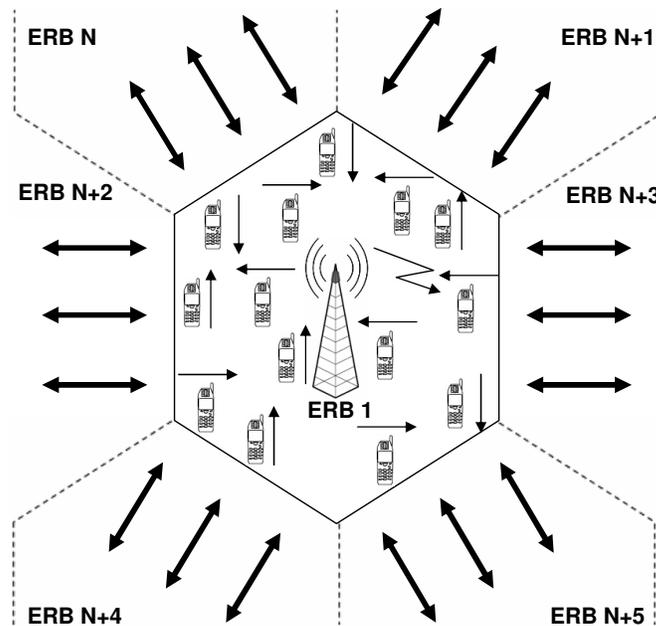


Fig. 4.3: Modelo *Handoff* 3G

Tab. 4.1: Distribuição de Probabilidade pela Taxa de Dados 1xEV-DO RA

Classes de Cobertura	Taxa (kbps)	PCobertura
1	38,4	2%
2	76,8	3%
3	153,6	8%
4	307,2	15%
5	614,4	20%
6	921,6	14%
7	1228,8	13%
8	1536,0	10%
9	1843,2	8%
10	2457,6	4%
11	3072,0	3%

Tab. 4.2: Distribuição de Probabilidade pela Taxa de Dados HSDPA

Categoria	Taxa (Mbps)	PCobertura
1	1,2	3%
2	1,2	3%
3	1,8	4%
4	1,8	13%
5	3,6	12%
6	3,6	14%
7	7,2	18%
8	7,2	15%
9	10,2	8%
10	14,4	4%
11	0,9	2%
12	1,8	4%

Para representar o cenário exibido pela Figura 4.3, o tráfego total de chegada de pacotes λ_{total} é dividido entre λ_h e λ_i , ou seja, tráfego de chegada *handoff* e tráfego de chegada dos pacotes internos da célula respectivamente. A notação λ é meramente ilustrativa com o propósito de diferenciar os tráfegos internos e em *handoff*. A ERB dos sistemas 1xEV-DO RA ou HSDPA atende ao pacote conforme as Tabelas 4.1 ou 4.2 mediante a condição do canal no momento do atendimento do pacote. Além disso, neste modelo de sistema pode haver até quatro filas finitas de acordo com as prioridades

atribuídas aos tráfegos que se pretende avaliar.

A representação de cada ERB segue o modelo da Figura 4.4a. Os pacotes internos ou em *handoff* gerados na rede núcleo são enviados até um *buffer* da ERB e ficam esperando até o atendimento. O atendimento (ou a transmissão) dos pacotes é feito de acordo com a Tabela 2.1 ou 2.2. Dessa maneira, o número de *slots* utilizados para transmitir um pacote varia de acordo com a taxa de dados. Os pacotes são eventualmente segmentados para acomodarem nas taxas que serão enviados. Assim, o modelo do enlace direto dos sistemas 3G 1xEV-DO RA ou HSDPA pode ser representado conforme a Figura 4.4b.

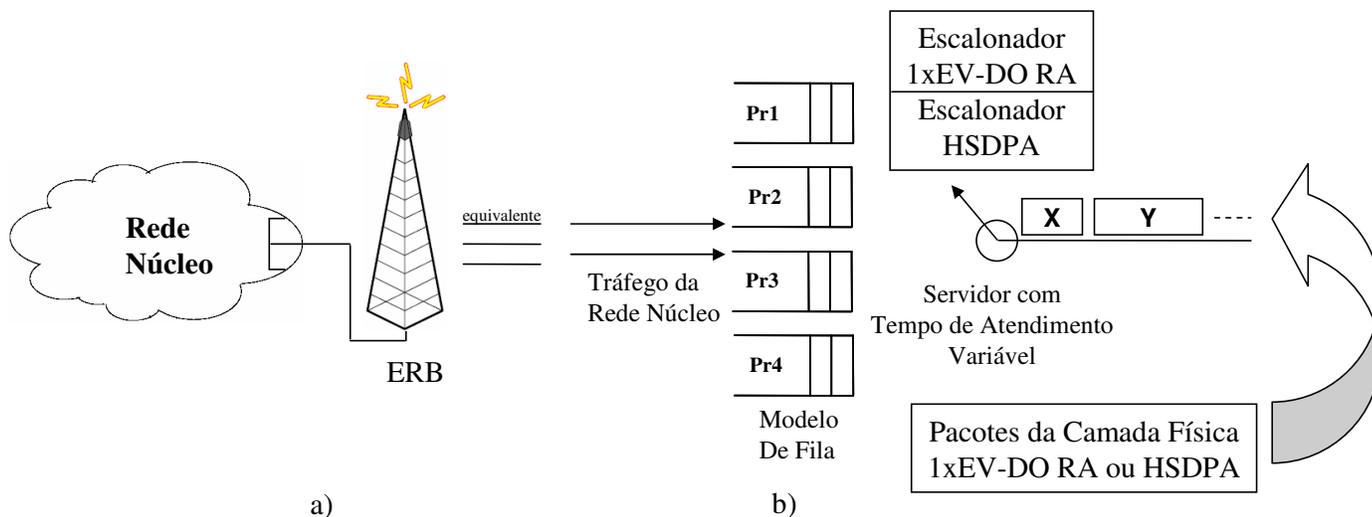


Fig. 4.4: Modelo 3G

As seguintes suposições são adotadas. Com o objetivo de obter uma melhor aproximação das atuais redes de dados são utilizadas fontes de tráfego HTTP. As fontes HTTP utilizadas neste estudo são as mesmas propostas em [10]. Em determinado momento são associadas prioridades aos pacotes antes de chegar ao escalonador. O escalonador baseia-se nos esquemas Max C/I, PF ou ainda Pr/PF. O *buffer* de cada fila tem tamanho finito e os pacotes HTTP são armazenados no esquema FIFO. Neste modelo *handoff* são desconsiderados o ruído e as interferências de outras células. O impacto da saída de tráfego *handoff* da célula 1xEV-DO RA ou HSDPA é desconsiderado devido ao maior fluxo de entrada de tráfego *handoff*.

As métricas de QoS avaliadas neste estudo são: a vazão, o atraso médio dos pacotes e o percentual de perda de pacotes, todos em função da taxa de chegada de tráfego *handoff*. Para a simulação deste modelo foi utilizada a ferramenta de *software* Matlab.

As classes de coberturas adotadas estão distribuídas conforme a estimativa mostrada na Tabela 4.1 ou 4.2. Os valores determinísticos, ou seja, fixos utilizados na distribuição de probabilidade da

cobertura (PCobertura) não são dados reais, mas são apenas estimativas que consideram porcentagens de tráfegos maiores nas taxas intermediárias e porcentagens menores nas taxas altas ou baixas.

4.4 Avaliação dos Algoritmos de *Handoff* Horizontal no Sistema 1xEV-DO RA

4.4.1 Cenário de Avaliação de Desempenho

O cenário apresentado neste estudo avalia o desempenho do sistema 1xEV-DO RA durante o processo de *handoff* através de novos critérios para aceitação de tráfego *handoff*. Além disso, estes critérios são avaliados em conjunto com os escalonadores de dados Max C/I, PF e o novo escalonador proposto neste estudo Pr/PF.

A distribuição de probabilidade das prioridades adotadas neste estudo são apenas estimativas baseadas em proporções maiores para os tráfegos de baixa prioridade e em proporções menores para os tráfegos de alta prioridade. Esta distribuição visa representar o cenário em que há um menor número de usuários dispostos a pagar mais para obter serviços diferenciados. Além da distribuição de probabilidade das prioridades, a Tabela 4.3 exibe os tamanhos dos *buffers* para cada tipo de prioridade, ou seja, o número máximo de pacotes permitidos no *buffer* relativo a cada prioridade. Outro objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da variação do tamanho do *buffer* no desempenho do sistema 1xEV-DO RA. Desta forma, dois tamanhos de *buffers* são considerados para cada prioridade.

Tab. 4.3: Distribuição de Prioridades X Tamanho dos *Buffers* 1xEV-DO RA

Prioridade	Proporção	<i>Buffer1</i>	<i>Buffer2</i>
1	10%	1	10
2	25%	3	25
3	30%	3	30
4	35%	3	35
Total	100%	10	100

O cenário em estudo consiste em manter fixo o número de fontes internas HTTP (6 unidades) da célula 1xEV-DO RA e aumentar o número de fontes HTTP *handoff* de 0 até 29 fontes. Este cenário avalia a combinação dos novos critérios de aceitação de tráfego *handoff* juntamente com a escolha do escalonador de dados com o objetivo de assegurar a QoS no sistema 1xEV-DO RA. A Tabela 4.4 mostra o cenário avaliado. Nota-se pela Tabela 4.4, por exemplo, o cenário em que há um total de 15

fontes HTTP. Deste total 9 delas, ou seja, 60% do total pertencem ao tráfego HTTP *handoff* enquanto as outras 6 fontes representam os outros 40% do tráfego HTTP interno da célula.

Tab. 4.4: Cenário Avaliado CDMA 1xEV-DO RA

Percentual de Tráfego Interno	100%	86%	40%	26%	17%
Percentual de Tráfego <i>Handoff</i>	0%	14%	60%	74%	83%
Nº de Fontes HTTP Internas	6	6	6	6	6
Nº de Fontes HTTP <i>Handoff</i>	0	1	9	17	29
Nº Total de Fontes HTTP	6	7	15	23	35

4.4.2 Análise dos Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações do sistema 1xEV-DO RA. Os diferentes critérios para aceitação de tráfego *handoff* estão identificados pelas siglas Pot e PotOcp. A sigla Pot representada nos gráficos pelas linhas tracejadas refere-se ao critério 1 na qual se leva em conta a potência do sinal recebido. A outra sigla PotOcp representada pelas linhas contínuas nos gráficos faz referência ao critério 2 na qual são consideradas a potência do sinal recebido e a ocupação dos *buffers* na tentativa de assegurar a melhor QoS no processo de *handoff* do sistema 1xEV-DO RA. As simulações computacionais apresentam em geral um desvio padrão de 3,01% do valor da média enquanto o intervalo de confiança de 95% apresenta 1,85% do valor da média.

Além das siglas que identificam os critérios para a aceitação de tráfego *handoff* são utilizadas as siglas MXCI, PF e Pr/PF representando, respectivamente, os escalonadores de dados *Maximum Carrier Interference*, *Proportional Fair* e *Priority Proportional Fair*. Por fim, os números nos finais das siglas que identificam os escalonadores de dados, associam prioridades a cada tipo de tráfego variando de 1 a 4, isto é, da prioridade mais alta para prioridade mais baixa.

Na Figura 4.5 é exibida a vazão do sistema 1xEV-DO RA relacionado ao tráfego HTTP interno de prioridade 1 para a condição de *buffer* 1 (veja a Tabela 4.3) em função do aumento do percentual de tráfego HTTP *handoff*. A vazão do tráfego interno de prioridade 1 no sistema 1xEV-DO RA independente do critério de aceitação e do escalonador de dados adotado decresce aproximadamente de 9 kbps para entre 8,5 a 7 kbps conforme ocorre o aumento do percentual de tráfego *handoff*. O comportamento destas curvas mostra que o critério 2 de aceitação de tráfego *handoff* (PotOcp) obtém vazões menores ao longo da simulação em virtude do descarte de pacotes HTTP internos quando a ocupação do *buffer* está acima de 50%. Por outro lado, o critério 1 (Pot) apresenta vazões maiores, pois os pacotes internos somente são descartados quando o *buffer* estiver cheio. Do ponto de

vista de escalonador de dados, o escalonador Pr/PF, independente do critério de aceitação de tráfego *handoff*, apresenta as maiores vazões durante a simulação. Este desempenho é resultado do aumento da eficiência do sistema 1xEV-DO RA em consequência do maior número de usuários atendidos e da redução de pacotes descartados.

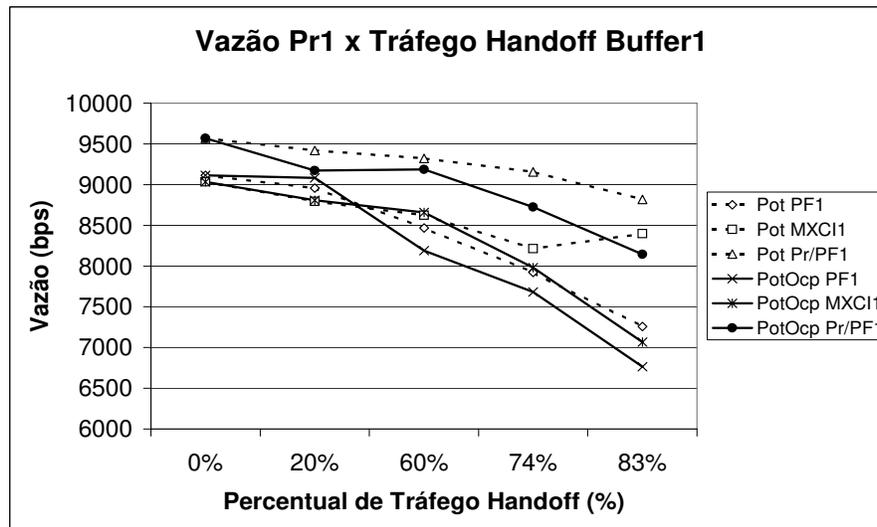


Fig. 4.5: Vazão do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no *Buffer* 1 da Célula 1xEV-DO RA

A Figura 4.6 mostra a vazão do sistema 1xEV-DO RA do tráfego HTTP interno dos pacotes de prioridade 4 para a condição de *buffer* 2. Nota-se nesta figura a diminuição das vazões dos esquemas avaliados variando de 34 kbps até aproximadamente 31 kbps de acordo com o aumento do percentual de tráfego HTTP *handoff*. Devido à baixa prioridade dos pacotes de prioridade 4 as vazões destes usuários são altamente sensíveis ao aumento de tráfego *handoff*, isto é, conforme se aumenta o tráfego *handoff* maior é o número de pacotes de prioridade 4 descartados no sistema. Esta sensibilidade torna-se mais acentuada a partir do percentual de 74% de tráfego *handoff*. Nos pontos em que o percentual de tráfego *handoff* são predominantes na célula 1xEV-DO RA, o critério 2 garante vazões maiores aos usuários de baixa prioridade com exceção do escalonador PF. Este desempenho é ainda melhorado quando utilizado o escalonador Pr/PF em conjunto com o critério 2 na qual proporciona vazões entre 34 kbps e 31,8 kbps.

Na Figura 4.7 é mostrada a vazão do sistema 1xEV-DO RA, porém para o tráfego HTTP *handoff* dos pacotes de prioridade 4 no *buffer* 2. Nesta figura como esperado, as vazões do tráfego *handoff* crescem gradativamente conforme se aumenta o número de pacotes *handoff* presentes no sistema. O critério PotOcp obtém as maiores vazões com máximo de 151 kbps e mínimo de 5,5 kbps durante a simulação. Este desempenho é resultante do descarte de pacotes *handoff* somente ocorrer quando, no mínimo, há uma ocupação superior a 30% do *buffer* 2. No outro critério Pot, os pacotes *handoff*

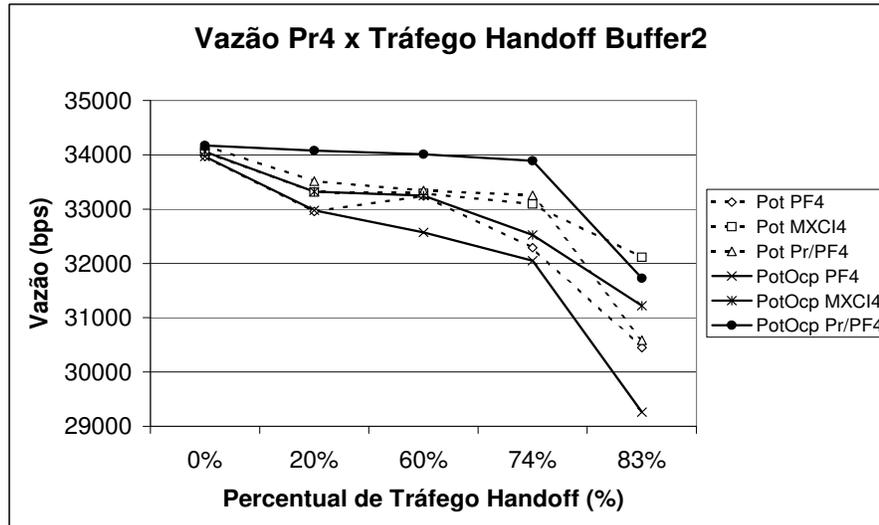


Fig. 4.6: Vazão do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no *Buffer 2* da Célula 1xEV-DO RA

são descartados invariavelmente quando estes pertencerem às classes de coberturas inferiores. Desta forma, as vazões deste critério são menores do que as obtidas pelo critério PotOcp. Deve-se salientar que o escalonador Pr/PF4, independente do critério de aceitação, apresenta as maiores vazões de tráfego *handoff*, uma vez que maximiza a alocação de recursos do sistema.

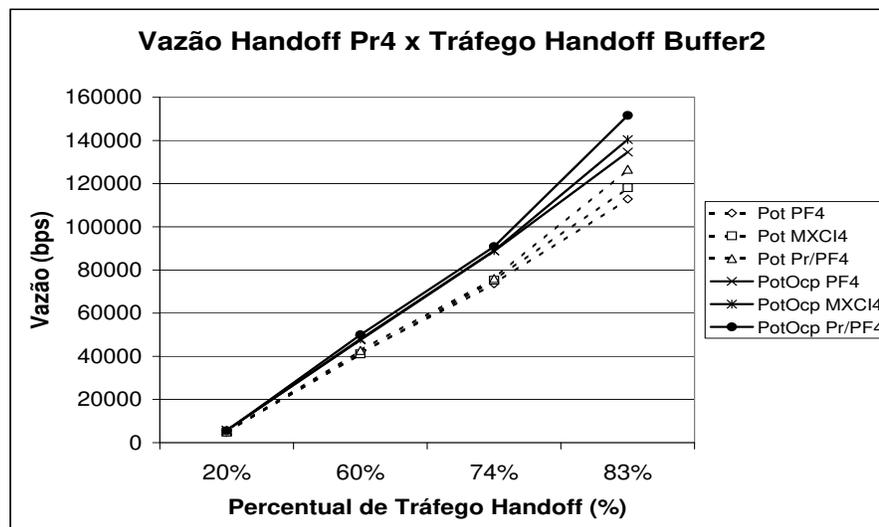


Fig. 4.7: Vazão do Tráfego *Handoff* de Pacotes Pr4 no *Buffer 2* da Célula 1xEV-DO RA

O atraso médio dos pacotes HTTP internos no sistema 1xEV-DO RA com prioridade 1 para a condição de *buffer 1* é mostrado na Figura 4.8. Os menores atrasos ao longo da simulação são con-

feridos ao escalonador Pr/PF em que é dada a prioridade absoluta ao usuário de prioridade mais alta, variando de 8,5 ms até 13,9 ms. O escalonador de dados Max C/I apresenta desempenho intermediário com atrasos de 19 ms a 35 ms, consequência direta da escolha do escalonador por usuários com as maiores taxas de dados. Por outro lado, o escalonador PF1 possui o pior desempenho quando comparado aos outros escalonadores de dados com os atrasos variando de 19 ms a 80 ms. Os critérios de aceitação de tráfego *handoff* pouco influíram no desempenho do sistema 1xEV-DO RA sob o ponto de vista dos usuários de alta prioridade.

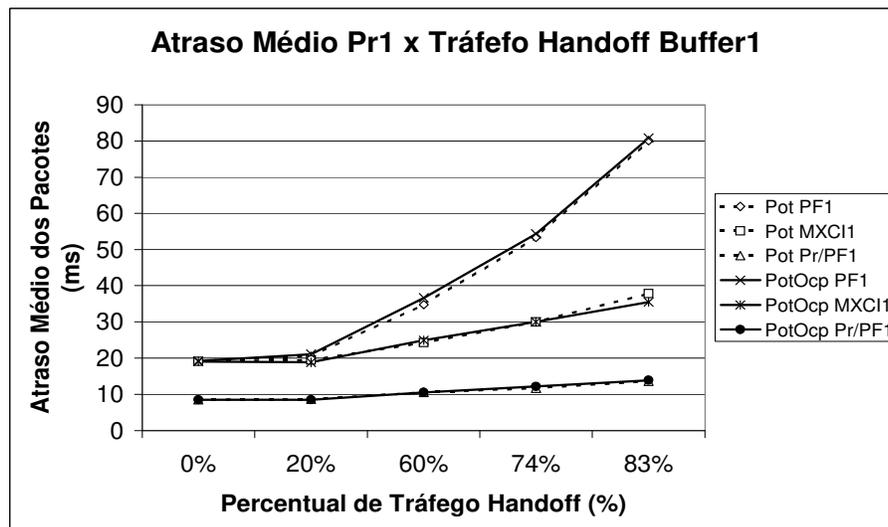


Fig. 4.8: Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no *Buffer* 1 da Célula 1xEV-DO RA

Na Figura 4.9 avalia-se o atraso médio dos pacotes HTTP internos do sistema 1xEV-DO RA, porém com o *buffer* 2, a fim de verificar o impacto do tamanho dos *buffers* no desempenho do sistema. O comportamento das curvas de dados é semelhante ao da Figura 4.8. Contudo, em razão do aumento do *buffer* de 10 para 100 posições, os atrasos verificados são maiores do que na figura anterior devido ao maior número de pacotes presentes no sistema. Por exemplo, para o esquema PotOcp PF1 o atraso varia de 25 ms a 309 ms, ou seja, o atraso é quase 4 vezes maior do que PotOcp PF1 com *buffer* 1. Outro ponto notado é o menor atraso do esquema Pot PF1 na comparação com o PotOcp PF1 ao longo da simulação, consequência direta do maior número de pacotes *handoff* descartados do esquema Pot PF1. A exceção é o escalonador de dados Pr/PF1 em que o atraso observado é muito próximo do obtido na Figura 4.8, variando de 8,75 ms a 14,6 ms devido à prioridade absoluta associada ao usuário de prioridade 1. Nota-se que mesmo aumentando-se o número de posições no *buffer* em dez vezes em relação ao *buffer* 1, o escalonador Pr/PF manteve a eficiência no atendimento dos pacotes internos da célula 1xEV-DO RA.

Na Figura 4.10 é mostrado o atraso médio dos pacotes HTTP internos no sistema 1xEV-DO RA

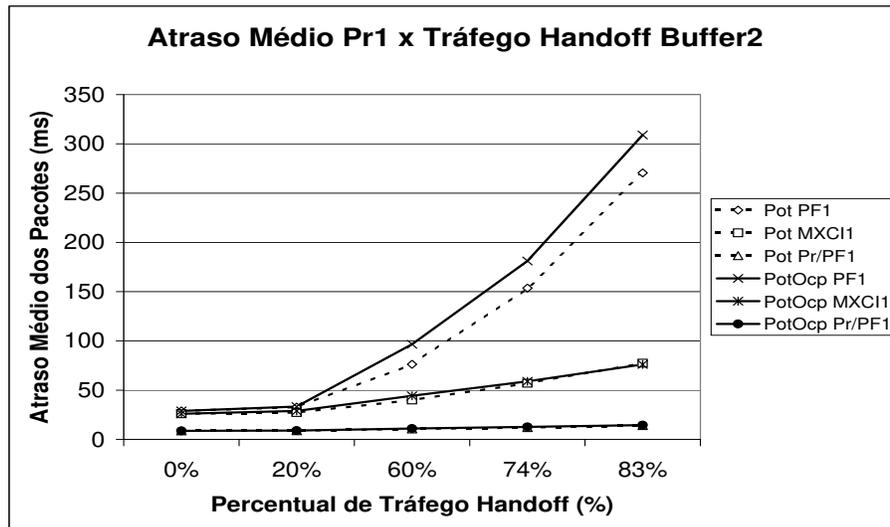
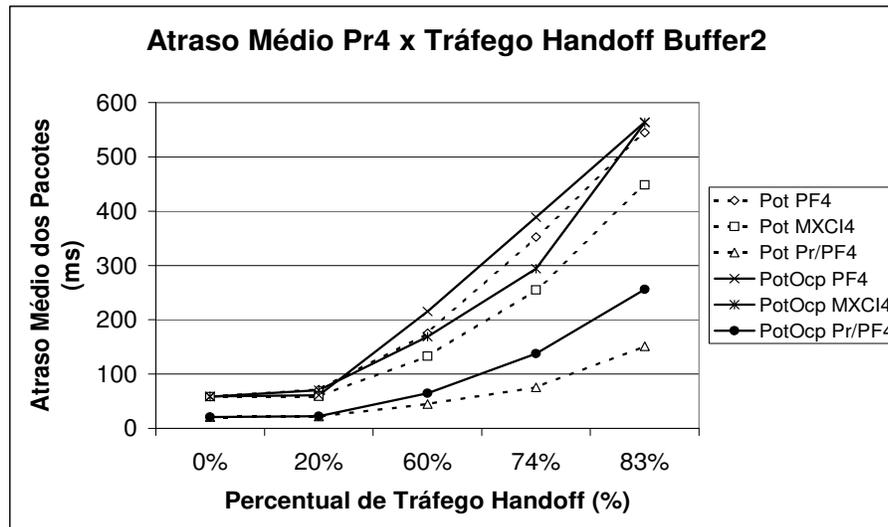
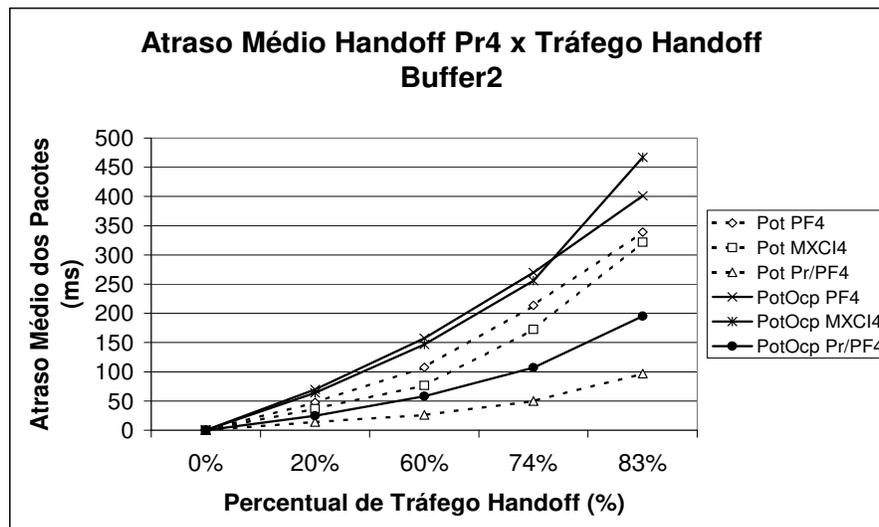


Fig. 4.9: Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no *Buffer 2* da Célula 1xEV-DO RA

com prioridade 4 para a condição de *buffer 2*. Nesta figura é evidente o alto índice de atrasos em função da baixa prioridade do usuário e da capacidade do *buffer* de 100 posições. Além disso, o critério de aceitação de tráfego *handoff* PotOcp apresenta maiores atrasos ao longo da simulação em virtude do maior número de pacotes internos e em *handoff* presentes no sistema. Ao contrário do critério PotOcp, o critério Pot obtém atrasos menores devido ao elevado descarte de pacotes *handoff*. Novamente, destaca-se o escalonador Pr/PF4 na qual mesmo para um percentual de 83% de tráfego *handoff*, apresenta atrasos de 255 ms para o critério PotOcp e 155 ms para o critério Pot. Por outro lado, os escalonadores MXCI4 e PF4 apresentam atrasos superiores a 400 ms independente do critério de aceitação de tráfego *handoff*.

A Figura 4.11 exibe o atraso médio dos pacotes HTTP *handoff* no sistema 1xEV-DO RA com prioridade 4 para a condição de *buffer 2*. O critério PotOcp apresenta os maiores atrasos durante a simulação devido ao maior número de pacotes *handoff* presentes no sistema. Por outro lado, o critério Pot obtém os menores atrasos em razão dos elevados índices de descarte de pacotes *handoff*. Na comparação com os atrasos dos pacotes internos da figura anterior, observam-se os menores atrasos dos pacotes *handoff* ao custo de perdas significativas de pacotes *handoff*. O escalonador Pr/PF4 garante os menores atrasos, independente do critério de aceitação, com atrasos inferiores a 200 ms no pior caso. Além disso, destaca-se a tendência negativa em termos de desempenho do escalonador Max C/I ao apresentar elevados atrasos a partir do percentual *handoff* de 74%. Este comportamento resulta do favorecimento dos usuários em melhores condições de canal e da penalização dos usuários em piores condições de canal, mais distantes da ERB.

A Figura 4.12 mostra o percentual de perda de pacotes de prioridade 4 do tráfego HTTP interno

Fig. 4.10: Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no *Buffer 2* da Célula 1xEV-DO RAFig. 4.11: Atraso Médio do Tráfego *Handoff* de Pacotes Pr4 no *Buffer 2* da Célula 1xEV-DO RA

para o *buffer 1* no sistema 1xEV-DO RA. O critério 1 para aceitação de tráfego *handoff*, baseado na potência do sinal recebido (Pot), apresenta menores percentuais de descarte na simulação quando comparados aos seus equivalentes do critério 2 (PotOcp). Estes comportamentos refletem as políticas de aceitação de tráfego *handoff* destes critérios, uma vez que no critério PotOcp para uma ocupação maior que 50% do *buffer* ocorre o descarte de pacotes HTTP internos, enquanto no critério Pot somente ocorre o descarte de pacotes HTTP internos quando o *buffer* estiver cheio. Por outro lado, apesar do critério Pot beneficiar o tráfego HTTP interno com baixo índice de descarte de pacotes ele

acaba por penalizar o tráfego HTTP *handoff* com altos índices de descarte. Além disso, quando combinado o escalonador de dados Pr/PF4 com o critério Pot, obtém-se o menor percentual de descarte de pacotes de prioridade 1 variando de 0,31% até 0,44% durante a variação do percentual de tráfego *handoff*.

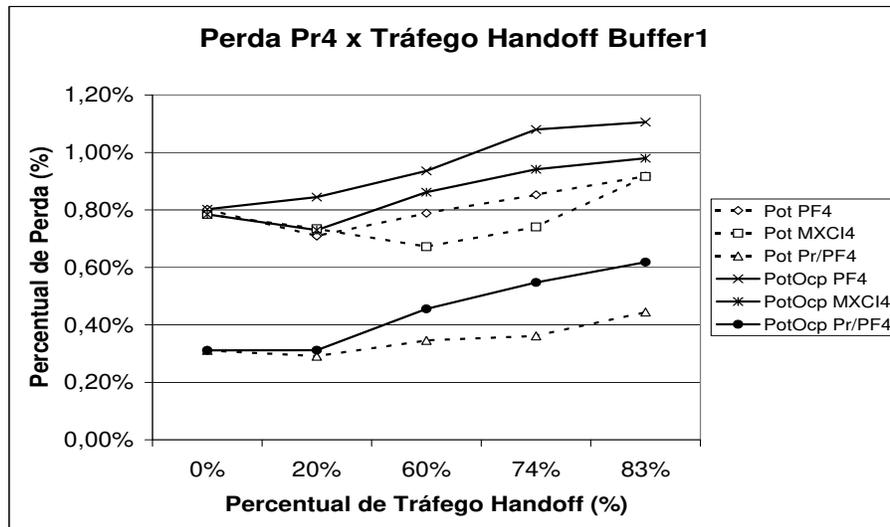


Fig. 4.12: Percentual de Perda do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no *Buffer* 1 da Célula 1xEV-DO RA

A Figura 4.13 exibe o percentual de perda de pacotes de prioridade 4 do tráfego HTTP interno, porém para o *buffer* 2 no sistema 1xEV-DO RA. O principal ganho na utilização do esquema de alocação de *buffer* 2 trata-se da redução da perda de pacotes HTTP do tráfego interno uma vez que os percentuais de perda são inferiores a 0,37%, mesmo para um percentual de tráfego *handoff* de 83% do tráfego total. Como mostrado na Figura 4.12 o critério Pot de aceitação de tráfego é mais eficiente em percentuais de perda de pacotes do que o critério PotOcp quando considerado apenas o descarte de pacotes HTTP internos do sistema. Outro fator determinante para o desempenho do sistema é adoção do escalonador Pr/PF4 no qual diminui ainda mais a perda dos pacotes internos. No pior caso, quando considerado o critério PotOcp em conjunto com o escalonador Pr/PF4, o percentual de descarte atinge no máximo 0,06% para uma proporção de 83% de tráfego *handoff* na célula.

Por fim, na Figura 4.14 é mostrado o percentual de perda de pacotes de prioridade 4 do tráfego HTTP *handoff*, para o *buffer* 2 no sistema 1xEV-DO RA. Nota-se nesta figura os altos índices de descarte de pacotes HTTP *handoff*, uma vez que na concepção dos critérios de aceitação de tráfego *handoff* nas células 1xEV-DO RA, priorizou-se o tráfego HTTP interno das células. Desta forma, devido o critério Pot descartar pacotes *handoff* das classes de cobertura inferiores 1, 2, 3 e 4 impôs como consequência altos percentuais de descarte comparados ao PotOcp com taxas de até 7,4% para o Pot PF4. Por outro lado, o critério PotOcp garante uma redução de aproximadamente 50% do

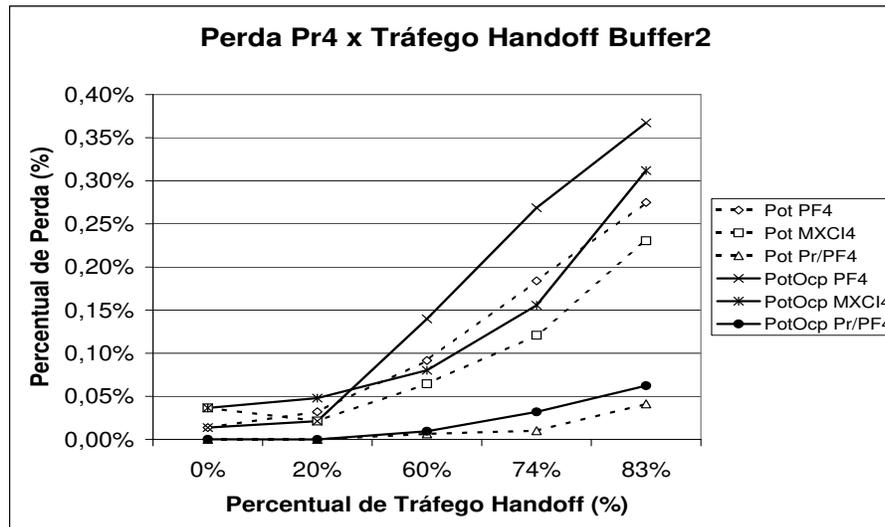


Fig. 4.13: Percentual de Perda do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no *Buffer 2* da Célula 1xEV-DO RA

percentual de perda de pacotes HTTP *handoff* na comparação com o critério Pot conforme se aumenta o percentual de tráfego *handoff*. Do ponto de vista dos escalonadores de dados, o escalonador Pr/PF4 garante os menores índices de descarte de pacotes *handoff* ao longo da simulação para ambos os critérios de aceitação de tráfego *handoff* na comparação com os escalonadores MXCI4 e PF4.

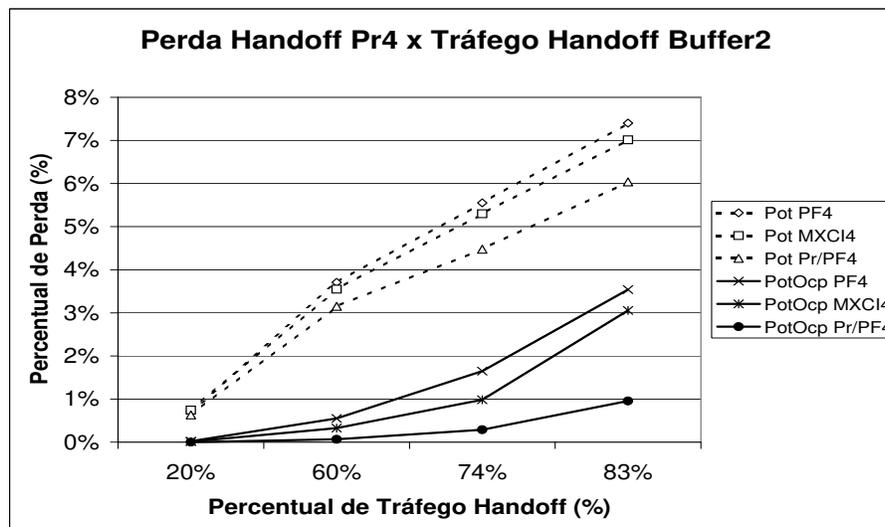


Fig. 4.14: Percentual de Perda do Tráfego *Handoff* de Pacotes Pr4 no *Buffer 2* da Célula 1xEV-DO RA

4.5 Avaliação dos Algoritmos de *Handoff* Horizontal no Sistema UMTS/HSDPA

4.5.1 Cenário de Avaliação de Desempenho

O cenário apresentado neste estudo avalia o desempenho do sistema HSDPA durante o processo de *handoff* através de novos critérios para aceitação de tráfego *handoff*. Além disso, estes critérios são avaliados em conjunto com os escalonadores de dados Max C/I, PF e o novo escalonador proposto neste estudo Pr/PF.

A distribuição de probabilidade das prioridades adotadas neste estudo são apenas estimativas baseadas em proporções maiores para os tráfegos de baixa prioridade e em proporções menores para os tráfegos de alta prioridade. Além da distribuição de probabilidade das prioridades, a Tabela 4.5 exhibe os tamanhos dos *buffers* para cada tipo de prioridade. Outro objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da variação do tamanho do *buffer* no desempenho do sistema HSDPA. Desta forma, dois tamanhos de *buffers* são considerados para cada prioridade.

Tab. 4.5: Distribuição de Prioridades X Tamanho dos *Buffers* HSDPA

Prioridade	Proporção	<i>Buffer1</i>	<i>Buffer2</i>
1	10%	1	10
2	25%	3	25
3	30%	3	30
4	35%	3	35
Total	100%	10	100

O cenário em estudo consiste em manter fixo o número de fontes internas HTTP (26 unidades) da célula HSDPA e aumentar o número de fontes HTTP *handoff* de 0 até 174 fontes. Este cenário avalia a combinação dos novos critérios de aceitação de tráfego *handoff* juntamente com a escolha do escalonador de dados com o objetivo de assegurar a QoS no sistema HSDPA. A Tabela 4.6 mostra o cenário avaliado. Nesta tabela, por exemplo, no cenário em que há um total de 73 fontes HTTP, 47 delas, ou seja, 64% do total pertencem ao tráfego HTTP *handoff* enquanto as outras 26 fontes representam os outros 36% do tráfego HTTP interno da célula.

4.5.2 Análise dos Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações do sistema HSDPA. Os diferentes critérios para aceitação de tráfego *handoff* estão identificados pelas siglas Pot e PotOcp. A sigla Pot

Tab. 4.6: Cenário Avaliado UMTS/HSDPA

Percentual de Tráfego Interno	100%	74%	36%	22%	13%
Percentual de Tráfego <i>Handoff</i>	0%	26%	64%	78%	87%
Fontes HTTP Internas	26	26	26	26	26
Fontes HTTP <i>Handoff</i>	0	9	47	92	174
Total de Fontes HTTP	26	35	73	118	200

representada nos gráficos pelas linhas tracejadas refere-se ao critério 1 na qual se leva em conta a potência do sinal recebido. A outra sigla PotOcp representada pelas linhas contínuas nos gráficos faz referência ao critério 2, na qual são consideradas a potência do sinal recebido e a ocupação dos *buffers* na tentativa de assegurar a melhor QoS no processo de *handoff* do sistema HSDPA. As simulações computacionais apresentam em geral um desvio padrão de 6,52% do valor da média enquanto o intervalo de confiança de 95% apresenta 4,04% do valor da média.

Além das siglas que identificam os critérios para a aceitação de tráfego *handoff* são utilizadas as siglas MXCI, PF e Pr/PF representando, respectivamente, os escalonadores de dados *Maximum Carrier Interference*, *Proportional Fair* e *Priority Proportional Fair*. Por fim, os números nos finais das siglas que identificam os escalonadores de dados, associam prioridades a cada tipo de tráfego variando de 1 a 4, isto é, da prioridade mais alta para prioridade mais baixa.

O atraso médio dos pacotes HTTP internos no sistema HSDPA com prioridade 1 para a condição de *buffer* 1 é mostrado na Figura 4.15. O critério de aceitação de tráfego *handoff* PotOcp apresenta maiores atrasos ao longo da simulação em virtude do maior número de pacotes internos e em *handoff* presentes no sistema. Ao contrário do critério PotOcp, o critério Pot obtém atrasos menores devido ao elevado descarte de pacotes *handoff*. Os menores atrasos durante a simulação são conferidos ao escalonador Pr/PF em que é dada a prioridade absoluta ao usuário de prioridade mais alta, variando de 0,8 ms até 3 ms. O escalonador de dados Max C/I apresenta desempenho intermediário com atrasos entre 1 ms e 6,2 ms, consequência direta da escolha do escalonador por usuários com as maiores taxas de dados. Por fim, o escalonador PF1 possui o pior desempenho quando comparado aos outros escalonadores de dados com os atrasos variando de 1,1 ms a 10,1 ms.

Na Figura 4.16 avalia-se o atraso médio dos pacotes HTTP internos Pr1 do sistema HSDPA, porém com o *buffer* 2, a fim de verificar o impacto do tamanho dos *buffers* no desempenho do sistema. O comportamento das curvas de dados é semelhante ao da Figura 4.15. Contudo, em razão do aumento do *buffer* de 10 para 100 posições, os atrasos verificados são maiores do que na figura anterior devido ao maior número de pacotes presentes no sistema. Por exemplo, para o esquema PotOcp PF1 o atraso varia de 0,9 ms a 22,6 ms, ou seja, o atraso é 2 vezes maior do que PotOcp PF1 com *buffer* 1. A

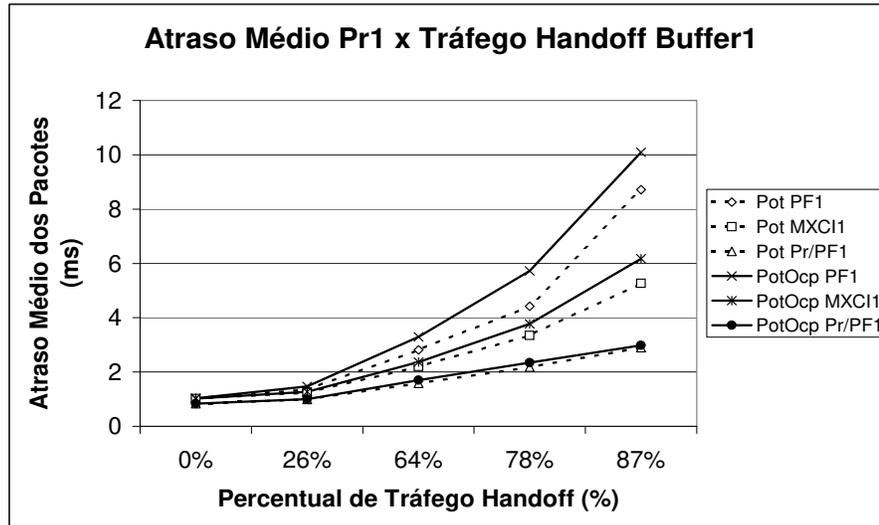


Fig. 4.15: Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no *Buffer* 1 da Célula HSDPA

exceção é o escalonador de dados Pr/PF1 em que o atraso observado é muito próximo do obtido na Figura 4.15, variando de 0,89 ms a 3,4 ms devido à prioridade absoluta associada ao usuário de prioridade 1. Nota-se que mesmo aumentando-se o número de posições no *buffer* em dez vezes em relação ao *buffer* 1, o escalonador Pr/PF1 manteve a eficiência no atendimento dos pacotes internos de Pr1 da célula HSDPA.

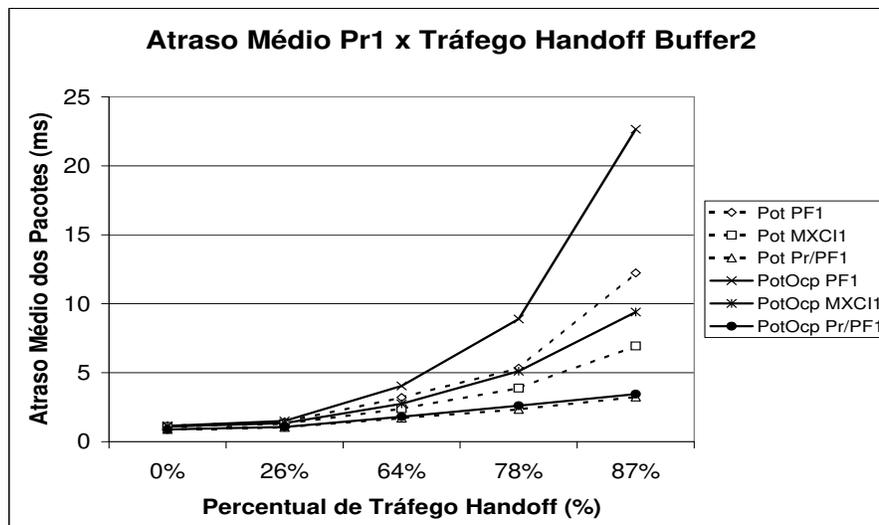


Fig. 4.16: Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no *Buffer* 2 da Célula HSDPA

A Figura 4.17 exibe o atraso médio dos pacotes HTTP internos no sistema HSDPA com prioridade

4 para a condição de *buffer 2*. Novamente, o critério PotOcp apresenta os maiores atrasos durante a simulação devido ao maior número de pacotes *handoff* presentes no sistema. Por outro lado, o critério Pot obtém os menores atrasos ao custo de perdas significativas de pacotes *handoff*. Nesta figura, salienta-se a inversão ocorrida nos desempenhos dos escalonadores Pr/PF e PF devido aos usuários de baixa prioridade. Para estes usuários, o escalonador PF4 garante os menores atrasos, independente do critério de aceitação, com atrasos inferiores a 48,6 ms no pior caso. Este desempenho está atrelado a melhor distribuição de recursos do sistema HSDPA provido por este escalonador na qual beneficia usuários de baixa prioridade. Além disso, destaca-se também a tendência negativa em termos de desempenho do escalonador Max C/I ao apresentar elevados atrasos a partir do percentual *handoff* de 78%. Este comportamento resulta do favorecimento dos usuários em melhores condições de canal e da penalização dos usuários em piores condições de canal, mais distantes do Nó B.

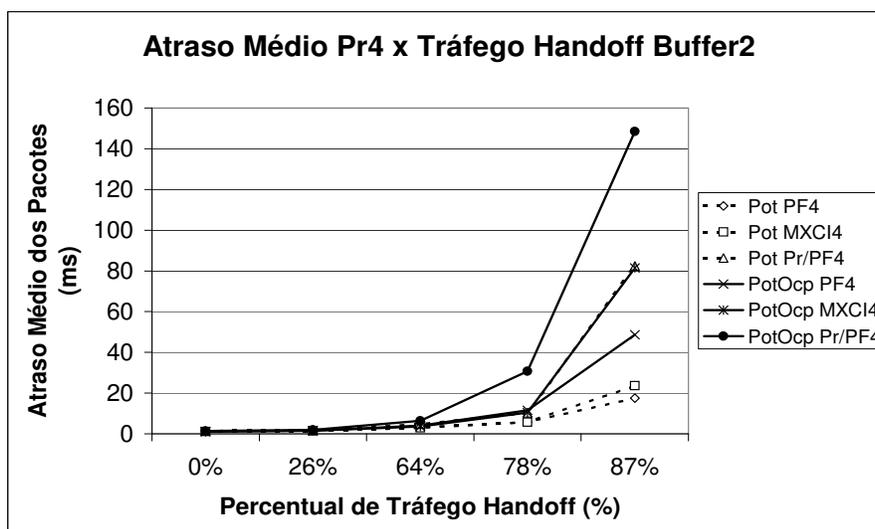


Fig. 4.17: Atraso Médio do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no *Buffer 2* da Célula HSDPA

A Figura 4.18 mostra o percentual de perda de pacotes de prioridade 1 do tráfego HTTP interno para o *buffer 1* no sistema HSDPA. Os maiores percentuais de perdas de pacotes internos nesta figura são atribuídos ao critério PotOcp devido ao descarte de pacotes internos quando a ocupação do *buffer 1* é superior a 50%. Por outro lado, o critério Pot somente descarta os pacotes internos quando o *buffer 1* transborda, o que garante os menores índices de descarte. Além disso, observa-se o melhor desempenho do escalonador Pr/PF1 comparados aos outros escalonadores MXCI1 e PF1 uma vez que este escalonador garante atendimento diferenciado aos usuários de alta prioridade.

A Figura 4.19 mostra o percentual de perda de pacotes de prioridade 4 do tráfego HTTP interno para o *buffer 1* no sistema HSDPA. O critério Pot, baseado na potência do sinal recebido, apresenta os menores percentuais de descarte na simulação quando comparados aos seus equivalentes do critério

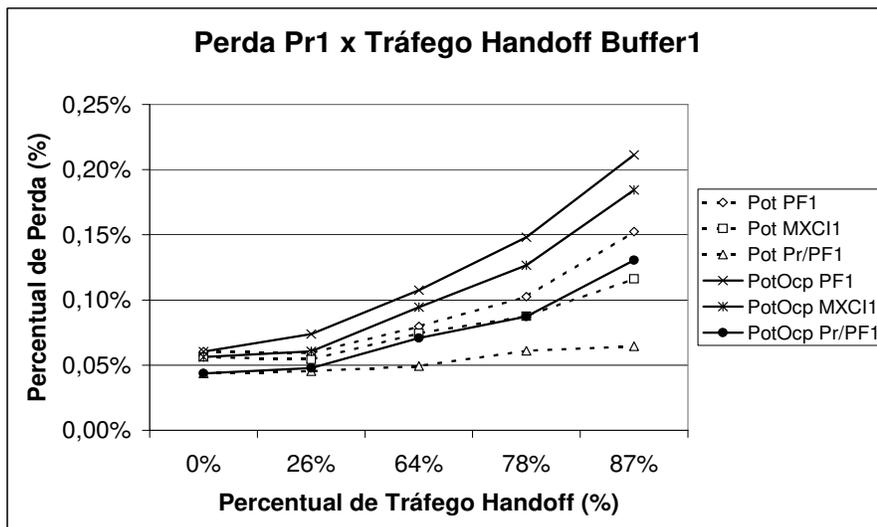


Fig. 4.18: Percentual de Perda do Tráfego Interno de Pacotes Pr1 no *Buffer* 1 da Célula HSDPA

PotOcp. Estes comportamentos refletem as políticas de aceitação de tráfego *handoff* destes critérios, uma vez que no critério PotOcp para uma ocupação maior que 50% do *buffer* ocorre o descarte de pacotes HTTP internos, enquanto no critério Pot somente ocorre o descarte de pacotes HTTP internos quando o *buffer* estiver cheio. Por outro lado, apesar do critério Pot beneficiar o tráfego HTTP interno com baixo índice de descarte de pacotes ele acaba por penalizar o tráfego HTTP *handoff* com altos índices de descarte. Além disso, quando combinado o escalonador de dados PF4 com o critério Pot, obtém-se o menor percentual de descarte de pacotes de prioridade 4 variando de 0,001% até o máximo de 0,2% durante a variação do percentual de tráfego *handoff*.

Por fim, na Figura 4.20 é mostrado o percentual de perda de pacotes de prioridade 4 do tráfego HTTP *handoff*, para o *buffer* 2 no sistema HSDPA. Nesta figura notam-se os altos índices de descarte de pacotes HTTP *handoff*, uma vez que na concepção dos critérios de aceitação de tráfego *handoff* nas células HSDPA, priorizou-se o tráfego HTTP interno das células. Desta forma, devido o critério Pot descartar pacotes *handoff* das categorias de cobertura inferiores 1, 2, 3 e 4 impôs como consequência altos percentuais de descarte comparados ao PotOcp com taxas de até 7,6% para o Pot Pr/PF4. Por outro lado, o critério PotOcp garante uma redução de mínimo 50% do percentual de perda de pacotes HTTP *handoff* no pior caso na comparação com o critério Pot conforme se aumenta o percentual de tráfego *handoff*. Do ponto de vista dos escalonadores de dados, o escalonador PF4 garante os menores índices de descarte de pacotes *handoff* ao longo da simulação para ambos os critérios de aceitação de tráfego *handoff*.

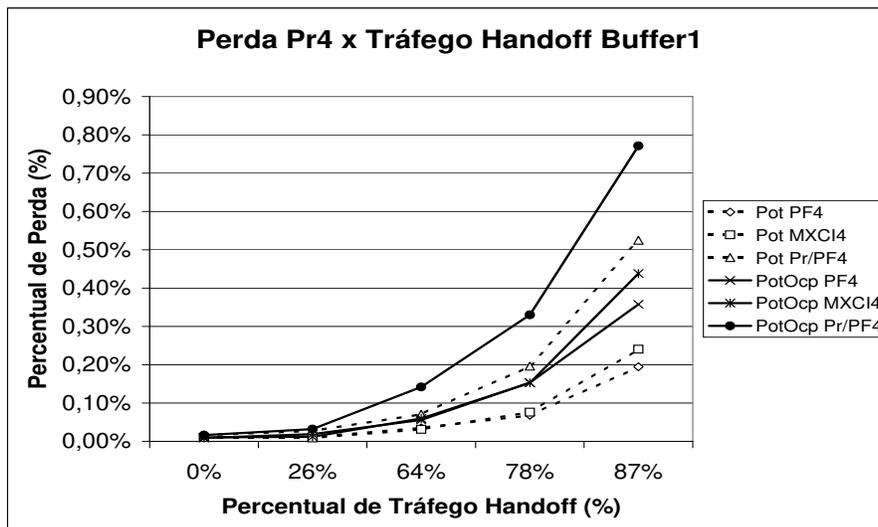


Fig. 4.19: Percentual de Perda do Tráfego Interno de Pacotes Pr4 no *Buffer 1* da Célula HSDPA

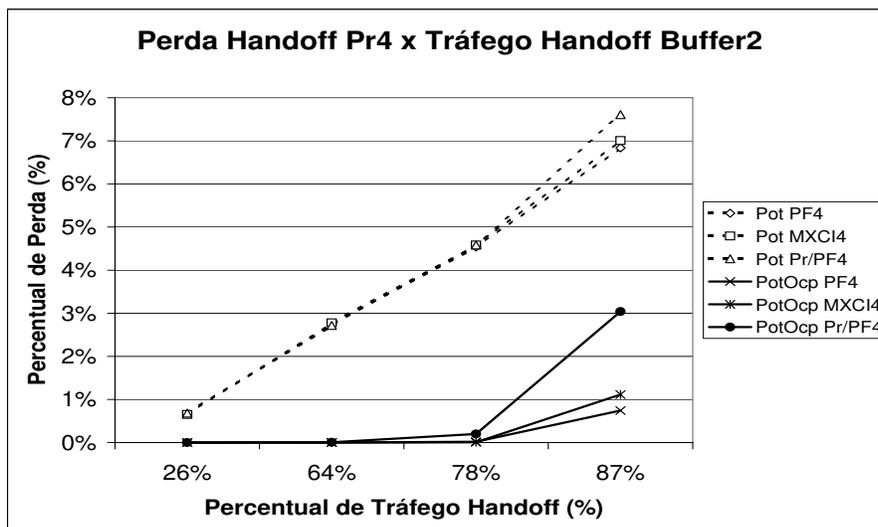


Fig. 4.20: Percentual de Perda do Tráfego *Handoff* de Pacotes Pr4 no *Buffer 2* da Célula HSDPA

4.6 Conclusões

Neste Capítulo, foram propostos e avaliados critérios de aceitação tráfego *handoff* horizontal em conjunto com os escalonadores de dados PF, Max C/I e a nova proposta Pr/PF, no intuito de assegurar a QoS do tráfego interno da célula e minimizar a degradação de desempenho causada pelo aumento de tráfego *handoff* horizontal nos sistemas móveis 1xEV-DO RA e HSDPA. Os impactos destes critérios de aceitação de tráfego *handoff* horizontal juntamente com a escolha dos escalonadores de dados

PF, Max C/I e Pr/PF foram avaliados através de simulações computacionais feitas na ferramenta de software Matlab. A vazão de dados, o atraso médio e o percentual de perda dos pacotes foram estudados em função da taxa de chegada de pacotes em *handoff* horizontal.

O critério de aceitação de tráfego Pot apresentou, em geral, o melhor desempenho nos cenários avaliados quando comparado ao PotOcp do ponto de vista do tráfego interno de pacotes HTTP. Entretanto, o desempenho aparentemente melhor do critério Pot está condicionado ao alto percentual de descarte de pacotes *handoff* das categorias de cobertura inferiores. Desta forma, caso o principal objetivo seja priorizar os tráfegos internos das células HSDPA e 1xEV-DO RA, o critério Pot é mais adequado para atender a este requisito. Caso contrário, se o tráfego interno e em *handoff* possuírem o mesmo grau de importância para a operadora, o critério de aceitação PotOcp proverá o melhor atendimento a ambos os tráfegos.

Os resultados também demonstraram que o escalonador de dados proposto Pr/PF assegurou a QoS dos usuários com altas prioridades e conseqüentemente apresentou a menor degradação destes quando se aumentou a carga de tráfego *handoff* no sistema. Entretanto, quando considerada a igualdade na distribuição de recursos dos sistemas HSDPA e 1xEV-DO RA, o escalonador PF garantiu não somente o atendimento homogêneo a todos os usuários, mas também a QoS dos usuários de baixa prioridade. Desta maneira, as operadoras que optarem pela diferenciação de serviços devem utilizar o escalonador Pr/PF. Entretanto, caso o foco seja a melhor distribuição de recursos dos sistemas HSDPA e 1xEV-DO RA, o escalonador PF será a melhor escolha.

Capítulo 5

Algoritmos de *Handoff* Vertical

5.1 Introdução

A quarta geração (4G) de sistemas móveis promove a conectividade de diferentes tecnologias de acesso, a fim de prover serviços multimídia aos seus usuários a qualquer hora, em qualquer lugar. Dentre as tecnologias de acesso existentes espera-se integrar vários sistemas móveis como o CDMA 1xEV-DO RA [17], o UMTS/HSDPA [15] e o WiMAX [31].

Para alcançar este novo objetivo das redes 4G propõem-se criar um novo mecanismo de *hand-off*, em prol da comunicação entre usuários independentemente das redes de acesso utilizadas. Este mecanismo é conhecido como *handoff* vertical [36] que viabiliza ao usuário migrar entre redes de acesso heterogêneas. Com o intuito de exercitar um possível cenário de *handoff* vertical destaca-se a migração de usuários do sistema CDMA 1xEV-DO RA para o sistema UMTS/HSDPA.

Neste Capítulo, novos algoritmos de *handoff* vertical são propostos com o intuito de distribuir o tráfego *handoff* vertical entre os sistemas 3G de maneira a não sobrecarregar ou subutilizar os sistemas 3G. Os algoritmos são propostos levando-se em consideração a potência do sinal recebido, a ocupação do *buffer* e a ocupação do enlace dos respectivos sistemas. As eficiências dos algoritmos propostos são verificadas utilizando os sistemas 3G 1xEV-DO RA e UMTS/HSDPA. São utilizadas fontes de tráfego HTTP para alimentar os sistemas. As seguintes métricas de QoS são avaliadas: a vazão, o atraso médio dos pacotes e o percentual de perda dos pacotes, todos em função da chegada de tráfego *handoff* vertical. O escalonador de dados PF é adotado nos dois sistemas 3G para prover igual distribuição de recursos a todos usuários. O estudo é feito através de simulações computacionais utilizando a ferramenta de software Matlab.

5.2 Algoritmos de *Handoff* Vertical

Nas redes 4G ocorre a integração de redes de acesso heterogêneas através de novos algoritmos de *handoff* vertical. Estes algoritmos visam assegurar a QoS das aplicações multimídia em tempo real independente da rede de acesso utilizada. Para promover esta integração entre as células de sistemas heterogêneos da maneira mais suave possível são propostos novos algoritmos de *handoff* vertical neste estudo para a aceitação de tráfego *handoff* vertical nos sistemas 3G. Estes algoritmos consideram além da potência do sinal recebido, a ocupação dos *buffers*, a ocupação do enlace e por último uma adaptação algoritmo DRR dentro do contexto de algoritmos de *handoff* vertical em que é atribuído um valor de quantum em bits para cada sistema 3G.

5.2.1 Potência do Sinal Recebido

No algoritmo de *handoff* vertical com base na potência do sinal recebido (RSS) de cada sistema 3G, o pacote em *handoff* vertical é atendido pelo sistema 3G que apresentar a maior potência de sinal. Evidentemente, o sistema UMTS/HSDPA receberá a maior parte dos pacotes em *handoff* vertical o que pode sobrecarregar o sistema enquanto o sistema CDMA 1xEV-DO RA fica subutilizado. Este algoritmo já existente [53] foi utilizado apenas para efeito de comparação com os outros algoritmos de *handoff* vertical propostos.

Escalone o sistema 3G com a maior potência de sinal

5.2.2 Potência Equivalente

No algoritmo de *handoff* vertical baseado na RSS equivalente, as taxas de dados em ambos sistemas 3G são convertidas em potências equivalentes e comparadas entre si. Então, na seqüência é selecionado o sistema 3G que apresentar a maior potência equivalente. No caso das potências equivalentes serem iguais após a conversão das mesmas, o sistema 3G UMTS/HSDPA será escolhido para receber o pacote em *handoff* vertical. A conversão de potência é executada de acordo ao mapeamento mostrado na Tabela 5.1.

Se as potências equivalentes são diferentes
Escalone o sistema 3G com a maior potência equivalente
Senão Se as potências equivalentes são iguais
Escalone o sistema 3G UMTS/HSDPA
Fim as potências equivalentes

Tab. 5.1: Mapeamento das Potências Equivalentes

Categoria HS-DSCH	Taxa (Mbps)	Potência Equivalente	Classe	Taxa (kbps)
Cat.11	0,9	1	1	38,4
Cat.1	1,2	2	2	76,8
Cat.2	1,2	3	3	153,6
Cat.12	1,8	4	4	307,2
Cat.3	1,8	5	-	-
Cat.4	1,8	5	5	614,4
Cat.5	3,6	6	6	921,6
Cat.6	3,6	7	7	1228,8
Cat.7	7,2	8	8	1536
Cat.8	7,2	9	9	1843,2
Cat.9	10,2	10	10	2457,6
Cat.10	14,4	11	11	3072

5.2.3 Ocupação de *Buffer*

O algoritmo com base na ocupação do *buffer* considera a ocupação do *buffer* de cada sistema 3G, isto é, o sistema 3G que apresentar a menor ocupação do *buffer* será o escolhido para atender o pacote em *handoff* vertical.

Escalone o sistema 3G com a menor ocupação de *buffer*

5.2.4 Ocupação de Enlace

No algoritmo de ocupação do enlace é selecionado o sistema 3G na qual apresenta a menor ocupação de enlace para receber o pacote em *handoff* vertical.

Escalone o sistema 3G com a menor ocupação de enlace

5.2.5 Ocupação Mix

Neste algoritmo de *handoff* vertical é feita uma combinação dos algoritmos baseados na ocupação do *buffer* e também na ocupação do enlace com o objetivo de aumentar a equidade na distribuição dos recursos entre os sistemas 3G. Este algoritmo é avaliado em dois cenários de avaliação de desempenho distintos. Os cenários avaliados divergem apenas no percentual da diferença entre as ocupações de enlace dos sistemas 3G. No primeiro cenário a diferença das ocupações de enlace é de 5% enquanto

no segundo cenário a diferença é de 10%. O algoritmo de ocupação mix é processado da seguinte forma:

Se as ocupações dos enlaces forem menores do que 30%

Escalone o sistema 3G com a menor ocupação de enlace

Senão Se as ocupações dos enlaces forem maiores ou iguais a 30%, verifique

Se a diferença entre as ocupações for menor ou igual a 5%

Escalone o sistema 3G com a menor ocupação de *buffer*

Senão Se a diferença entre as ocupações for maior do que 5%

Escalone o sistema 3G com a menor ocupação de enlace

Fim a diferença

Fim as ocupações

Algoritmo de *Handoff* Vertical Ocupação Mix - Cenário I

Se as ocupações dos enlaces forem menores do que 30%

Escalone o sistema 3G com a menor ocupação de enlace

Senão Se as ocupações dos enlaces forem maiores ou iguais a 30%, verifique

Se a diferença entre as ocupações for menor ou igual a 10%

Escalone o sistema 3G com a menor ocupação de *buffer*

Senão Se a diferença entre as ocupações for maior do que 10%

Escalone o sistema 3G com a menor ocupação de enlace

Fim a diferença

Fim as ocupações

Algoritmo de *Handoff* Vertical Ocupação Mix - Cenário II

Assim, por meio desta combinação de algoritmos espera-se aumentar a QoS em ambos sistemas 3G além de atender satisfatoriamente os usuários em *handoff* vertical.

5.2.6 Ocupação de Enlace & Potência Mix

Este algoritmo de *handoff* vertical é uma combinação de potência equivalente e ocupação de enlace em que se procura garantir um balanceamento justo de recursos entre os sistemas 3G. O algoritmo de ocupação de enlace & potência mix é executado pelo escalonador de dados como se segue:

Se as ocupações de enlace forem menores do que 30%, verifique
Se as potências equivalentes são diferentes
Escalone o sistema 3G com a maior potência equivalente
Senão Se as potências equivalentes são iguais
Escalone o sistema 3G UMTS/HSDPA
Fim as potências equivalentes
Senão Se as ocupações de enlace forem maiores ou iguais a 30%, verifique
Se a diferença entre as ocupações for menor ou igual a 10%, verifique
Se as potências equivalentes são diferentes
Escalone o sistema 3G com a maior potência equivalente
Senão Se as potências equivalentes são iguais
Escalone o sistema 3G UMTS/HSDPA
Fim as potências equivalentes
Senão Se a diferença entre as ocupações for maior do que 10%
Escalone o sistema 3G com a menor ocupação de enlace
Fim a diferença
Fim as ocupações de enlace

5.2.7 *Deficit Round Robin*

No escalonador DRR o servidor trabalha em ciclos onde em cada ciclo, um pacote de cada fila é processado [56]. Neste modelo o tráfego de *handoff* vertical é armazenado numa fila 4G e o servidor é representado pelo escalonador 4G conforme ilustrado na Figura 5.1. Para cada sistema 3G é atribuído um valor de quantum em bits para ser processado pelo servidor 4G. Além disso, há também um valor de saldo para cada sistema 3G. Quando o pacote em *handoff* vertical apontado pelo ponteiro DRR é direcionado para o sistema 3G o valor do quantum é somado ao valor do saldo. Os pacotes são direcionados ao sistema 3G enquanto o saldo permanecer maior do que zero e a fila 4G não estiver vazia. O saldo é zerado no momento em que não houver mais pacotes na fila 4G para serem processados pelo escalonador 4G.

```

Enquanto houver pacotes em handoff vertical faça
  Se a fila 4G não está vazia Então
    ciclo := ciclo + 1;
    Saldo := Saldo + Quantum;
    Enquanto (Saldo - TamanhoPacote) > 0
      Saldo := Saldo - TamanhoPacote;
      Escalone o sistema 3G; /* HSDPA ou 1xEV-DO RA */
      Aponte para o próximo pacote da fila
    Se a fila 4G está vazia Então
      Saldo := 0;
      Break; /* saia do loop */
    Fim Se fila 4G vazia
  Fim Enquanto saldo
  Fim Se fila 4G não vazia
Fim Enquanto pacotes em handoff vertical

```

5.3 Modelo de Simulação

Para a avaliação dos algoritmos de *handoff* vertical foi desenvolvido uma plataforma de simulação. Toda a plataforma é feita através da ferramenta de software Matlab. Os dois sistemas 3G heterogêneos escolhidos são o UMTS/HSDPA e o CDMA 1xEV-DO RA. Os desempenhos destes dois sistemas são avaliados em função do tráfego de *handoff* vertical, isto é, para o sistema UMTS/HSDPA é considerado tráfego *handoff* vertical, aquele vindo do sistema CDMA 1xEV-DO RA e vice-versa. Além disso, os algoritmos de *handoff* vertical propostos são avaliados em conjunto com o escalonador de dados PF [27], a fim de garantir a QoS dos sistemas 3G.

A Figura 5.1 ilustra o modelo de simulação 4G adotado neste estudo. Nesta figura, o novo elemento aqui chamado de escalonador 4G será o responsável por distribuir o tráfego de *handoff* vertical entre os sistemas 3G móveis de acordo com os algoritmos de *handoff* vertical propostos. Além disso, cada sistema 3G possui seu próprio escalonador de dados PF, seus próprios *buffers*, seu próprio tráfego interno e seu próprio tráfego de *handoff* horizontal. Os pacotes são classificados em quatro tipos de prioridades e separados em *buffers* diferentes, um para cada prioridade. Esta divisão em quatro prioridades está em concordância com a arquitetura DiffServ onde os usuários podem ser classificados quanto ao tipo de serviço em: ouro, prata, bronze e melhor esforço.

As seguintes suposições são adotadas. As fontes HTTP e os pacotes IP (1.500 bytes e 576 bytes) utilizados neste estudo são os mesmos propostos em [10]. Em algum momento, as prioridades são associadas aos pacotes IP antes de chegarem ao escalonador de dados. O *buffer* de cada fila tem tamanho finito e os pacotes IP são armazenados de acordo com o esquema FIFO (*First IN First Out*). Neste modelo de *handoff* o ruído e as interferências de outras células são desconsideradas. O tráfego

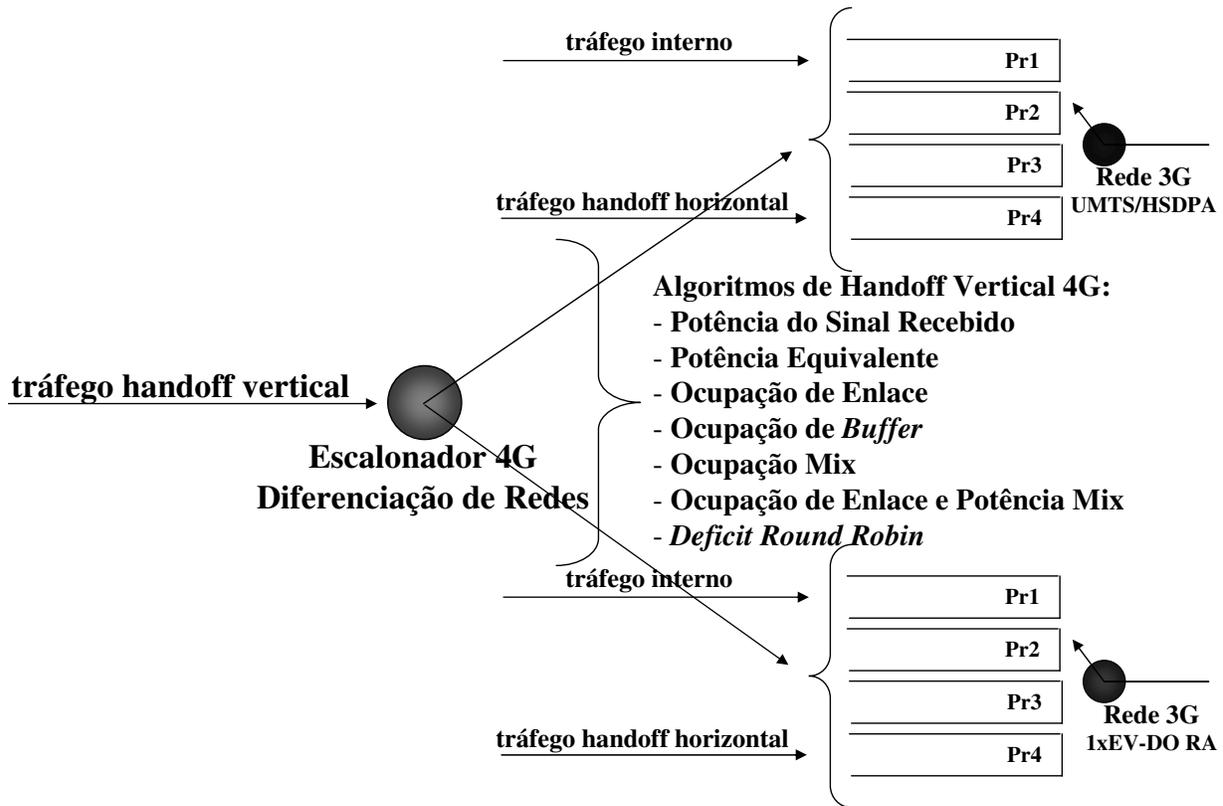


Fig. 5.1: Modelo de Simulação 4G

handoff de saída (*handoff* horizontal e *handoff* vertical) das células 3G não é considerado devido ao alto fluxo de tráfego de *handoff* de entrada. O *overhead* existente nas camadas físicas dos sistemas 3G quando considerado o processo de *handoff* vertical é desconsiderado para a simplificação do modelo 4G.

As classes de cobertura estão distribuídas de acordo com as estimativas mostradas nas Tabelas 4.1 e 4.2. Os valores determinísticos, isto é, os valores fixos usados nesta distribuição de probabilidade não são dados reais mas apenas valores estimados que consideram percentuais mais altos para taxas de dados intermediárias e percentuais mais baixos para taxas de dados altas ou baixas.

5.4 Cenários de Avaliação de Desempenho

5.4.1 Cenário I

O primeiro cenário apresentado neste estudo avalia o desempenho dos sistemas 3G UMTS/HSDPA e CDMA 1xEV-DO RA durante o processo de *handoff* vertical através de novos algoritmos para a

aceitação de tráfego *handoff* vertical. Além disso, em conjunto com os algoritmos de *handoff* vertical é avaliado implicitamente o escalonador de dados PF intrínseco a cada sistema 3G.

A distribuição de probabilidade das prioridades adotadas neste estudo são apenas estimativas baseadas em proporções maiores para os tráfegos de baixa prioridade e em proporções menores para os tráfegos de alta prioridade. Esta distribuição visa representar o cenário em que há um menor número de usuários dispostos a pagar mais para obter serviços diferenciados. Além da distribuição de probabilidade das prioridades, a Tabela 5.2 exibe o tamanho do *buffer* para cada tipo de prioridade, ou seja, o número máximo de pacotes permitidos no *buffer* relativo a cada prioridade.

Tab. 5.2: Distribuição de Prioridades X Tamanho do *Buffer*

Prioridade	Proporção	<i>Buffer</i>
1	10%	20
2	25%	50
3	30%	60
4	35%	70
Total	100%	200

O cenário em estudo consiste em manter fixo o número de fontes HTTP internas e em *handoff* horizontal dos sistemas 3G e aumentar o número de fontes HTTP em *handoff* vertical de 2 até 232 fontes. Este cenário avalia os novos algoritmos de *handoff* vertical juntamente com o escalonador de dados PF com o objetivo de assegurar a QoS nos sistemas 3G. As Tabelas 5.3 e 5.4 mostram o cenário avaliado. Pode ser observado pela Tabela 5.3, por exemplo, o cenário em que há um total de 34 fontes HTTP. Deste total, 2 delas, ou seja, 6% do total pertencem ao tráfego HTTP *handoff* vertical enquanto as outras 32 fontes representam os outros 94% dos tráfegos HTTP interno e em *handoff* horizontal da célula UMTS/HSDPA. O mesmo entendimento da Tabela 5.3 aplica-se a Tabela 5.4. Nota-se, o mesmo número de fontes HTTP em *handoff* vertical nos sistemas 3G. A definição sobre qual sistema 3G atenderá o pacote em *handoff* vertical somente acontecesse em tempo de execução determinado pelo algoritmo de *handoff* vertical utilizado. Em razão disto, o número de fontes HTTP em *handoff* vertical foi acrescido nas tabelas apenas para efeito de comparação entre os sistemas 3G.

5.4.2 Cenário II

O cenário II consiste em avaliar o desempenho dos algoritmos de *handoff* vertical nos sistemas 1xEV-DO RA e HSDPA. Da mesma forma é avaliado implicitamente o escalonador de dados PF presente em cada sistema 3G.

Tab. 5.3: Cenário Avaliado I - UMTS/HSDPA

Tráfego Interno	47%	20%	11%	6%
Tráfego <i>Handoff</i> Horizontal	47%	20%	11%	6%
Tráfego <i>Handoff</i> Vertical	6%	59%	78%	88%
Fontes HTTP Internas	16	16	16	16
Fontes HTTP <i>Handoff</i> Horizontal	16	16	16	16
Fontes HTTP <i>Handoff</i> Vertical	2	47	115	232
Total de Fontes HTTP	34	79	147	264

Tab. 5.4: Cenário Avaliado I - CDMA 1xEV-DO RA

Tráfego Interno	40%	7%	3%	2%
Tráfego <i>Handoff</i> Horizontal	40%	7%	3%	2%
Tráfego <i>Handoff</i> Vertical	20%	85%	93%	97%
Fontes HTTP Internas	4	4	4	4
Fontes HTTP <i>Handoff</i> Horizontal	4	4	4	4
Fontes HTTP <i>Handoff</i> Vertical	2	47	115	232
Total de Fontes HTTP	10	55	123	240

A distribuição de probabilidade das prioridades adotadas neste estudo é somente uma estimativa baseada em proporções maiores para o tráfego de baixa prioridade e proporções menores para o tráfego de alta prioridade. Esta distribuição representa o cenário onde há poucos usuários desejando pagar mais por serviços diferenciados. Além disso, a Tabela 5.5 exibe o tamanho do *buffer* para cada tipo de prioridade, isto é, o número máximo de pacotes IP permitidos no *buffer* para cada prioridade. No caso do escalonador DRR, os tamanhos do quantuns associados com os sistemas UMTS/HSDPA e 1xEV-DO RA são: 5 Mbits e 0,6 Mbits, respectivamente. Estes tamanhos de quantuns foram estimados com base na banda de cada sistema 3G e também por aproximações das simulações computacionais.

O cenário avaliado consiste em manter um número fixo de fontes HTTP internas e fontes HTTP em *handoff* horizontal nos sistemas 3G e aumentar o número de fontes HTTP em *handoff* vertical variando de 2 até 280 fontes. As Tabelas 5.6 e 5.7 mostram o cenário avaliado. Conforme pode ser observado na Tabela 5.6 onde há um total de 34 fontes HTTP. Deste total, 2 delas, isto é, 6% do total pertencem ao tráfego HTTP em *handoff* vertical enquanto as outras 32 fontes representam os outros 94% de tráfego interno e em *handoff* horizontal da célula UMTS/HSDPA. A mesma regra aplica-se a Tabela 5.7. Note que o número de fontes HTTP em *handoff* vertical é o mesmo em ambos sistemas

Tab. 5.5: Distribuição de Prioridades X Tamanho do *Buffer*

Prioridade	Proporção	Buffer
1	10%	20
2	25%	50
3	30%	60
4	35%	70
Total	100%	200

3G. A definição sobre qual sistema 3G atenderá o pacote em *handoff* vertical somente acontecesse em tempo de execução determinado pelo algoritmo de *handoff* vertical utilizado. Assim, o número de fontes HTTP em *handoff* vertical foi incluído nas tabelas somente para fins de comparação entre os sistemas 3G.

Tab. 5.6: Cenário Avaliado II - UMTS/HSDPA

Tráfego Interno	47%	20%	10%	5%
Tráfego <i>Handoff</i> Horizontal	47%	20%	10%	5%
Tráfego <i>Handoff</i> Vertical	6%	59%	80%	90%
Fontes HTTP Internas	16	16	16	16
Fontes HTTP <i>Handoff</i> Horizontal	16	16	16	16
Fontes HTTP <i>Handoff</i> Vertical	2	47	125	280
Total de Fontes HTTP	34	79	157	312

Tab. 5.7: Cenário Avaliado II - CDMA 1xEV-DO RA

Tráfego Interno	40%	7%	3%	1%
Tráfego <i>Handoff</i> Horizontal	40%	7%	3%	1%
Tráfego <i>Handoff</i> Vertical	20%	85%	94%	97%
Fontes HTTP Internas	4	4	4	4
Fontes HTTP <i>Handoff</i> Horizontal	4	4	4	4
Fontes HTTP <i>Handoff</i> Vertical	2	47	125	280
Total de Fontes HTTP	10	55	133	288

5.5 Análise dos Resultados

5.5.1 Cenário I

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações dos sistemas UMTS HSDPA e CDMA 1xEV-DO RA. Os algoritmos de *handoff* vertical estão identificados pelas siglas Pot, OcpBuffer, OcpEnlace e OcpMix. A sigla Pot refere-se ao algoritmo na qual se leva em conta a potência do sinal recebido. A outra sigla OcpBuffer considera a ocupação dos *buffers* nos sistemas 3G. A sigla OcpEnlace está relacionada a ocupação dos enlaces em cada sistema 3G. Na última sigla OcpMix é considerada uma combinação das ocupações do enlace e dos *buffers*. Todos os algoritmos visam melhorar a QoS no processo de *handoff* vertical dos sistemas 3G. Por fim, os números nos finais das siglas associam prioridades a cada tipo de tráfego variando de 1 a 4, isto é, da prioridade mais alta para a prioridade mais baixa. Em todos os gráficos é considerada a condição de *buffer* da Tabela 5.2. As simulações computacionais apresentam em geral um desvio padrão de 4,56% do valor da média enquanto o intervalo de confiança de 95% apresenta 2,82% do valor da média.

Na Figura 5.2 é mostrada a vazão do tráfego de *handoff* vertical de prioridade 1 no sistema HSDPA em função do aumento de tráfego *handoff* vertical. A vazão do algoritmo de *handoff* vertical baseado na potência (Pot) apresenta o melhor desempenho variando de 4,7 kbps até o máximo de 521 kbps. Contudo, tal desempenho está atrelado as maiores taxas de dados presentes no sistema HSDPA em relação ao 1xEV-DO RA. O algoritmo com base na ocupação do enlace (OcpEnlace) obtém desempenho intermediário com vazões entre 4,9 kbps e 347 kbps, em virtude da melhor política de distribuição de recursos deste algoritmo. Os outros algoritmos de *handoff* vertical OcpMix e OcpBuffer proporcionam desempenhos semelhantes durante o aumento de tráfego *handoff* vertical, porém com ligeira vantagem do algoritmo de *handoff* vertical OcpMix.

Na outra Figura 5.3 é mostrada a vazão do tráfego de *handoff* vertical de prioridade 4 no sistema HSDPA. Esta figura mostra comportamentos semelhantes ao verificado pela Figura 5.2. Entretanto, no momento em que há mais de 78% de tráfego em *handoff* vertical as vazões de todos os algoritmos de *handoff* vertical avaliados aumentam em menor intensidade devido à baixa prioridade dos usuários sensíveis ao aumento de tráfego. Este declínio das vazões é explicado pelo aumento do descarte de pacotes. O algoritmo Pot apresenta as maiores vazões variando de 17,2 kbps até 1.164 kbps em consequência do maior fluxo de *handoff* vertical direcionado a este sistema. As menores vazões são conferidas aos algoritmos OcpBuffer e OcpMix. Novamente, o algoritmo OcpMix apresenta maiores vazões em relação ao OcpBuffer em virtude da melhor distribuição de recursos provido por este algoritmo.

A vazão do tráfego de *handoff* vertical de prioridade 1 no sistema 1xEV-DO RA é mostrada na Figura 5.4. No caso deste sistema, o algoritmo Pot apresenta a pior vazão dos algoritmos avaliados

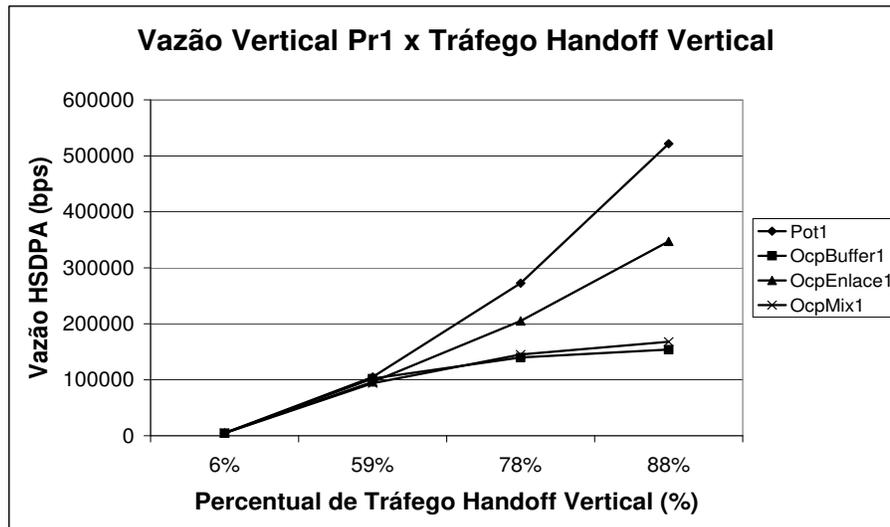


Fig. 5.2: Vazão HSDPA Pr1 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

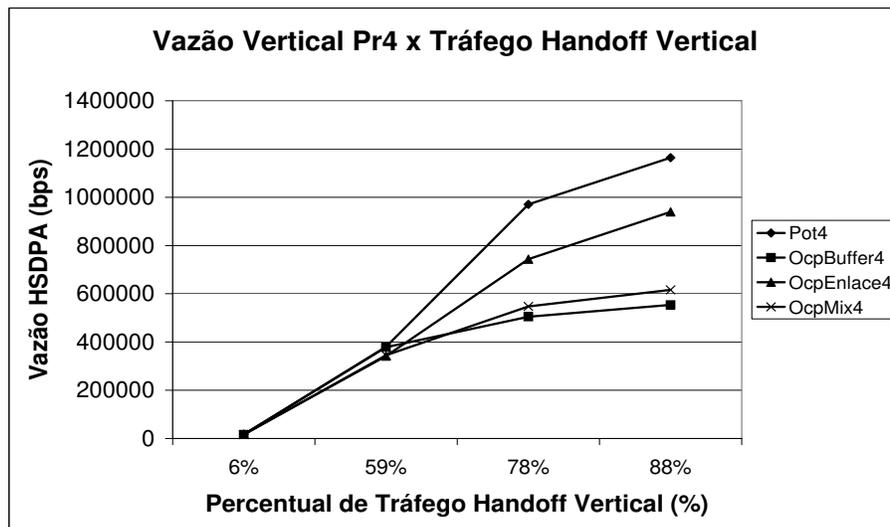


Fig. 5.3: Vazão HSDPA Pr4 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

durante o aumento de tráfego *handoff* vertical com mínimo de 0 kbps e máximo de 12,8 kbps. Este algoritmo baseia-se na potência dos sistemas 3G e acaba por sobrecarregar o sistema HSDPA, uma vez que na maioria das vezes as taxas de dados do HSDPA são mais altas do que o 1xEV-DO RA e subutilizar o sistema 1xEV-DO RA reduzindo significativamente suas vazões. Por outro lado, o algoritmo OcpEnlace exhibe as maiores vazões com pico de 57,4 kbps para um percentual de 97% de tráfego de *handoff* vertical. O algoritmo OcpMix apresenta desempenho intermediário entre OcpEnlace e OcpBuffer resultante da combinação entre os dois algoritmos.

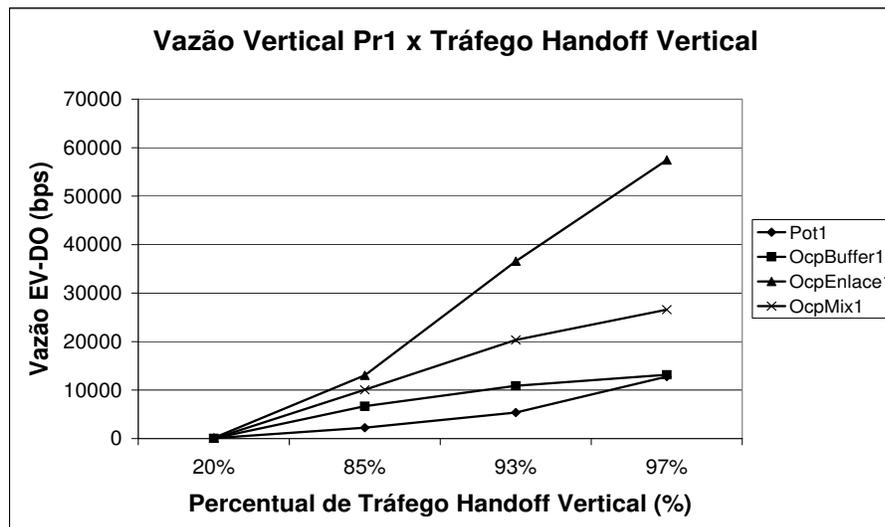


Fig. 5.4: Vazão 1xEV-DO RA Pr1 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

A Figura 5.5 exibe a vazão do tráfego de *handoff* vertical de prioridade 4 no sistema 1xEV-DO RA. O algoritmo Pot possui a pior vazão dos algoritmos avaliados variando de 0,3 kbps a 36,5 kbps durante o aumento de tráfego *handoff* vertical. Como este algoritmo baseia-se na RSS dos sistemas 3G, o sistema 1xEV-DO RA é subutilizado e conseqüentemente suas vazões são reduzidas enquanto o sistema HSDPA fica sobrecarregado devido a grande intensidade de tráfego em *handoff* vertical direcionada. Além disso, destaca-se o aumento da vazão de forma mais acentuada do algoritmo Pot a partir do percentual de tráfego de *handoff* vertical de 93%. O aumento mais acentuado da vazão do algoritmo Pot é resultante da saturação do sistema HSDPA. Por outro lado, o algoritmo OcpEnlace obtém as maiores vazões com pico de 116 kbps para um percentual de 97% de tráfego de *handoff* vertical. O algoritmo OcpMix apresenta novamente um desempenho intermediário entre OcpEnlace e OcpBuffer com vazões alternando entre 0 kbps a 69 kbps.

O atraso médio dos pacotes de prioridade 1 em *handoff* vertical no sistema HSDPA é mostrado na Figura 5.6. Os maiores atrasos durante a simulação são os obtidos pelo algoritmo Pot com atrasos de 4,32 ms até 222,5 ms em razão da saturação do sistema HSDPA pelo alto volume de tráfego de *handoff* vertical direcionado a este sistema. O algoritmo OcpEnlace mostra melhor desempenho com atrasos variando de 1,46 ms a 197 ms, porém os atrasos deste algoritmo são sensíveis ao aumento de tráfego em *handoff* vertical. Os algoritmos OcpMix e OcpBuffer apresentam ótimos desempenhos mesmo em situações de alto percentual de tráfego *handoff* vertical. Destaca-se o algoritmo OcpMix com baixos índices de atraso variando de 1,56 ms a até 62 ms devido às verificações das condições dos *buffers* e do enlace para a tomada de decisão no *handoff* vertical.

Na Figura 5.7 é mostrado o atraso médio dos pacotes de prioridade 4 no sistema HSDPA. As

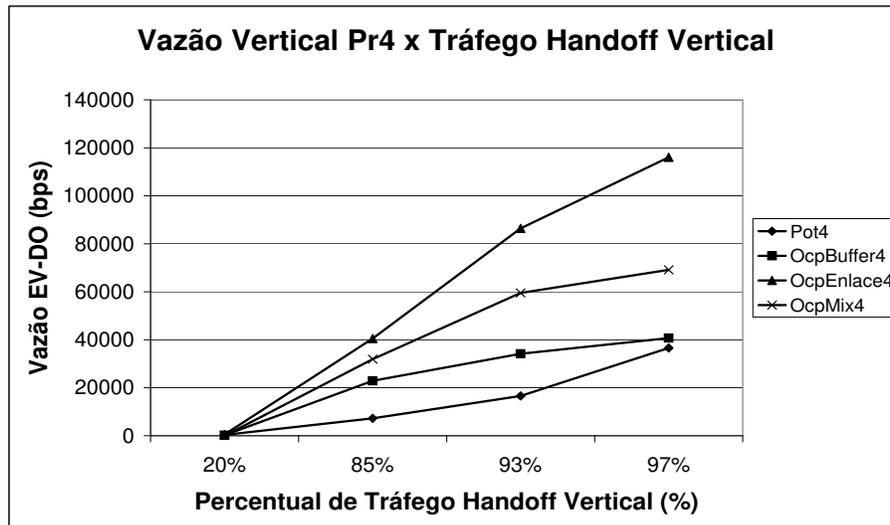


Fig. 5.5: Vazão 1xEV-DO RA Pr4 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

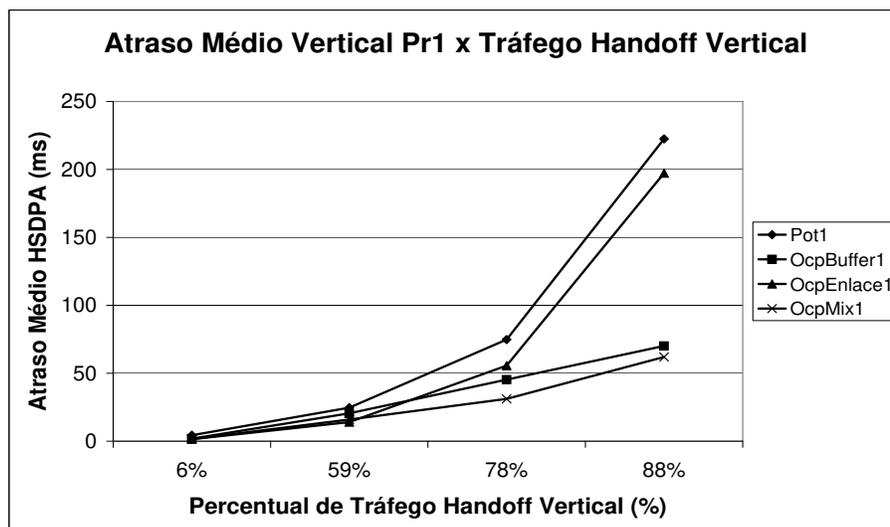


Fig. 5.6: Atraso Médio HSDPA Pr1 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

curvas deste gráfico seguem o comportamento semelhante ao da Figura 5.6, porém em virtude da maior proporção de usuários de baixa prioridade faz os atrasos saltarem de 1,7 ms até 1.137,2 ms no pior caso do algoritmo Pot. Os menores atrasos médios são conferidos novamente aos algoritmos OcpBuffer e OcpMix. Porém, a partir do percentual de tráfego de *handoff* vertical de 78% ocorre uma inversão de desempenhos dos algoritmos OcpBuffer e OcpMix explicado pela tendência do algoritmo OcpMix em acompanhar a curva do algoritmo OcpEnlace. Mesmo assim, o algoritmo OcpMix apresenta atrasos inferiores a 334,7 ms. Entretanto, os resultados do algoritmo OcpBuffer

estão condicionados a altos índices de descarte de pacotes em *handoff* vertical.

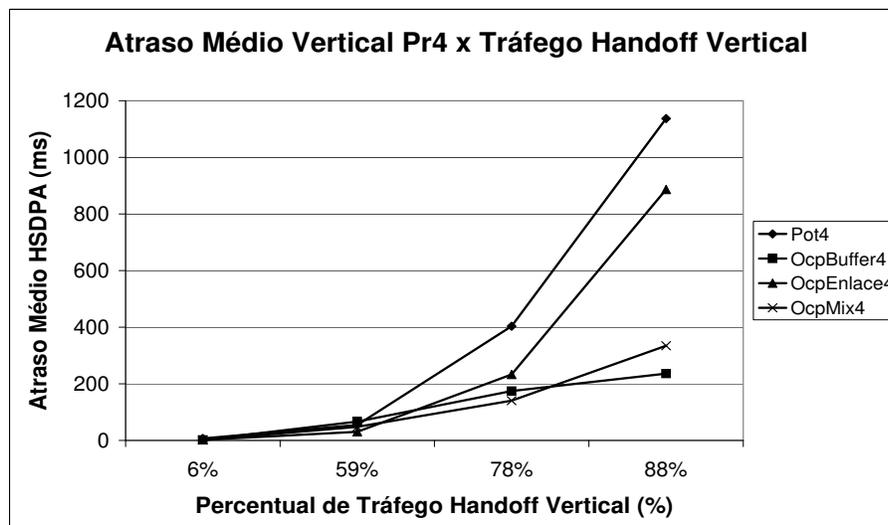


Fig. 5.7: Atraso Médio HSDPA Pr4 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

A Figura 5.8 mostra o atraso médio do tráfego de *handoff* vertical de prioridade 1 para o sistema 1xEV-DO RA. Nesta figura observa-se o excessivo atraso médio dos pacotes em *handoff* vertical em todos os algoritmos de *handoff* vertical avaliados em virtude da incapacidade do sistema 1xEV-DO RA em prover banda suficiente para atender a todos usuários de alta prioridade. Os maiores atrasos são conferidos ao algoritmo OcpEnlace variando de 44,07 ms a até 1.760 ms. O algoritmo OcpMix mostra um desempenho intermediário com atrasos de 57,85 ms até 1.297,1 ms. Os outros algoritmos Pot e OcpBuffer apresentam desempenhos semelhantes com atrasos inferiores a 600 ms no pior caso. O algoritmo Pot apresenta uma pequena vantagem em relação do OcpBuffer porém, condicionada a ineficiência do sistema 1xEV-DO RA.

Na Figura 5.9 é exibido o atraso médio do tráfego em *handoff* vertical de prioridade 4 no sistema 1xEV-DO RA. Os altíssimos índices de atraso obtidos em todos os algoritmos demonstram principalmente a fragilidade do sistema 1xEV-DO RA uma vez que este sistema não oferece banda suficiente para atender a alta demanda do tráfego *handoff* vertical de baixa prioridade. Além disso, a maior proporção destes usuários de prioridade 4 e o tamanho do *buffer* reduzem mais ainda o desempenho do sistema 1xEV-DO RA. Desta forma, o algoritmo OcpEnlace atinge atrasos inaceitáveis de 4.130 ms no pior caso. Os atrasos são reduzidos quando utilizado o algoritmo OcpMix porém, ainda elevados com mínimo de 330 ms e máximo de 3.090 ms. Os melhores resultados são conferidos ao algoritmo OcpBuffer com atrasos variando de 33 ms a 1.620 ms.

A Figura 5.10 exhibe o percentual de perda do tráfego *handoff* vertical de prioridade 4 no sistema HSDPA. O maior percentual de perda é obtido pelo algoritmo Pot com perdas variando de 0% a

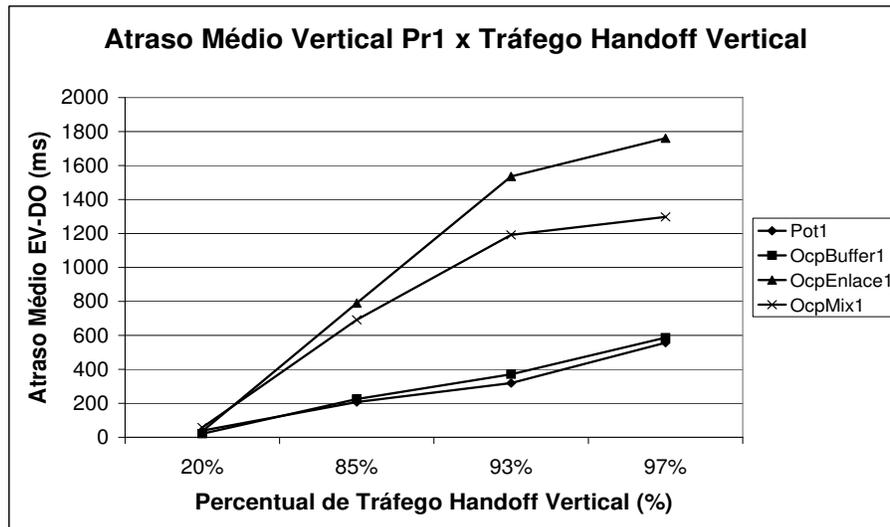


Fig. 5.8: Atraso Médio 1xEV-DO RA Pr1 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

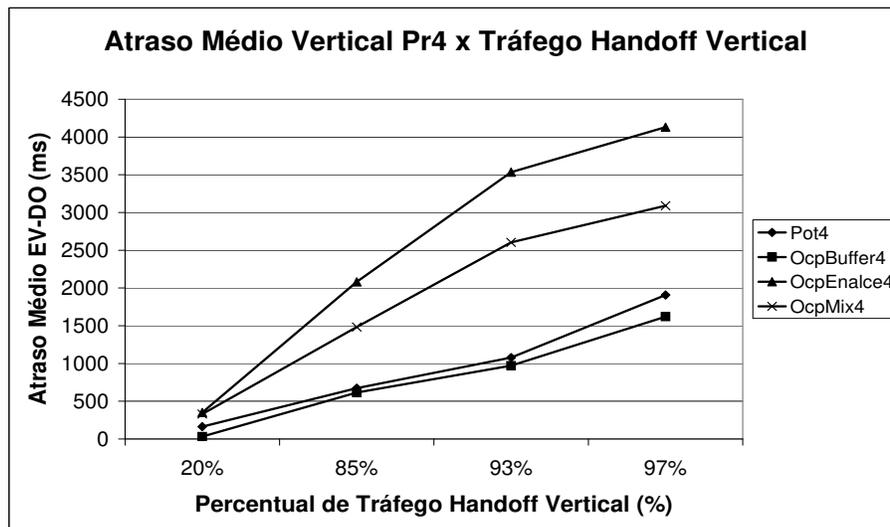


Fig. 5.9: Atraso Médio 1xEV-DO RA Pr4 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

8,33%. Tal desempenho é resultante do grande fluxo de tráfego em *handoff* vertical direcionado ao sistema HSDPA em virtude das suas altas taxas de dados no enlace direto. O algoritmo OcpBuffer também apresenta elevado índice de descarte com percentual de perda até 7,11% no pior caso. Perdas moderadas são obtidas pelo algoritmo OcpEnlace variando de 0% a 5,7%. Os menores percentuais de perdas são conferidos ao algoritmo OcpMix com o valor máximo de 0,6%.

Por fim, na Figura 5.11 é mostrado o percentual de perda do tráfego *handoff* vertical de prioridade 4 no sistema 1xEV-DO RA. Os algoritmos OcpMix e OcpEnlace apresentam descartes semelhantes

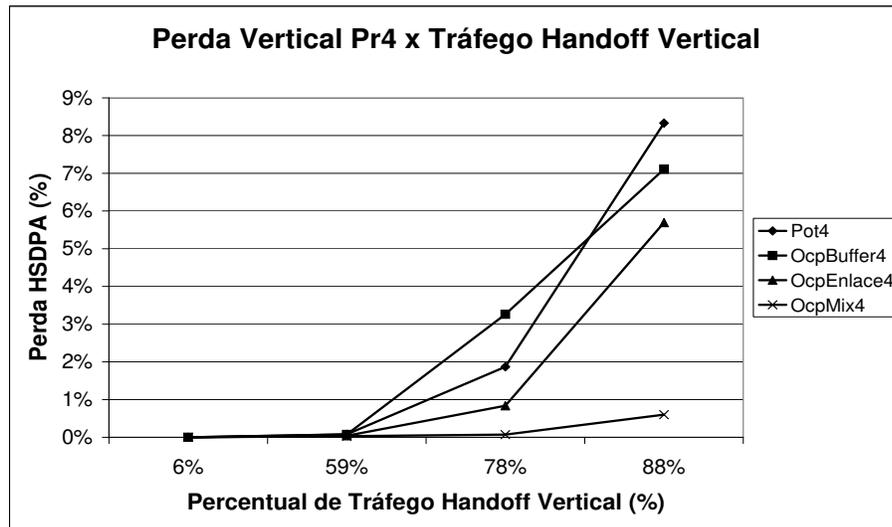


Fig. 5.10: Percentual de Perda HSDPA Pr4 em Função do Tráfego Handoff Vertical

em virtude do maior direcionamento de tráfego handoff vertical para o sistema 1xEV-DO RA. Entretanto, o algoritmo OcpMix apresenta descartes superiores aos do algoritmo OcpEnlace em toda simulação. Os outros algoritmos OcpBuffer e Pot obtêm excelentes desempenhos com perdas de no máximo 0,17% porém, estes algoritmos subutilizam o sistema 1xEV-DO RA e sobrecarregam o sistema HSDPA com elevados índices de descarte.

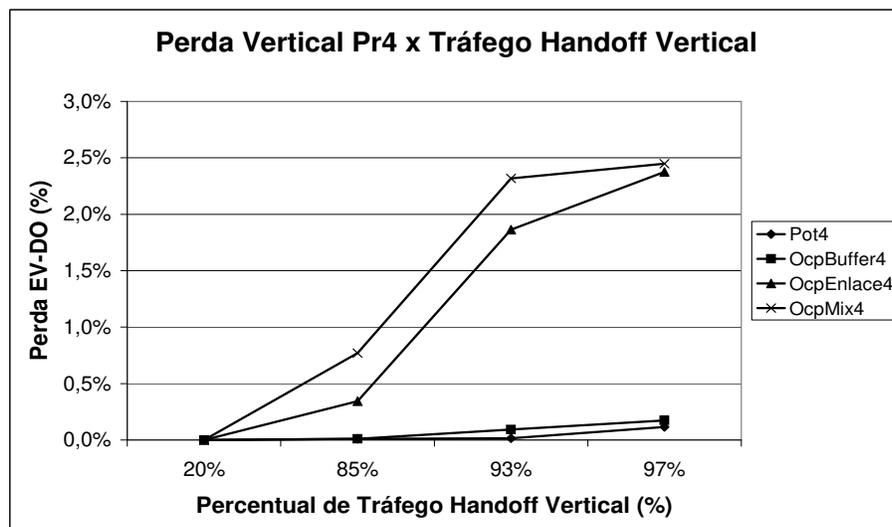


Fig. 5.11: Percentual de Perda 1xEV-DO RA Pr4 em Função do Tráfego Handoff Vertical

5.5.2 Cenário II

Nesta seção são apresentados os resultados de simulação referentes ao desempenho dos sistemas UMTS/HSDPA e CDMA 1xEV-DO RA. Os algoritmos potência equivalente, ocupação mix, ocupação de enlace e potência mix e o *deficit round robin* são identificados nas figuras pelos acrônimos PotEq, OcpMix, OcpPotMix e DRR respectivamente. Finalmente, os números no final de cada acrônimo estão associados com a prioridade de cada tipo de tráfego variando de 1 a 4, isto é, da prioridade mais alta para a prioridade mais baixa. Em todos os gráficos é considerado a condição do *buffer* da Tabela 5.5. O desvio padrão médio da simulação foi de 4,49% e para um intervalo de confiança de 95% foi 2,75% do valor da média.

Na Figura 5.12 é mostrada a vazão de dados dos usuários de Pr1 no sistema HSDPA em função do aumento do tráfego de *handoff* vertical. A vazão do algoritmo de *handoff* vertical baseado na potência equivalente (PotEq) apresenta o melhor desempenho variando de 4,3 kbps até o máximo de 513 kbps. Este algoritmo proporciona a vazão de dados mais alta desde que os usuários atendidos estejam entre os que apresentarem as melhores condições de canal. O algoritmo OcpPotMix também influenciado pela potência equivalente apresenta boas vazões com o máximo de 467 kbps. O algoritmo DRR obtém desempenho intermediário com vazões entre 4,3 kbps e 321,6 kbps. O outro algoritmo de *handoff* vertical OcpMix apresenta o pior desempenho com vazões variando de 4,5 kbps até 163 kbps devido ao efeito ping-pong para selecionar o sistema 3G mais adequado para receber os pacotes em *handoff* vertical. No caso dos usuários Pr4 os resultados são semelhantes.

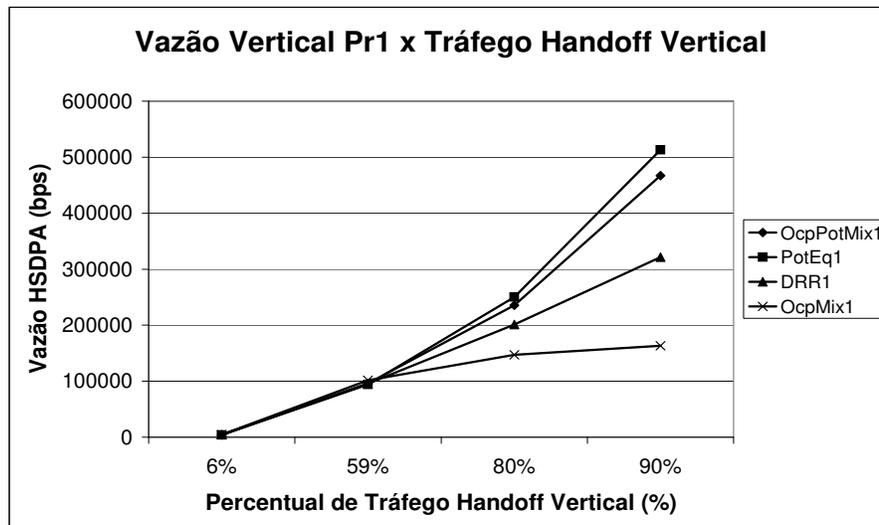


Fig. 5.12: Vazão HSDPA Pr1 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

A vazão de dados dos usuários Pr1 no sistema 1xEV-DO RA em função do tráfego *handoff* verti-

cal é exibido na Figura 5.13. No sistema 1xEV-DO RA o algoritmo OcpPotMix apresenta o melhor desempenho variando de 6,9 kbps até 66 kbps. No caso do algoritmo PotEq o sistema 1xEV-DO RA mostra um desempenho pior do que o sistema HSDPA porque em alguns casos em que as potências equivalentes são as mesmas, e de acordo com algoritmo o sistema HSDPA é escolhido para receber o pacote em *handoff* vertical. Assim, o algoritmo PotEq apresenta pior desempenho no sistema 1xEV-DO RA com o máximo de 54,7 kbps. Mais uma vez, o algoritmo DRR mostra vazões intermediárias variando de 0,7 kbps até 47,8 kbps. Finalmente, o algoritmo OcpMix apresenta as piores vazões com máximo de 19,6 kbps em razão da baixa ocupação de enlace do sistema 1xEV-DO RA. No caso dos usuários Pr4 os resultados são similares.

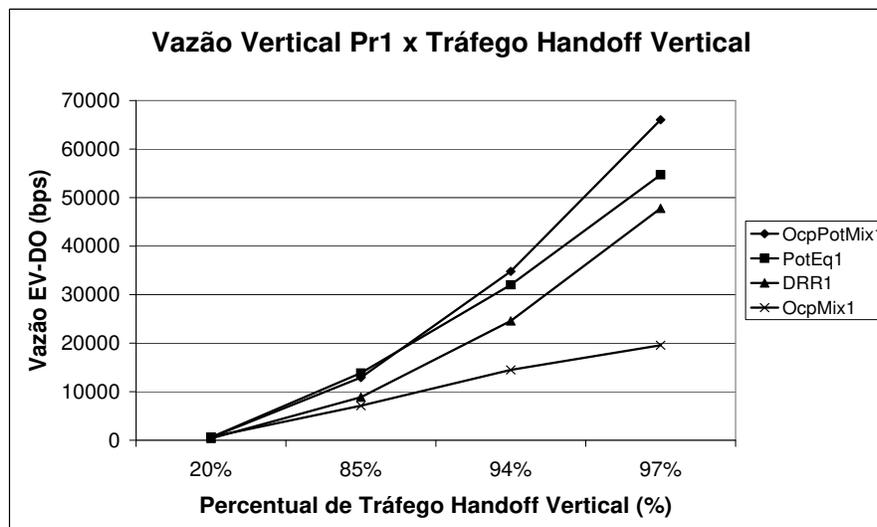


Fig. 5.13: Vazão 1xEV-DO RA Pr1 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

A Figura 5.14 mostra o atraso médio dos pacotes Pr1 no sistema HSDPA em função do tráfego de *handoff* vertical. Os maiores atrasos médios são obtidos pelo algoritmo DRR com atrasos médios de 4 ms até 289 ms devido ao maior quantum de 5 Mbits aplicado para este sistema. Os outros algoritmos PotEq e OcpPotMix apresentam desempenhos intermediários com atrasos variando de 9,6 ms até 260 ms porém, estes atrasos são sensíveis ao aumento de tráfego *handoff* vertical. O algoritmo OcpMix mostra baixos atrasos variando de 1,5 ms até 65 ms. Contudo, estes bons resultados estão condicionados à baixa ocupação de enlace no sistema HSDPA.

No caso dos usuários de Pr4 o atraso médio no sistema HSDPA é semelhante ao da Figura 5.15 mas, devido à baixa prioridade dos usuários os atrasos médios aumentaram de 2 ms até 1.025 ms no pior caso do algoritmo OcpPotMix. Os menores atrasos médios estão novamente associados ao algoritmo OcpMix em razão da baixa ocupação de enlace do sistema HSDPA. No caso dos algoritmos PotEq e OcpPotMix os desempenhos são similares durante as simulações com uma pequena vantagem

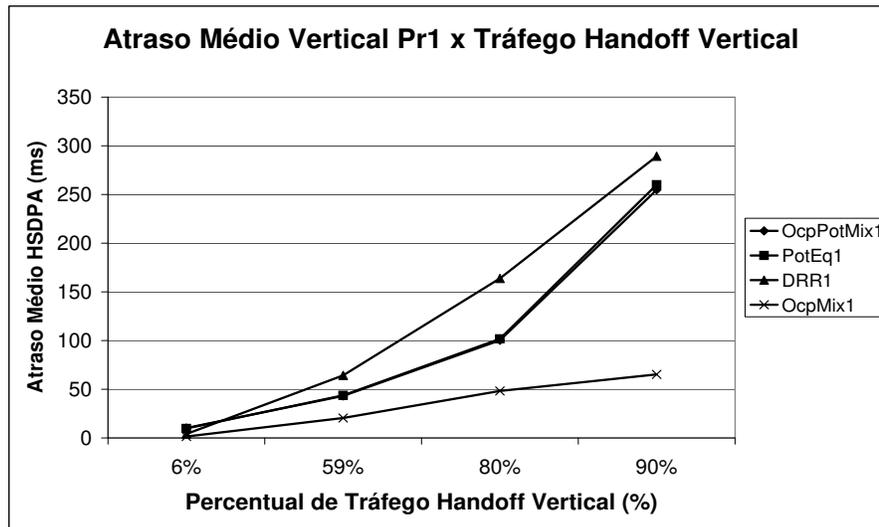


Fig. 5.14: Atraso Médio HSDPA Pr1 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

do algoritmo PotEq. O algoritmo DRR apresenta o segundo pior atraso médio variando de 7,8 ms até 978 ms. Entretanto, este desempenho pode ser melhorado através da redução do tamanho do quantum para o sistema HSDPA.

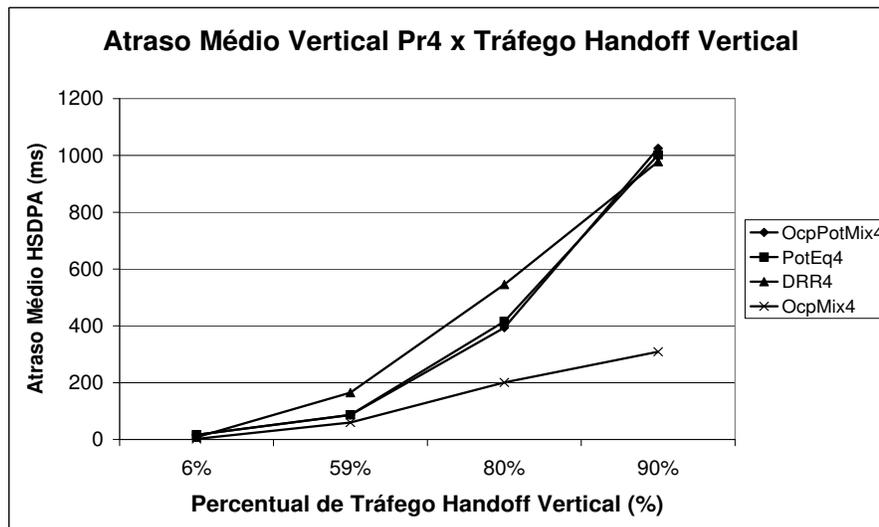


Fig. 5.15: Atraso Médio HSDPA Pr4 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

A Figura 5.16 mostra o atraso médio dos usuários Pr1 no sistema 1xEV-DO RA em função do tráfego *handoff* vertical. Conforme pode ser observado o excessivo atraso médio verificado em todos algoritmos avaliados são consequência da incapacidade do sistema 1xEV-DO RA em prover banda

o suficiente para atender todos os usuários de alta prioridade. Os maiores atrasos médios estão relacionados ao algoritmo OcpPotMix variando de 127,8 ms até 1.641 ms. O algoritmo PotEq mostra um desempenho intermediário com atraso médio variando de 107,5 ms até 1.371 ms. O outro algoritmo DRR apresenta um bom desempenho com atraso médio variando de 161,8 ms até 1.064 ms em virtude do sistema 1xEV-DO RA não ser sobrecarregado pelo tráfego *handoff* vertical. O melhor resultado é o obtido pelo algoritmo OcpMix com atraso médio máximo de 875 ms embora o sistema 1xEV-DO RA não seja utilizado eficientemente.

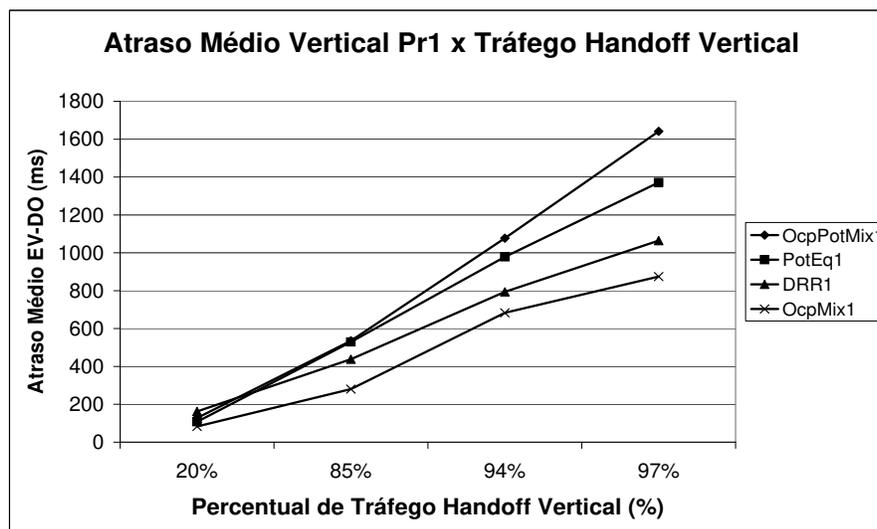


Fig. 5.16: Atraso Médio 1xEV-DO RA Pr1 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

O atraso médio dos usuários de Pr4 no sistema 1xEV-DO RA em função do tráfego de *handoff* vertical é exibido na Figura 5.17. Os altos índices de atrasos obtidos por todos os algoritmos avaliados demonstram principalmente a fraqueza do sistema 1xEV-DO RA uma vez que o sistema não oferece banda o suficiente para atender a alta demanda do tráfego de *handoff* vertical. Além disso, a alta proporção de usuários de prioridade 4 e o tamanho reduzido do *buffer* reduzem o desempenho do sistema 1xEV-DO RA. Desta forma, o algoritmo OcpPotMix atinge atrasos médios inaceitáveis e no pior caso, 4.234,8 ms. Os atrasos são reduzidos quando é utilizado o algoritmo PotEq porém, ainda os atrasos permanecem altos com o mínimo de 368 ms e o máximo de 3.768 ms. O algoritmo DRR apresenta um desempenho intermediário com atrasos menores do que 3.729 ms no pior caso. Os melhores resultados são alcançados pelo algoritmo OcpMix com atraso médio variando de 294 ms até 2.546 ms contudo, este algoritmo apresenta altos percentuais de perda conforme mostrado na Figura 5.19.

A Figura 5.18 exibe o percentual de perda de pacotes dos usuários de Pr4 no sistema HSDPA em função do tráfego de *handoff* vertical. O maior percentual de perda é obtido pelo algoritmo DRR com

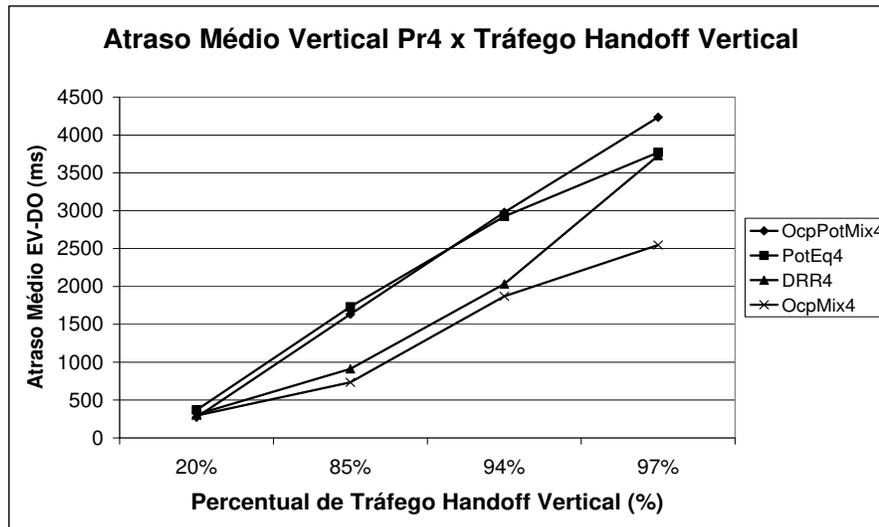


Fig. 5.17: Atraso Médio 1xEV-DO RA Pr4 em Função do Tráfego de *Handoff* Vertical

perdas variando de 0% até 7,6%. Este desempenho é resultado do tamanho do quantum do sistema HSDPA que aumenta o tempo de espera dos usuários Pr4 e conseqüentemente o percentual de perda. Os algoritmos OcpPotMix e PotEq também apresentam altos percentuais de perda com 7,32% no pior caso. Os menores percentuais de perda são obtidos pelo algoritmo OcpMix variando de 0% a 2,54%. Todavia, este resultado é conseqüência da subutilização do sistema HSDPA.

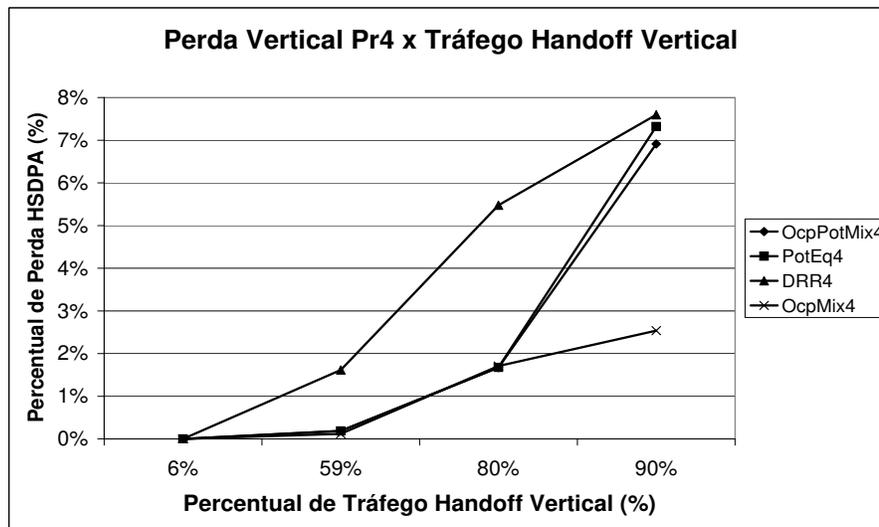


Fig. 5.18: Percentual de Perda HSDPA Pr4 em Função do Tráfego Handoff Vertical

Finalmente, na Figura 5.19 é mostrado o percentual de perda dos usuários Pr4 no sistema 1xEV-

DO RA em função do tráfego de *handoff* vertical. Os percentuais de descarte mais altos são conferidos ao algoritmo OcpMix variando de 0% até 2%. No outro algoritmo OcpPotMix o desempenho do sistema 1xEV-DO RA apresenta uma pequena melhora com o percentual de perda máximo de 1,96%. O algoritmo PotEq apresenta desempenho intermediário variando de 0% até 1,4%. Por fim, os melhores resultados são associados com o algoritmo DRR onde os percentuais de perda são menores do que 0,79%.

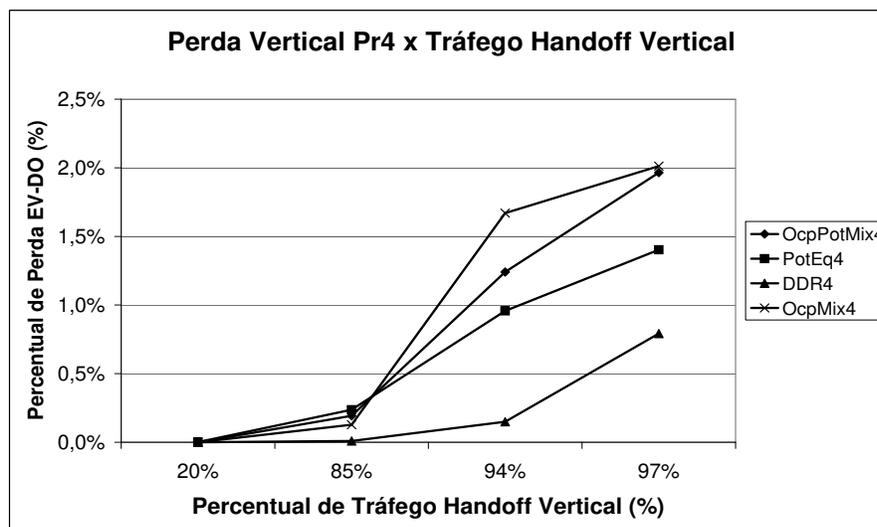


Fig. 5.19: Percentual de Perda 1xEV-DO RA Pr4 em Função do Tráfego Handoff Vertical

5.6 Conclusões

Neste estudo, novos algoritmos para aceitação de tráfego *handoff* vertical foram propostos e avaliados nos sistemas 3G UMTS/HSDPA e 1xEV-DO RA em conjunto com o escalonador de dados PF a fim de assegurar a QoS de cada sistema 3G e minimizar a degradação de desempenho causada pelo aumento de tráfego *handoff* vertical nos sistemas 3G. Os impactos destes algoritmos na aceitação de tráfego junto com o escalonador de dados PF foram avaliados através de simulações computacionais usando a ferramenta de *software* Matlab. A vazão, o atraso médio e o percentual de perda de pacotes foram estudados em função carga de tráfego de *handoff* vertical.

Neste novo cenário de integração de redes 3G heterogêneas, o algoritmo OcpMix na qual constitui-se de uma combinação de parâmetros para ocupação do *buffer* e ocupação do enlace apresentou um bom desempenho em termos de atraso médio e percentual de perda nos dois cenários de avaliação de desempenho. Contudo, tal desempenho está relacionado a ineficiência na alocação de recursos das redes 3G com a subutilização dos sistemas 1xEV-DO RA e HSDPA. O outro algoritmo OcpPotMix

assegurou altas taxas de vazão de dados para ambos sistemas 3G, porém, estes resultados estavam associados com altos percentuais de perda e altos índices de atrasos em ambos sistemas 3G.

O algoritmo PotEq mostrou um desempenho intermediário em todas as métricas de QoS avaliados com altas vazões para ambos sistemas 3G. Entretanto, as altas latências nos sistemas 3G obtidas por este algoritmo não atenderam satisfatoriamente a todos usuários. Por outro lado, o algoritmo DRR assegurou satisfatoriamente a QoS na maioria das métricas de desempenho avaliadas. Além disso, este desempenho pode ser melhorado através da redução do tamanho do quantum no sistema HSDPA, isto é, o tamanho do quantum em ambos sistemas 3G é flexível de acordo com a necessidade da operadora de telecomunicações.

Capítulo 6

Conclusões

Com o advento das redes 4G novos mecanismos de *handoff* foram criados para permitir o *roaming* entre diferentes redes de acesso. Desta forma, espera-se integrar diversos tipos de sistemas móveis como o CDMA 1xEV-DO RA, o UMTS/HSDPA e o WiMAX. Neste estudo, os desempenhos dos enlaces diretos dos sistemas CDMA 1xEV-DO RA, UMTS/HSDPA e WiMAX foram avaliados face aos novos algoritmos de *handoff* vertical e horizontal como forma de melhorar a QoS das conexões em andamento nas redes 3G e 4G. Estes algoritmos consideram os seguintes parâmetros de QoS para a tomada de decisão *handoff*: a ocupação do enlace, a ocupação do *buffer*, a potência do sinal recebido (RSS) e o tamanho do quantum (DRR).

Além disso, avaliou-se o desempenho dos algoritmos de escalonamento de dados: Prioritário (Pr), *Proportional Fair* (PF), *Maximum Carrier Interference* (Max C/I) e a nova proposta *Priority Proportional Fair* (Pr/PF). As seguintes métricas de QoS foram avaliadas neste trabalho: a vazão de dados, o atraso médio dos pacotes e o percentual de perda de pacotes, todos em função de fontes de tráfego HTTP ou de fontes segundo o processo de Poisson. O estudo baseou-se em simulações computacionais através de um simulador de eventos discretos desenvolvido na ferramenta de software Matlab.

A nova proposta de escalonamento de dados Pr/PF demonstrou ser uma boa alternativa para assegurar QoS para diversos tipos de usuários. Os usuários de alta prioridade obtiveram desempenhos semelhantes aos verificados pelo escalonador prioritário. Por outro lado, os usuários de baixa prioridade conseguiram uma QoS razoável com desempenho superior ao verificado pelo escalonador Pr e inferiores aos obtidos pelos escalonadores Max C/I e PF. Desta forma, este escalonador privilegia os usuários dispostos a pagar mais pelo serviço diferenciado e ao mesmo tempo atende aos usuários de baixa prioridade com desempenhos superiores ao escalonador Pr.

Em relação aos algoritmos de *handoff* horizontal Pot e PotOcp os mesmos apresentaram comportamentos distintos. O algoritmo Pot garantiu a melhor QoS do tráfego interno dos sistemas CDMA

1xEV-DO RA e UMTS/HSDPA na maioria das métricas avaliadas. Contudo, a aparente superioridade em relação ao algoritmo PotOcp está condicionada ao alto índice de descarte de pacotes *handoff*. Por outro lado, o algoritmo PotOcp além de assegurar a QoS nas métricas avaliadas de maneira satisfatória foi mais solidário ao tráfego *handoff* com baixos índices de descarte. Portanto, a escolha do melhor algoritmo de *handoff* horizontal fica a critério da operadora do sistema móvel na qual pode priorizar o tráfego interno ou em *handoff* de acordo com a escolha dos algoritmos.

Entre os vários algoritmos de *handoff* vertical propostos destaca-se o algoritmo DRR. Os resultados mostraram que este algoritmo assegurou a QoS satisfatoriamente na maioria das métricas avaliadas com a vantagem de que os resultados podem ser melhorados através de ajustes nos parâmetros de saldo e quantum dos sistemas móveis. Este algoritmo permite a "reserva" de banda para cada sistema móvel por meio dos parâmetros de saldo e de quantum. Assim, através de ajustes finos nestes parâmetros do algoritmo DRR pode-se alcançar o balanceamento "ideal" de carga entre os sistemas móveis de maneira a não sobrecarregar ou subutilizar qualquer sistema com o tráfego de *handoff* vertical.

Outro algoritmo de *handoff* vertical relevante trata-se do algoritmo OcpMix na qual foram obtidos baixos índices de atraso e perda de pacotes. Entretanto, as menores vazões de dados deste algoritmo quando comparado aos outros algoritmos mostram claramente que os sistemas 3G CDMA 1xEV-DO RA e UMTS/HSDPA ficaram subutilizados, ou seja, uma situação indesejada uma vez que se procura maximizar o desempenho das redes.

Finalmente, como trabalhos futuros sugere-se utilizar outras fontes de tráfego como FTP, WAP, *video-streaming* e voz em conjunto com as fontes HTTP a fim de avaliar o desempenho dos sistemas móveis em cenários em que há a coexistência dos tráfegos de *handoff* horizontal e vertical juntamente com o tráfego interno.

Outra idéia para a continuidade deste trabalho está relacionada à inclusão do sistema móvel 4G LTE na plataforma de simulação em conjunto com os sistemas CDMA 1xEV-DO RA e UMTS/HSDPA. Desta forma, através da inclusão deste sistema 4G poderia-se avaliar "na prática" os desempenhos dos algoritmos de *handoff* vertical com maior precisão, além de propor novos algoritmos para aumentar a QoS dos sistemas 3G e 4G.

Outro possível trabalho futuro refere-se a avaliação de um único sistema móvel com o objetivo de estudar o impacto das mudanças nos parâmetros da rede avaliada e desta forma conseguir isolar os parâmetros de rede que provocam mudanças no comportamento do sistema móvel. Um destes possíveis parâmetros seria a distribuição da taxa de dados em que conforme a variação deste parâmetro pode-se obter diferentes índices de desempenho.

Referências Bibliográficas

- [1] Qualcomm. 1xEV: 1x evolution IS-856 TIA/EIA standard, airlink overview. White paper, Qualcomm, Novembro 2001. http://www.cdg.org/technology/3g/resource/1xEV_AirlinkOverview_110701.pdf.
- [2] Michel D. Yacoub. *WIRELESS TECHNOLOGY - Protocols, Standards, and Techniques*. CRC PRESS, 2002.
- [3] Antti Toskala Harri Holma. *WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 2004.
- [4] Eiko Seidel. Technology of high speed packet access (HSPA). White Paper Technology of HSPA, NOMOR RESEARCH GMBH, Outubro 2006. http://www.nomor.de/uploads/b0/2m/b02mwrVvIa5ZUtVrFeSP1w/Technology_of_HSPA.pdf.
- [5] WiMAX Forum. Mobile wimax - part i: A technical overview and performance evaluation. White paper, WiMAX Forum, 2006. http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/Mobile_WiMAX_Part1_Overview_and_Performance.pdf.
- [6] IEEE 802.16-2004. IEEE standard for local and metropolitan area networks, part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems, Outubro 2004.
- [7] Loutfi Nuaymi. *WiMAX TECHNOLOGY FOR BROADBAND WIRELESS ACCESS*. John Wiley & Sons, 2007.
- [8] Daniela Maniezzo. UCLA - Proposed Research. Página na internet, UCLA Computer Science Department, Novembro 2004. <http://www.cs.ucla.edu/ST/research.html>.
- [9] Suk Yu Hui e Kai Hau Yeung. Challenges in the migration to 4g mobile systems. *IEEE Communications Magazine*, 41:54–59, Dezembro 2003.
- [10] 3GPP2 WG5 Evaluation Ad Hoc. 1xEV-DV evaluation methodology - addendum (V6), Julho 2001.

- [11] Raymond Steele. *Mobile Radio Communications*. Wiley-IEEE Press, 1999.
- [12] Mehmet Yavuz e Yeliz Tokgoz Chirag S. Patel. Handoff performance analysis for 1xEV-DO rev. a systems. *IEEE International Conference on Communications, 2006. ICC '06*, 11:4924–4929, Junho 2006.
- [13] Tania Aida Garcia Bassi. Análise do desempenho do sistema 3g 1xEV-DV no enlace direto. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Fevereiro 2006.
- [14] 3GPP2 C.S0024. CDMA2000, high rate packet data air interface specification, Outubro 2002.
- [15] 3GPP Release'5. High speed downlink packet access (HSDPA); overall description, 2004. (3GPP TS 25.308 version 5.4.0).
- [16] Qi Bi. A forward link performance study of the 1xEV-DO system through simulations and field measurements. *White Paper, Lucent Technologies Bell Laboratories*, pages 1–19, Março 2004.
- [17] 3GPP2 C.S20024-A. CDMA2000, high rate packet data air interface specification, Março 2004.
- [18] Peter Black Rashid Attar Yu-Cheun Jou Mingxi Fan Donna Ghosh e Jean Au Naga Bhushan, Chris Lott. CDMA2000 1xEV-DO revision a: A physical layer and mac layer overview. *IEEE Communications Magazine*, pages 75–87, Fevereiro 2006.
- [19] 3GPP TR 25.896. Feasibility study for enhanced uplink for UTRA FDD (release 6), Abril 2004. v6.0.0.
- [20] 3GPP TR 25.913. Requirements for evolved UTRA (E-UTRA) and evolved UTRAN (E-UTRAN), Dezembro 2009. (3GPP TR 25.913 version 9.0.0).
- [21] Ericsson AB 2007. Long term evolution (LTE): an introduction. *White Paper Ericsson*, pages 1–19, Outubro 2007. 284 23-3124 Uen.
- [22] Qualcomm. 1xEV-DO system architecture. White paper, Qualcomm, 2003.
- [23] Qualcomm. 1xEV-DO session protocol stacks. White paper, Qualcomm, 2003.
- [24] Qiang Wu e Eduardo Esteves. *Advances in 3G enhanced technologies for wireless communications*, chapter The cdma2000 High Rate Packet Data System, pages 149–226. Mobile Communications Series. Artech House, Incorporated, 2002.

- [25] Hugo Swart. Estudo de desempenho do sistema 1xEV-DO com prioridades de serviços na interface aérea. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Abril 2004.
- [26] Nagabhushana T. Sindhushayana e Peter J. Black. Forward link coding and modulation for CDMA2000 1xEV-DO (IS-856). *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 4:1839 – 1846, Setembro 2002.
- [27] R.Padovani e R. Pankaj A. Jalali. Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system. *Vehicular Technology Conference*, 3:1854–1858, 2000.
- [28] Nortel. HSDPA and beyond. White Paper NN110820-012805, Nortel, 2005. http://www.nortel.com/solutions/wireless/collateral/nn_110820_01-28-05.pdf.
- [29] Remco Litjens e Joost Laverman Hans van den Berg. HSDPA flow level performance: The impact of key system and traffic aspects. *COST 290 Management Committee Meeting*, pages 1 – 16, 2005.
- [30] George D. Stamoulis e Costas Courcoubetis Manos Dramitinos. Auction-based resource allocation in UMTS high speed downlink packet access (HSDPA). *Next Generation Internet Networks*, pages 434 – 441, 2005.
- [31] IEEE 802.16e 2005. Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems, Fevereiro 2005. IEEE P802.16e/D12.
- [32] Mustafa Ergen. The access service network in wimax: The role of asn-gw. White paper, Wi-Chorus, 2007. <http://www.mustafaergen.com/asn-gw.pdf>.
- [33] Luciano Lenzini e Enzo Mingozzi Claudio Cicconetti, Alessandro Erta. Performance evaluation of the IEEE 802.16 MAC for qos support. *IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING*, 6(1):26–38, Janeiro 2007.
- [34] Zdenek Becvar e Jan Zelenka. Handovers in the mobile wimax. *Research in Telecommunication Technology*, 2006.
- [35] Keiji Tachikawa. A perspective on the evolution of mobile communications. *IEEE Communications Magazine*, 41:66–73, Outubro 2003.

- [36] Ahmed Hasswa e Hossam Hassanein Nidal Nasser. Handoffs in fourth generation heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine*, 44(10):96–103, Outubro 2006. EUA.
- [37] Pierfrancesco Annese e Umberto Spagnolini Giorgio Manfredi. A channel aware scheduling algorithm for HSDPA system. *The 16th Annual IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC2005*, 4:2136–2140, Setembro 2005.
- [38] Dusit Niyato e Ekram Hossain. Queue-aware uplink bandwidth allocation for polling services in 802.16 broadband wireless networks. *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '05*, 6:3702–3706, Dezembro 2005.
- [39] Pavel Mach e Robert Bestak. Wimax performance evaluation. *Sixth International Conference on Networking, ICN '07*, pages 17–17, Abril 2007.
- [40] Robert Love Kenneth Stewartl Rapeepat Ratasukt Raja Bachul Yakun Sun e Q. Zhao Fan Wangt, Amitava Ghosht. IEEE 802.16e system performance: Analysis and simulations. *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2005*, 2:900–904, Setembro 2005.
- [41] Kitti Wongthavarawat e Aura Ganz. Packet scheduling for qos support in IEEE 802.16 broadband wireless access systems. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATIONS SYSTEMS*, 16:81–96, 2003.
- [42] Min-Su Kim e Ki-Jun Han Dong-Hoon Cho, Jung-Hoon Song. Performance analysis of the IEEE 802.16 wireless metropolitan area network. *First International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications, DFMA '05*, pages 130–136, 2005.
- [43] Leandro Bento Sena Marques e Shusaburo Motoyama. Critérios de aceitação de tráfego hand-off e escalonadores de dados para garantia de qos no sistema CDMA 1xEV-DO RA. *XXVIII Congresso da Sociedade Brasileira da Computação*, pages 76–94, Julho 2008.
- [44] S. Tekinary e B. Jabbari. A measurement based prioritization scheme for handovers in cellular and micro-cellular networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 10(8):1343–1350, Outubro 1992.
- [45] Hoang Nam Nguyen e Iwao Sasase. Downlink queuing model and packet scheduling for providing lossless handoff and qos in 4g mobile networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5:452–462, Maio 2006.

- [46] Tsung-Nan Lin e Po-Chiang Lin. Handoff ordering using link quality estimator for multimedia communications in wireless networks. *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '05*, 2:1125–1130, Novembro 2005.
- [47] Wang Kuang e Guangxin Zhu Qian Jun, Yanping-Yu. Handoff strategy analysis by stackelberg model over HSDPA. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCom 2007*, pages 1766–1770, Setembro 2007.
- [48] Antonios Argyriou e Vijay Madisetti. Modeling the effect of mobile handoffs on TCP and TFRC throughput. *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '06*, pages 1–5, Novembro 2006.
- [49] William Michael MacDonald e Harish Viswanathan Suman Das. Sensitivity analysis of handoff algorithms on CDMA forward link. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(1):272–285, Janeiro 2005.
- [50] Qingyang Song e Abbas Jamalipour. A network selection mechanism for next generation networks. *IEEE International Conference on Communications, ICC 2005*, 2:1418–1422, Maio 2005.
- [51] J. Gosteaub P. Pellatia e G. Vivier Z. Daia, R. Fracchiaa. Vertical handover criteria and algorithm in IEEE 802.11 and 802.16 hybrid networks. *IEEE International Conference on Communications, ICC 2008*, pages 2480–2484, Maio 2008.
- [52] Vassilis E. Zafeiris e Emmanuel A. Giakoumakis. An agent-based architecture for handover initiation and decision in 4g networks. *Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'05)*, pages 72–77, Junho 2005.
- [53] Bin Qiu e Laurence S. Dooley Kemeng Yang, Iqbal Gondal. Combined SINR based vertical handoff algorithm for next generation heterogeneous wireless networks. *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '07*, pages 4483–4487, Novembro 2007.
- [54] Abdel Obaid e Robert Johnston Samir Chebbine, Mohand Tahar Chebbine. Framework architecture and mathematical optimization of vertical handover decision on 4g networks using msctp. *IEEE International Conference on Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, WiMob'2005*, 2:235–241, Agosto 2005.
- [55] Cheng-Hsiung Hsieh Ying-Hsin Liang Ben-Jye Chang, Jun-Fu Chen. Markov decision process-based adaptive vertical handoff with RSS prediction in heterogeneous wireless networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2009*, pages 1–6, Abril 2009.

- [56] M. Shreedhar e George Varghese. Efficient fair queuing using deficit round-robin. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(3):375–385, 1996.
- [57] Hyoung-Kee Choi e John O. Limb. A behavioral model of web traffic. *Seventh International Conference on Network Protocols*, pages 327–334, Novembro 1999. Canadá.
- [58] Kevin Jeffay e David Ott F. Donelson Smith, Félix Hernández Campos. What tcp/ip protocol headers can tell us about the web. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 29:245–256, Junho 2001. EUA.
- [59] Nicholas Hastings e Brian Peacock Merran Evans. *Statistical Distributions*. John Wiley & Sons, 1993.
- [60] Charles Harrell e Kerim Tumay. *Simulation Made Easy: A Manager's Guide*. Engineering & Management Press, 1997.
- [61] Michalis Faloutsos e Andre Broido Thomas Karagiannis, Mart Molle. A nonstationary poisson view of internet traffic. *23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM'04*, 3:1558–1569, Março 2005. China.

Apêndice A

Fontes de Tráfego

A.1 Fontes de Tráfego de Poisson

Em parte deste trabalho são adotadas fontes de tráfego segundo o processo de Poisson. As fontes de tráfego de Poisson são muito utilizadas na modelagem de tráfego de voz e dados em redes de comunicações. Entretanto, com a popularização das aplicações baseadas no protocolo IP as fontes de tráfego de Poisson tornaram-se pouco precisas para o dimensionamento de redes. Assim, em grande parte deste estudo optou-se por utilizar fontes de tráfego HTTP ao invés de fontes de tráfego segundo o processo de Poisson.

Em relação as fontes de tráfego de Poisson adotadas neste estudo, elas representam o processo de chegada de pacotes a ERB. Este processo de chegada é modelado através da geração de números aleatórios segundo a função de distribuição de Poisson. Além do processo de chegada de pacotes, o tamanho dos pacotes segue a função de distribuição de Poisson como forma de simular o modelo da fila M/M/1 em que a chegada de pacotes e o atendimento de pacotes obedecem uma distribuição exponencial negativa, isto é, a distribuição de Poisson. A função distribuição de Poisson é dada pela Equação A.1.

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (\text{A.1})$$

A.1.1 Método da Transformação Inversa

A geração de números aleatórios em linguagens de programação normalmente seguem a distribuição uniforme o que é incompatível com a distribuição de Poisson. Assim, uma das soluções para este problema trata-se da aplicação do método de transformação inversa na função de distribuição de Poisson.

Fazendo $F(x) = u$, tem-se:

$$x = -(1/\lambda)\ln(1 - u) \quad (\text{A.2})$$

Os valores para a variável aleatória x podem ser produzidos através da geração de uma variável u , uniforme, e usando a Equação A.2 para determinar x . Como u é uniformemente distribuída entre 0 e 1, a expressão $(1 - u)$ também é distribuída uniformemente entre 0 e 1. Desta forma, o algoritmo de geração pode ser simplificado para:

$$x = -\frac{\ln(u)}{\lambda} \quad (\text{A.3})$$

A.1.2 Código Fonte

A Figura A.1 mostra o código fonte em Matlab para a geração de números aleatórios segundo a distribuição de Poisson. No código pode ser observado que a função *rand* implementa a geração de números aleatórios com distribuição uniforme enquanto a função *log* executa o logaritmo natural do resultado da função *rand*.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Simulação do tempo de chegada de pacotes - Fontes Poisson
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Número máximo de pacotes simulados
Max = 10000;
% Parâmetros para a distribuição inter-chegadas
lambda = 70; % taxa de chegada
Tmax = (1100 * (Max/1000))/lambda; % tempo limite [0,Tmax]

tempo_de_chegada(1) = -log(rand)/lambda;
i=1;

b1 = waitbar(0,'Simulando chegadas poissonianas');
while tempo_de_chegada(i) < Tmax,
    tempo_de_chegada(i+1) = tempo_de_chegada(i) + -log(rand)/lambda;
    i = i + 1;
    waitbar(tempo_de_chegada(i)/Tmax,b1);
end
close(b1);

```

Fig. A.1: Código Fonte da Chegada de Pacotes Segundo o Processo de Poisson

O tamanho dos pacotes com distribuição exponencial negativa é ilustrado pela Figura A.2. Neste

exemplo são gerados 20.000 pacotes com tamanho médio de 1.500 *bytes*.

```
tamanho_medio = 1500; % bytes
```

```
for i = 1:20000  
    tamanho(i) = round(-log(rand)/(1/tamanho_medio));  
end
```

Fig. A.2: Código Fonte Para a Geração de Pacotes com Comprimento Médio de 1.500 *bytes*

A.1.3 Gráficos

A Figura A.3 mostra a chegada de pacotes a ERB segundo a função distribuição de Poisson em função do tempo em segundos.

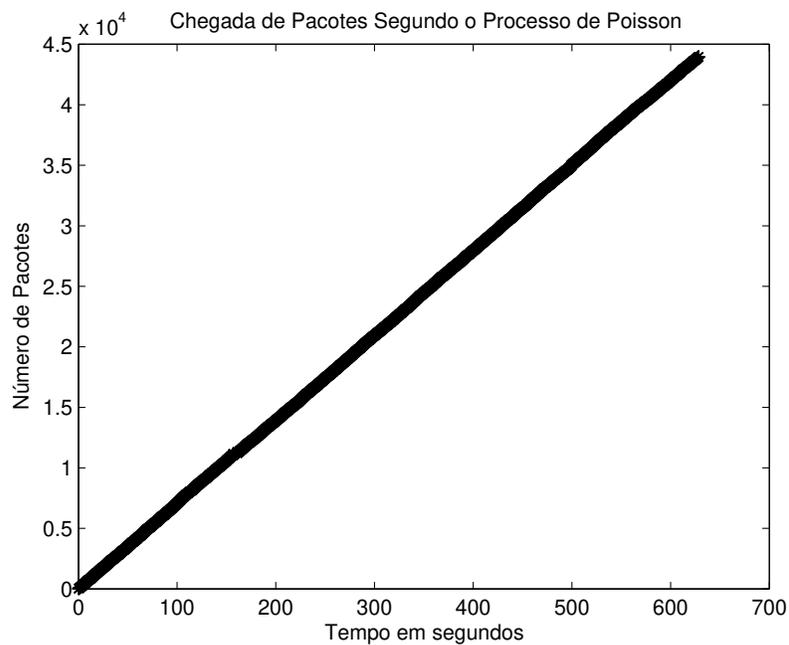


Fig. A.3: Chegada de Pacotes Segundo o Processo de Poisson

Na Figura A.4 é exibido o histograma do comprimento de pacotes segundo a distribuição de Poisson. O tracejado em vermelho na figura representa o comprimento médio dos pacotes com média de 1.500 *bytes*.

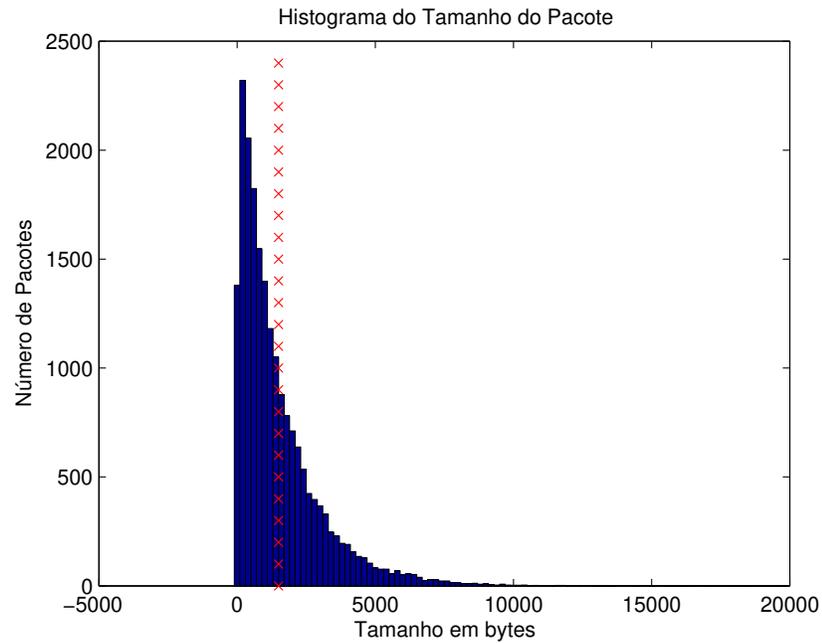


Fig. A.4: Histograma do Comprimento dos Pacotes Conforme a Distribuição de Poisson

A.2 Fontes de Tráfego HTTP

Nesta seção é mostrado o código fonte em Matlab das fontes HTTP utilizadas neste estudo. O código abaixo ilustra o algoritmo usado para a geração de tráfego HTTP interno ao sistema HSDPA. É importante ressaltar que este mesmo algoritmo foi utilizado para a geração das fontes HTTP de *handoff* horizontal e vertical cada qual com o seu próprio conjunto de variáveis.

A.2.1 Código Fonte

Programa Principal

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Simulação das fontes HTTP INTERNAS HSDPA (tempo de chegada e tamanho dos pacotes IP)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Número máximo de pacotes gerados para cada fonte HTTP
Max_Fontes = 10000;

% Número de fontes HTTP geradas
n_fontes_http_n_hsdpa = 1;

if n_fontes_http_n_hsdpa > 0

```

```

% Tamanho_hsdpa máximo de cada fonte HTTP
TMax_HTTP_n_hsdpa = Max_Fontes;
% Tempo de chegada do tráfego HTTP
tempo_de_chegada_http_n_hsdpa = zeros(n_fontes_http_n_hsdpa,TMax_HTTP_n_hsdpa);

for j = 1:n_fontes_http_n_hsdpa
    On = 1; % estado ativo

    Dpc = 0.033; % Tempo de Leitura

    MTU = 0; % 76% das vezes o tamanho_hsdpa máximo dos pacotes será 1500 bytes
        % e em 24% das vezes 576 bytes
    i = 1;

    while i < TMax_HTTP_n_hsdpa
        if On == 1

            sorteio = rand;
            if sorteio <= 0.76
                MTU = 1500;
                MTU_40 = 1460;
            else
                MTU = 576;
                MTU_40 = 536;
            end

            if sorteio <= 0.5
                HTP_Burst_n_hsdpa;
            else
                HTP_Persistent_n_hsdpa;
            end

            On = 0;
        else
            tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Dpc;
            On = 1;
            i = i + 1;
        end % fim if
    end % fim while
    fprintf('HSDPA - Fonte de Tráfego Interno HTTP %d .. OK\n',j);
end % fim for
end % if n_fontes_http_n_hsdpa

% Gráficos
a = 0:200:24000;
figure
hist(tamanho_http_n_hsdpa,a);
title('Histograma do Tamanho do Pacote IP');
xlabel('Tamanho em bits');
ylabel('Número de Pacotes');

y = length(tempo_de_chegada_http_n_hsdpa);
x = 1:y;
figure

```

```

plot(tempo_de_chegada_http_n_hsdpa,x,'k*');
title('Fonte de Tráfego HTTP');
ylabel('Número de Pacotes');
xlabel('Tempo em segundos');

```

HTTP/1.0-Modo *Burst*

```

% Simula uma fonte HTTP 1.0 Burst Mode
% Data: 26/05/07

Tp = 7.69; % Tempo Parsing
Tc = 20; % Tempo de propagação

% Parâmetros para distribuição de Pareto
k = 1.75; alfa = 1.1;

S = zeros; % Tamanho do objeto em bytes
m = zeros; % 1 para o objeto principal
           % b, 1<=b<=4 objeto composto de b objetos embutidos

W = zeros; % Tamanho do janela de congestionamento

N = zeros; % Número de pacotes para transmitir o objeto

C = zeros; % C pacotes para transmissão

PW = zeros; % Tamanho da janela TCP no fim da transmissão do objeto

Nd = zeros; % Número de objetos embutidos por página

n_objetos_compostos = zeros; % Número de objetos compostos

if On == 1

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %                                OBJETO PRINCIPAL                                %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    m = 1; % Seta m = 1 para o objeto principal

    % Tamanho do objeto principal segundo a distribuição lognormal com
    % média 10710 bytes
    S = round(lognrnd(8.35,1.37));
    % Enquanto o tamanho do arquivo for maior que 2 MB e menor que 100
    % bytes gere outro tamanho aleatório neste intervalo
    while (S > 2000000) | (S < 100)
        S = round(lognrnd(8.35,1.37));
    end

    % Envio de segmentos SYN+ACK e segmentos de controle
    tamanho_http_n_hsdpa(j,i + 1) = 640; % (40 bytes + 40 bytes)*m*8 = 640 bits

```



```

%                               OBJETOS COMPOSTOS                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% A transferência do 1º objeto composto inicia-se após Tc + Tp ms
% depois de terminada a transmissão do objeto composto
tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Tc + -log(rand)/Tp;
i = i + 1;

% Numero de objetos embutidos segundo a distribuição de pareto com média = 5.64
Nd = round(k*(1 - rand)^(-1/alfa)); % Número de objetos embutidos
% Enquanto o número de objetos embutidos for maior do que 53 gera-se outro número aleatório
while Nd > 53
    Nd = round(k*(1 - rand)^(-1/alfa));
end

resto_composto = 0;
n_objetos_compostos = 0;

if (Nd/4) <= 1
    b = Nd;
    n_objetos_compostos = 1;
else
    b = 4;
    n_objetos_compostos = fix(Nd/4);

    if ((Nd/4) - fix(Nd/4))*4 > 0
        % Número de objetos embutidos restantes para transmissão <= 3
        resto_composto = ((Nd/4) - fix(Nd/4))*4;
    end
end

while (n_objetos_compostos > 0)

    m = b;

    S = 0;
    for l = 1:b
        % Tamanho do objeto embutido segundo a distribuição lognormal com media 7758 bytes
        tamanho_objeto_embutido = round(lognrnd(6.17,2.36));
        % Enquanto o tamanho do objeto embutido for maior que 2 MB e menor que 50 bytes gere outro
        % tamanho aleatório
        while (tamanho_objeto_embutido > 2000000) | (tamanho_objeto_embutido < 50)
            tamanho_objeto_embutido = round(lognrnd(6.17,2.36));
        end

        S = S + tamanho_objeto_embutido;
    end

    % Envio de segmentos SYN+ACK e segmentos de controle
    tamanho_http_n_hsdpa(j,i + 1) = 80*m*8; % (40 bytes + 40 bytes)*m*8 = 640,1280,1920,2560 bits

    % Tempo de propagação
    tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Tc;
    i = i + 1;
end

```

```

W = m; % Seja W igual a m

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% INÍCIO MODELO TCP
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Calcula-se o número de pacotes para transmitir o objeto
N = round(S/MTU_40);

if N == 0
    N = 1;
end

C = min(N,W); % Enfileira C pacotes para a transmissão

% P = N - C;

% Todos os pacotes são colocados na fila para a transmissão numa
% só vez ao invés de por N ou W ou ainda 2 pacotes por vez.
P = N;

while P > 0
    tamanho_http_n_hsdpa(j,i + 1) = MTU * 8 * min(P,2); % MTU = 1500 * 8 * 1
    % = 12000 bits, 1500* 8 * 2 = 24000 bits
    % Tempo de propagação
    tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Tc;
    P = P - min(P,2);
    i = i + 1; % 2 segmentos de dados são gerados para cada
    % pacote ACK recebido pelo servidor (base de dados)
end

PW = N+W;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FIM MODELO TCP
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Envio do segmento FIN e do segmento ACK, fecha a conexão
tamanho_http_n_hsdpa(j,i + 1) = 80*m*8; % 80 bytes * m * 8 = 640,1280,1920,2560 bits

% Tempo de propagação
tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Tc;
i = i + 1;

n_objetos_compostos = n_objetos_compostos - 1;

if n_objetos_compostos == 0
    if resto_composto > 0
        n_objetos_compostos = 1;
        b = resto_composto;
        resto_composto = 0;
    end
end
end

```

```

end % fim while
end % fim if volta ao programa principal

```

HTTP/1.1-Modo Persistente

```

% Simula uma fonte HTTP 1.1 Persistent Mode
% Data: 26/05/07

Tp = 7.69; % Tempo Parsing
Tc = 20; % Tempo de propagação

% Parâmetros para distribuição de Pareto
k = 1.75; alfa = 1.1;

S = zeros; % Tamanho do objeto em bytes
m = zeros; % 1 para o objeto principal
           % b, 1<=b<=4 objeto composto de b objetos embutidos

W = zeros; % Tamanho do janela de congestionamento

N = zeros; % Número de pacotes para transmitir o objeto

C = zeros; % C pacotes para transmissão

PW = zeros; % Tamanho da janela TCP no fim da transmissão do objeto

Nd = zeros; % Número de objetos embutidos por página

n_objetos_embutidos = zeros; % Contador para o nº de objetos embutidos

if On == 1

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %                                OBJETO PRINCIPAL                                %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    m = 1; % Seta m = 1 para o objeto principal

    % Tamanho do objeto principal segundo a distribuição lognormal com
    % média 10710 bytes
    S = round(lognrnd(8.35,1.37));
    % Enquanto o tamanho do arquivo for maior que 2 MB e menor que 100
    % bytes gere outro tamanho aleatório neste intervalo
    while (S > 2000000) | (S < 100)
        S = round(lognrnd(8.35,1.37));
    end

    % Envio de segmentos SYN+ACK e segmentos de controle
    tamanho_http_n_hsdpa(j,i + 1) = 640; % (40 bytes + 40 bytes)*m*8 = 640 bits
    % tamanho_http_n_hsdpa(j,i + 1) para sincronizar com o tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1)

```

```

% Tempo de propagação
tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Tc;
i = i + 1;

W = m; % Seja W igual a m

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% INÍCIO MODELO TCP
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Calcula-se o número de pacotes para transmitir o objeto
N = round(S/MTU_40);

if N == 0
    N = 1;
end

C = min(N,W); % Enfileira C pacotes para a transmissão

% P = N - C;

% Todos os pacotes são colocados na fila para a transmissão numa
% só vez ao invés de por N ou W ou ainda 2 pacotes por vez.
P = N;

while P > 0
    tamanho_http_n_hsdpa(j,i + 1) = MTU * 8 * min(P,2); % MTU = 1500 * 8 * 1
    % = 12000 bits, 1500* 8 * 2 = 24000 bits
    % Tempo de propagação
    tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Tc;
    P = P - min(P,2);
    i = i + 1; % 2 segmentos de dados são gerados para cada
    % pacote ACK recebido pelo servidor (base de dados)
end

PW = N+W;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FIM MODELO TCP
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

m = PW;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% OBJETOS EMBUTIDOS
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Transmite 4 pacotes de 40 bytes
tamanho_http_n_hsdpa(j,i + 1) = 1280; % 4*40 bytes * 8 = 1280 bits

% A transferência do 1º objeto composto inicia-se após Tp ms
% depois de terminada a transmissão do objeto composto
tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Tp;

```

```

i = i + 1;

% Numero de objetos embutidos segundo a distribuição de pareto com média = 5.64
Nd = round(k*(1 - rand)^(-1/alfa)); % Número de objetos embutidos
% Enquanto o número de objetos embutidos for maior do que 53 gera-se outro número aleatório
while Nd > 53
    Nd = round(k*(1 - rand)^(-1/alfa));
end

if Nd > 0

    n_objetos_embutidos = 1;

    while (n_objetos_embutidos <= Nd)

        % Tamanho do objeto embutido segundo a distribuição lognormal com media 7758 bytes
        S = round(lognrnd(6.17,2.36));
        % Enquanto o tamanho do objeto embutido for maior que 2 MB e menor que 50 bytes gere outro
        % tamanho aleatório
        while (S > 2000000) | (S < 50)
            S = round(lognrnd(6.17,2.36));
        end

        % Tempo de propagação
        tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Tc;
        i = i + 1;

        W = m; % Seja W igual a m

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        % INÍCIO MODELO TCP
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

        % Calcula-se o número de pacotes para transmitir o objeto
        N = round(S/MTU_40);

        if N == 0
            N = 1;
        end

        C = min(N,W); % Enfileira C pacotes para a transmissão

        % P = N - C;

        % Todos os pacotes são colocados na fila para a transmissão numa
        % só vez ao invés de por N ou W ou ainda 2 pacotes por vez.
        P = N;

        while P > 0
            tamanho_http_n_hsdpa(j,i + 1) = MTU * 8 * min(P,2); % MTU = 1500 * 8 * 1
            % = 12000 bits, 1500* 8 * 2 = 24000 bits
            % Tempo de propagação
            tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Tc;
            P = P - min(P,2);
        end
    end
end

```

```

        i = i + 1; % 2 segmentos de dados são gerados para cada
        % pacote ACK recebido pelo servidor (base de dados)
    end

    PW = N+W;

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % FIM MODELO TCP
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    m = PW;
    n_objetos_embutidos = n_objetos_embutidos + 1;
    end % fim while
end % fim if

% Envio do segmento FIN e do segmento ACK, fecha a conexão
tamanho_http_n_hsdpa(j,i + 1) = 640; % 80 bytes * 8 = 640 bits

% Tempo de propagação
tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i + 1) = tempo_de_chegada_http_n_hsdpa(j,i) + -log(rand)/Tc;
i = i + 1;
end

```

A.2.2 Gráficos

Fonte de Tráfego HTTP

A Figura A.5 mostra a chegada de pacotes IP a ERB de acordo com o modelo de tráfego HTTP proposto em [10]. Esta figura representa apenas uma amostra da chegada de pacotes IP a ERB no tempo em segundos, pois, trata-se de um processo estocástico onde o instante de tempo em que ocorre a chegada de um pacote IP é representado por uma variável aleatória.

Na Figura A.6 é exibido o histograma do comprimento dos pacotes IP gerados por esta fonte. Nota-se que a maior quantidade pacotes IP são referentes aos tamanhos 12.000 bits e 24.000 bits, isto é, 1.500 *bytes* e 3.000 *bytes*. Os comprimentos de 24.000 bits e 9.216 bits são abstrações para representar o tamanho equivalente a dois pacotes IP (4.608 bits + 4.608 bits = 9.216 bits). Esta maior proporção de pacotes está em concordância com o modelo HTTP utilizado em que 76% das vezes o MTU é 1.500 *bytes* e 24% das vezes é 576 *bytes*. Além disso, os pacotes de comprimento zero representam os períodos em que o usuário está lendo a página HTTP, isto é, o período *OFF*. Os demais comprimentos de pacotes representam os pacotes de dados de 4.608 bits e 9.216 bits, os pacotes de sincronização e os pacotes de controle de sinalização.

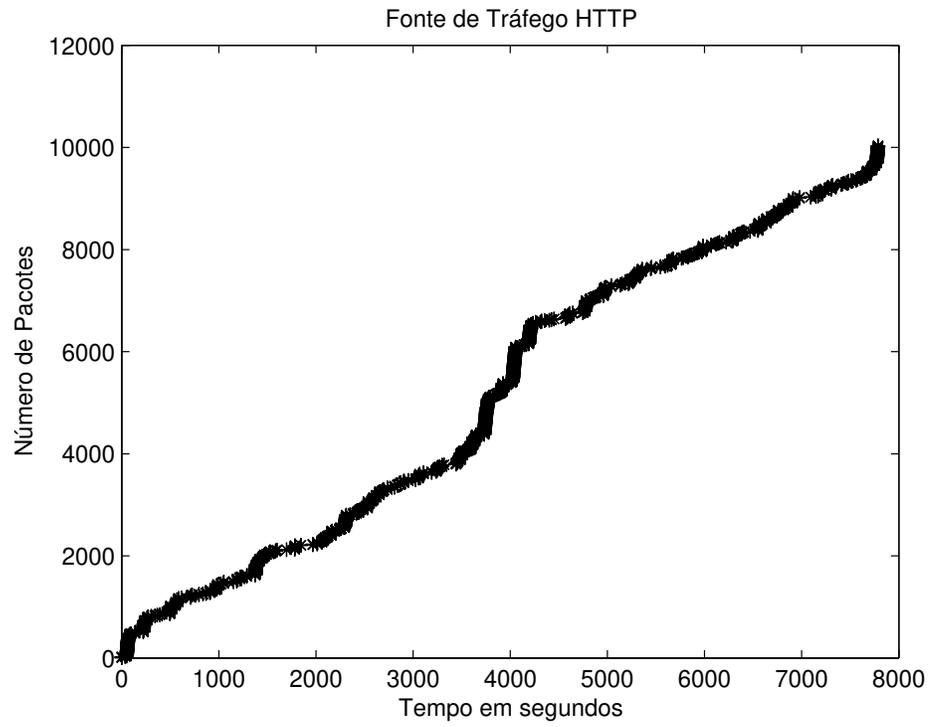


Fig. A.5: Tempo de Chegada de Pacotes IP das Fontes HTTP

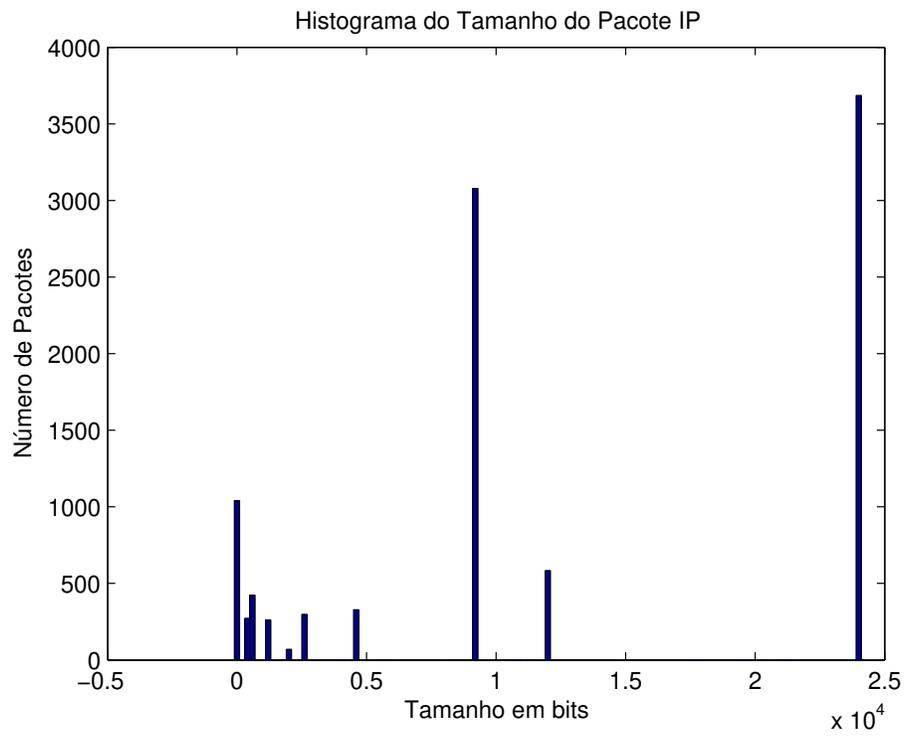


Fig. A.6: Histograma do Comprimento dos Pacotes IP das Fontes HTTP

Apêndice B

Fluxograma do Simulador de Eventos Discretos

Neste apêndice é apresentado o fluxograma do programa principal do simulador de eventos discretos utilizado neste trabalho.

B.1 Programa Principal

A Figura B.1 mostra o fluxograma do programa principal do simulador adotado neste trabalho.

No início do programa ocorre a inicialização das variáveis. A variável relógio representa o tempo simulado no programa sendo inicializada com zero. O número de pacotes na fila é representado pela variável fila e inicialmente é zerada. Por fim, a variável livre indica o estado do servidor em que no início do programa é inicializada com um mostrando que o servidor está pronto para atender o pacote.

O simulador desenvolvido neste trabalho caracteriza-se por ser um simulador de eventos discretos em que podem ocorrer dois tipos de eventos: chegada de pacote ou término de serviço do pacote. Este dois eventos estão representados no fluxograma pelas variáveis chegada_pacote e término_serviço. No início do programa o único evento possível de ocorrer é chegada do primeiro pacote ao sistema. Desta forma, a variável chegada_pacote recebe o tempo de chegada do primeiro pacote e como este é único evento possível término_serviço e chegada_pacote são igualados.

A cada iteração do programa verifica-se qual é o evento iminente e atualiza-se o relógio. Se o evento for de chegada de pacote é verificado se o servidor está livre. Estando livre, o servidor muda de estado e passa a estar ocupado e em seguida o pacote é atendido. Além disso, a variável chegada_pacote recebe o tempo de chegada do próximo pacote a chegar no sistema. Senão se o servidor estiver ocupado o pacote é armazenado na fila para atendimento posterior.

Caso o evento seja de término de serviço verifica-se a fila. Se a fila estiver vazia o servidor muda

de estado setando a variável livre em um e aguarda o próximo evento a ocorrer no sistema, como não há nenhum pacote sendo atendido no sistema o próximo evento será obrigatoriamente a chegada de um novo pacote. Senão caso exista algum pacote na fila decrementa-se o número de pacotes na fila e o atende-se este pacote.

A condição de saída do *loop* do programa principal se dá no momento em que o último pacote for processado.

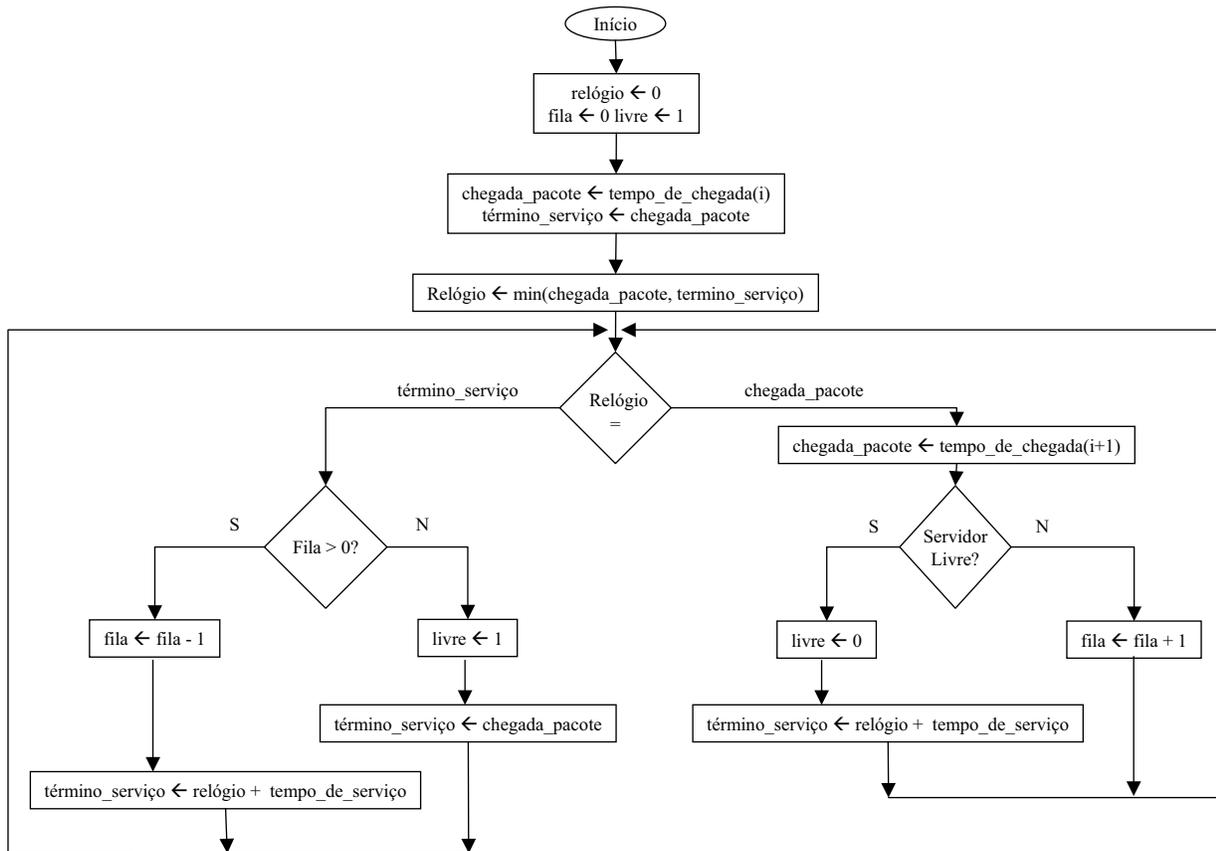


Fig. B.1: Fluxograma do Programa Principal do Simulador