

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

MODELAGEM MULTIFRACTAL APLICADA À
ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA DE
DADOS E AO CONTROLE DE FLUXOS DE TRÁFEGO
EM REDES

FLÁVIO GERALDO COELHO ROCHA

ORIENTADOR: PROF. DR. FLÁVIO HENRIQUE TELES VIEIRA

GOIÂNIA/GO – 2011

FLÁVIO GERALDO COELHO ROCHA

**MODELAGEM MULTIFRACTAL APLICADA À
ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA DE
DADOS E AO CONTROLE DE FLUXOS DE TRÁFEGO
EM REDES**

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de concentração: Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique Teles Vieira

GOIÂNIA/GO – 2011

FLÁVIO GERALDO COELHO ROCHA

**MODELAGEM MULTIFRACTAL APLICADA À
ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA DE
DADOS E AO CONTROLE DE FLUXOS DE TRÁFEGO
EM REDES**

Dissertação de mestrado defendida e aprovada em 29 de março de 2011, pela banca examinadora constituída pelos Professores Doutores:

Prof. Dr. Flávio Henrique Teles Vieira

Prof. Dr. Rodrigo Pinto Lemos

Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito

Prof. Dr. Paulo Henrique Portela de Carvalho

Aos meus pais, que sempre, mesmo perante todos os percalços, investiram na minha formação.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos

A Deus, por ter me proporcionado a oportunidade de chegar até aqui.

Aos meus pais, pelo carinho, apoio e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Flávio Henrique Teles Vieira, pelas sábias orientações e por não se ter limitado a ensinar apenas conhecimentos técnicos, mas também conhecimentos de vida.

Aos membros da banca pelas valiosas sugestões e comentários.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Nesta dissertação, a análise multifractal é utilizada no contexto de modelagem do tráfego de redes de comunicações, propondo algoritmos e técnicas para a melhoria do desempenho destas redes. Assim, com o propósito de descrever melhor o tráfego de redes, propõe-se um modelo multifractal baseado em cascata multiplicativa que utiliza processos autorregressivos para modelagem dos multiplicadores da cascata, o modelo é chamado de CMAM (Cascata Multifractal com Modelagem Autorregressiva para os Multiplicadores). Simulações utilizando o CMAM são conduzidas para avaliar o desempenho deste modelo em descrever séries reais de tráfego de vídeo, de redes com fio, e de redes sem fio. Adicionalmente, considerando a probabilidade de perda de dados como uma importante métrica de qualidade de serviço, uma expressão matemática para estimação de probabilidade de perda, que leva em consideração coeficientes *wavelets* associados ao processo de tráfego, é proposta. Os resultados da expressão proposta são analisados, dentre outras formas, por meio de simulações realizadas em um cenário de rede sem fio baseado no OFDM/TDMA. Em seguida, é apresentado um esquema de controle de admissão de fluxos baseado na expressão para estimação de probabilidade de perda proposta e aplicado ao cenário considerado. Simulações comprovam a eficiência do esquema proposto em comparação com outras abordagens presentes na literatura. Além disso, um esquema de alocação adaptativa de taxa de transmissão que considera as características multifractais do tráfego de redes é proposto, o qual é comparado com uma abordagem existente na literatura que considera as propriedades monofractais do tráfego. Por fim, utilizando o CMAM para modelagem multifractal do tráfego de vídeo, um algoritmo de controle de taxa de tráfego de vídeo na fonte é apresentado com base na modelagem exponencial da função de escala associada ao parâmetro de quantização Q do codificador de vídeo.

ABSTRACT

In this dissertation, the multifractal analysis is used in the context of traffic modeling of communications networks by proposing algorithms and techniques for improving the performance of these networks. Thus, in order to better describe traffic networks, a model based on multifractal multiplicative cascade that uses autoregressive processes for multipliers modeling is proposed, the model is called CMAM (Multifractal Cascade with Multipliers Autoregressive Modeling). Simulations are carried out to evaluate the model performance on describing real video traffic traces and wired and wireless real network traffic traces. In addition, considering data loss probability as an important quality of service measure, a mathematical expression for estimating loss probability that takes into account wavelet coefficients associated to the traffic process is proposed. The expression is evaluated, among other ways, through simulations in a wireless network scenario based on OFDM / TDMA technologies. Then, an admission control scheme for network flows which is based on the proposed loss probability estimation is presented and applied to the scenario considered. Simulations show efficiency of the proposed scheme in comparison to other approaches found in the literature. In addition, an adaptive transmission rate allocation scheme that considers the characteristics of multifractal network traffic is proposed, which one is compared to an approach that considers the monofractal traffic properties. Finally, using CMAM for video traffic modeling, a rate control algorithm for video traffic in the source is presented based on exponential modeling of the scale function associated with the quantization parameter Q of the video encoder.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS POR ORDEM DE APARECIMENTO	xviii
TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS PELO AUTOR	xxi
Capítulo 1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÕES	1
Capítulo 2. TECNOLOGIAS DE REDES SEM FIO E DE VÍDEO	5
2.1 REDES SEM FIO	5
2.1.1 Características de redes sem fio.....	6
2.1.2 Arquitetura de redes sem fio.....	11
2.1.2.1 OFDM (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>).....	12
2.1.2.2 A subcamada MAC (<i>Media Access Control</i>).....	13
2.1.3 O padrão IEEE 802.16.....	15
2.1.4 Arquitetura do padrão IEEE 802.16	18
2.2 TECNOLOGIAS DE VÍDEO DIGITAL	20
2.2.1 Conceitos relacionados ao vídeo digital	21
2.2.2 Séries de vídeo ‘ <i>single layer</i> ’	22
2.2.3 Reprodução de vídeo	24
2.2.4 O padrão MPEG-4	25
2.3 RESUMO DO CAPÍTULO	27
Capítulo 3. ANÁLISE MULTIFRACTAL DO TRÁFEGO DE REDES	28
3.1 ANÁLISE MULTIFRACTAL	28
3.2 SÉRIES DE TRÁFEGO CONSIDERADAS NESTE TRABALHO	32
3.3 FUNÇÃO DE ESCALA	37
3.4 DIAGRAMA MULTIESCALA	39
3.5 ESPECTRO MULTIFRACTAL.....	42
3.6 RESUMO DO CAPÍTULO	46
3.7 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO.....	46

Capítulo 4. MODELAGEM MULTIFRACTAL DO TRÁFEGO DE REDES	47
4.1 CASCATAS MULTIPLICATIVAS.....	49
4.2 ESTIMAÇÃO DA DENSIDADE DE PROBABILIDADE DOS MULTIPLICADORES DE UMA CASCATA.....	51
4.3 MODELOS MULTIFRACTAIS	53
4.4 CASCATA MULTIFRACTAL COM MODELAGEM AUTORREGRESSIVA PARA OS MULTIPLICADORES (CMAM).....	56
4.4.1 Processos autorregressivos	56
4.4.2 Estimação de parâmetros para modelos autorregressivos	59
4.4.3 Modelo CMAM.....	59
4.5 VALIDAÇÃO DO MODELO MULTIFRACTAL PROPOSTO	60
4.5.1 Estatísticas de séries de tráfego de redes sem fio e de tráfego de vídeo.....	61
4.5.2 A função de autocorrelação	66
4.5.3 Espectro multifractal.....	69
4.5.4 Testes de verificação do comportamento de fila	72
4.6 RESUMO DO CAPÍTULO	76
4.7 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO.....	77
Capítulo 5. ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA DE DADOS BASEADA EM MODELAGEM DE TRÁFEGO	78
5.1 PROBABILIDADE DE PERDA.....	79
5.2 MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA DE DADOS	80
5.3 ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA BASEADA EM MODELAGEM MULTIFRACTAL.....	82
5.4 REDE SEM FIO BASEADA EM OFDM/TDMA.....	86
5.5 AVALIAÇÃO DA ABORDAGEM DE ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA PROPOSTA.....	88
5.6 RESUMO DO CAPÍTULO	89
5.7 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO.....	90
Capítulo 6. CONTROLE DE ADMISSÃO DE FLUXOS DE TRÁFEGO DE REDES BASEADO EM ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA.....	91
6.1 MÉTODOS DE CONTROLE DE ADMISSÃO DE CONEXÕES.....	91
6.2 MECANISMO DE CONTROLE DE ADMISSÃO PROPOSTO.....	92

6.3	AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO CONTROLE DE ADMISSÃO EM UM SISTEMA OFDM/TDMA	93
6.4	RESUMO DO CAPÍTULO	96
6.5	ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO.....	96
Capítulo 7.	ALOCAÇÃO ADAPTATIVA DE TAXA DE TRANSMISSÃO BASEADA EM MODELAGEM MULTIFRACTAL	97
7.1	UM MÉTODO DE ALOCAÇÃO DINÂMICA DE RECURSOS BASEADO EM MODELAGEM MONOFRACTAL	98
7.2	ALOCAÇÃO ADAPTATIVA DE TAXA DE TRANSMISSÃO BASEADA EM ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA	100
7.2.1	Algoritmo de busca binária.....	100
7.2.2	Cálculo adaptativo de taxa de transmissão utilizando janelamento temporal ..	101
7.3	RESULTADOS OBTIDOS	103
7.4	RESUMO DO CAPÍTULO	116
7.5	ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO.....	117
Capítulo 8.	CONTROLE DA TAXA DE TRÁFEGO DE VÍDEO MPEG-4.....	118
8.1	MODELAGEM DA FUNÇÃO DE FATOR DE ESCALA	119
8.2	CONTROLE DE TAXA DA FONTE DE VÍDEO MPEG-4.....	122
8.3	RESUMO DO CAPÍTULO	127
8.4	ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO.....	127
Capítulo 9.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Camada física do padrão IEEE 802.11.	9
Figura 2.2. Configuração de uma WLAN 802.11 (Adaptado de [Garg 2007]).....	11
Figura 2.3. Exemplo de topologia de uma rede WiMAX (Adaptado de [Figueiredo 2007])...	17
Figura 2.4. Estrutura típica de um GoP do padrão MPEG [Seeling et al. 2004].....	23
Figura 2.5. Relação entre sequência de codec e sequência de reprodução (Adaptado de [Seeling et al. 2004]).	25
Figura 3.1. Exemplo de fractal – feto de uma folha de samambaia.	29
Figura 3.2. Amostras da série de tráfego de rede sem fio USCtrace02.....	32
Figura 3.3. Amostras da série de tráfego de rede dec-pkt-1 na escala de 40 ms.	33
Figura 3.4. Amostras da série de tráfego de rede 4-7-I-9 na escala de 100 ms.	33
Figura 3.5. Amostras (quadros) da série de tráfego de vídeo MPEG-4 lord3.	35
Figura 3.6. Amostras (GoPs) da série de tráfego de vídeo MPEG-4 lord3.	35
Figura 3.7. Histograma para a série de quadros de vídeo MPEG-4 lord3.....	36
Figura 3.8. Histograma para a série de tráfego dec-pkt-1 na escala de 40 ms.	36
Figura 3.9. Função de escala para uma série de tráfego monofractal (dec-pkt-2) [DEC 2000] e para duas séries de tráfego de redes sem fio, USCtrace01 e ISF_wifidog.	38
Figura 3.10. Função de escala para a série de tráfego dec-pkt-1.....	39
Figura 3.11. Função de escala para a série de tráfego lbl-pkt-5.	39
Figura 3.12. Diagrama multiescala (funções ζ_q e h_q) para a série de tráfego monofractal conhecida como dec-pkt-2 da DEC (<i>Digital Equipment Corporation</i>).....	41
Figura 3.13. Diagrama multiescala (funções ζ_q e h_q) para uma série de tráfego de redes sem fio do conjunto de séries de tráfego USC_06spring_trace, chamada USCtrace01.	41
Figura 3.14. Diagrama multiescala (funções ζ_q e h_q) para a série de tráfego dec-pkt-1.....	42
Figura 3.15. Diagrama multiescala (funções ζ_q e h_q) para a série de tráfego lbl-pkt-4.	42
Figura 3.16. Espectro de Legendre para a série multifractal dec-pkt-1 e para a série monofractal sintética fBm de mesmo parâmetro de <i>Hurst</i>	44
Figura 3.17. Espectro de Legendre para a série multifractal 4-7-I-9 e para a série monofractal sintética fBm de mesmo parâmetro de <i>Hurst</i>	45
Figura 3.18. Espectro multifractal – séries USCtrace01 e USCtrace02.	45

Figura 4.1. Processo de construção de uma cascata binomial [Vieira 2006].	50
Figura 4.2. Histogramas para os multiplicadores obtidos a partir da série de vídeo Lord3 no décimo estágio da cascata, ou seja, $j=10$.	52
Figura 4.3. Histogramas para os multiplicadores obtidos a partir da série de vídeo Lord3 no décimo quarto estágio da cascata, ou seja, $j=14$.	52
Figura 4.4. Cascata formada pelos coeficientes de escala $U_{j,k}$ [Crouse et al. 2000].	55
Figura 4.5. Processo de construção de uma cascata multiplicativa.	60
Figura 4.6. Função densidade de probabilidade (<i>pdf</i>) – S.LAMBS.	62
Figura 4.7. Função de autocorrelação – Série de GoPs – Lord3.	66
Figura 4.8. Função de autocorrelação – Série de Quadros – Lord3.	67
Figura 4.9. Função de autocorrelação – Série USCtrace01.	68
Figura 4.10. Função de autocorrelação – Série USCtrace02.	68
Figura 4.11. Espectro multifractal - Série de GoPs – Lord3.	69
Figura 4.12. Espectro multifractal - Série de Quadros – Lord3.	69
Figura 4.13. Espectro multifractal - Série de GoPs – Matrix1.	70
Figura 4.14. Espectro multifractal - Série de Quadros – Matrix1.	71
Figura 4.15. Espectro multifractal – Série USCtrace01.	71
Figura 4.16. Espectro multifractal – Série USCtrace02.	72
Figura 4.17. Probabilidade de perda - Série de GoPs – Lord3.	73
Figura 4.18. Probabilidade de perda - Série de Quadros – Lord3.	73
Figura 4.19. Probabilidade de perda - Série de GoPs – Matrix1.	74
Figura 4.20. Probabilidade de perda - Série de Quadros – Matrix1.	74
Figura 4.21. Probabilidade de perda – Série USCtrace01.	75
Figura 4.22. Probabilidade de perda – Série USCtrace02.	75
Figura 5.1. Probabilidade de perda de <i>bytes</i> em função do tamanho do <i>buffer</i> . Esquema proposto e outras abordagens. Série dec-pkt-1.	85
Figura 5.2. Probabilidade de perda de <i>bytes</i> em função do tamanho do <i>buffer</i> . Esquema proposto e outras abordagens. Série dec-pkt-2.	85
Figura 5.3. Probabilidade de perda de <i>bytes</i> em função do tamanho do <i>buffer</i> . Esquema proposto e outras abordagens. Série sintética fBm gerada a partir dos parâmetros estatísticos da série dec-pkt-2.	86
Figura 5.4. Cenário de rede sem fio baseado no OFDM/TDMA.	87

Figura 5.5. Comparação entre a probabilidade de perda média de <i>bytes</i> obtida com a expressão proposta e outros métodos, em função do tamanho do <i>buffer</i> , para a série USCtrace01 ($N=10$).	89
Figura 5.6. Comparação entre a probabilidade de perda média de <i>bytes</i> obtida com a expressão proposta e outros métodos, em função do tamanho do <i>buffer</i> , para a série USCtrace02 ($N=5$).	89
Figura 6.1. Probabilidade de perda média <i>versus</i> número de usuários do sistema OFDM/TDMA – USCtrace01 – $b=0,8 \times 10^4$ bytes.	94
Figura 6.2. Probabilidade de perda média <i>versus</i> número de usuários do sistema OFDM/TDMA – USCtrace02 – $b=2,0 \times 10^3$ bytes.	94
Figura 7.1. Esquema de alocação dinâmica de recursos (DRA – <i>Dynamic Resource Allocation</i>), adaptado de [Trinh e Miki 1999].	98
Figura 7.2. Comparação entre taxas de perda para a série dec-pkt-1, janela = 128 amostras.	107
Figura 7.3. Comparação entre esquemas adaptativos de alocação de taxa de transmissão para a série dec-pkt-1.	107
Figura 7.4. Comparativo entre taxas de perda para a série lbl-pkt-5, janela = 128 amostras.	110
Figura 7.5. Comparativo entre alocações adaptativas de taxa de transmissão para a série lbl-pkt-5.	111
Figura 7.6. Comparação entre taxas de perda para a série dec- pkt-2, janela = 64 amostras.	114
Figura 7.7. Comparação entre esquemas adaptativos de alocação de taxa de transmissão para a série dec-pkt-2.	114
Figura 8.1. Fator de escala <i>versus</i> parâmetro de quantização Q – série de vídeo S.LAMBS.	121
Figura 8.2. Modelagem exponencial dos fatores de escala	122
Figura 8.3. Esquema VBR com controle de taxa da fonte.	123
Figura 8.4. Ocupação média do <i>buffer</i> – S.LAMBS.	125
Figura 8.5. Probabilidade de perda – S.LAMBS.	126
Figura 8.6. Probabilidade de perda – SW4.	126
Figura 8.7. Utilização do enlace – S.LAMBS.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Características dos principais padrões de WLANs.....	6
Tabela 2.2. Comparativo entre padrões IEEE 802.16 (Adaptado de [Garg 2007]).....	16
Tabela 3.1. Estatísticas das séries de tráfego.....	34
Tabela 4.1. Média e variância – série de quadros – S.LAMBS.....	63
Tabela 4.2. Média e variância – série de GoPs – Lord3.....	63
Tabela 4.3. Média e variância – série de quadros – Lord3.....	64
Tabela 4.4. Média e variância- série de GoPs – Matrix1.	64
Tabela 4.5. Média e variância – série de quadros – Matrix1.....	64
Tabela 4.6. Média e variância – USCtrace01.	65
Tabela 4.7. Média e variância– USCtrace02.	65
Tabela 6.1. Número de usuários aceitos no sistema OFDM/TDMA em relação a ε (USCtrace01).	95
Tabela 6.2. Número de usuários aceitos no sistema OFDM/TDMA em relação a ε (USCtrace02).	95
Tabela 7.1. Estatísticas das séries de tráfego.....	105
Tabela 7.2. Configurações do sistema – capacidade do <i>buffer</i> e utilização ótima.	105
Tabela 7.3. Resultados de taxa de perda e AGF	106
Tabela 7.4. Estatísticas registradas de taxa de perda para a série dec-pkt-1.	108
Tabela 7.5. Estatísticas de utilização média do <i>buffer</i> - série dec-pkt-1.	109
Tabela 7.6. Estatísticas de utilização média do enlace para a série dec-pkt-1.	110
Tabela 7.7. Estatísticas de taxa de perda para a série lbl-pkt-5.....	112
Tabela 7.8. Estatísticas de utilização média do <i>buffer</i> para a série lbl-pkt-5.	112
Tabela 7.9. Estatísticas de utilização média do enlace para a série lbl-pkt-5.....	113
Tabela 7.10. Estatísticas registradas de taxa de perda para a série dec-pkt-2.	115
Tabela 7.11. Estatísticas de utilização média do <i>buffer</i> - série dec-pkt-2.	115
Tabela 7.12. Estatísticas de utilização média do enlace para a série dec-pkt-2.	116
Tabela 8.1. Média e variância - série de quadros – S.LAMBS.	121

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACF	<i>AutoCorrelation Function</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
AGF	<i>Average Goodness Factor</i>
AP	<i>Access Point</i>
AR	<i>Auto Regressive</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat reQuest</i>
ASP	<i>Advanced Simple Profile</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
AVC	<i>Advanced Video Coding</i>
AWMM	<i>Adaptive Wavelet based Multifractal Model</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CA	<i>Collision Avoidance</i>
CD	<i>Collision Detection</i>
CDTSQ	<i>Critical Dyadic Time-Scale Queue</i>
CIF	<i>Common Intermediate Format</i>
CMAM	<i>Cascata Multifractal com Modelagem Autorregressiva para os Multiplicadores</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
CTS	<i>Clear To Send</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
DNS	<i>Domain Name Service</i>
DOS	<i>Denial of Service</i>
DSSS	<i>Direct-Sequence Spread Spectrum</i>
DVD	<i>Digital Video Disc</i>
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i>
EAP	<i>Extensible Authentication Protocol</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FARIMA	<i>Fractal Auto Regressive Integrated Moving Average</i>
FD	<i>Full Duplex</i>

FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
fGn	<i>fractional Gaussian noise</i>
FHSS	<i>Frequency-Hopping Spread Spectrum</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GF	<i>Goodness Factor</i>
GoP	<i>Group of Pictures</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i>
HDLC	<i>High level Data Link Control</i>
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
i.i.d.	<i>independente e identicamente distribuídos</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
LRD	<i>Long Range Dependence</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MA	<i>Moving Average</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MPEG	<i>Motion Picture Experts Group</i>
MSE	<i>Mean Square Error</i>
MSQ	<i>MultiScale Queuing</i>
MWM	<i>Multifractal Wavelet Model</i>
NTSC	<i>National Television Standards Committee</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QCIF	<i>Quarter Common Intermediate Format</i>
QoS	<i>Quality over Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>

RF	<i>Rádio Frequência</i>
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
RTP	<i>Real-time Transport Protocol</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
TCP	<i>Transport Control Protocol</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TKIP	<i>Temporal Key Integrity Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
USC	<i>University of Southern California</i>
VBR	<i>Variable Bit Rate</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>
VVGM	<i>Variable Variance Gaussian Model</i>
WEP	<i>Wired Equivalent Privacy</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMAX	<i>Worldwide interoperability for Microwave access</i>
WLANs	<i>Wireless Local Area Networks</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WPA	<i>Wi-Fi Protected Access</i>
WWW	<i>World Wide Web</i>

LISTA DE SÍMBOLOS POR ORDEM DE APARECIMENTO

H	Parâmetro de <i>Hurst</i>
$X(t)$	Processo estocástico
$\tau(q)$	Função de escala
$c(q)$	Fator de momento
$Z^{(\Delta t)}$	Processo de incrementos no intervalo de tempo Δt
m	Nível de agregação do processo de incrementos
$S_j(q)$	Função de partição baseada em <i>wavelets</i>
$Y_{j,k}$	Volume de tráfego (total de <i>bytes</i>) observado na escala temporal j e no instante de tempo k .
$W_{j,k}$	Coeficientes <i>wavelet</i> de Haar na escala temporal j e no instante de tempo k .
q	ordem do momento
ζ_q	Expoente de escala para momentos de ordem q
α_q	Inclinação de $\log_2 S_j(q)$ em relação à escala j
h_q	Quociente entre o expoente de escala (ζ_q) para momento de ordem q e o q respectivo, igual ao parâmetro de <i>Hurst</i> para processos monofractais.
$C^\alpha(x_0)$	Conjunto de funções f que são α vezes diferenciáveis, com derivadas contínuas no ponto x_0
h	Expoente de Hölder pontual
$C(t)$	Sinal positivo, estacionário e com longa-dependência
$C^{(n)}[k]$	Discretização do sinal $C(t)$ na resolução 2^{-n}
$U_{j,k}$	Coeficiente de escala associado a <i>wavelet</i> de Haar
$A_{j,k}$	Multiplicadores de uma cascata no domínio <i>wavelet</i> na escala temporal j e no instante de tempo k
ε_t	Processo aleatório com média zero
X_t	Processo autorregressivo
$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$	Parâmetros de um processo autorregressivo de ordem p

$\gamma(k)$	Função de autocovariância para $k = 0, 1, 2, \dots$
$\rho(k)$	Coeficiente de correlação
b	Tamanho do <i>buffer</i>
Q	processo de tamanho da fila no <i>buffer</i> b ou parâmetro de quantização de vídeo
N_b	Número de <i>bytes</i> descartados que não podem ser armazenados no <i>buffer</i> de tamanho b
N_t	Número total de <i>bytes</i> a ser atendido por um servidor.
$P(Q > b)$	Estimativa de probabilidade de perda
$W(t)$	Processo de carga de trabalho (<i>Workload</i>) armazenado no <i>buffer</i> no intervalo de tempo $[0, t)$
$A(t)$	Quantidade total de trabalho acumulado que chega ao <i>buffer</i> no intervalo $[0, t)$
c	Capacidade do servidor
$Q(t)$	processo de tamanho da fila no <i>buffer</i> b no instante de tempo t
T	Intervalo de tempo total considerado
$P(T)$	Perda total computada para o intervalo de tempo total considerado.
β	Constante assintótica
η	Taxa de decaimento
K_r	Processo de chegada de tráfego agregado em múltiplas escalas de tempo r .
r^*	Escala de tempo r crítica
N	Número de usuários de um sistema
M	Número de canais de tráfego (subportadoras)
Δf	Largura de banda de uma portadora
$\gamma_{m,n}(t)$	SNR instantânea na janela de tempo t , onde m é a subportadora relativa ao usuário n
$c_{m,n}(t)$	Número máximo de bits por símbolo (por Hz) para a subportadora m relativa ao usuário n
$C_{m,n}(t)$	Taxa alocada para a subportadora m e usuário n
P_{ber}	Taxa de erro de bit
ε_t	Limite superior de probabilidade de perda desejada

μ	Média da taxa de trafego de entrada
$X_n^{(m)}$	Média em blocos do processo de tráfego, onde m é o tamanho do bloco e n o número do bloco
$\hat{X}_n^{(m)}$	Valor predito de $X_n^{(m)}$
C_n	Taxa alocada para o bloco n utilizando DRA
ΔC	Diferença entre o valor predito $\hat{X}_n^{(m)}$ e a taxa alocada
u	Utilização do enlace
r_t	Valor observado da taxa de tráfego
C_t	Capacidade do servidor no instante de tempo t .
GFj	Fator de adequação para a janela j
u_{opt}	Utilização ótima
Q_{ref}	Parâmetro de quantização de referência

TRABALHOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS PELO AUTOR

• TRABALHOS PUBLICADOS

1. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Modelagem de Tráfego de Vídeo MPEG-4 Utilizando Cascata Multifractal com Distribuição Autorregressiva dos Multiplicadores” In: International Information Telecommunication Symposium, Florianópolis, 2009.
2. Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Garcez, S. G. “Modelagem Preditiva Multifractal-Fuzzy Aplicada ao Controle Adaptativo de Taxa de Transmissão para Tráfego de Redes” In: International Information Telecommunication Symposium, Florianópolis, 2009.
3. Vieira, F. H. T., Ling, L. L., Rocha, F. G. C., Garcez, S. G. “Esquema de Alocação Adaptativa de Banda para Tráfego de Redes Utilizando uma Modelagem Multifractal-Fuzzy” In: XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT 2009), Blumenau, 2009.
4. Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Ling, Lee Luan, S. G. Garcez. “Predição de Tráfego de Redes Utilizando um Modelo Fuzzy com Funções de Base Ortonormais Baseadas em Propriedades Multifractais” In: IX Congresso Brasileiro de Redes Neurais / Inteligência Computacional (IX CBRN), Ouro Preto/MG, 2009.
5. Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Garcez, S. G., Santos, C. B. “A Fuzzy Model for Network Traffic Prediction Using Orthonormal Basis Functions Based on Multifractal Characteristics” In: LASCAS 2010 - IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems, Foz do Iguaçu, 2010.
6. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T., Santos Jr, J.A. “A Multifractal Based Approach for Loss Probability Estimation for OFDM/TDMA Based Systems” In: The 13th

International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Recife/PE/Brazil, 2010.

7. Santos Jr, J.A., Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C. “A Policing Algorithm for WiMAX Systems Considering Multifractal Traffic” In: The 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Recife/PE/Brazil, 2010.
8. Santos Jr, J. A., Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “A Traffic Policing Mechanism for WiMAX Systems Based on Multifractal Modeling” In: 7th International Telecommunication Symposium (ITS 2010), Manaus, 2010.
9. Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Lemos, R. P. “An Algorithm for Adaptive Prediction of Local Singularities of Network Traffic Flows” In: The 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Recife/PE/Brazil. 2010.
10. Santos Jr, J. A., Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Sousa, M. A. “Análise de desempenho de algoritmos de controle para tráfego multifractal de redes” In: XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2010), Bonito/MS, 2010.
11. Santos, C. B., Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T., Araújo, S. G. “Modelagem de Tráfego em redes PLC Utilizando Cadeias de Markov” In: XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves, 2010.
12. Santos, C. B., Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Marques, F. S., Araújo, S. G., Pereira, J. B. J. “Traffic Modeling and Analysis of PLC Networks using Markov Chains” In: LASCAS 2010 - IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems, Foz do Iguaçu, 2010.
13. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Abordagem para Alocação de Banda Baseada em Modelagem Multifractal para Tráfego de Redes sem Fio”. In: VII Seminário de Pós-Graduação da UFG, Goiânia, 2010.
14. Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C. “An Adaptive Fuzzy Model Using Orthonormal Basis Functions Based on Multifractal Characteristics Applied to Network Traffic Control”. Neurocomputing (Amsterdam). 2010. (Aceito).

- **TRABALHOS SUBMETIDOS**

15. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Modeling of MPEG-4 Video Traffic Using a Multifractal Cascade with Autoregressive Multipliers”. Revista IEEE América Latina. (Submetido em 22.07.2010).
16. Rocha, F. G. C., Santos, C. B., Vieira, F. H. T. “Modelagem de Tráfego de Redes PLC Utilizando Cadeias de Markov com Ajuste da Função de Autocovariância do Processo. Pesquisa Operacional (SOBRAPO). (Submetido em 23.07.2010).
17. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Loss Probability Estimation for OFDM/TDMA Based Wireless Systems Considering Multifractal Traffic Characteristics”. European Transactions on Telecommunications. (Submetido em 13.09.2010).
18. Rocha, F. G. C., Santos, C. B., Vieira, F. H. T. “Traffic Modeling in PLC Networks using a Markov Fluid Model with Autocorrelation Function Fitting”. TEMA – Tendências em Matemática Aplicada. (Submetido em 10.11.2010).
19. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Controle de Admissão de Fluxos de Tráfego Baseado em Estimação de Probabilidade de Perda Através de Modelagem Multifractal”. XXIX Brazillian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBrT 2011). (Submetido em 10.04.2010).
20. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Modelagem e Controle da Taxa de Vídeo MPEG-4 Utilizando Cascata Multifractal com Multiplicadores Autorregressivos”. XXIX Brazillian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBrT 2011). (Submetido em 10.04.2010).
21. Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Santos Jr, J.A. “Loss Probability Estimation and Control for OFDM/TDMA Wireless Systems Considering Multifractal Traffic Characteristics”. Computer Communications. (Submetido em 22.12.2010).
22. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Alocação Adaptativa de Taxa de Transmissão Baseada em Estimação de Probabilidade de Perda para Tráfego de Redes Considerando Características Multifractais”. Revista Controle & Automação/SBA (Sociedade Brasileira de Automática). (Submetido).

Capítulo 1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÕES

A melhoria no desempenho de redes de computadores é certamente um dos temas que merecem mais atenção da comunidade científica associada às redes de comunicações. Assim, o desempenho de redes é alvo de pesquisas constantes, e muitos são os trabalhos propondo modelos para descrição do tráfego de redes [Krishna et al. 2003], [Lee e Fapojuwo 2005], [Vieira e Ling 2008], [Rocha e Vieira 2009], mecanismos de predição [Aquino e Barria 2006], [Ouyang et al. 2006], [Vieira et al. 2010a], métodos de controle de tráfego [Liu e Hsu 2006], [Santos Jr. et al. 2010], [Vieira e Rocha 2011], algoritmos para estimação de parâmetros relacionados à Qualidade de Serviço (QoS – *Quality of Service*) [Riedi et al. 1999], [Tran e Ziegler 2005], [Rocha et al. 2010] e controle de admissão de fluxos [Choudhury et al. 1994], [Knightly e Shroff 1999], [Kvackaj e Baronak 2006], [Vieira e Ling 2010] além de outras propostas que visam melhorar o desempenho de redes utilizando diferentes tecnologias e cenários [Heymann et al. 1992], [Fei e Zhimei 2003], [Yeo e Agrawala 2004], [Santos et al. 2010], [Rocha et al. 2010].

Técnicas de análise que proporcionam melhor compreensão do comportamento do tráfego de redes são muito importantes na concepção e otimização de redes de comunicações [Frost e Melamed 1994]. Uma vez obtido um modelo para o tráfego, profissionais da área de redes podem prever o desempenho da rede por meio de técnicas analíticas ou por meio de simulação e assim proporem mecanismos mais eficientes para provisão de QoS e controle dos fluxos que trafegam pela rede. Assim, a análise, a modelagem e as técnicas de controle do tráfego de redes contribuem para a tomada de decisões adequadas relativas à concepção e gestão de redes [Aquino e Barria 2006].

A necessidade de uma análise mais precisa e de um desempenho mais eficiente para o tráfego de redes torna-se ainda mais evidente quando são considerados cenários de redes sem fio e/ou de redes com considerável percentual de tráfego multimídia. O tráfego de redes sem fio está sujeito aos problemas relacionados aos canais de comunicação sem fio e à mobilidade do usuário, e o tráfego multimídia está sujeito às demandas de QoS feitas pelos usuários e ao crescente número de aplicações voltadas para este tipo de tráfego. As características presentes nestes fluxos de tráfego, que podem ser observadas em redes atuais, como dependência de

longo prazo entre amostras e rajadas em múltiplas escalas tornam a modelagem e a predição de tráfego tarefas difíceis e desafiadoras [Crovella e Bestavros 1996], [Park e Willinger 2000]. Embora modelos Poissonianos consigam descrever com certa precisão o tráfego telefônico, estes modelos não conseguem descrever o comportamento das redes atuais, pois um processo de Poisson utilizado na teoria clássica de dimensionamento de redes telefônicas é estacionário, apresenta dependência de curto prazo e outras características presentes em processos Gaussianos, fazendo com que projetos de redes de computadores baseados em modelos Poissonianos possam apresentar desempenho inferior ao esperado [Paxson e Floyd 1995]. Outros modelos baseados em cadeias de Markov também se mostram inadequados, pois também apresentam características como dependência de curto prazo, e por isso não descrevem satisfatoriamente o tráfego atual de redes [Park e Willinger 2000], [Lee e Fapojuwo 2005], [Zou et al. 2008].

Dentre os modelos existentes, modelos autossimilares e multifractais têm recebido grande atenção devido aos seus desempenhos em termos de análise e modelagem relacionados ao tráfego real de redes. Modelos multifractais possuem dependência de longa duração como os modelos monofractais, mas, além disso, apresentam diferentes leis de escala. Em outras palavras, os modelos multifractais superam as limitações de modelos monofractais, no sentido de que conseguem capturar as características de pequena escala, como, por exemplo, a distribuição lognormal para o tráfego de redes [Feldmann et al. 1998], [Riedi et al. 1999], [Park e Willinger 2000]. Para estes modelos, o tratamento analítico, ou seja, a obtenção de expressões matemáticas, é geralmente mais difícil do que para os modelos Markovianos e impõe limitações ao estudo e ao projeto relacionados ao atendimento de requisitos de QoS, dentre as quais pode-se citar a probabilidade de perda de dados. Neste sentido, métodos de estimação de probabilidade de perda têm sido propostos, como aqueles baseados na teoria dos grandes desvios [Dembo e Zeitouni 1998], na teoria assintótica das muitas fontes [Choudhury et al. 1994] e baseado em processos com longa dependência [Duffield e O'Connell 1993].

A estimação da probabilidade de perda feita de forma eficiente pode servir como ferramenta muito útil a partir da qual é possível estimar e controlar outras características de um servidor de rede, como a ocupação do *buffer* e a alocação de taxas de transmissão. Neste cenário, quanto mais precisa for a estimação do comportamento estatístico dos fluxos que trafegam pela rede, mais apropriado será o serviço oferecido ao usuário. Por outro lado, se a abordagem utilizada não for capaz de representar bem ou oferecer mecanismos de controle para o tráfego real, o desempenho real da rede pode ser subestimado ou superestimado.

Os modelos multifractais são mais precisos e abrangentes quando aplicados ao controle do tráfego [Feldmann et al. 1998], [Yeo e Agrawala 2004], [Vieira e Ling 2008]. Desta forma, com uma caracterização do tráfego mais detalhada utilizando análise multifractal, espera-se obter melhores estimativas para, por exemplo, a modelagem do tráfego de redes e a estimação de probabilidade de perda de dados para fluxos de tráfego.

Neste contexto, o desempenho de redes controladas por mecanismos baseados em análise multifractal pode ser ainda melhorado utilizando-se esquemas com adaptação de parâmetros, que oferecerem desempenho superior aos dos esquemas estáticos. Uma vez que os esquemas adaptativos podem lidar com o congestionamento de redes no momento que ele ocorre, constituindo-se, portanto, um modo eficiente para provisão e manutenção da qualidade de serviço oferecida aos usuários, como por exemplo, a alocação adaptativa de taxas de transmissão e o controle de admissão de fluxos na rede.

Dado o desempenho e a importância da análise multifractal no contexto das redes de computadores, são apresentadas neste trabalho algumas contribuições que se traduzem em algoritmos e técnicas de análise e melhoria do desempenho de redes de comunicações utilizando esta análise. Portanto, neste trabalho, são apresentadas inovações como: um modelo multifractal baseado em cascata multiplicativa denominado CMAM (Cascata Multifractal com Modelagem Autorregressiva para os Multiplicadores), uma expressão matemática para estimação de probabilidade de perda de dados, um método de controle de admissão de fluxos baseado em estimação de probabilidade de perda, um esquema de alocação adaptativa de taxa de transmissão e um mecanismo de controle de tráfego de vídeo na fonte codificado com MPEG (*Motion Picture Experts Group*). Testes de análise de desempenho e comparações com outros métodos existentes na literatura comprovam a eficiência dos esquemas e algoritmos propostos neste trabalho.

A dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentados conceitos sobre redes sem fio e vídeo digital. No Capítulo 3 é introduzida a teoria relacionada à análise multifractal. Com o objetivo de verificar a existência de características multifractais em séries reais de tráfego de redes, são apresentados resultados em termos de função de escala, diagrama multiescala e espectro multifractal para diferentes séries de tráfego. O Capítulo 4 trata sobre modelagem multifractal, objetivando descrever melhor o comportamento do tráfego de redes. Neste capítulo, é proposto o modelo multifractal baseado em cascata multiplicativa chamado CMAM. Testes de desempenho são realizados em comparação a

outros modelos existentes na literatura, em termos de: estatísticas, função de autocorrelação, espectro multifractal e análise de comportamento de fila. O Capítulo 5 é dedicado à estimação de probabilidade de perda de dados, nele é proposta uma expressão para estimação de probabilidade de perda que é aplicada a um cenário de redes sem fio baseado no OFDM/TDMA. São também apresentados resultados de simulações em comparação com outras abordagens de estimação de probabilidade de perda existentes na literatura. Já no Capítulo 6, é apresentado um esquema de controle de admissão baseado na estimação de probabilidade de perda introduzida no Capítulo 5; comparações com outros esquemas são realizadas. O Capítulo 7 propõe um esquema de alocação adaptativa de taxa de transmissão com base em características multifractais em comparação a um esquema de alocação de recursos que leva em consideração características monofractais do tráfego de rede, onde simulações são utilizadas para comprovar a eficiência do esquema proposto. No Capítulo 8, é apresentado um algoritmo para controle do tráfego de vídeo na fonte chamado VBR com controle de taxa que se baseia na modelagem exponencial da função de escala associada ao parâmetro de quantização Q . Comparações com o esquema VBR convencional são realizadas e demonstram a eficiência do algoritmo proposto. Por fim, no Capítulo 9, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho realizado.

Capítulo 2. TECNOLOGIAS DE REDES SEM FIO E DE VÍDEO

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos sobre tecnologias de redes sem fio e sobre tecnologias de vídeo, uma vez que em capítulos seguintes serão abordados temas relacionados a modelagem, análise de desempenho e controle de redes baseadas nestas tecnologias.

Dentre os tópicos relacionados às tecnologias de redes sem fio discutidas neste capítulo, estão os padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16. O primeiro deles é o padrão de rede sem fio mais conhecido e utilizado, e o uso de redes baseadas neste padrão tem propiciado muitos benefícios para o homem moderno, como por exemplo, flexibilidade e mobilidade sem perder facilidade de comunicação. O segundo padrão (IEEE 802.16) refere-se a uma tecnologia ainda em fase de maturação, mas que poderá ser amplamente utilizada caso as expectativas em relação a altas taxas de transmissão, ganhos de cobertura e eficiência em modulação adaptativa sejam realmente alcançadas na prática.

Em relação às tecnologias de vídeo, pode-se dizer que a Internet de hoje não é a mesma sem o tráfego de vídeo. A maioria das aplicações presentes na rede mundial de computadores está voltada para as comunicações em tempo real, que incluem o vídeo. Mais do que a Internet de hoje, a Internet do futuro tenderá a ser constituída por tecnologias de vídeo que demandarão grandes larguras de banda e o atendimento a requisitos de qualidade de serviço (QoS) ainda mais rigorosos que os existentes atualmente.

O capítulo está organizado da seguinte forma: na seção 2.1, são apresentados conceitos relacionados às redes sem fio. Na seção 2.2, são discutidas tecnologias relacionadas ao vídeo digital. Por fim, na seção 2.3, são apresentadas as conclusões sobre o capítulo.

2.1 REDES SEM FIO

Há um grande aumento no mercado das redes de computadores atuais voltado para as comunicações sem fio, especialmente para as LANs (*Local Area Networks*) sem fio, ou seja,

as chamadas WLANs (*Wireless Local Area Networks*). As WLANs são sistemas de comunicações de dados que se apresentam muito flexíveis, por serem mais independentes de cabeamento que as LANs, e por isso podem ser utilizadas em aplicações onde a mobilidade é requerida. Mas este não é o único caso em que as redes sem fio são empregadas, em ambientes *indoor*, por exemplo, onde a mobilidade não é essencial, as WLANs podem substituir as redes com fio e proporcionar maior flexibilidade ao ambiente de trabalho, dispensando a presença de cabos incômodos e proporcionando facilidades em relação a mudanças físicas e estruturais que ocorrem nestes ambientes.

Uma característica interessante das redes sem fio está relacionada às faixas de frequências nas quais elas operam, onde salvo em casos específicos (geralmente relacionados a potências de transmissão elevadas), não são licenciadas. Outro ponto a ser ressaltado é a taxa de transmissão, algumas WLANs amplamente utilizadas operam com taxas de até 54 Mbps, e o padrão IEEE 802.11n opera com taxas ainda maiores. Estas características das redes sem fio fizeram com que elas tivessem um futuro promissor no mercado de telecomunicações [Garg 2007].

O comitê responsável pela padronização das WLANs é o IEEE 802.11 [ANSI/IEEE 1999], [O'Hara e Petrick 1999]. As WLANs incluem, principalmente, os padrões IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g e IEEE 802.11n.

2.1.1 Características de redes sem fio

As principais características destes padrões são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Características dos principais padrões de WLANs.

	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
Data de Aprovação	Julho de 1999	Julho de 1999	Junho de 2003	Agosto de 2006
Taxa Máxima	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	600 Mbps
Modulação	OFDM	HR-DSSS	OFDM	OFDM
Banda	5 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz ou 5 GHz
Largura do Canal	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz ou 40 MHz

As WLANs podem ser vistas como sistemas de comunicações de dados implementados como uma extensão ou como uma alternativa às LANs com fio. As WLANs utilizam o ar livre para transmissão e recepção de dados, minimizando a necessidade de conexões com fio. Desta forma as WLANs combinam conectividade com mobilidade [Pahlavan 2002].

Nos últimos anos diversos fabricantes têm implementado WLANs para o processo e controle de aplicações empresariais. A presença de WLANs em setores como saúde e educação tem experimentado um rápido crescimento [Abichar et al. 2006]. Sabe-se que WLANs oferecem alta velocidade, comunicações confiáveis de dados em edifícios ou também em ambientes *outdoors*, bem como cobertura em áreas rurais. Além disso, WLANs são simples de instalar e uma vez instaladas podem facilmente ser modificadas, o que aumenta a praticidade de se utilizar estas redes nestes ambientes.

Nas redes sem fio, a conexão entre o provedor de acesso e o usuário é estabelecida utilizando um meio sem fio que pode ser por rádiofrequência ou também por infravermelho. Isto permite que o usuário remoto possa continuar conectado mesmo quando estiver em movimento. A conexão sem fio é estabelecida a partir do usuário final, utilizando um equipamento compatível, como um computador (geralmente um *notebook*) equipado com uma placa de rede sem fio, ou um computador ou dispositivo móvel que tenha uma interface de RF (RádioFrequência) integrada.

A conexão do servidor de acesso da rede cabeada até o usuário final da rede sem fio é feita através de um ponto de acesso (AP – *Access Point*) que pode suportar o acesso de múltiplos usuários simultaneamente. Um AP pode ser posicionado em qualquer nó da rede cabeada e atua como um *gateway* para os dados transmitidos/recebidos pelos usuários da rede sem fio que são roteados das WLANs para dentro da rede com fio.

O alcance das redes sem fio depende do ambiente onde o sistema é implementado. O alcance pode variar de 30 metros em ambientes *indoor* até dezenas de vezes este valor para ambientes com linha de visada, onde não há obstrução para o sinal de RF. Além disso, assim como os sistemas celulares, as redes sem fio possuem recursos de comutação de um AP para outro, permitindo que um usuário utilizando um dado AP possa mover-se para um AP vizinho sem perder a conectividade. Desta forma as WLANs podem servir como uma extensão ao serviço da rede cabeada, proporcionando uma cobertura ainda maior ao serem utilizados múltiplos APs [Garg 2007].

Por outro lado, outra grande vantagem das redes sem fio é o fato de elas poderem operar independentemente da existência de redes com fio. Elas podem ser usadas como redes autônomas em qualquer lugar para conectar vários computadores sem ter que construir ou ampliar redes cabeadas. Nas redes sem fio, as comunicações ocorrem em uma faixa do espectro de RF que é livre de licenciamento. Na banda de 2,4 a 2,5 GHz, por exemplo, os usuários podem utilizar equipamentos livremente, desde que os mesmos tenham sido aprovados para operação nesta faixa de frequência. Esta faixa de frequência foi designada como livre de licenciamento pelo ITU (*International Telecommunication Union*), e está disponível como faixa de frequência livre de licenciamento na maioria dos países do mundo. Portanto, algumas das muitas vantagens do desenvolvimento/uso de redes sem fio são destacadas:

- **Flexibilidade:** dentro da área de cobertura, uma determinada estação pode se comunicar de qualquer lugar, sem nenhuma restrição. Além disso, as comunicações sem fio permitem que a rede alcance lugares onde os fios não poderiam chegar.
- **Facilidade:** a instalação pode ser rápida, evitando a passagem de cabos através de paredes, canaletas e forros, portanto há o uso mais eficiente do espaço físico.
- **Redução de custo:** apesar do investimento inicial geralmente ser superior ao das redes cabeadas, particularmente em ambientes dinâmicos onde as modificações são frequentes, os custos por usuário e por dispositivo instalado são menores que aqueles das redes cabeadas.
- **Topologias:** algumas topologias estão disponíveis para atender a aplicações específicas. As configurações e alterações de topologia são facilmente realizadas, existe facilidade de expansão e a manutenção é reduzida.
- **Outras vantagens como:** melhor utilização dos investimentos em tecnologias existentes como *laptops*, rede de dados e voz, aplicativos e agilidade nas respostas aos clientes podem ser destacados.

No entanto, existem alguns pontos importantes que devem ser considerados no desenvolvimento/implementação de redes sem fio:

- **Qualidade de Serviço (QoS):** o nível de qualidade de serviço provido ainda é menor do que a das redes cabeadas. Tendo como principais razões para isso a pequena banda

passante devido às limitações de RF e às eventuais taxas de erro devido à interferência.

- Investimento inicial: o preço dos equipamentos de redes sem fio é mais alto do que os equivalentes em redes cabeadas, portanto o investimento inicial é maior.
- Segurança: intrinsecamente, os canais sem fio são mais suscetíveis a interceptadores não desejados. O uso de ondas de rádio na transmissão de dados também pode interferir em outros equipamentos de alta tecnologia, como por exemplo, equipamentos utilizados em hospitais. Além disso, equipamentos elétricos são capazes de interferir na transmissão de dados feita por equipamentos sem fio acarretando perdas de dados e erros na transmissão.
- Transferência de dados: embora a taxa de transmissão teórica das redes sem fio seja alta e esteja crescendo rapidamente, na prática ela ainda é baixa se comparada com as redes cabeadas.

As primeiras versões de WLANs, conhecidas como WLANs de baixa velocidade, são capazes de operar com velocidades entre 1 e 2 Mbps. Os padrões de WLANs de alta velocidade, como o IEEE 802.11b, por exemplo, opera com velocidade de até 11 Mbps. O IEEE estabeleceu o padrão 802.11b para redes sem fio de forma que os produtos WLANs sejam interoperáveis entre produtos de diferentes fabricantes. Além disso, ele é projetado para que quaisquer aplicações LAN, sistemas operacionais de redes, ou protocolos, incluindo a suíte de protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) operem no padrão IEEE 802.11b, da mesma forma que operariam em uma rede Ethernet [Haykin 2005].

A Figura 2.1 apresenta as divisões dos padrões das WLANs em padrões de baixa e alta velocidades.

IEEE 802.11 Infravermelho	IEEE 802.11 FHSS 2,4 GHz	IEEE 802.11 DSSS 2,4 GHz	IEEE 802.11a OFDM	IEEE 802.11b HR-DSSS	IEEE 802.11g OFDM	IEEE 802.11n OFDM
(Baixa Velocidade)			(Alta Velocidade)			

Figura 2.1. Camada física do padrão IEEE 802.11.

Além das principais características dos padrões WLANs apresentados na Tabela 2.1 e na Figura 2.1, é apresentada, logo em seguida, uma visão geral das propriedades de cada padrão e tecnologia de transmissão utilizada [Garg 2007]:

- Infravermelho: destaca-se por não exigir regulação por parte do governo, por possuir imunidade a ondas eletromagnéticas e por não sofrer interferências de rádio frequências. É uma tecnologia de curto alcance. Quando utilizada em ambientes fechados (*indoor*), a transmissão pode ser limitada por objetos sólidos. A iluminação também afeta a qualidade do sinal.
- FHSS (*Frequency-Hopping Spread Spectrum*): utiliza portadoras de banda estreita que mudam de frequência seguindo um padrão que só é conhecido pelo transmissor e pelo receptor, evitando assim interceptação de dados e proporcionando maior imunidade aos efeitos do desvanecimento seletivo.
- DSSS (*Direct Sequency Spread Spectrum*): técnica de espalhamento espectral que gera um padrão diferente para cada bit a ser transmitido, este padrão é chamado de código de espalhamento. Quanto maior o tamanho do código maior a probabilidade da informação ser recuperada no receptor sem erros. Por outro lado, quanto maior o tamanho do código utilizado, maior a largura de banda necessária.
- 802.11a - 1999: atinge taxa de transmissão de até 54 Mbps; utiliza a faixa de frequência de 5 GHz e, na camada física, trabalha com a tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Esse padrão utiliza 12 canais de frequência sem sobreposição. As vantagens desse padrão são a maior imunidade à interferência, a maior quantidade de canais não sobrepostos e a alta taxa de transmissão que pode ser obtida.
- 802.11b - 1999: estende o padrão 802.11 original e aumenta as taxas de comunicação para até 11 Mbps. Atua na faixa de frequência de 2,4 GHz e utiliza na camada física o DSSS (*Direct Sequency Spread Spectrum*). Os equipamentos que operam nesse padrão podem transmitir a 1, 2, 5,5 e 11 Mbps. Quanto mais longe do AP ou quanto menor a amplitude do sinal de radiofrequência detectado, menor será a velocidade de transmissão utilizada pelos clientes sem fio.

- 802.11g - esse padrão possui similaridades com os padrões "a" e "b", transmite em velocidade (taxa de transmissão) de até 54 Mbps, trabalha na camada física com OFDM e atua na faixa de frequência de 2,4 GHz. É o padrão mais difundido.
- 802.11n - Opera nas faixas de frequência de 2,4 e 5 GHz. Sua velocidade de transmissão pode chegar até 600 Mbps. Utiliza técnica de transmissão MIMO (*Multiple-Input, Multiple-Output*), ou seja, capta sinais diretos e sinais refletidos, aumentando a probabilidade de recuperação dos dados transmitidos.

2.1.2 Arquitetura de redes sem fio

A arquitetura WLAN 802.11 foi desenvolvida para que grande parte da tomada de decisões desta rede seja realizada na estação móvel [Haykin 2005].

A arquitetura do padrão é flexível, podendo suportar diferentes tamanhos de redes. Além disso, esta arquitetura oferece meios de economia de energia e prolongamento da vida das baterias que podem ser considerados bastante significativos.

A arquitetura WLAN 802.11 se baseia principalmente na utilização de APs para interligação da rede sem fio com a rede com fio. Nesta arquitetura são definidos o DS (*Distribution System*), o BSS (*Basic Service Set*), o AP (*Access Point*) e o ESS (*Extended Service Set*) [O'Hara e Petrick 1999], como pode ser observado por meio da Figura 2.2.

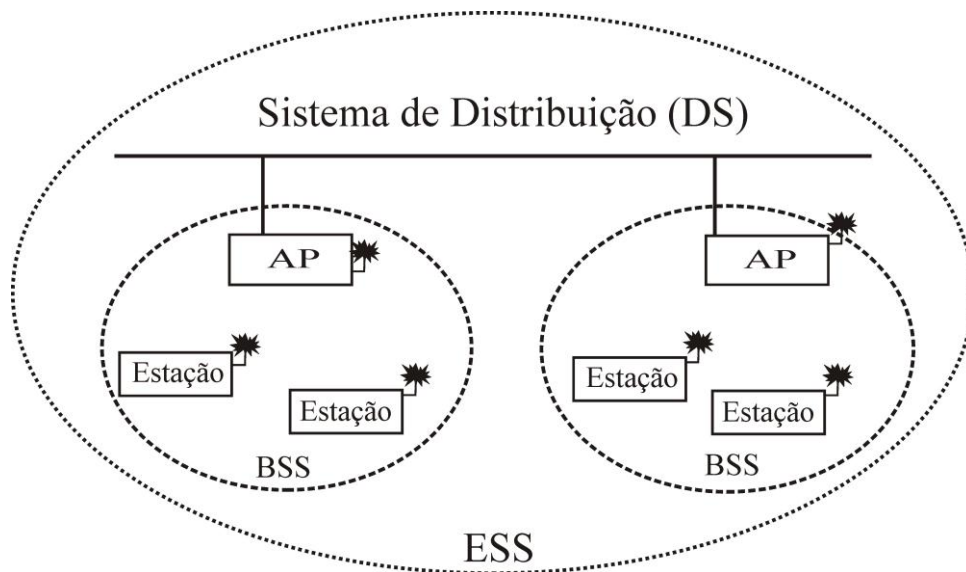


Figura 2.2. Configuração de uma WLAN 802.11 (Adaptado de [Garg 2007]).

Além desta configuração de arquitetura, como dito anteriormente, pode-se configurar uma rede para operar com uma topologia *Ad-Hoc*, onde não são utilizados APs. A topologia *Ad-Hoc* é aquela em que há comunicação entre os clientes, sem a presença de um AP e assim sem a conexão com uma rede cabeada.

2.1.2.1 OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

Ao contrário do que ocorre na FDM (*Frequency Division Multiplexing*), onde as subportadoras são separadas umas das outras por bandas de guarda, na OFDM há uma sobreposição espectral de subportadoras [Haykin 2005]. Os primeiros estudos com OFDM foram apresentados em [Chang e Gibby 1968], e sua primeira aplicação como tecnologia voltada para redes móveis foi apresentada em [Cimini 1985]. Deste então, a OFDM tem sido considerada para diversas aplicações como: radiodifusão, transmissão do sinal telefônico em linhas digitais e, especialmente, em redes sem fio. A OFDM trabalha no domínio da frequência e por este motivo ganhos adicionais em relação às tecnologias de multiplexação no domínio do tempo são alcançados, ao serem utilizadas técnicas de melhoria do sinal como códigos de entrelaçamento e códigos corretores de erro [Pinto e Albuquerque 2002].

Sabe-se que em um sistema básico de transmissão, utilizado convencionalmente, os símbolos são transmitidos em sequência por meio de uma portadora única, cujo espectro ocupa toda a faixa de frequência disponível. Já nos sistemas de transmissão que utilizam OFDM a transmissão é paralela, utilizando diversas subportadoras moduladas com técnicas como QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) e QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Cada uma destas subportadoras possui taxa de transmissão mais baixa que o convencional, e esta taxa diminui ainda mais à medida que um maior número de suportadoras é alocado por unidade de tempo. Assim, com a redução na taxa de transmissão, ou seja, aumento da duração dos símbolos transmitidos por portadora, a interferência intersimbólica causada por multipercursos perde o efeito de degradação sobre o sinal OFDM, aumentando, portanto, o desempenho do sistema que utiliza desta tecnologia.

Em outras palavras, o princípio básico do OFDM consiste em dividir um sinal binário de alta velocidade que será transmitido em certo número de subportadoras de menor taxa. Cada fluxo de dados de menor taxa de bits é utilizado para modular uma subportadora de cada um dos canais da banda considerada. A interferência intersimbólica geralmente não é uma grande preocupação para as portadoras de menor velocidade, porém, estas portadoras podem estar sujeitas ao desvanecimento rápido (*fast fading*). Portanto, *interleaving* e codificação

convolucional são usados para melhorar o desempenho em termos de BER (*Bit Error Rate*) [Haykin 2005].

Apesar de haver sobreposição espectral entre as subportadoras, no receptor a informação carregada por cada uma das subportadoras só poderá ser distinguida das demais utilizando um dispositivo conhecido como correlator, como por exemplo, um filtro casado configurado adequadamente [Pinto e Albuquerque 2002]. Assim, supondo que haja sincronização adequada de relógio, o sinal obtido no receptor será uma representação consideravelmente fiel do sinal de informação que se desejava transmitir, já que em relação a cada subportadora, as subportadoras vizinhas terão efeito nulo, ou seja, na modulação OFDM as subportadoras ficam dispostas de forma ortogonal entre si.

Como pode ser observado por meio da Figura 2.1, que apresenta a camada física do padrão IEEE 802.11, a principal técnica de modulação utilizada pelos padrões de redes sem fio de alta velocidade é o OFDM. No padrão 802.11a, por exemplo, o fluxo é dividido em 48 subportadoras de dados e 4 subportadoras piloto formando um total de 52 subportadoras.

A utilização do OFDM em WLANs, como nos padrões 802.11a e 802.11g, fornece a possibilidade de transmissão de dados a taxas que chegam a 54 Mbps. Assim, um padrão de WLAN que utiliza OFDM pode constituir uma forma viável de transmissão eficiente de tráfego multimídia [Czylwik 1996].

2.1.2.2 A subcamada MAC (*Media Access Control*)

Em relação à camada de enlace do padrão IEEE 802.11, assim como em outros padrões 802, ela consiste em duas subcamadas, a subcamada de controle de enlace lógico (LLC – *Logical Link Control*) e a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC – *Media Access Control*). Em linhas gerais, o controle de enlace lógico tem o objetivo de fornecer a interface necessária para interconexão entre redes sem fio e redes com fio. A subcamada MAC é uma subcamada de grande importância para as WLANs. A subcamada MAC do padrão IEEE 802.11 é similar à subcamada MAC do Ethernet (IEEE 802.3), pois se baseia em oferecer acesso, feito por muitos usuários, a um meio compartilhado. No entanto, o CSMA(*Carrier Sense Multiple Access*)/CD(*Collision Detecion*) utilizado no 802.3 não pode ser utilizado nas WLANs, pois para detectar uma colisão, um rádio precisa ser FD (*Full Duplex*), o que, geralmente, não é o caso em WLANs, onde o custo dos rádios é um fator importante.

Assim, ao contrário do 802.3, que utiliza o CSMA/CD, o 802.11 geralmente utiliza uma variante deste protocolo chamada de CSMA/CA (*Collision Avoidance*). O CSMA/CA tenta evitar colisões antes que elas ocorram. No CSMA, o transmissor escuta o canal antes de qualquer transmissão. Este método é eficiente, mas falha quando dois transmissores identificam um canal livre ao mesmo tempo, transmitindo quadros ao mesmo tempo e, portanto, ocorrendo colisões. Este problema poderia ser resolvido com o CD (*Collision Detection*), mas ele não está presente em WLANs. O CA (*Collision Avoidance*) é um mecanismo que se baseia no envio de um quadro ACK (*Acknowledgement*) por parte do receptor para indicar que ele acabara de receber um quadro intacto, na utilização de intervalos de tempo fixos denominados SIFS (*Short InterFrame Spacing*), PIFS (*PCF (Point Coordination Function) InterFrame Spacing*), DIFS (*DCF (Distributed Coordination Function) InterFrame Spacing*) e EIFS (*Extended InterFrame Spacing*) que o transmissor deverá aguardar para realizar uma transmissão e no emprego do algoritmo de recuo binário exponencial para temporizar as transmissões. Maiores informações sobre o CSMA/CA podem ser encontradas em [Tanembaum 2003].

O recuo binário consiste em um algoritmo normalmente usado para resolver problemas de disputa entre diferentes estações que desejam transmitir dados ao mesmo tempo. Quando uma estação vai para o estado de *backoff* (recuo), ela espera um número aleatório de *slots* de tempo, conhecido como janela de contenção, para então transmitir. No entanto, quando esta janela é pequena e muitas estações tentam transmitir dados ao mesmo tempo, é possível que algumas delas tenham o mesmo intervalo de tempo de *backoff*. Por outro lado, se esta janela de contenção for muito grande haverá grande retardo. Este problema é resolvido utilizando um algoritmo de recuo binário exponencial, onde o tamanho da janela de contenção, ou seja, o número de *slots* de tempo que um transmissor deverá aguardar cresce exponencialmente, a cada tentativa de transmissão mal sucedida, até certo limite pré-fixado, geralmente de 1023 *slots* de tempo.

Estas e outras características da camada física e da camada de enlace (especialmente da subcamada MAC) do padrão IEEE 802.11 que fazem dele um padrão eficiente e comparável a outros padrões de rede cabeada, mesmo tendo como meio de transmissão o meio sem fio, mais suscetível a interferências e atenuações.

2.1.3 O padrão IEEE 802.16

Até aqui as WLANs foram destacadas dentre as tecnologias de redes sem fio existentes, no entanto, nesta subseção é descrito brevemente o padrão IEEE 802.16.

O IEEE 802.16 é o comitê responsável pelos padrões WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*). O padrão IEEE 802.16 oferece desempenho comparável àquele presente em redes que utilizam cabo ou DSL (*Digital Subscriber Line*) como meios de transmissão. São muitas as vantagens oferecidas em relação ao DSL, por exemplo: provisão mais rápida de serviços, baixo custo de instalação e facilidade de vencer obstáculos físicos enfrentados pela rede cabeada [Abichar et al. 2006].

O padrão IEEE 802.16 constitui-se em uma avançada tecnologia desenvolvida para alcançar alta velocidade de acesso à Internet com um baixo custo. O termo WiMAX (*Worldwide Interoperability for MicroAccess*) foi criado por um consórcio (grupo de empresas) conhecido como *WiMAX Forum*, cujo o objetivo é promover compatibilidade e interoperabilidade entre equipamentos baseados no padrão IEEE 802.16. Alguns dos pontos positivos obtidos ao se utilizar o WiMAX estão destacados abaixo [Garg 2007]:

- Diminuir custos de infra-estrutura de banda larga para conexão com o usuário final, ou seja, custos de última milha (*last-mile*)
- Ter uma aceitação grande por usuários, seguindo a tecnologia *Wi-Fi* (IEEE 802.11) e diminuindo ainda mais os custos da tecnologia;
- Possibilitar, segundo a especificação, altas taxas de transmissão de dados;
- Em sua versão com suporte a mobilidade (WiMAX móvel), possibilitar a criação de uma rede de cobertura de conexão à Internet similar à de cobertura celular, permitindo acesso à Internet mesmo em movimento;
- Prover amplo suporte de desenvolvimento e aprimoramento desta tecnologia por parte da indústria.

Por outro lado, existem algumas observações a serem feitas em relação às expectativas criadas em torno do WiMAX.

- Em alguns testes realizados, o WiMAX não conseguiu suprir as expectativas criadas em relação a altas taxas de transmissão [Garg 2007];
- Apesar das muitas iniciativas e pesquisas, essa tecnologia ainda tem um período de maturação a ser atingido;
- Pode, em alguns países, haver sobreposição de utilização de frequência com algum serviço já existente;
- Em alguns países a tecnologia já foi inviabilizada devido a uma política específica para proteção do investimento de capital (CAPEX), já realizado com licenças da tecnologia de telefonia móvel UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*).
- Nas faixas de frequência mais altas existem limitações de taxas de transmissão, em virtude de atenuações ocasionadas pela chuva, que resultam em diminuição de taxas de transferências e também de raios de cobertura.

A Tabela 2.2 apresenta um comparativo entre os padrões IEEE 802.16, apresentando a data de aprovação e alguns recursos disponíveis.

Tabela 2.2. Comparativo entre padrões IEEE 802.16 (Adaptado de [Garg 2007]).

Padrão	Data de Aprovação	Recursos
802.16	2001	Sistema de acesso sem fio de banda larga fixa Camada MAC e camada física projetadas para operar com linha de visada entre 10-66 GHz
802.16a	Janeiro de 2003	Emenda realizada no padrão 802.16, modificações realizadas na camada MAC e camada física para operar entre 2-11 GHz sem linha de visada. Utilização do OFDMA, ARQ e suporte a topologia em malha.
802.16d	Julho de 2004	Combinação entre 802.16 e 802.16a, algumas modificações na camada física e MAC
802.16e	Dezembro de 2005	Emenda realizada no padrão 802.16d, modificações na camada MAC para proporcionar mobilidade.

Dentre estes padrões, destacam-se dois padrões principais de rede WiMAX:

- O IEEE 802.16-2004, conhecido como 802.16d, é o padrão de acesso sem fio de banda larga fixa (também conhecido como WiMAX fixo) e teve os primeiros equipamentos (*Aperto Networks, Redline Communications, Wavesat e Sequans*) homologados em Janeiro de 2006 pelo laboratório espanhol Cetecom.
- O IEEE 802.16-2005, conhecido como 802.16e (ratificado em Dezembro de 2005) é o padrão de acesso sem fio de banda larga móvel - WiMAX Móvel (proporcionando conectividade para estações em velocidades de até 100 km/h).

Além destes padrões, pode-se citar uma nova tecnologia de banda larga sem fio, chamada 802.16m, conhecida também como WiMAX para 4G (quarta geração de telefonia celular). Esta versão m do padrão WiMAX promete taxas de até 100 Mbps para aplicações móveis e 1Gbps para aplicações fixos. Além disso, em comparação ao padrão 802.16e, o padrão 802.16m poderá suportar comunicações com usuários móveis desempenhando velocidades de até 350 km/h, o que pode ser caracterizado como uma mobilidade plena. Espera-se que o padrão 802.16m apresente estes avanços em relação aos padrões anteriores sem perder a interoperabilidade com os padrões antecessores e outras redes existentes, como o *Wi-Fi*, 3G e DSL [Paula 2009].

Um exemplo simplificado de uma topologia típica de uma rede WiMAX está ilustrada na Figura 2.3:

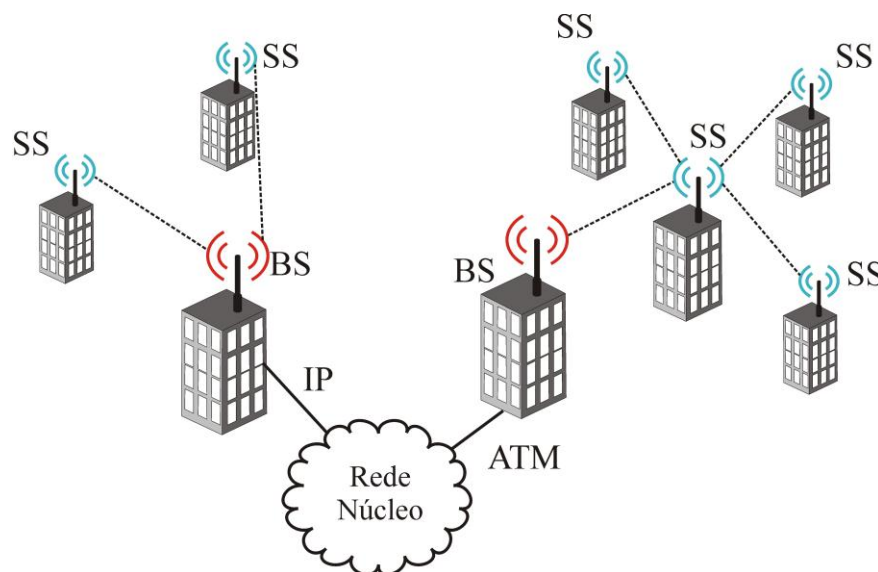


Figura 2.3. Exemplo de topologia de uma rede WiMAX (Adaptado de [Figueiredo 2007]).

Na topologia de rede especificada pelo IEEE 802.16a (ilustrada na Figura 2.3), são definidos os elementos estação base (BS - *Base Station*) e estação do assinante (SS - *Subscriber Station*). A BS realiza a interface entre rede sem fio e uma rede núcleo (*Core Network*), suportando diversas interfaces como IP, ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), Ethernet e E1/T1. A SS permite ao usuário acessar a rede por intermédio do estabelecimento de enlaces com a BS, em uma topologia ponto-multiponto. Como alternativa à topologia ponto-multiponto, tem-se a topologia em malha, na qual uma SS pode se conectar a uma ou mais SS intermediárias, até atingir a BS, como ilustrado na Figura 2.3. Nesse caso, trata-se de uma rede de muitos saltos (*hops*) e por isso denominada *multihop*, que apresenta uma estratégia para expandir a área de cobertura total da rede sem a necessidade de um aumento no número de estações base, o que representa uma eficiência no processo de implantação, já que as estações dos assinantes possuem custos bem inferiores ao das estações base, gerando economias significativas [Figueiredo 2007].

2.1.4 Arquitetura do padrão IEEE 802.16

A camada física do padrão 802.16 suporta TDD (*Time Division Duplexing*) e FDD (*Frequency Division Duplexing*) em modo *full* e *half duplex*. No entanto, a primeira versão do WiMAX móvel suporta apenas o modo TDD [Figueiredo 2007]. Outros recursos avançados da camada física incluem modulação e codificação adaptativas (AMC – *Adaptive Modulation and Coding*) e solicitação de repetição automática híbrida (HARQ – *Hybrid Automatic Repeat reQuest*) com o objetivo de melhorar a cobertura e a capacidade do canal de comunicação, especialmente em aplicações móveis do WiMAX.

Na faixa de frequência entre 10-66 GHz, o 802.16 define uma interface aérea chamada Wireless MAN – SC (*Single Carrier*). Na faixa de frequência entre 2-11 GHz a transmissão do sinal é dificultada por interferências. Assim, o padrão oferece esquemas adaptativos em termos de modulação e codificação. Desta forma o padrão 802.16 é conhecido por possuir recursos que possibilitam uma negociação entre robustez e capacidade. Na faixa de frequência entre 2-11GHz (incluindo as faixas de frequências licenciadas e não-licenciadas) é possível definir três interfaces aéreas [Figueiredo 2007]:

- Wireless MAN – SCa: utiliza modulação com portadora única.

- Wireless MAN – OFDM: utiliza 256 portadoras OFDM. Esta interface aérea provê acesso múltiplo a diferentes estações por meio de TDMA (*Time Division Multiple Access*).
- Wireless MAN – OFDMA: utiliza um esquema com 2048 portadoras OFDM. A interface provê múltiplo acesso alocando um subconjunto de portadoras a um receptor específico.

Na versão móvel do WiMAX as modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM são obrigatórias no sentido enlace direto (*downlink*). No enlace reverso (*uplink*), o 64-QAM é opcional. São suportados ainda códigos convolucionais e códigos turbo de taxa variável. O escalonamento realizado pelas estações base (BS - *Base Station*) determina a taxa apropriada a ser alocada para cada situação baseando-se em características como tamanho do *buffer*, condições de propagação do canal e etc. Um indicador de qualidade do canal (CQI – *Channel Quality Indicator*) é utilizado para fornecer informações sobre o estado dos canais de comunicações entre o usuário final e o escalonador existente na estação base [Abichar 2006], [Figueiredo 2007].

O WiMAX fornece um mecanismo de sinalização que opera de forma assíncrona. Este mecanismo permite que um atraso variável exista entre retransmissões, o que proporciona maior flexibilidade ao escalonador de taxas ao custo de um *overhead* adicional, ou seja, ao custo de mais bits de sinalização adicionados aos pacotes. Mecanismos como o HARQ e o AMC fornecem enlaces robustos em ambientes móveis extremos como em um veículo a uma velocidade acima de 120 km/h.

A subcamada MAC do padrão IEEE 802.16 possui diferenças significativas em relação à subcamada MAC do padrão *Wi-Fi* IEEE 802.11b. No *Wi-Fi* mecanismos de contenção de acesso são utilizados, conforme visto anteriormente. Ao buscarem o acesso de APs, usuários competem pelo meio físico e acabam por ter o serviço negado por um tempo aleatório, de forma que a capacidade do sistema é degradada pela utilização destes mecanismos de contenção. Assim, serviços como VoIP (*Voice over IP*) ou IPTV que dependem de um alto nível de QoS tornam-se difíceis de serem mantidos para uma grande quantidade de usuários.

A subcamada MAC do padrão IEEE 802.16 é projetada para servir estações distribuídas de forma esparsa pela área de cobertura com altas taxas. As estações assinantes não precisam umas das outras enquanto transmitem, como feito pelas WLANs, pois isto seria muito difícil

de se conseguir em um ambiente WiMAX. No padrão 802.16, o usuário precisa competir com os demais apenas no primeiro instante, quando o acesso é estabelecido, quando o usuário deseja entrar na rede. Daí em diante um *slot* de tempo é alocado para este usuário pela estação base. Este algoritmo de escalonamento é estável sob condições de carga pesada e não entra em colapso quando uma quantidade de usuários maior que àquela que o sistema pode suportar tenta acessar o sistema [Garg 2007]. Enfim, este algoritmo de escalonamento possibilita a estação base controlar de forma eficiente a qualidade de serviço oferecida ao balancear as requisições com as necessidades por largura de banda feitas pelos assinantes.

A técnica de duplexação no padrão WiMAX, onde uma estação pode transmitir e receber dados de forma concorrente, está disponível nos modos TDD e FDD. No TDD, a estação transmite e recebe no mesmo canal, mas não ao mesmo tempo, o que diminui os custos dos rádios dos assinantes (por serem mais simples). Já no FDD a estação transmite e recebe ao mesmo tempo, mas em canais diferentes.

O protocolo da subcamada MAC do IEEE 802.16 é orientado a conexão e utiliza adaptação do enlace e funções ARQ (*Automatic Repeat reQuest*) a fim de manter a taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*) objetivo enquanto maximiza a vazão (*throughput*) de dados. Esta camada suporta diferentes tecnologias como o IPv4, IPv6, Ethernet e ATM, tornando o WiMAX flexível e mais independente de tecnologias específicas.

2.2 TECNOLOGIAS DE VÍDEO DIGITAL

Com o crescimento da popularidade de aplicações multimídia em redes de computadores, espera-se que dados de vídeo constituam grande parte do tráfego de vídeo na Internet do futuro, nas mais recentes e nas próximas gerações de redes sem fio [Zainaldin 2008].

Para o transporte através de redes de computadores, dados de vídeo são geralmente comprimidos a fim de reduzir a quantidade de largura de banda necessária para a transmissão. No entanto, mesmo os dados de vídeo após passarem por um processo de compressão requerem uma largura de banda considerável para que sejam transmitidos eficientemente através das redes de comunicações.

Adicionalmente, destaca-se que o tráfego de vídeo apresenta uma alta variabilidade de taxas de bits (é o chamado tráfego VBR - *Variable Bit Rate*), assim como propriedades de longa

dependência (LRD – *Long Range Dependence*). Estes fatores, em conjunto com as atuais exigências de qualidade de serviço para o tráfego de vídeo, fazem do transporte de vídeo por redes de comunicações um grande desafio. Como uma resposta a este desafio, nos últimos anos, a comunidade científica tem apresentado resultados interessantes em termos de representação das características dos fluxos de vídeo, modelagem, e mecanismos inovadores para o controle do tráfego de vídeo através das redes de computadores [Heyman et al. 1992], [Cruz et al.1998], [Fei e Zhimei 2003], [Wang e Qiu 2005], [Zainaldin 2008], [Zou et al. 2008], [Rocha e Vieira 2009]. De fato, as redes atuais oferecem taxas de bits variáveis para a transmissão de fluxos de vídeo que acarretam problemas na rede como o descarte de pacotes e o congestionamento, especialmente quando os fluxos de vídeo são transportados por meio de redes sem fio. É certo que as redes do futuro transportarão vídeos com diferentes padrões de qualidade, com diferentes resoluções e em diferentes condições de SNR (*Signal Noise Rate*). Assim quaisquer desenvolvimentos que proporcionem uma melhor descrição do tráfego de vídeo são muito importantes. Muitos desenvolvimentos na área de compressão de vídeo têm sido realizados. Como importantes padrões de compressão de vídeo pode-se citar: H.263, H.263+, MPEG-2, MPEG-4, divx, RealVideo e WindowsMedia.

Tipicamente, os estudos na área de tráfego de vídeo por redes de telecomunicações são feitos por meio da análise de séries de vídeo (*video traces*). Séries de tamanho de quadros de vídeo (a forma mais simples de séries de vídeo) fornecem o tamanho de cada quadro de vídeo codificado e são chamados de séries de camada única (*single layer*). Séries de quadros de vídeo que utilizam MPEG-1 têm sido utilizados no estudo do tráfego de vídeo desde 1990 [Feng 1996]. Atualmente existem várias séries de quadros (*single layer*) de tráfego de vídeo MPEG-4 disponíveis na Internet [Reisslein et al. 2003]. O padrão de codificação MPEG-4 é um dos mais difundidos e utilizados atualmente, estando presente em empresas, em instituições de ensino, de pesquisa e principalmente na Internet. O MPEG-4 possui um alto índice de aceitabilidade entre os principais aplicativos multimídia. Estes fatores indicam que o MPEG-4 e outros padrões derivados dele terão um importante papel no tráfego de vídeo da Internet do futuro.

2.2.1 Conceitos relacionados ao vídeo digital

O vídeo digital é constituído de quadros de vídeo (imagens de vídeo) que são apresentados a uma taxa pré-estabelecida, por exemplo, uma taxa de quadros de vídeo de 30 quadros/segundo é utilizada no padrão NTSC (*National Television Standards Committee*). O inverso da taxa de

quadros fornece o tempo de visualização de um quadro na tela e é geralmente chamado de período de quadro. Cada quadro de vídeo consiste em elementares componentes de imagem (geralmente chamados de pixels ou pels). O formato do quadro especifica seu tamanho em pixels. O formato conhecido como ITU-R/CCIR-601 (o formato padrão para televisão) possui 720x480 pixels (ou seja, 720 pixels na horizontal e 480 pixels na vertical), enquanto o formato intermediário comum (CIF – *Common Intermediate Format*) possui 352x288 pixels, e o chamado um quarto de formato intermediário comum (QCIF – *Quarter Common Intermediate Format*) possui 176x144 pixels. Os formatos CIF e QCIF são muito utilizados em estudos de tráfego de vídeo em redes de computadores. Cada pixel é representado por três componentes: pelo componente de luminância (Y), e por dois componentes de cromaticidade, a matiz (U) e a intensidade (V). Esta representação também pode ser feita utilizando o sistema RGB (*Red, Green, Blue*) que pode ser convertido a partir do sistema YUV e vice-versa, o que é típico em estudos de codificadores de vídeo [Seeling et al. 2004].

Uma vez que o sistema visual humano é menos sensível a cor do que a luminância, os componentes de cromaticidade são sub-amostrados de forma que para cada conjunto de quatro amostras de Y haverá apenas uma amostra de U e uma amostra de V. Assim, para um quadro no formato 352x288 pixels, haverá 352x288 amostras de Y, 176x144 amostras de U e 176x144 amostras de V. Cada amostra é tipicamente quantizada utilizando 8 bits, resultando em um quadro de tamanho igual a 152064 bytes para um quadro de vídeo no formato CIF sem compressão, e conseqüentemente em uma taxa correspondente de 36,5 Mbps, tornando inviável a transmissão de vídeo sem compressão. Neste contexto os padrões de compressão de vídeo foram criados, dentre eles está o MPEG. Este padrão de compressão lança mão de técnicas de supressão de redundâncias existentes entre quadros sucessivos de vídeo para obter taxas menores e assim viabilizar o tráfego de vídeo por redes de comunicações. O MPEG será abordado na subseção 2.2.4.

2.2.2 Séries de vídeo ‘single layer’

Nesta seção são apresentados os principais conceitos sobre codificação e compressão de vídeo de camada única (*single layer*), especificamente para os padrões MPEG e H.26x, uma vez que a maioria dos codecs de vídeo, incluindo *RealVideo* e *WindowsMedia*, é derivada destes padrões. Os dois principais conceitos na codificação de vídeo MPEG e H.26x são: a codificação intra-quadros (*intra-frames*), utilizando DCT (*Discrete Cosine Transform*), e a

codificação entre quadros (*inter-frames*) que utiliza técnicas de estimação e compensação entre quadros sucessivos de vídeo.

Na codificação intra-quadros (intra-codificação) cada quadro de vídeo é dividido em blocos de 8x8 amostras do tipo Y, U e V. Cada bloco é transformado utilizando DCT em um bloco de 8x8 coeficientes, que representam os componentes de frequência espacial do bloco original. Estes coeficientes da transformada são então quantizados por uma matriz de quantização 8x8 que contém um passo de quantização diferente para cada coeficiente. O tamanho dos passos de quantização na matriz de quantização é obtido multiplicando uma matriz base por uma escala de quantização (parâmetro de quantização). A escala de quantização é tipicamente utilizada para controlar a codificação de vídeo e um alto parâmetro de quantização resulta em uma quantização mais grosseira, proporcionando um quadro de vídeo menor (com menos bits), e consequentemente um quadro de vídeo com menor qualidade é obtido [Seeling et al. 2004].

O padrão MPEG introduziu três tipos diferentes de quadros, os intra-quadros (I), os entre-quadros (P), e os quadros com codificação bidirecional (B) que também são classificados como entre-quadros. Quadros similares a estes existem no padrão de codificação H.26x. Estes diferentes tipos de quadros são organizados em grupos chamados de GoPs (*Group of Pictures*). Mais especificamente, a sequência de quadros que inicia em um quadro do tipo I até o último quadro antes do quadro do tipo I seguinte é chamada de um GoP. O padrão com que os quadros do tipo I, P e B estão dispostos dentro de um GoP é chamado de estrutura de GoPs ou padrão de GoPs. Uma estrutura típica de um GoP com três quadros do tipo P e dois quadros do tipo B antes e depois de cada quadro do tipo P está representado na Figura 2.4.

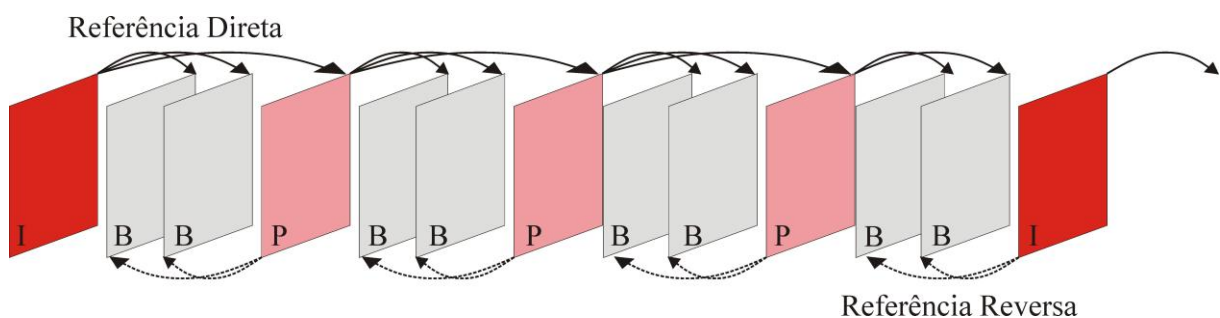


Figura 2.4. Estrutura típica de um GoP do padrão MPEG [Seeling et al. 2004].

Os diferentes tipos de quadros são codificados da seguinte maneira. Em um quadro do tipo I todos os blocos são intra-codificados conforme explicado anteriormente. Em um quadro do tipo P um macrobloco (um macrobloco consiste em quatro blocos de 8x8 amostras) são inter-codificados tendo como referência um quadro do tipo I ou P anterior, isto é, um quadro precedente do tipo I ou P serve de referência direta para síntese de um novo quadro P, conforme ilustrado pelas setas de linha cheias da Figura 2.4. Em um quadro do tipo B, os macroblocos são inter-codificados tendo como referência um quadro do tipo I ou P anterior, que servem de referência direta e por um quadro do tipo I ou P posterior que servem de referência reversa para síntese do quadro B, conforme ilustrado pelas setas de linhas tracejadas da Figura 2.4.

2.2.3 Reprodução de vídeo

As diferentes formas de codificação dos quadros de vídeo têm implicações importantes na reprodução do vídeo que chega ao receptor. Lembre-se que um quadro do tipo P é codificado tendo como referência um quadro do tipo I ou P anterior e que um quadro do tipo B é codificado com referência a um quadro do tipo I ou P anterior e um quadro do tipo I ou P posterior. Assim, a sequência de quadros ilustrada na Figura 2.4 não representa a sequência com que os quadros são gerados no codificador, visto que os quadros do tipo B necessitam de uma referência posterior para serem sintetizados. A sequência apresentada na Figura 2.4 é uma sequência de reprodução de vídeo e por isso é chamada de sequência de reprodução. A sequência de quadros gerados pelo codificador é chamada de sequência de codec.

Para melhor entendimento, considere o seguinte padrão de GoP IBBPBBPBBPBBIBBP..., com três quadros do tipo P entre quadros sucessivos do tipo I e dois quadros do tipo B entre quadros do tipo I e P; P e I; e P e P. Para o padrão especificado o decodificador necessitará de ambos, o quadro precedente I (ou P) e o quadro posterior P (ou I), para decodificar um quadro do tipo B. Assim, o codificar emite a sequência de quadros na seguinte ordem IPBBPBBPBBIBBP..., conhecida como sequência de codec. No entanto, esta sequência de codec, ao chegar ao receptor, será convertida em sequência de reprodução, a fim de ser exibida na tela.

A relação entre a sequência de codec e a sequência de reprodução em função do tempo de recepção e exibição do vídeo está ilustrada na Figura 2.5.

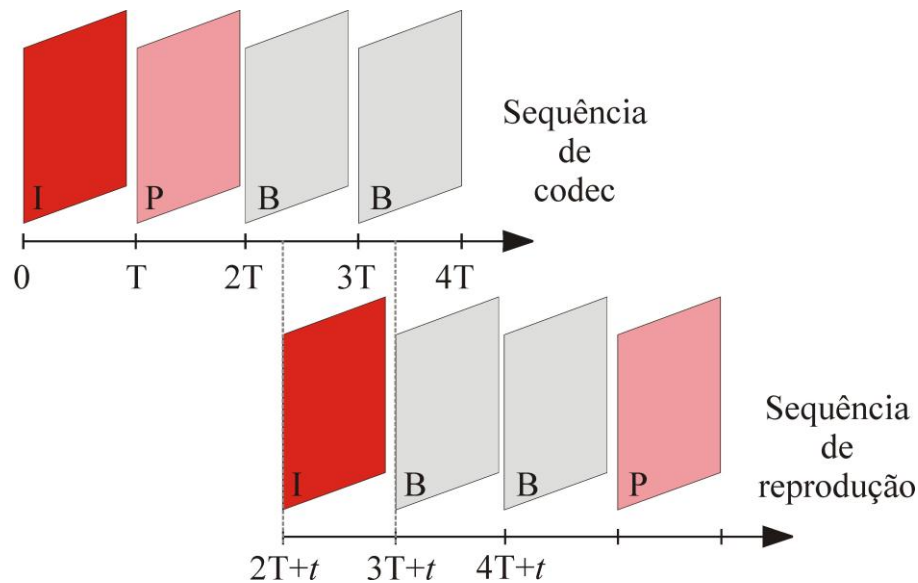


Figura 2.5. Relação entre sequência de codec e sequência de reprodução (Adaptado de [Seeling et al. 2004]).

Conforme apresentado na Figura 2.5, a recepção do primeiro quadro do tipo I da sequência de codec ocorre no tempo igual a zero e é finalizada no tempo igual a T , que denota o período do quadro. Cada quadro subsequente também possui período igual a T . A decodificação do primeiro quadro do tipo B é iniciada no instante $3T$, e sua decodificação é finalizada no instante $3T+t$. Neste cenário, observa-se que o quadro do tipo I não é necessário no processo de decodificação do receptor até o tempo $2T$, quando o processo de decodificação deste quadro é iniciado, e em $2T+t$ é finalizado. De forma similar, o quadro do tipo P não é necessário até o tempo $3T$, assumindo que ambos, o quadro do tipo P e o primeiro quadro do tipo B, podem ser decodificados em t segundos, garantindo assim que o quadro do tipo B estará disponível para reprodução no tempo $3T+t$.

2.2.4 O padrão MPEG-4

A técnica de compressão do vídeo digital utilizando o padrão MPEG baseia-se na premissa de que em um vídeo, frequentemente um quadro difere muito pouco do quadro posterior e do anterior a ele. Baseado nesta premissa, o padrão MPEG é capaz de sintetizar quadros dos tipos I, P e B, como visto anteriormente, de formar relacional, a fim de aproveitar o fato de existirem informações redundantes dentro de um mesmo quadro e entre quadros vizinhos, e assim diminuir consideravelmente o tamanho do vídeo total [Fei e Zhimei 2003], [Rocha e Vieira 2009].

Dessa forma, em linhas gerais, diz-se que o MPEG trabalha com dois tipos de compressão, onde cada um deles corresponde a uma etapa de síntese do vídeo MPEG. A primeira, baseada na redundância dos elementos de crominância dos pixels de cada imagem, informações redundantes existentes entre pixels vizinhos são suprimidas. Na segunda etapa, cada quadro é dividido em blocos e para cada transição de um quadro para outro, são mudados apenas os blocos sucessivos que sofreram alterações de forma perceptível de um quadro para o seguinte.

São vários os padrões MPEG existentes, diferindo entre eles por versões e perfis (partes). Dentre as versões mais comuns e consolidadas pode-se citar o MPEG-1, o MPEG-2 e o MPEG-4. No MPEG-4, por exemplo, podem ser citadas as partes 2 e 10 [Tudor e Wells 1994].

- MPEG-1 – Da família MPEG, o primeiro padrão de vídeo e áudio digital a ser codificado foi o MPEG-1. Este padrão foi projetado, inicialmente, para comprimir mais ou menos 30 minutos de áudio e vídeo, e para que estas informações fossem gravadas em um CD (*Compact Disc*). A resolução do MPEG-1 é de 352x288 pixels, sendo também encontrada a resolução de 320x240 pixels. O MPEG-1 possui aplicações em transmissões de vídeo pela Internet, jogos, armazenamento de filmes em CDs, além de ser derivado dele o formato de áudio MP3, muito comum na Internet. Uma das desvantagens do MPEG-1 é a exibição apenas de quadros progressivos, diminuindo a qualidade do vídeo resultante e inviabilizando sua reprodução, por exemplo, por aparelhos televisores.
- MPEG-2 – Com o propósito de melhorar a qualidade no desenvolvimento do vídeo digital e atender as demandas que o MPEG-1 não conseguia suprir, surgiu em 1994 o padrão MPEG-2. O MPEG-2 implementou uma solução prática para gravação de filmes em DVD (*Digital Video Disc*), além de oferecer uma multiplicidade de resoluções que o MPEG-1 não possuía. O MPEG-2 também foi utilizado em transmissões via satélite e para transmissões da tecnologia a cabo.
- MPEG-4 – O MPEG-4 surgiu por inúmeras necessidades distintas e complexas. Iniciado em 1998, o MPEG-4 é um padrão utilizado primeiramente para compressão de dados digitais de áudio e vídeo. Com ele é possível o envio de imagens de melhor definição usando uma menor quantidade de dados e capacidade de rede, tornando mais fácil o envio de vídeos completos pela Internet e oferecendo uma maior disponibilidade de canais livres no mesmo meio físico de transmissão. Na verdade, o

MPEG-4 é uma designação para um grupo de padrões de codificação de áudio e vídeo e de tecnologias relacionadas. O MPEG-4 ASP (*Advanced Simple Profile*) é a segunda parte do MPEG-4 (MPEG-4 parte 2), sendo uma implementação muito mais abrangente do que daquele padrão introduzido em 1998. O MPEG-4 abrange funcionalidades do MPEG-1 e MPEG-2 e de outros padrões relacionados, adicionando novas funcionalidades como renderização 3D, arquivos compostos orientados a objeto (incluindo áudio e vídeo), além de suporte a gerenciamento de direitos digitais [ISO 2000]. O MPEG-4 está dividido em várias partes. Ao dizer-se que um padrão ou aplicativo é compatível ao MPEG-4, muitas vezes é necessário referir-se a qual nível, ou parte, do MPEG-4 está associado o aplicativo. As principais partes são: parte 2 (usado por codecs como DivX, Xvid, Nero Digital, 3ivx e Quicktime 6) e a parte 10 (AVC(*Advanced Video Coding*)/H.264, usado pelos codecs x264, Nero Digital AVC, QuickTime 7 e por formatos novos como o *Blu-ray*). Dentre as vantagens do uso do MPEG-4, além daquelas já pontuadas anteriormente, pode-se destacar a codificação cuja eficiência é bem superior aos padrões anteriores, a possibilidade de codificação de diferentes mídias, e a robustez para identificação e correção de erros.

2.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos sobre tecnologias de redes sem fio e de vídeo. Foi exposto que as redes sem fio constituem uma tendência no mercado das telecomunicações, que estas redes possuem peculiaridades em relação às redes cabeadas e que muitos trabalhos na área de análise de desempenho e dimensionamento destas redes têm sido feitos. Foram apresentadas as principais técnicas e os principais protocolos dos padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16, além de terem sido pontuadas as vantagens e as desvantagens destes padrões. Em um segundo momento, foram descritas as principais características dos padrões de vídeo, com destaque para o tráfego de vídeo comprimido utilizando o padrão MPEG, principalmente para a versão 4 deste padrão. Foram discutidas as técnicas utilizadas por este padrão para compressão de imagens (quadros) e a sequência de codec e a sequência de reprodução foram comparadas. Além disso, foram abordadas as características das séries de vídeo do tipo *single layer*, por serem estas extensivamente utilizadas no estudo do tráfego de vídeo e por serem também utilizadas neste trabalho.

Capítulo 3. ANÁLISE MULTIFRACTAL DO TRÁFEGO DE REDES

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre a análise multifractal aplicada ao tráfego de redes. Define-se função de escala, diagrama multiescala e espectro multifractal e estas definições são utilizadas para verificar se algumas séries reais de tráfego de redes apresentam indícios de comportamento multifractal.

Esta análise é importante, pois ainda hoje muitos pesquisadores discutem sobre a existência ou não de ‘multifractalidade’ em séries reais de tráfego de redes. Assim, neste capítulo são apresentadas diversas formas de verificar se uma série de tráfego possui características multifractais. O conjunto de indícios, utilizando diferentes ferramentas de análise, fornece mais segurança ao se afirmar que uma série é multifractal ou monofractal.

O capítulo está organizado da seguinte forma: na seção 3.1, são apresentados conceitos relacionados à análise multifractal. Na seção 3.3, a função de escala é definida. Na seção 3.4, o conceito de diagrama multiescala é introduzido. A seção 3.5 discursa a respeito do espectro multifractal. Por fim, na seção 3.6, são apresentadas as conclusões sobre o capítulo.

3.1 ANÁLISE MULTIFRACTAL

Fractais são objetos geométricos que possuem uma forma irregular que persiste em várias resoluções de observação. O conceito de fractal é abrangente e pode ser estendido ao conceito de sinal fractal, ou seja, sinais que possuem características fractais. A maioria dos sinais fractais conhecidos possuem características como a autossimilaridade, característica esta que pode influir, por exemplo, no desempenho do tráfego de redes [Carvalho et al. 2005]. Diz-se que caso um fractal seja ampliado ou reduzido inúmeras vezes, o fractal obtido será sempre similar ao original, ou seja, apresentará a mesma forma, conforme pode ser observado por meio da Figura 3.1, que apresenta um feto fractal de uma folha de samambaia. Note que a folha pode ser subdividida em partes menores que são semelhantes ao todo. Obviamente, na prática, o ambiente no qual o fractal será analisado deverá sofrer imposições determinísticas

de decomposição, a fim de que o sistema possa ser analisado em aplicações reais, onde ampliações e reduções indefinidas não ocorrem. Consequentemente, fractais determinísticos consistem em padrões de repetição, que geralmente seguem regras de processos iterativos geométricos, já que fenômenos reais raramente podem ser descritos por modelos ideais, compostos por processos iterativos indefinidos, como o descrito acima. Entretanto, graus de similaridade de medidas estatísticas em diversas escalas, como nos fractais, podem ser encontrados em processos reais [Mandelbrot 1990], [Véhel e Riedi 1997].

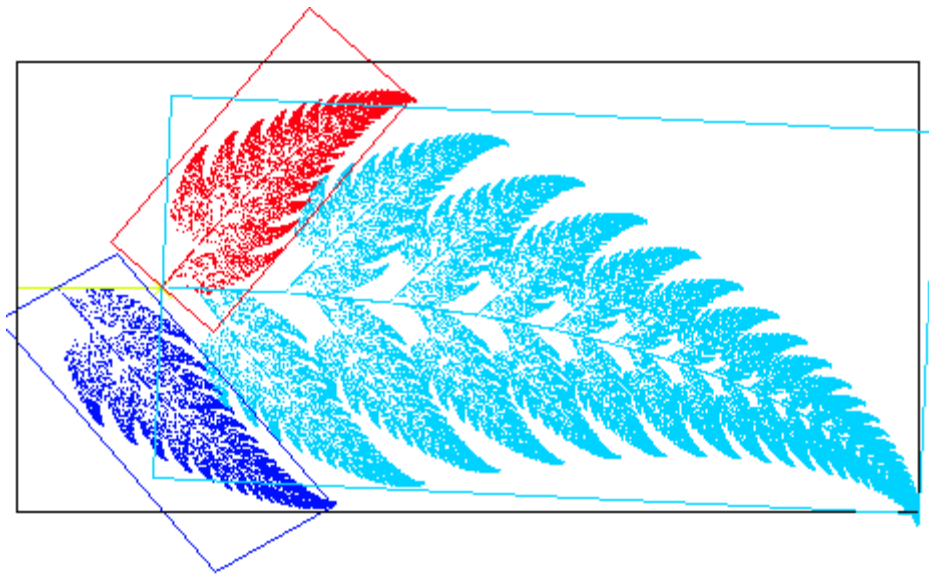


Figura 3.1. Exemplo de fractal – feto de uma folha de samambaia¹.

O conceito de autossimilaridade pode ser utilizado para descrever o tráfego de redes que apresenta rajadas em várias escalas temporais. A autossimilaridade está associada aos fractais, uma vez que os fractais são objetos cuja forma não muda em decorrência da mudança de escala. O chamado parâmetro de *Hurst* (H) mede o grau de autossimilaridade do processo com característica fractal [Abry e Veitch 1998]. Esta medida está basicamente relacionada com o decaimento da função de autocorrelação do processo envolvido.

As séries temporais autossimilares possuem rajadas em uma gama de escalas temporais. Um conceito relacionado à autossimilaridade é o de distribuição de cauda pesada (*heavy tail*) [Park e Willinger 2000]. A distribuição de cauda pesada da duração ou tamanho das sessões ou conexões que originam tráfego agregado é apontada como uma causa da característica autossimilar observada [Crovella e Bestavros 1996], [Park e Willinger 2000]. Rajadas

¹Imagem de domínio público, disponível em <http://es.wikipedia.org/wiki/Fractal>.

ocasionais presentes nos processos de tráfego de rede como o tempo entre chegada de pacotes, geram este comportamento de ‘cauda pesada’, onde a densidade de probabilidade desses processos decai lentamente. Convém ressaltar que no caso de processos assintoticamente autossimilares de segunda ordem restringindo-se o parâmetro de *Hurst* ao intervalo ($1/2 < H < 1$), autossimilaridade implica em longa dependência e vice-versa. Assim, diz-se que processos autossimilares com $H > 1/2$ apresentam dependência de longa duração [Vieira 2006].

A descoberta da natureza fractal em muitos fenômenos tem proporcionado muitos avanços em várias áreas do meio científico como na física, química, astronomia, biologia, meteorologia, hidrologia e ciências do solo [Cox 1984], [Feder 1989]. Nos últimos anos, o estudo de fractais tem contribuído positivamente, especialmente, para o estudo de tráfego de redes. Como descrito em [Leland et al. 1994] e em outros trabalhos subsequentes, o tráfego de redes apresenta propriedades fractais como autossimilaridade, rajadas (*burstiness*), e longa dependência entre as amostras (LRD – *Long Range Dependence*). Assim, em muitos casos, modelos como o clássico modelo de Poisson e modelos baseados em cadeias de Markov têm apresentado deficiências em termos de desempenho de análise e modelagem do tráfego de redes [Leland et al. 1994], [Riedi et al. 1999], [Pavlov e Anishchenko 2007], [Rocha e Vieira 2009].

A complexidade geométrica de um fractal pode ser descrita, pelo menos de uma forma global, por suas dimensões [Riedi e Véhel 1997], [Riedi 1998]. Mas ao se levar em consideração que as propriedades em escala do tráfego são causadas por uma dinâmica não determinística e por processos aleatórios, é natural que existam vários comportamentos em escalas diferentes (*multiple scaling*) [Vieira 2006]. Os modelos monofractais por possuírem um único valor para o expoente de *Hölder* (neste caso, igual ao parâmetro de *Hurst*), expoente este que indica a regularidade local do processo, foram considerados em alguns trabalhos inapropriados para modelar tráfego em pequenas escalas [Riedi e Véhel 1997], [Feldmann et al. 1998]. De fato, diferentes comportamentos em escala frequentemente são encontrados em diferentes instantes de tempo, gerando o comportamento multifractal [Vieira 2006]. Na maioria das situações práticas, o grau de autossimilaridade do tráfego é variante com o tempo, o que não ocorre em modelos Gaussianos e monofractais, reduzindo o horizonte de aplicação destes modelos. Estas propriedades de séries temporais, que vão além daquelas descritas pelos fractais, influenciaram o surgimento de propostas baseadas em multifractais.

A análise multifractal tem aplicações na descrição de comportamentos locais de medidas e

funções de forma geométrica e estatística [Park e Willinger 2000]. Ela foi, primeiramente, introduzida em estudos envolvendo turbulência [Mandelbrot 1990], e posteriormente estudada como uma ferramenta matemática muito útil para tratar fenômenos que ocorrem em escala. Assim como os fractais, os multifractais são utilizados em muitas áreas como análise de fenômenos como terremotos, reconhecimento de padrões, processamento de sinais e imagens, compressão de imagens e modelagem de tráfego de redes de computadores [Mallat 1989], [Riedi 1998], [Mallat 2008].

Na análise multifractal verifica-se o comportamento em escala de momentos estatísticos dos processos para estimar suas regularidades locais [Feldmann et al. 1998], [Riedi et al. 1999]. Através de ferramentas da análise multifractal algumas propriedades encontradas em processos reais podem ser verificadas. O tráfego de redes, por exemplo, ao ser considerado multifractal significa que possui uma estrutura de forte dependência inerente entre as amostras, com incidência de rajadas em várias escalas [Riedi et al. 1999]. Estas características podem degradar o desempenho de rede em relação a fluxos de tráfego considerados Gaussianos e de curta-dependência [Park e Willinger 2000]. Processos multifractais são definidos a seguir.

Definição 1: Um processo estocástico $X(t)$ é multifractal se satisfaz a equação:

$$E(|X(t)|^q) = c(q)t^{\tau(q)+1} \quad (3.1)$$

onde $t \in T$ e $q \in Q$, T e Q são intervalos na reta real, $\tau(q)$ e $c(q)$ são funções com domínio Q . Normalmente, assume-se que T e Q tenham comprimentos positivos, e que $0 \in T$, $[0,1] \subseteq Q$.

A Definição 1 permite que ‘multifractalidade’ seja descrita em termos de momentos, onde $\tau(q)$ é a função de escala e $c(q)$ é o fator de momento de um processo multifractal. Caso $\tau(q)$ seja linear em q o processo é dito ser monofractal, caso contrário, é multifractal [Riedi et al. 1999], [Park e Willinger 2000], [Vieira e Ling 2008].

3.2 SÉRIES DE TRÁFEGO CONSIDERADAS NESTE TRABALHO

Neste trabalho são utilizadas séries reais de tráfego de redes sem fio, séries de tráfego de redes com fio e séries reais de tráfego de vídeo MPEG-4 (divididas em séries de GoPs (*Group of Pictures*) e séries de quadros).

Foram utilizadas séries de tráfego de redes sem fio provenientes de coletas realizadas em WLANs (*Wireless Local Area Networks*) montadas nas dependências da Universidade do Sul da Califórnia (USC - *University of Southern California*). As séries de tráfego utilizadas foram coletadas entre os dias 25 de Janeiro e 28 de Abril de 2006 e estão disponíveis em [USC 2006]. Os dados disponibilizados em [USC 2006] contêm informações referentes a 25481 usuários que acessaram 137 pontos de acessos diferentes. Cada ponto de acesso refere-se a uma localidade do campus da USC e, para cada porta do *switch* que controla o tráfego das referidas localidades, séries de tráfego representativas foram coletadas. Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos para as maiores séries de tráfego disponibilizadas em [USC 2006]. Estas séries são chamadas neste trabalho de USCtrace01 e USCtrace02. Além destas séries, são apresentados resultados relacionados a uma série de tráfego de rede sem fio chamada ISF_wifidog, disponível em [ISF 2007], cuja coleta foi realizada no sentido direto (*downlink*) de um enlace de comunicação sem fio, padrão IEEE 802.11. A Figura 3.2 apresenta amostras da série de tráfego de rede sem fio USCtrace02.

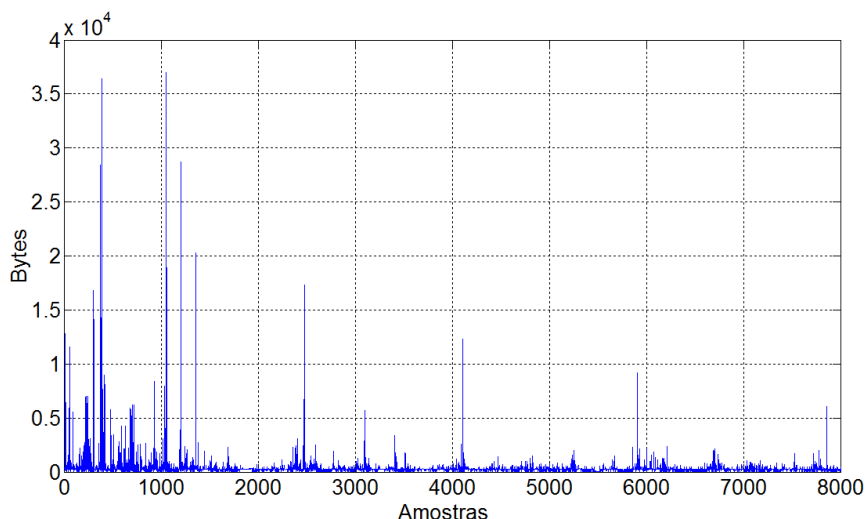


Figura 3.2. Amostras da série de tráfego de rede sem fio USCtrace02.

Em relação às séries de tráfego de redes com fio, serão apresentados os resultados obtidos para várias séries de tráfego diferentes, chamadas neste trabalho de dec-pkt-1, dec-pkt-2, lbl-pkt-4 e lbl-pkt-5, disponíveis em [DEC 2000] e 4-7-I-9 (série de tráfego obtida de um roteador de acesso Internet de uma rede da Petrobrás [Perlingeiro e Ling 2005]). Estas séries de tráfego TCP/IP, obtidas da *Digital Equipment Corporation (DEC)* [DEC 2000] e *Lawrence Berkeley Laboratory (LBL)* [DEC 2000], têm sido muito utilizadas na literatura [Molnar et al. 2002], [Veitch et al. 2005] e são também utilizadas neste trabalho. A Figura 3.3 apresenta amostras da série de tráfego dec-pkt-1 na escala de 40 ms, já a Figura 3.4 apresenta amostras da série de tráfego 4-7-I-9 na escala de 100 ms.

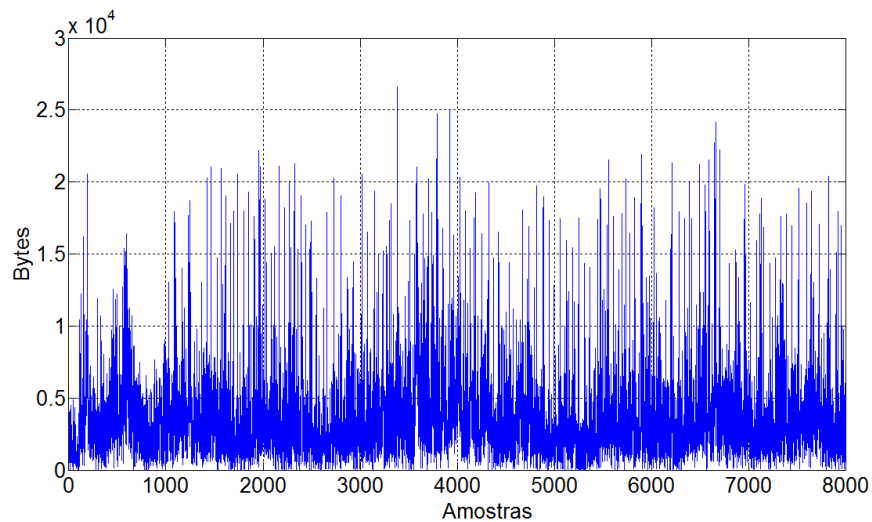


Figura 3.3. Amostras da série de tráfego de rede dec-pkt-1 na escala de 40 ms.

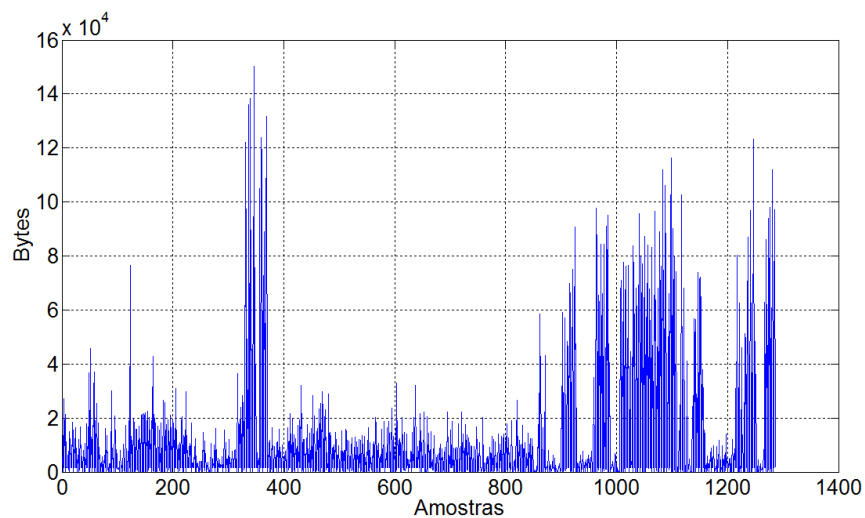


Figura 3.4. Amostras da série de tráfego de rede 4-7-I-9 na escala de 100 ms.

A Tabela 3.1 apresenta algumas estatísticas das séries de tráfego de redes com fio utilizadas. Estas estatísticas podem ser utilizadas para caracterizar séries de tráfego e também para avaliar o grau de ajuste com o qual uma série sintética, gerada a partir de um modelo específico, se aproxima de uma série real de tráfego.

Tabela 3.1. Estatísticas das séries de tráfego.

Série de tráfego	Média (μ) bytes	Desvio padrão (σ) bytes	Parâmetro de <i>Hurst</i> (H)
dec-pkt-1	$3,4474 \times 10^3$	$2,8376 \times 10^3$	0,7784
lbl-pkt-5	$2,5920 \times 10^3$	$2,2961 \times 10^3$	0,7769
lbl-pkt-4	$3,1965 \times 10^3$	$2,2378 \times 10^3$	0,7800
4-7-I-9	$1,2198 \times 10^4$	$2,3206 \times 10^3$	0,7732
dec-pkt-2	$9,9285 \times 10^3$	$6,5590 \times 10^3$	0,7783

Em relação ao tráfego de vídeo MPEG-4, primeiramente, foram consideradas nas simulações séries de tráfego de vídeo *single layer* que utilizam compressão MPEG-4 (parte 2). Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos para algumas séries de tráfego, como as relativas aos vídeos “*Lord of the rings III*” e “*Matrix I*”, chamados neste trabalho, respectivamente, de Lord3 e Matrix1. Estas séries possuem agrupamento de 12 quadros por GoP ordenados da seguinte forma IBBPBBPBBPBB (G12B2). Os quadros são do tipo CIF apresentando resolução de 352 x 288 pixels e taxa de 25 quadros por segundo. Resultados semelhantes foram obtidos para outros vídeos, como por exemplo, o vídeo “*Silence of the Lambs*” (O Silêncio dos Inocentes), chamado neste trabalho de S.LAMBS. Este vídeo utiliza compressão MPEG-4 parte 2, resolução de 352 x 288 pixels, taxa de 30 quadros por segundo e agrupamento de 16 quadros por GoP, ordenados da seguinte forma (IBBBPBBBBPBBBBPBBBB – G16B3). Tanto as séries de GoPs, quanto os dados de quadros de várias séries de vídeo MPEG-4 parte 2 estão disponíveis em [Reisslein 2003] e outros detalhes técnicos sobre elas podem ser encontrados em [Seeling et al. 2004], [Rocha e Vieira 2009].

A Figura 3.5 apresenta amostras da série de quadros do vídeo lord3 e a Figura 3.6 apresenta amostras da série de GoPs também do vídeo lord3.

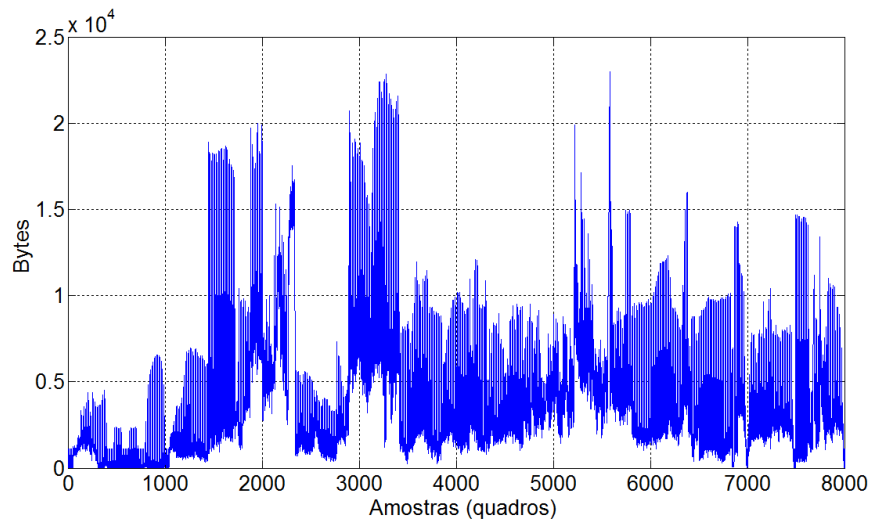


Figura 3.5. Amostras (quadros) da série de tráfego de vídeo MPEG-4 lord3.

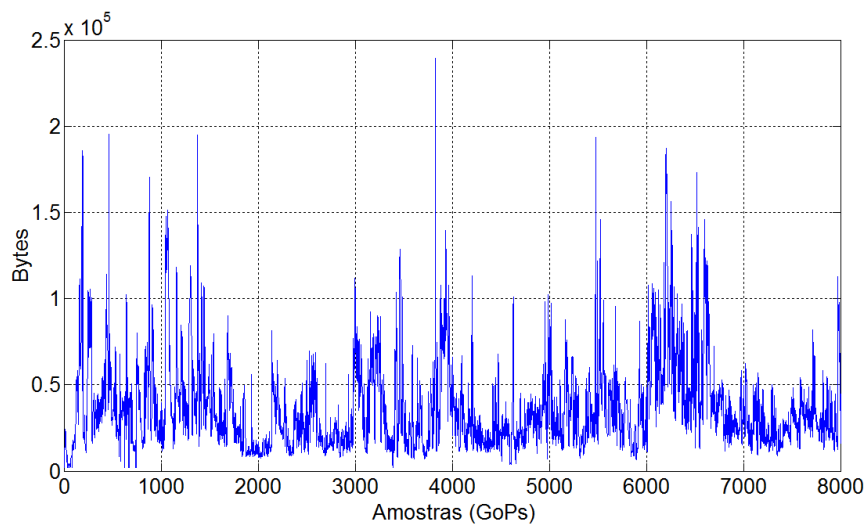


Figura 3.6. Amostras (GoPs) da série de tráfego de vídeo MPEG-4 lord3.

Outra característica comumente encontrada nestas séries de tráfego é a de apresentar uma função de densidade de probabilidade (pdf) tendendo a uma função lognormal. A Figura 3.7 e a Figura 3.8 apresentam as estimativas das pdfs das séries de tráfego lord3 e dec-pkt-1, respectivamente, feitas por meio de histogramas. A partir destas figuras, é possível observar (visualmente) a similaridade das pdfs com a função lognormal.

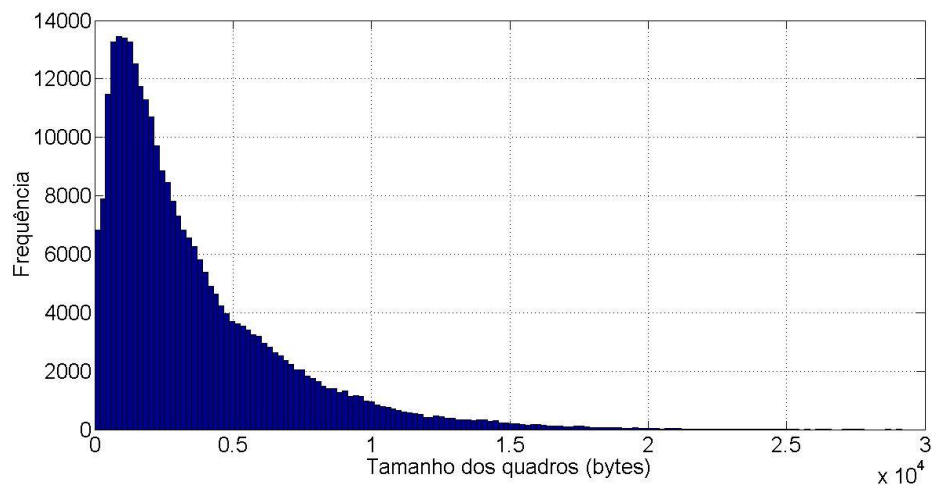


Figura 3.7. Histograma para a série de quadros de vídeo MPEG-4 lord3.

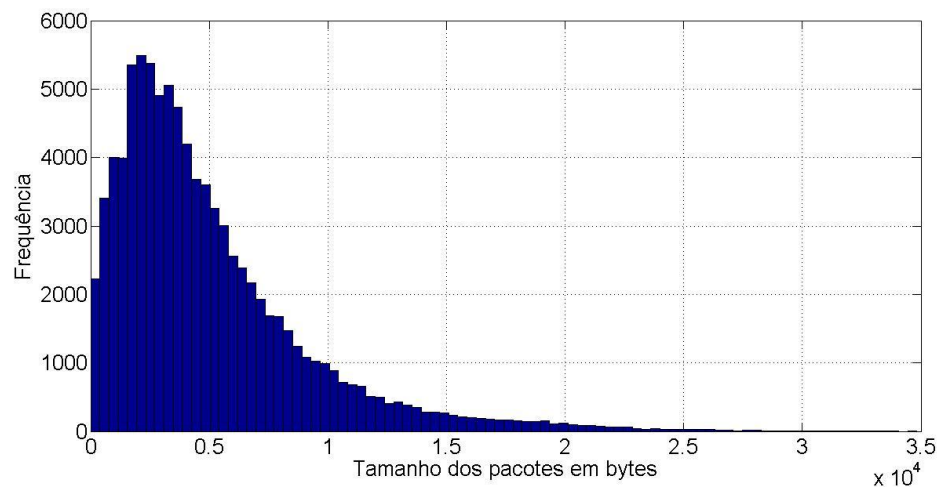


Figura 3.8. Histograma para a série de tráfego dec-pkt-1 na escala de 40 ms.

A alta variabilidade do tamanho dos pacotes transmitidos em função do tempo, a presença de rajadas em intervalos de tempo específicos, os altos valores estimados para o parâmetro de *Hurst* e o comportamento lognormal das pdfs das séries reais são características encontradas nas séries de tráfego que motivaram a aplicação da análise multifractal utilizada neste capítulo.

Nas seções seguintes são apresentados métodos de análise multifractal (função de escala, diagrama multiescala e espectro multifractal). A partir destes métodos é possível avaliar se uma série real de tráfego de redes, como as apresentadas nesta seção, possui indícios de um comportamento multifractal.

3.3 FUNÇÃO DE ESCALA

Um processo multifractal, como definido em (3.1), implica condição de estacionariedade para seus incrementos [Dang et al. 2003]. Portanto, a relação dada pela equação (3.2) apresentada abaixo, obtida a partir de (3.1), é válida para os momentos dos processos de incrementos, isto é:

$$E\left[|Z^{(\Delta t)}|^q\right] = c(q)(\Delta t)^{\tau_0(q)} \quad (3.2)$$

onde $Z^{(\Delta t)}$ denota o processo de incremento no intervalo de tempo Δt , $q > 0$ e $\tau_0(q) = \tau(q) + 1$. Então, escolhendo Δt como intervalo de tempo unitário, pode-se escrever (3.2) como:

$$\log E\left[|Z^{(m)}|^q\right] = \tau_0(q) \log m + \log c(q) \quad (3.3)$$

onde a equação (3.3) também é válida para $m = 1, 2, \dots$, e m é o nível de agregação do processo de incrementos.

Se a sequência de incrementos Z^m tem propriedade de escala (*scaling property*), então a curva que descreve os momentos $E\left[|Z^{(m)}|^q\right]$ versus m em um gráfico em escala logarítmica deverá ser uma linha reta, conforme (3.3). A inclinação desta linha reta fornece uma estimativa de $\tau_0(q)$ e o ponto de intercepção desta linha corresponde ao valor de $\log c(q)$. Uma vez estimados os valores de $\tau_0(q)$ para diferentes valores de q , uma curva de $\tau_0(q)$, ou $\tau(q)$, em função de q pode ser construída. Se a função de escala $\tau(q)$ versus q tiver um comportamento linear, diz-se que este é um indício de um comportamento monofractal do processo, caso contrário, diz-se que há um indício de que o processo seja multifractal [Dang et al. 2003].

Um fluxo de tráfego de rede sem fio pode apresentar dependência de longa duração entre suas amostras e incidência de rajadas em várias escalas e, ainda, diferentes leis de escalas, como aquelas encontradas em fluxos de tráfego de redes com fio [Riedi et al. 1999], [Feldmann et al. 1998]. As funções de escala para uma série de tráfego com características autossimilares (dec-pkt-2 na escala de 100ms [DEC 2000]) e para duas séries de tráfego de redes sem fio são mostradas na Figura 3.9, onde é possível observar que a série autossimilar apresenta uma

relação linear entre $\tau(q)$ e q , o que é consistente com o comportamento monofractal. Em contraste, a função $\tau(q)$ para as séries de tráfego de redes sem fio USCtrace01 e ISF_wifidog mostra evidências de um comportamento não linear, sugerindo uma estrutura multifractal para as séries de tráfego de redes sem fio consideradas.

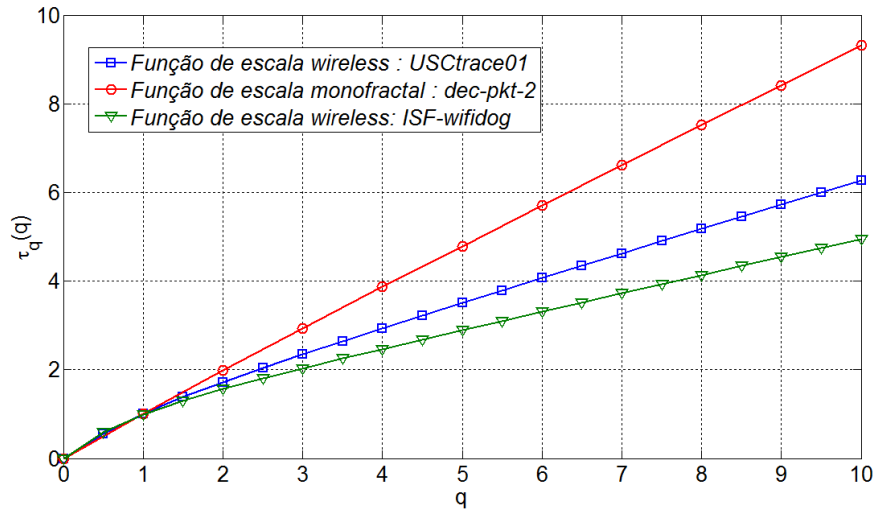


Figura 3.9. Função de escala para uma série de tráfego monofractal (dec-pkt-2) [DEC 2000] e para duas séries de tráfego de redes sem fio, USCtrace01 e ISF_wifidog.

A Figura 3.10 apresenta a função de escala $\tau(q)$ para a série de tráfego dec-pkt-1, disponível em [DEC 2000], na escala de 40ms. É possível observar que a função $\tau(q)$ não é linear em q , o que pode ser melhor observado com a ajuda da linha reta e da linha tangente ao ponto (1,1) apresentadas também na Figura 3.10. Portanto, este é um indício de ‘multifractalidade’ presente na série de tráfego dec-pkt-1. Resultado semelhante é apresentado na Figura 3.11, obtido para a série de tráfego lbl-pkt-5, na escala de 100ms, e também disponível em [DEC 2000].

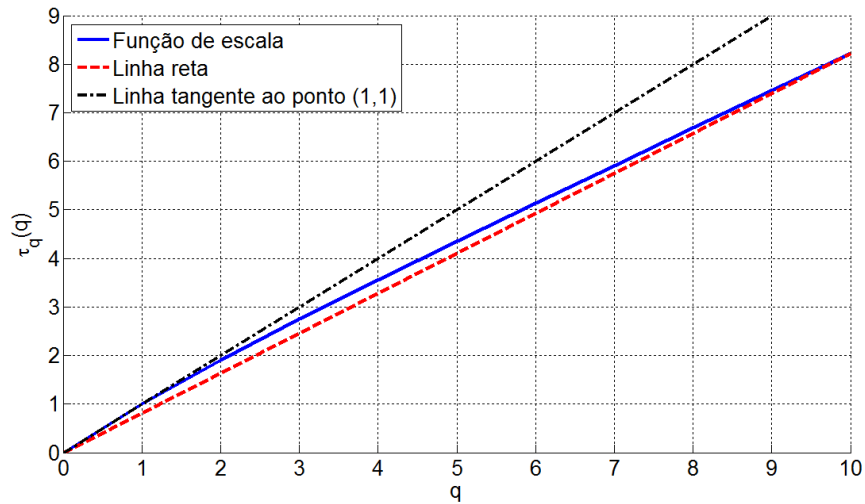


Figura 3.10. Função de escala para a série de tráfego dec-pkt-1.

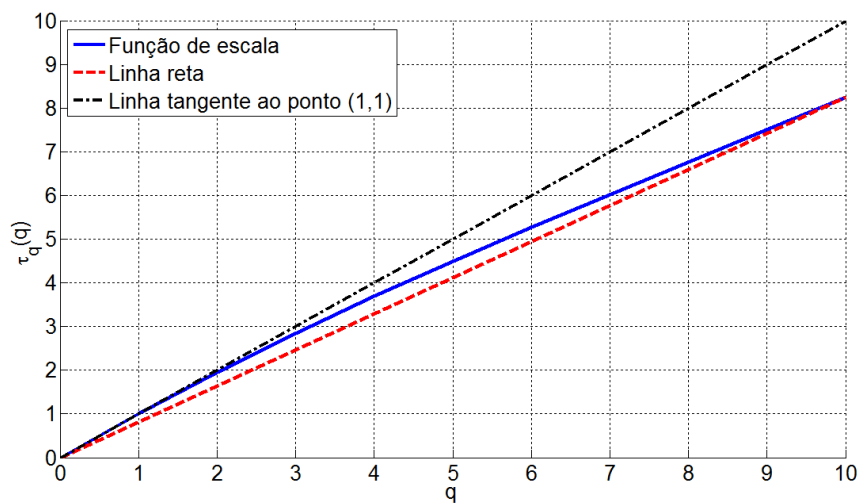


Figura 3.11. Função de escala para a série de tráfego lbl-pkt-5.

Conclui-se, a partir destes resultados, que estas séries de tráfego possuem indícios de um comportamento multifractal.

3.4 DIAGRAMA MULTIESCALA

Uma função importante na análise multifractal é a função de partição baseada em *wavelets* $S_j(q)$, por meio da qual estatísticas do comportamento local de um processo podem ser

obtidas. Considere $Y_{j,k}$ denotando o volume de tráfego (total de *bytes*) em uma escala temporal j e no instante de tempo k .

A função de partição $S_j(q)$ no domínio *wavelet* é definida como [Crouse et al. 2000]:

$$S_j(q) = E \{ |W_{j,k}|^q \} \quad (3.4)$$

onde $W_{j,k}$ são os coeficientes *wavelet* de Haar do processo na escala temporal j e no instante de tempo k , dados por [Veitch 2005], [Vieira 2006]:

$$W_{j,k} = 2^{j/2} (Y_{j+1,2k} - Y_{j+1,2k+1}) \quad (3.5)$$

A função de partição calcula os momentos de ordem q dos coeficientes *wavelet* em função da escala e consegue capturar o comportamento local de um processo. A explicação para esta última afirmação é que um expoente de Hölder local de baixo valor gera um coeficiente *wavelet* de valor alto, sendo sua presença evidenciada ainda mais, ao se tomar a potência q desses valores. De forma análoga, quando um processo é localmente suave, seus coeficientes *wavelet* são pequenos. O cálculo da função de partição baseada em *wavelet* pode ser feita para diferentes valores de q . A partir dos resultados obtidos, pode-se analisar o comportamento em escala para diferentes valores de q , e concluir se há presença da propriedade de multiescala (*multiscaling*), considerada indício para o comportamento multifractal [Vieira 2006].

Para certos processos multifractais a função de partição supracitada pode ser definida assintoticamente ($j \rightarrow \infty$) como:

$$\log_2 S_j(q) \sim q \cdot k + j \alpha_q \quad (3.6)$$

Assim, a inclinação de $\log_2 S_j(q)$ em relação à escala j fornece uma estimativa de α_q .

Com o objetivo de obter mais uma forma de verificar se o comportamento multifractal está presente nas séries reais de tráfego de redes (séries de tráfego de redes sem fio e com fio) foram consideradas as duas seguintes variáveis: $\zeta_q = \alpha_q - q/2$ e $h_q = \zeta_q/q$ [Veitch 2005]. Para processos monofractais, por exemplo, para o modelo fBm (*fractional Brownian motion*) [Norros 1994], [Mandelbrot 1968], tem-se $\zeta_q = qH$ e $h_q = H$, onde H é o chamado parâmetro de Hurst [Abry e Veitch 1998]. Assim, uma característica linear de ζ_q ou uma característica constante de h_q determina processos monofractais, enquanto uma característica não linear de

ζ_q ou uma característica não constante de h_q determina processos multifractais [Zhang et al. 2003].

A Figura 3.12 mostra estimativas de ζ_q e h_q para uma série de tráfego autossimilar, chamada dec-pkt-2 [DEC 2000]. O resultado obtido para uma série de tráfego autossimilar revela que ζ_q tende a ser linear em q e que h_q é aproximadamente constante, uma característica típica de processos monofractais. Por outro lado, afirma-se que as séries de tráfego de redes sem fio consideradas tendem a ser multifractais, uma vez que ζ_q é não linear em q e h_q não é constante, como retratado pela Figura 3.13 que apresenta resultado para a série de rede sem fio USCtrace01, onde as barras verticais representam os intervalos de confiança de 95%.

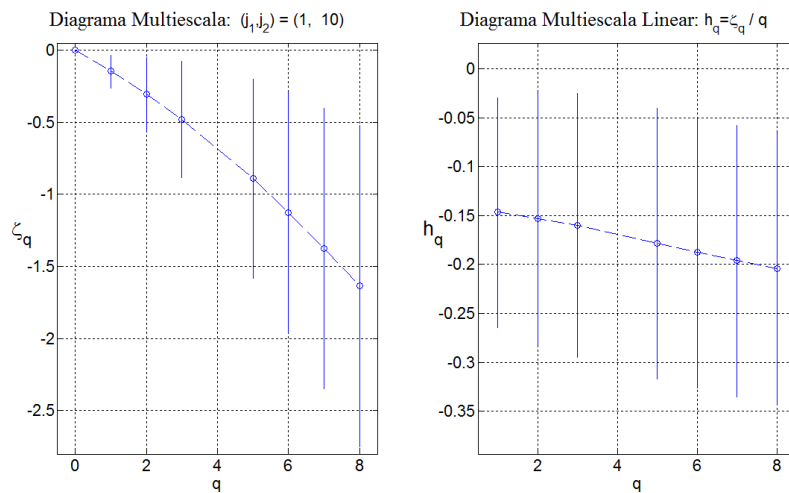


Figura 3.12. Diagrama multiescala (funções ζ_q e h_q) para a série de tráfego monofractal conhecida como dec-pkt-2 da DEC (*Digital Equipment Corporation*).

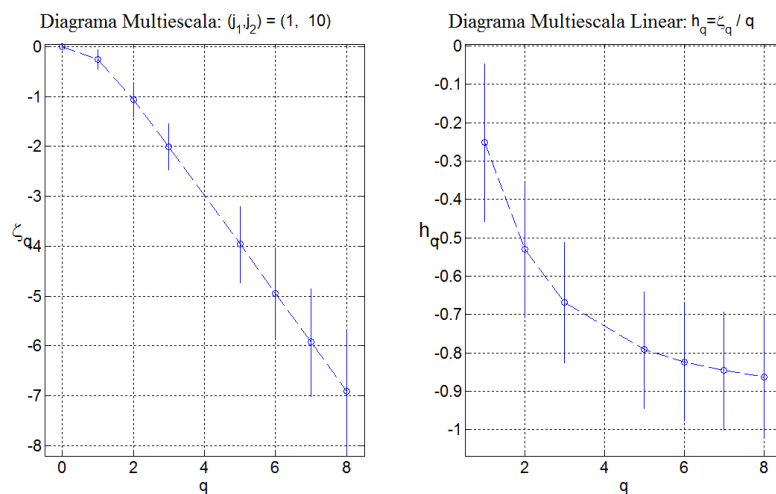


Figura 3.13. Diagrama multiescala (funções ζ_q e h_q) para uma série de tráfego de redes sem fio do conjunto de séries de tráfego USC_06spring_trace, chamada USCtrace01.

De forma análoga, afirma-se que algumas das séries de tráfego de redes com fio consideradas tendem também a ser multifractais, uma vez que ζ_q é não linear em q e h_q não é constante, como retratado na Figura 3.14 e na Figura 3.15, que apresentam, respectivamente, resultados para as séries dec-pkt-1 e lbl-pkt-4 [DEC 2000].

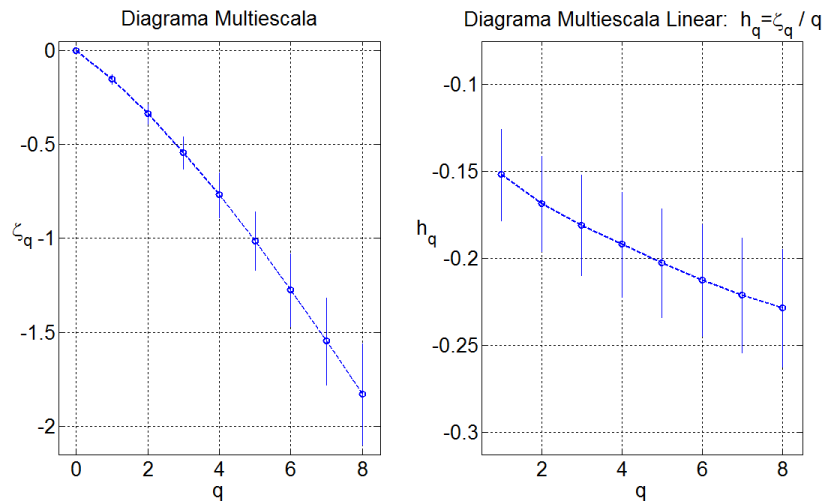


Figura 3.14. Diagrama multiescala (funções ζ_q e h_q) para a série de tráfego dec-pkt-1.

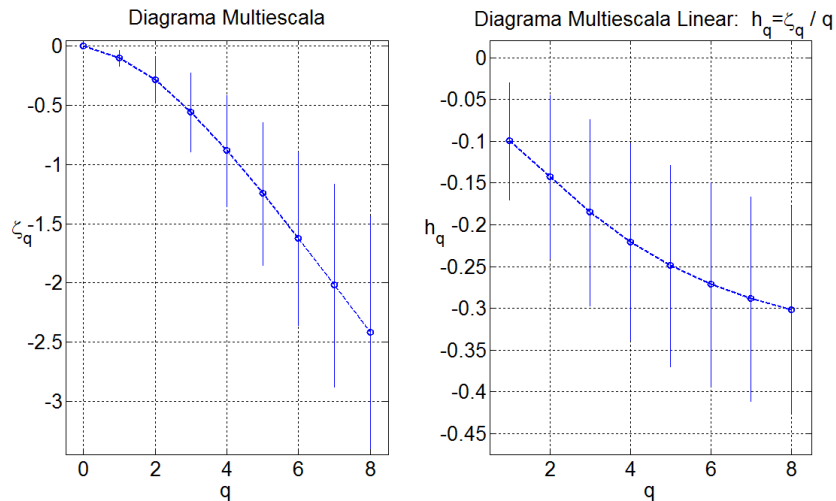


Figura 3.15. Diagrama multiescala (funções ζ_q e h_q) para a série de tráfego lbl-pkt-4.

3.5 ESPECTRO MULTIFRACTAL

O grau de singularidades locais de um processo estocástico pode ser quantificado por meio

dos expoentes de Hölder pontuais correspondentes.

Seja α um número real estritamente positivo, K uma constante, e $x_0 \in R$. A função $f: R \rightarrow R$ é $C^\alpha(x_0)$ se existe um polinômio P_n , de grau $n < \alpha$, onde $C^\alpha(x_0)$ define o conjunto de funções f que são α vezes diferenciáveis, com derivadas contínuas, tal que:

$$|f(x) - P_n(x - x_0)| < K |x - x_0|^\alpha \quad (3.7)$$

O expoente de Hölder pontual h da função f em x_0 é definido como:

$$h = \sup \{ \alpha > 0 \mid f \in C^\alpha(x_0) \} \quad (3.8)$$

Esta caracterização da regularidade de uma função é amplamente utilizada em análise multifractal. Por exemplo, em [Seuret e Gilbert, 2000], mostra-se que o expoente de Hölder pontual pode quantificar o grau da variação instantânea de um sinal de tráfego de redes. Mais precisamente, este expoente pode indicar o grau das rajadas de dados presentes neste sinal [Vieira et al. 2010b].

Em outras palavras, em contraste a outros modelos de tráfego, processos multifractais contêm uma multiplicidade de expoentes de Hölder locais dentro de qualquer intervalo finito [Park e Willinger 2000]. Os expoentes de Hölder descrevem as características locais em escala de um processo em determinado ponto no tempo. O conceito de expoente de Hölder está relacionado com a singularidade local de um processo, ou seja, caracteriza a sua suavidade (quantidade de rajadas) em certo instante de tempo [Zhang et al. 2003], [Ehlers 2003]. A distribuição destes expoentes pode ser representada por uma densidade normalizada chamada espectro multifractal. Em outras palavras, o espectro multifractal descreve a dimensão fractal do conjunto de instantes possuindo um dado expoente local [Riedi et al. 1999]. O espectro multifractal $f(\alpha)$ de um processo $X(t)$ pode ser visto como a transformada de Legendre de $\tau(q)$ (função de escala definida anteriormente) pela relação:

$$f(\alpha) = \min_q \{ q\alpha - \tau(q) \} \quad (3.9)$$

Processos cujo espectro $f(\alpha)$ é definido para apenas um ponto, apresentando um único expoente de Hölder, são classificados como monofractais. Para processos multifractais, o espectro apresenta uma forma parabólica côncava, apresentando assim, múltiplos valores para os expoentes de Hölder [Riedi et al. 1999], [Vieira e Ling 2008].

Através da transformada de Legendre, o espectro multifractal para várias séries de tráfego foi calculado. A Figura 3.16 e a Figura 3.17 apresentam os espectros multifractais para as séries reais de tráfego de redes dec-pkt-1 e 4-7-I-9, respectivamente. Os espectros multifractais das séries sintéticas geradas a partir do modelo fBm para cada série de tráfego também são exibidos para comparação. Este modelo é conhecido por gerar tráfego sintético com autossimilaridade e tem sido usado para representar tráfego monofractal com dependência de longo prazo [Norros 1994]. Os tráfegos sintéticos fBm foram gerados com os mesmos valores de H das séries reais, ou seja, $H=0,7784$ para a série dec-pkt-1 e $H=0,7732$ para a série 4-7-I-9. Os espectros de Legendre apresentados na Figura 3.16 e na Figura 3.17 para as duas séries reais são mais largos que os espectros obtidos a partir das séries sintéticas geradas segundo o modelo fBm, denotando uma multiplicidade de expoentes de Hölder, o que é mais uma evidência de ‘multifractalidade’ destas séries [Pavlov e Anishchenko 2007]. Resultados semelhantes também foram obtidos para as séries de tráfego de rede sem fio USCTrace01 e USCTrace02, apresentados na Figura 3.18, onde o tráfego sintético fBm foi gerado a partir da série USCTrace01, cujo parâmetro de *Hurst* (similar à série USCTrace02) é igual a 0,7704 ($H=0,7704$).

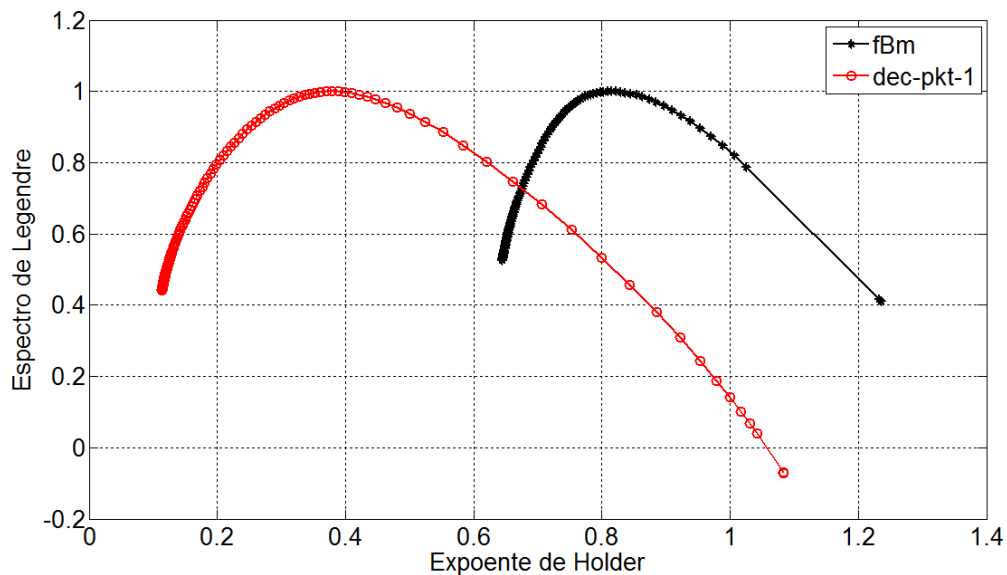


Figura 3.16. Espectro de Legendre para a série multifractal dec-pkt-1 e para a série monofractal sintética fBm de mesmo parâmetro de *Hurst*.

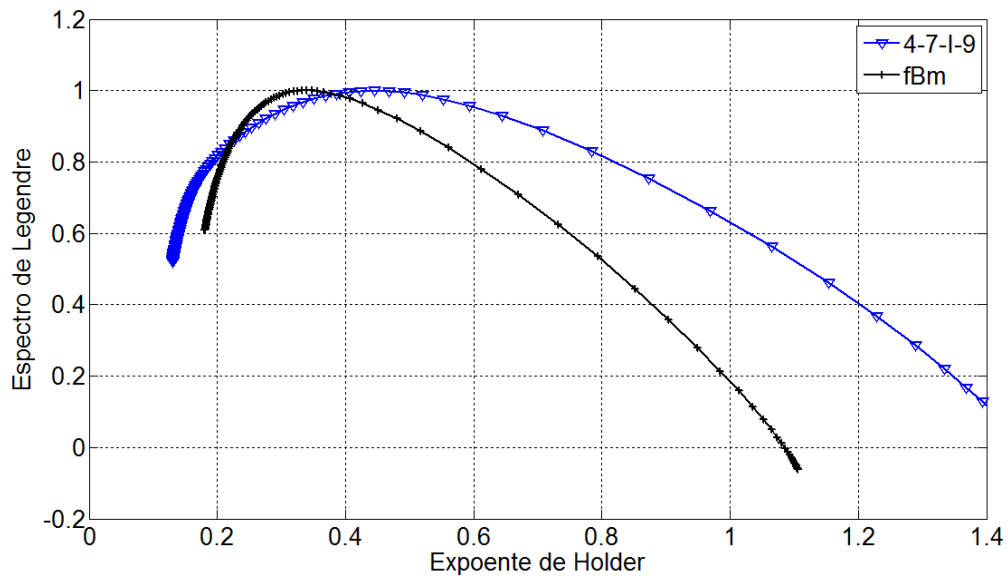


Figura 3.17. Espectro de Legendre para a série multifractal 4-7-I-9 e para a série monofractal sintética fBm de mesmo parâmetro de *Hurst*.

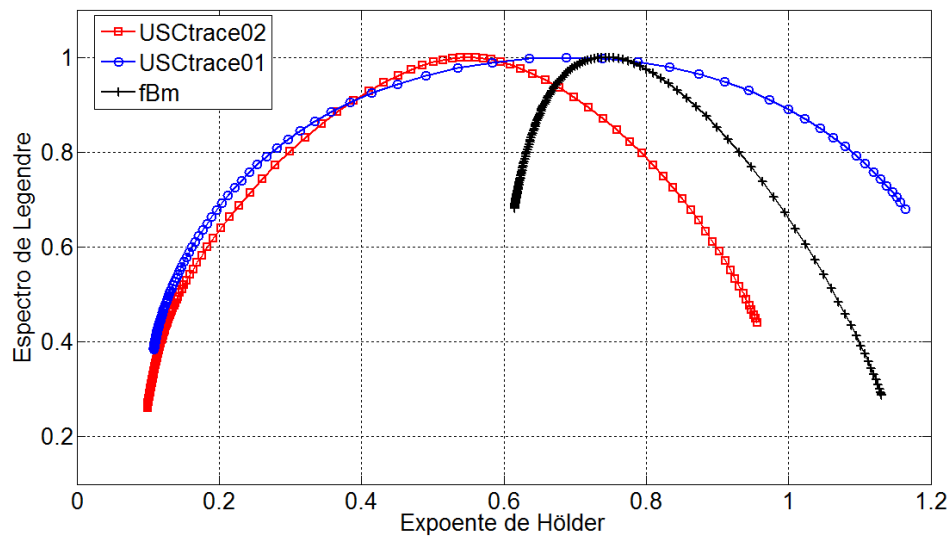


Figura 3.18. Espectro multifractal – séries USCtrace01 e USCtrace02.

Assim, utilizando conceitos de função de escala, diagrama multiescala e espectro multifractal demonstrou-se que características multifractais podem ser encontradas em séries de tráfego de redes reais (com fio e sem fio).

3.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, primeiramente, foram apresentados conceitos relacionados aos fractais. Em seguida foi definido um processo multifractal e apresentados parâmetros e métodos utilizados na análise multifractal. Foram introduzidas as definições de função de escala, diagrama multiescala e espectro multifractal e, posteriormente, utilizando séries reais de tráfego de redes sem fio e séries reais de tráfego de redes TCP/IP, foi demonstrado que muitas destas séries de tráfego possuem indícios de um comportamento multifractal.

3.7 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO

1. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T., Santos Jr, J.A. “A Multifractal Based Approach for Loss Probability Estimation for OFDM/TDMA Based Systems” In: The 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Recife/PE/Brazil, 2010.
2. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Loss Probability Estimation for OFDM/TDMA Based Wireless Systems Considering Multifractal Traffic Characteristics”. European Transactions on Telecommunications. (Submetido em 13.09.2010).
3. Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Santos Jr, J.A. “Loss Probability Estimation and Control for OFDM/TDMA Wireless Systems Considering Multifractal Traffic Characteristics”. Computer Communications. (Submetido em 22.12.2010).
4. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Alocação Adaptativa de Taxa de Transmissão Baseada em Estimação de Probabilidade de Perda para Tráfego de Redes Considerando Características Multifractais”. Revista Controle & Automação – SBA (Sociedade Brasileira de Automática). (Submetido em 20.02.2011).

Capítulo 4. MODELAGEM MULTIFRACTAL DO TRÁFEGO DE REDES

Muitos modelos de tráfego foram desenvolvidos para as redes de telecomunicações [Abry e Veitch 1998]. Dentre eles, podem ser citados modelos baseados em cadeias de Markov, modelos autorregressivos, modelos autossimilares e modelos multifractais [Yeo e Agrawala 2004]. Estes modelos de tráfego proporcionam formas de caracterizar o comportamento do tráfego de redes por meio de técnicas analíticas ou simulação.

Como dito anteriormente, modelos autossimilares e multifractais têm recebido grande atenção devido ao desempenho mais eficiente em termos de análise e modelagem do tráfego real de redes que eles proporcionam em relação aos tradicionais modelos Gaussianos. De fato, alguns pesquisadores têm revelado que modelos multifractais são adequados para descrever algumas características do tráfego de redes, tais como: longa dependência entre as amostras de tráfego, decaimento lento da função de autocorrelação, comportamentos multiescala e rajadas que persistem em diversas escalas de tempo [Feldmann et al. 1998], [Riedi et al. 1999], [Crouse et al. 2000], [Park e Willinger 2000], [Vieira e Lee 2009].

Sistemas de comunicações sem fio são projetados para suportarem uma grande diversidade de serviços e aplicações. Devido às suas características intrínsecas, o tráfego de LANs sem fio é tipicamente afetado por condições não ideais dos canais de comunicação e pelas próprias características dos protocolos da subcamada MAC, assim como pelas intempéries relacionadas à mobilidade do usuário [Yeo e Agrawala 2004], [Haykin 2005], [Ruangchaijaturon e Ji 2009]. Portanto, devido a estes fatores, o tráfego de LANs sem fio baseadas no OFDM pode apresentar propriedades singulares relacionadas às características multifractais em pequenas escalas, como mencionado no Capítulo 3, onde indícios de ‘multifractalidade’ foram encontrados em séries reais de tráfego de redes sem fio. Sistemas fixos de acesso em banda larga sem fio como, por exemplo, o 802.16a, poderão também apresentar tais singularidades. Assim, as propriedades multifractais encontradas nos fluxos de

tráfego devem ser consideradas na elaboração de modelos que visem à descrição do comportamento do tráfego de redes sem fio.

Neste trabalho, defende-se que a análise multifractal é uma importante ferramenta para análise do tráfego de redes sem fio e pode proporcionar mecanismos mais eficientes para provisão de QoS.

Assim como o tráfego de redes sem fio tem sido destaque dentre os estudos na área de redes, o crescente número de aplicações multimídia com requisitos de qualidade de serviço (QoS) sugere que grande parte do tráfego da rede mundial de computadores será composto por tráfego de vídeo [Fei e Zhimei 2003]. Como visto no Capítulo 2, mesmo utilizando-se de técnicas de compressão como o MPEG-4 (*Motion Picture Experts Group*), o tráfego de vídeo demanda uma grande largura de banda, principalmente em aplicações de tempo real, cada vez mais requeridas pelos usuários [Wang e Qiu 2005].

A modelagem do tráfego de redes, assim como a modelagem do tráfego de vídeo não é um tópico recente. Para um melhor dimensionamento, utilização dos recursos e compreensão dos dados que trafegarão na rede, a modelagem de dados de vídeo tem sido um tópico de pesquisas constante. Especificamente para o tráfego de vídeo, inicialmente, modelos baseados em cadeias de Markov, assim como processos autorregressivos foram desenvolvidos [Maglaris et al. 1988], [Heyman et al. 1992]. No entanto, estes modelos eram capazes apenas de capturar as características de curta dependência entre as amostras. Quando características de longa dependência foram consideradas, modelos como, por exemplo, FGn (*Fractional Gaussian noise*) [Huang et al. 1995] e FARIMA (*Fractal Auto Regressive Integrated Moving Average*) [Cruz et al. 1998] foram aplicados. Pesquisas recentes têm mostrado que o tráfego de vídeo possui propriedades que vão além daquelas relativas aos processos autossimilares. Longa-dependência entre as amostras, comportamento mais complexo para a variação da energia dos coeficientes *wavelet* da série de tráfego *versus* escala e tráfego em rajadas persistentes nas mais diversas escalas têm sido observadas [Feldmann et al. 1998], [Wang e Qiu 2006]. Neste sentido, modelos multifractais proporcionam melhores resultados em termos de desempenho de modelagem de tráfego [Riedi et al. 1999], [Krishna et al. 2003], [Vieira e Ling 2008].

Neste capítulo, propõe-se um modelo baseado em uma cascata multifractal que é utilizada para modelar o tráfego de redes, mais especificamente o tráfego de redes sem fio e o tráfego de vídeo de taxa variável (VBR- *Variable Bit Rate*) que utiliza MPEG-4 como técnica de

compressão. No entanto, acredita-se que o modelo proposto também possa ser aplicado a outros padrões de vídeo, semelhantes ou derivados do padrão MPEG. Utilizou-se, para validação do modelo, séries de tráfego de redes sem fio disponíveis em [USC 2006] e as séries de GoPs (*Group of Pictures*) e os dados de quadros de várias séries de vídeo MPEG-4 parte 2 disponíveis em [Reisslein 2003], e cujos detalhes técnicos são especificados em [Seeling et al. 2004]. O modelo proposto foi chamado de CMAM (Cascata Multifractal com Modelagem Autorregressiva para os Multiplicadores). Testes de desempenho foram realizados com o objetivo de averiguar o desempenho do modelo em comparação a outros modelos multifractais.

O capítulo está organizado da seguinte forma: na seção 4.1, são apresentados fundamentos sobre a geração de processos multifractais a partir de cascatas multiplicativas. Na seção 4.2, discursa-se sobre a estimação dos multiplicadores de cascatas multiplicativas. Na seção 4.3, alguns modelos multifractais baseados em cascata presentes na literatura são destacados. Na seção 4.4, são tratados assuntos relacionados aos processos autorregressivos e suas propriedades e em seguida é apresentado o modelo multifractal CMAM proposto. Na seção 4.5, são mostrados os testes realizados para validar o modelo multifractal CMAM em comparação com outros modelos existentes. Por fim, na seção 4.6, as conclusões sobre o capítulo são apresentadas.

4.1 CASCATAS MULTIPLICATIVAS

Uma cascata binomial é um método de se obter um processo multifractal que consiste de um procedimento iterativo no intervalo compacto $[0,1]$. Sejam m_0 e m_1 (multiplicadores da cascata) dois números positivos cuja soma é 1. No estágio $k=0$ da cascata, obtém-se a medida inicial μ_0 do processo com probabilidade uniforme em $[0,1]$. No estágio $k=1$, a medida μ_1 distribui massa utilizando a distribuição uniforme, sendo, m_0 no subintervalo $[0,1/2]$ e massa igual a m_1 em $[1/2, 1]$. Em $k=2$, o intervalo $[0,1/2]$ é subdividido em $[0,1/4]$ e $[1/4,1/2]$ e o mesmo acontece com o intervalo $[1/2,1]$, obtendo [Park e Willinger 2000], [Vieira 2006]:

$$\begin{aligned} \mu_2[0,1/4] &= m_0 m_0 & \mu_2[1/4,1/2] &= m_0 m_1 \\ \mu_2[1/2,3/4] &= m_1 m_0 & \mu_2[3/4,1] &= m_1 m_1 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Considere o intervalo diádico $[t, t+2^{-k}]$ onde $t = 0.\eta_1 \dots \eta_k = \sum_{i=1}^k \eta_i 2^{-i}$. Sejam φ_0 e φ_1 as frequências relativas de 0's e 1's no desenvolvimento da cascata. A medida μ no intervalo diádico é dada por:

$$\mu[t, t+2^{-k}] = m_0^{k\varphi_0} m_1^{k\varphi_1} \quad (4.2)$$

Este processo preserva em cada estágio a massa dos intervalos diádicos por isso é chamado de cascata conservativa ou microcanônica. Em cada estágio da cascata os intervalos podem ser divididos em um número $b \geq 2$ de intervalos de tamanhos iguais. Para $b > 2$, o processo resultante é definido como cascata multinomial. Se os multiplicadores usados têm um valor fixo para m_0 e $b=2$, então a cascata multiplicativa é binomial determinística com função de escala: $\tau(q) = -\log_2(m_0^q + m_1^q) + 1$ [Park e Willinger 2000]. Um exemplo de cascata binomial pode ser observado na Figura 4.1:

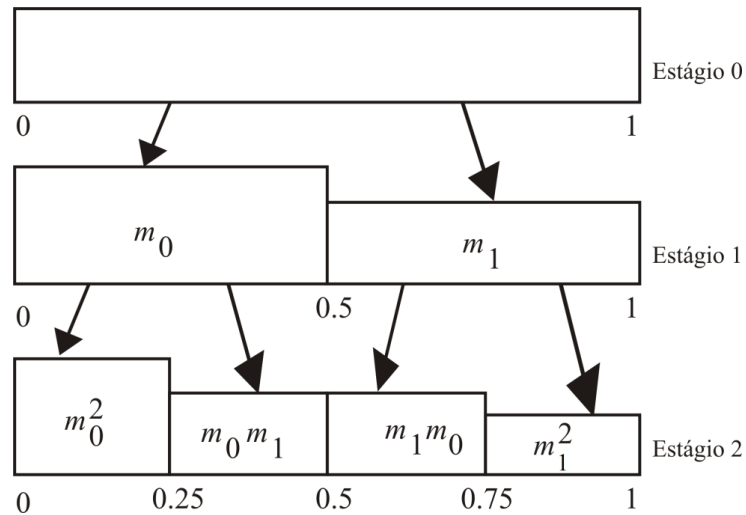


Figura 4.1. Processo de construção de uma cascata binomial [Vieira 2006].

Ao se permitir que os multiplicadores da cascata sejam variáveis aleatórias independentes em $[0,1]$ com densidade de probabilidade $f_R(X)$, obtém-se uma estrutura mais geral do que a determinística em que os multiplicadores são valores fixos. Dessa forma, o processo multifractal obtido $\{\mu(\Delta t_k)\}_{k=1}^{2^N}$ terá no estágio i da cascata e no intervalo diádico de comprimento $\Delta t_k = 2^{-k}$, que começa em $t = 0.\eta_1 \dots \eta_k = \sum_{i=1}^k \eta_i 2^{-i}$, a medida μ :

$$\mu(\Delta t_k) = R(\eta_1) \cdot R(\eta_1, \eta_2), \dots, R(\eta_1, \dots, \eta_k) \quad (4.3)$$

onde $R(\eta_1, \dots, \eta_i)$ é o multiplicador no estágio i da cascata. Uma vez que os multiplicadores $R(\eta_1, \dots, \eta_i)$ são i.i.d. (independentes e identicamente distribuídos), pode-se demonstrar que a medida μ satisfaz a relação de escala [Zou et al. 2008]:

$$E(\mu(\Delta t_k)^q) = (E(R)^q)^k = \Delta t_k^{-\log_2 E(R^q)} \quad (4.4)$$

que define um processo multifractal com função de escala $\tau(q) = -\log_2 E(R^q)$.

4.2 ESTIMAÇÃO DA DENSIDADE DE PROBABILIDADE DOS MULTIPLICADORES DE UMA CASCATA

Seja X^N o processo de tráfego no estágio N da cascata. A série de tráfego no estágio $(N-1)$ da cascata pode ser obtida agregando valores consecutivos do estágio N em blocos não sobrepostos de tamanho 2. De forma análoga, dada a série na escala $(N-j)$, ou seja, X_i^{N-j} onde $(i=1, \dots, 2^{N-j})$, obtêm-se os dados na escala $(N-j-1)$ pela soma consecutiva dos valores do estágio $(N-j)$ da seguinte forma:

$$X_i^{N-j-1} = X_{2i-1}^{N-j} + X_{2i}^{N-j} \quad (4.5)$$

para $i=1, \dots, 2^{N-j-1}$. Este procedimento termina quando a agregação dos valores forma apenas um ponto na última escala da cascata. Uma estimativa $r_j^{(i)}$ dos multiplicadores da cascata pode ser obtida pela equação [Feldmann et al. 1998]:

$$r_j^{(i)} = X_i^{N-j} / X_{2i-1}^{N-j-1} \quad (4.6)$$

para $i=1, \dots, 2^{N-j}$. Pode-se considerar $r_j^{(i)}$ como sendo amostras da distribuição $f_{R_j}(r)$ dos multiplicadores no estágio j . A distribuição dos multiplicadores na escala j pode ser obtida pelos histogramas de $r_j^{(i)}$. As figuras a seguir apresentam os histogramas dos multiplicadores obtidos de uma série de vídeo, denominada Lord3, em duas escalas diferentes.

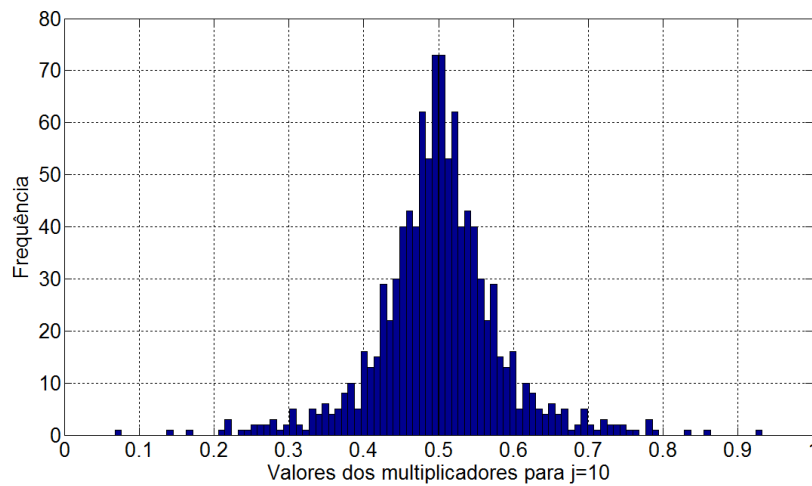


Figura 4.2. Histogramas para os multiplicadores obtidos a partir da série de vídeo Lord3 no décimo estágio da cascata, ou seja, $j=10$.

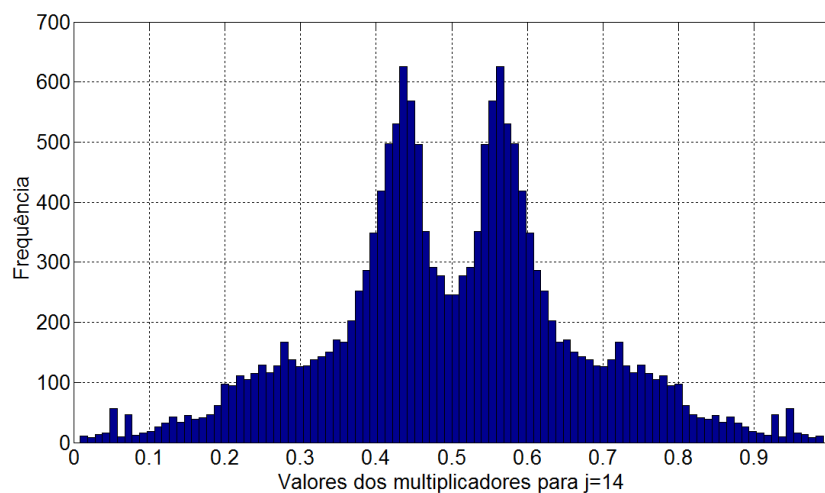


Figura 4.3. Histogramas para os multiplicadores obtidos a partir da série de vídeo Lord3 no décimo quarto estágio da cascata, ou seja, $j=14$.

A partir destas figuras é possível observar que os multiplicadores de uma cascata podem apresentar comportamentos distintos para níveis de agregação (estágios) diferentes.

O modelo multifractal VVGM (*Variable Variance Gaussian Model*) [Krishna 2003], por exemplo, é uma cascata multiplicativa que aproxima os histogramas obtidos por Gaussianas. Outros métodos de estimação de multiplicadores podem ser encontrados na literatura, como em [Vieira e Ling 2008], onde os autores propõem uma generalização da distribuição dos multiplicadores utilizando um método de kernel [Chui 1992], sendo que a média desta distribuição varia a cada estágio. Em [Vieira e Ling 2006], os autores propõem um modelo

adaptativo denominado AWMM (*Adaptive Wavelet based Multifractal Model*) que também está associado à estimação de multiplicadores de uma cascata multiplicativa. A seção seguinte apresenta brevemente importantes modelos multifractais baseados em cascatas multiplicativas presentes na literatura.

4.3 MODELOS MULTIFRACTAIS

Dentre os modelos multifractais existentes na literatura pode-se destacar os seguintes modelos específicos, sendo eles: o mBm (*multifractal Brownian motion*) [Peltier e Véhel 1995], o VVGM (*Variable Variance Gaussian Model*) [Krishna 2003], o MWM (*Multifractal Wavelet Model*) [Riedi et al. 1999] e o AWMM (*Adaptive Wavelet based Multifractal Model*) [Vieira e Ling 2006].

A partir das limitações apresentadas pelo modelo fBm (*fractional Brownian motion*), os autores em [Peltier e Véhel 1995] propuseram um modelo chamado mBm (*multifractal Brownian motion*). O fBm é um processo autossimilar cuja regularidade local é representada por um único valor para o parâmetro de *Hurst* em todos os pontos considerados. Já no mBm a regularidade local é dada pelo expoente de Hölder que varia com o tempo, apresentando, portanto, uma multiplicidade de valores que descrevem melhor as características das séries temporais descritas por um processo mBm [Vieira 2006].

O modelo VVGM, apresentado em [Krishna 2003], baseia-se em uma cascata multiplicativa onde os valores correspondentes aos multiplicadores da cascata são amostras de uma distribuição Gaussiana a cada estágio da cascata. Ou seja, neste modelo assume-se que a distribuição dos multiplicadores $f_{R_i}(r)$ é Gaussiana com média igual a 0,5 e variância que varia a cada escala da cascata, a medida que ela é sintetizada. Segundo os autores em [Krishna 2003], o modelo é apropriado para descrever o tráfego de redes com características autossimilares, variações multi-escalas e rajadas.

Um modelo multifractal adaptativo baseado em *wavelets* chamado AWMM (*Adaptive Wavelet based Multifractal Model*) foi proposto em [Vieira e Ling 2006], levando em consideração propriedades dos coeficientes *wavelet* de um processo multifractal baseado em uma cascata multiplicativa. O modelo AWMM é capaz de capturar, simultaneamente, a função de escala $\tau(q)$ e o fator de momento $c(q)$ de processos multifractais e o decaimento

de energia dos coeficientes *wavelets* associados a estes processos. O modelo AWMM possui capacidade de adaptação em tempo real e mostrou ser eficiente em capturar as características multifractais presentes no tráfego de redes, por meio das simulações apresentadas em [Vieira e Ling 2006], [Vieira e Ling 2009].

Riedi et al. propuseram o modelo multifractal MWM (*Multifractal Wavelet Model*) baseado na *wavelet* de Haar para caracterizar tráfego de redes [Riedi et al. 1999]. O MWM é baseado em uma cascata multiplicativa no domínio *wavelet*. A transformada *wavelet* discreta é usada neste modelo devido a sua capacidade de representação multiescala de sinais [Chui 1992]. Para se gerar um processo segundo o modelo MWM é preciso aplicar a transformada *wavelet* discreta (DWT – *Discrete Wavelet Transform*) ao tráfego de rede, calcular os momentos de segunda ordem dos coeficientes *wavelet* em cada escala, a média e a variância dos coeficientes na escala de maior resolução e calcular p_i , variável usada para capturar o decaimento de energia dos coeficientes *wavelet* em escala. O MWM aproxima com eficiência as propriedades do fluxo de tráfego original em relação à distribuição marginal (produz distribuição aproximadamente lognormal) e sua estrutura de correlação; tendo grande destaque na modelagem de tráfego de redes [Riedi et al. 1999], [Ribeiro et al. 2000].

No MWM, um sinal $C(t)$ positivo, estacionário e com longa dependência entre as amostras é representado no domínio *wavelet*. Assim, seja $C^{(n)}[k]$ um sinal discreto no tempo e uma aproximação de $C(t)$ na resolução de 2^{-n} , onde n é a variável relacionada à escala de tempo. Utilizando a *wavelet* de Haar, o processo discreto $C^{(n)}[k]$ assume valores que correspondem à integral de $C(t)$ no intervalo $[k2^{-n}, (k+1)2^{-n}]$. Estes processos podem ser matematicamente descritos pela seguinte equação:

$$C^{(n)}[k] = \int_{k2^{-n}}^{(k+1)2^{-n}} C(t)dt = 2^{-n/2} U_{n,k} \quad (4.7)$$

Para a *wavelet* de Haar, os coeficientes de escala $U_{j,k}$ e os coeficientes da transformada *wavelet* $W_{j,k}$ podem ser recursivamente calculados, onde a simples restrição $|W_{j,k}| \leq U_{j,k}$ garante que o processo resultante $U_{j,k}$ seja positivo [Riedi et al. 1999].

Neste modelo, pode-se relacionar o deslocamento k_j de um coeficiente de escala ao deslocamento de um de seus dois descendentes diretos k_{j+1} por meio de $k_{j+1} = 2k_j + k'_j$, onde $k'_j = 0$ corresponde ao descendente levogiro da cascata e $k'_j = 1$ o descendente dextrogiro da cascata. A Figura 4.4 ilustra a cascata MWM no domínio *wavelet*. Assim, é possível escrever os coeficientes de escala e os coeficientes *wavelet* do MWM como:

$$U_{j,k_j} = 2^{-j/2} U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} [1 + (-1)^{k'_i} A_{i,k_i}] \quad (4.8)$$

$$W_{j,k_j} = 2^{-j/2} A_{j,k_j} U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} [1 + (-1)^{k'_i} A_{i,k_i}] \quad (4.9)$$

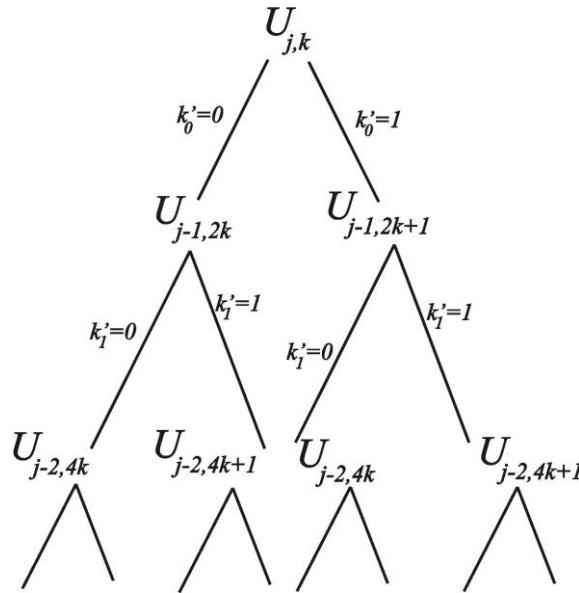


Figura 4.4. Cascata formada pelos coeficientes de escala $U_{j,k}$ [Crouse et al. 2000].

No MWM assume-se que, em cada escala j , os multiplicadores $A_{j,k}$, $k = 0, 1, \dots, 2^{j-1}$, são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d) de acordo com alguma variável aleatória $A_j \in [-1, 1]$, onde A_j representa o vetor de multiplicadores $A_{j,k}$ na escala j e para todos os valores de k . Então, fazendo $j = n$ em (4.8) e (4.9), e fazendo $k = k_n$ em (4.7), tem-se:

$$C^{(n)}[k] = 2^{-n} U_{0,0} \prod_{i=0}^{n-1} [1 + A_i] \quad (4.10)$$

Posteriormente, os momentos de $C^{(n)}[k]$ podem ser calculados de (4.10) por meio da seguinte equação:

$$E[C^{(n)}[k]^q] = E[U_{0,0}^q] \prod_{j=0}^{n-1} E\left[\left(\frac{1+A_j}{2}\right)^q\right] \quad (4.11)$$

Assim, processos multifractais podem ser definidos por uma lei de escala para os momentos estatísticos dos processos de incrementos sobre intervalos de tempo finitos.

4.4 CASCATA MULTIFRACTAL COM MODELAGEM

AUTORREGRESSIVA PARA OS MULTIPLICADORES (CMAM)

Nesta seção, o modelo multifractal CMAM (Cascata Multifractal com Modelagem Autorregressiva para os Multiplicadores) é proposto. Para tanto, são apresentados conceitos sobre processos autorregressivos, um método para estimação de parâmetros destes processos e o algoritmo de síntese do processo CMAM.

4.4.1 Processos autorregressivos

Motivados pelas características de um processo autorregressivo, como, por exemplo, sua estacionariedade, assumiu-se que os multiplicadores de uma cascata multiplicativa multifractal podem ser modelados por processos autoregressivos em cada escala.

Suponha que $\{\varepsilon_t\}$ seja um processo aleatório com média zero e variância σ_t^2 . Um processo $\{X_t\}$ é chamado de processo autorregressivo (AR – *AutoRegressive*) de ordem p ou AR(p) se [Ehlers 2003]:

$$X_t = \alpha_1 X_{t-1} + \dots + \alpha_p X_{t-p} + \varepsilon_t \quad (4.12)$$

onde $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ são os parâmetros do modelo autorregressivo e $X_{t-1}, \dots, X_{t-p}$ os valores passados de X_t .

Trata-se de um processo de regressão múltipla, onde os valores passados de X_t são utilizados na estimação do valor atual de X_t . Assim, processos AR podem ser usados como modelos se

for razoável assumir que o valor atual de uma série temporal depende de amostras passadas mais um erro aleatório ε_t [Ehlers 2003], característica esta que pode ser observada nos multiplicadores das cascatas multiplicativas associadas às séries de tráfego analisadas.

A ordem do processo está associada ao número de regressões realizadas para obtenção do valor de X_t , de forma que um processo de ordem 1, AR(1), pode ser escrito como:

$$X_t = \alpha X_{t-1} + \varepsilon_t \quad (4.13)$$

Note que existe uma estrutura Markoviana no processo AR(1) no sentido de que X_t depende de X_{t-1} , e não de valores passados como X_{t-2} , X_{t-3} ,... . Fazendo substituições sucessivas em (4.13), tem-se:

$$\begin{aligned} X_t &= \alpha(\alpha X_{t-2} + \varepsilon_{t-1}) + \varepsilon_t \\ X_t &= \alpha^2 X_{t-2} + \alpha \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \\ X_t &= \alpha^3 X_{t-3} + \alpha^2 \varepsilon_{t-2} + \alpha \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \\ X_t &= \alpha^{r+1} X_{t-r-1} + \sum_{j=0}^r \alpha^j \varepsilon_{t-j} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Se X_t for estacionário com variância finita σ_X^2 pode-se escrever:

$$E \left\{ \left(X_t - \sum_{j=0}^r \alpha^j \varepsilon_{t-j} \right)^2 \right\} = \alpha^{2r+2} E \{ X_{t-r-1}^2 \} = \alpha^{2r+2} \sigma_X^2 \quad (4.15)$$

e se $|\alpha| < 1$, tem-se que $\alpha^{2r+2} \rightarrow 0$ quando $r \rightarrow \infty$. Portanto, esta condição nos permite escrever X_t como o seguinte processo MA (*Moving Average* – Média Móvel) infinito:

$$X_t = \varepsilon_t + \alpha \varepsilon_{t-1} + \alpha^2 \varepsilon_{t-2} + \dots \quad (4.16)$$

E assim $|\alpha| < 1$ é uma condição suficiente para que X_t seja estacionário. Neste caso, reescrevendo o processo k períodos à frente, tem-se:

$$X_{t+k} = \varepsilon_{t+k} + \alpha \varepsilon_{t+k-1} + \dots + \alpha^k \varepsilon_{t+k-k} + \dots \quad (4.17)$$

O efeito de ε_t sobre X_{t+k} diminui à medida que k aumenta e por isso é chamado efeito transitório.

Pode-se também usar o operador de retardo $B = X_{t-1}/X_t$, reescrevendo a equação (4.13) como:

$$(1 - \alpha B)X_t = \varepsilon_t \quad (4.18)$$

ou, equivalentemente:

$$\begin{aligned} X_t &= \frac{1}{(1 - \alpha B)} \varepsilon_t = (1 + \alpha B + \alpha^2 B^2 + \dots) \varepsilon_t \\ &= \varepsilon_t + \alpha \varepsilon_{t-1} + \alpha^2 \varepsilon_{t-2} + \dots \end{aligned}$$

Escrevendo o processo AR(1) neste formato de MA infinito observa-se que a sua média e variância são dados por [Ehlers 2003]:

$$E(X_t) = 0 \text{ e } \text{Var}(X_t) = \sigma_t^2 (1 + \alpha^2 + \alpha^4 + \dots) = \frac{\sigma_t^2}{1 - \alpha^2}$$

A função de autocovariância pode ser obtida usando os resultados acima e para $|\alpha| < 1$ pode-se mostrar que [Ehlers 2003]:

$$\gamma(k) = E(X_t X_{t+k}) = \alpha^k \frac{\sigma_t^2}{1 - \alpha^2} = \alpha^k \sigma_x^2 \quad (4.19)$$

Portanto, a partir de (4.19), nota-se que, para $k = 0, 1, 2, \dots$, $\gamma(k)$ não depende de t . Como a média e a variância também não dependem de t , pois são constantes, o processo AR(1) com $|\alpha| < 1$ é estacionário.

A estacionariedade de um processo autorregressivo de ordem 1 constitui uma característica interessante para o modelo CMAM, visto que se pretende modelar os multiplicadores da cascata através de modelos AR(1). Se as propriedades estatísticas dos multiplicadores não variam com o tempo, condição de estacionariedade, é possível modelar os multiplicadores para diversas escalas de tempo, mantendo assim as características do processo de tráfego modelado pela cascata a cada escala.

Testes de modelagem dos multiplicadores com processos autorregressivos de ordens superiores também foram feitos e não apresentaram melhorias expressivas que pudessem justificar o uso de ordens superiores. O uso de ordens superiores implica aumento no esforço computacional para a geração das séries sintéticas e dificuldades para representação das séries reais em escalas mais grosseiras da cascata (onde o nível de detalhes, e consequentemente, o número de amostras é menor). Isto ocorre porque um processo AR(p) precisa de no mínimo p amostras passadas para ser sintetizado.

4.4.2 Estimação de parâmetros para modelos autorregressivos

A descrição de um processo autorregressivo de ordem 1, como apresentado em (4.13), depende do cálculo do parâmetro α . Um método muito utilizado para estimação dos parâmetros de um processo autorregressivo é o método dos mínimos quadrados [Björk 1996].

Estrutura-se o processo autorregressivo na forma de um modelo de regressão ordinária, como em (4.12), ou mais especificamente como em (4.13), e os parâmetros deste modelo são estimados pelo método dos mínimos quadrados. Em [Neumaier e Schneider 2001] e [Schneider e Neumaier 2001], os autores apresentam um algoritmo utilizando o método dos mínimos quadrados para estimação de parâmetros. Neste trabalho, este algoritmo baseado no método dos mínimos quadrados foi utilizado para estimação de parâmetros dos processos autorregressivos envolvidos. Basicamente, em um problema de otimização onde o método dos mínimos quadrados é aplicado, busca-se encontrar uma função cujos valores correspondentes se aproximem dos valores reais de uma função específica, que se deseja descrever. Se esta função for definida como $f(x) = y_i$ e os valores da curva de ajuste for definida como $g(x) = a + bx_i$, então o método dos mínimos quadrados é aplicado com o objetivo de minimizar as diferenças (ou seja, os erros de ajuste) entre $f(x)$ e $g(x)$, minimizando o quadrado da diferença entre eles. Assim, para um conjunto S de p pontos de valores possíveis de $f(x)$, onde $i \in [0, p]$, tem-se [Björk 1996]:

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^p (y_i - (a + bx_i))^2 \quad (4.20)$$

onde os valores de a e b são encontrados de forma que $S(a, b)$ seja minimizado.

4.4.3 Modelo CMAM

Nesta subseção é apresentado o algoritmo de síntese do processo CMAM. O algoritmo proposto de síntese de tráfego de redes faz uso do valor agregado de tráfego na última escala da cascata e da densidade de probabilidade dos multiplicadores estimada através de processos autorregressivos.

A partir das equações (4.5) e (4.6) pode-se representar a estrutura de construção da cascata multiplicativa, descrita nas seções 4.1 e 4.2, através da Figura 4.5:

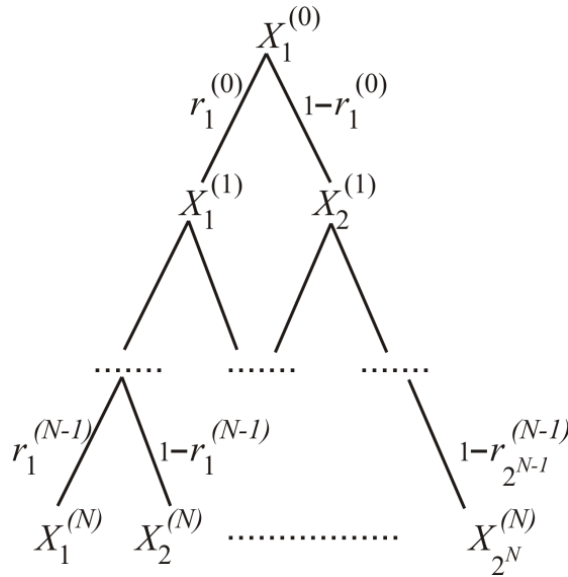


Figura 4.5. Processo de construção de uma cascata multiplicativa.

Assim, o algoritmo de síntese do processo CMAM consiste basicamente dos seguintes passos:

Algoritmo Proposto 1: Síntese do processo CMAM

- 1) Calcula-se o valor agregado das amostras de tráfego obtidas na última escala N ;
- 2) Estimam-se os multiplicadores usando a equação (4.6);
- 3) Calcula-se, através do método dos mínimos quadrados apresentado em [Neumaier e Schneider 2001], os parâmetros do modelo de regressão para cada escala da cascata;
- 4) Estima-se a distribuição dos multiplicadores em cada escala através de um processo autorregressivo de ordem 1;
- 5) Com os multiplicadores disponíveis, geram-se amostras de um processo multifractal por meio das equações (4.5) e (4.6) e por meio do procedimento descrito pela Figura 4.5.

4.5 VALIDAÇÃO DO MODELO MULTIFRACTAL PROPOSTO

Nesta seção é apresentada a validação do modelo multifractal CMAM. Para tanto, primeiramente, na subseção 4.5.1 são apresentadas características das séries de tráfego utilizadas e são apresentadas também estatísticas do processo gerado pelo modelo CMAM e do tráfego real, assim como de outros modelos multifractais de tráfego. Nas subseções

subsequentes são apresentados resultados de simulações em termos de função de autocorrelação e espectro multifractal. Além disso, para verificar o desempenho do modelo CMAM em representar o tráfego real, foram realizadas simulações para analisar a perda de *bytes* em um sistema constituído de um enlace com *buffer* finito alimentado pelo modelo CMAM.

4.5.1 Estatísticas de séries de tráfego de redes sem fio e de tráfego de vídeo

Quando se fala em tráfego de vídeo, duas maneiras de abordar a modelagem das séries de tráfego de vídeo MPEG-4 podem ser destacadas: por meio de séries de GoPs e por meio de séries de quadros [Seeling et al. 2004]. Alguns trabalhos apresentam modelos distintos para estes dois tipos de tráfego [Huang et al. 1995], [Seeling et al. 2004], dentre estes modelos destacam-se aqueles baseados em cascatas multiplicativas [Fei e Zhimei 2003]. Com relação aos modelos baseados em cascata, um fator importante é a modelagem dos multiplicadores da cascata em função da escala [Huang et al. 1995]. Uma modelagem mais precisa dos multiplicadores pode implicar em uma maior eficiência para o modelo como um todo. Avaliações deste tipo com relação aos multiplicadores podem ser encontradas em [Riedi et al. 1999], [Krishna et al. 2003], [Vieira e Ling 2008].

O modelo proposto neste capítulo é comparado com outros modelos multifractais, mostrando assim sua eficiência. Destaca-se a capacidade do modelo proposto em estimar estatisticamente os multiplicadores, em todas as escalas, por meio de um modelo autorregressivo de ordem 1 e ainda sua eficiência em modelar tanto o tráfego representado por séries de quadros como por séries de GoPs. A utilização de um modelo autorregressivo de ordem 1 implica em menor esforço computacional, medido em termos de tempo de processamento.

As simulações e testes foram realizados tanto para série de GoPs como para série de quadros de cada vídeo. Para tanto, foi utilizada como ferramenta computacional o *software* Matlab da MathWorks®. Da mesma forma foram conduzidas simulações para avaliar o desempenho do modelo CMAM em representar o tráfego de redes sem fio, e para tanto são apresentados os resultados de simulações para duas séries de tráfego de redes sem fio, disponíveis em [USC 2006], e chamadas neste trabalho de USCtrace01 e USCtrace02, cujas características multifractais foram averiguadas no Capítulo 3.

O desempenho do modelo proposto foi comparado com o do modelo multifractal VVGM (*Variable Variance Gaussian Model*) [Krishna et al. 2003], que se destaca por sua

simplicidade. Ele também foi comparado com o MWM (*Multifractal Wavelet Model*) [Riedi et al. 1999], que apresenta um ótimo desempenho para o tráfego multifractal [Riedi et al. 1999], [Ribeiro et al. 2000], [Vieira e Ling 2008]. Especificamente para o tráfego de vídeo MPEG-4 VBR e para as séries de tráfego de redes sem fio consideradas, averiguou-se o desempenho do modelo proposto em comparação a estes dois importantes modelos.

Resultados das simulações são apresentados a seguir:

A Figura 4.6 apresenta as funções de densidade de probabilidade (*pdf-probability density function*) reais e sintéticas da série de vídeo S.LAMBS. Observa-se que esta série possui uma tendência a ser descrita por uma função lognormal e que o modelo CMAM foi capaz de representar bem este comportamento. Em relação aos modelos VVGM e MWM, o modelo CMAM apresentou desempenho comparável aos demais modelos e em alguns casos, como na Figura 4.6, apresentou desempenho superior ao VVGM, que apresentou valores para densidade de probabilidade mais discrepantes dos dados reais.

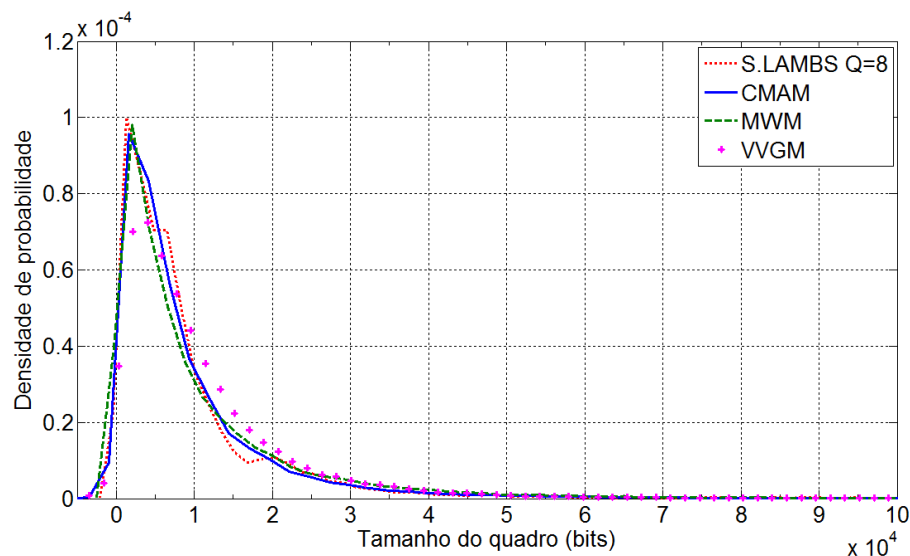


Figura 4.6. Função densidade de probabilidade (*pdf*) – S.LAMBS.

As estatísticas apresentadas nas tabelas seguintes foram obtidas a partir da média de 100 realizações dos processos VVGM, MWM e CMAM. Este número de realizações foi considerado adequado, uma vez que a partir de 100 realizações os resultados obtidos não oscilaram mais, ou seja, a média de 100 realizações e a média de mais de 100 realizações foram praticamente iguais.

A Tabela 4.1 apresenta estatísticas do vídeo S.LAMBS. Observa-se que a média obtida com o modelo CMAM proposto foi a que mais se aproximou da série real e que a variância encontrada com o CMAM é comparável aquela obtida com o MWM e mais próxima do real que o modelo VVGM. Isto pode ser observado através da coluna de erro percentual, que apresenta o erro relativo das estatísticas das séries sintéticas geradas em relação às séries reais.

Tabela 4.1. Média e variância – série de quadros – S.LAMBS.

Quadros (bits)	Média	Erro	Variância	Erro
S.LAMBS	$9,411 \times 10^3$	-	$1,659 \times 10^8$	-
VVGM	$1,006 \times 10^4$	6,84%	$1,033 \times 10^8$	37,77%
MWM	$1,126 \times 10^4$	19,64%	$1,856 \times 10^8$	11,83%
CMAM	$9,280 \times 10^3$	1,40%	$1,456 \times 10^8$	12,26%

Semelhantemente aos resultados obtidos para a série S.LAMBS, foram obtidos resultados para as séries de GoPs e para a série de quadros dos vídeos Lord3 e Matrix1, exibidos nas tabelas subsequentes.

Tabela 4.2. Média e variância – série de GoPs – Lord3.

GoPs (bits)	Média	Erro	Variância	Erro
LORD3	$3,766 \times 10^4$	-	$7,385 \times 10^8$	-
VVGM	$3,003 \times 10^4$	20,27%	$3,675 \times 10^8$	50,24%
MWM	$3,536 \times 10^4$	6,12%	$6,062 \times 10^8$	17,92%
CMAM	$3,707 \times 10^4$	1,57%	$6,955 \times 10^8$	5,83%

Tabela 4.3. Média e variância – série de quadros – Lord3.

Quadros (bits)	Média	Erro	Variância	Erro
LORD3	$2,872 \times 10^3$	-	$9,362 \times 10^6$	-
VVGM	$3,087 \times 10^3$	7,52%	$1,082 \times 10^7$	15,60%
MWM	$2,416 \times 10^3$	16,03%	$6,296 \times 10^6$	32,75%
CMAM	$2,844 \times 10^3$	0,96%	$1,172 \times 10^7$	25,21%

A Tabela 4.2 e a Tabela 4.3 apresentam estatísticas do vídeo Lord3. Na Tabela 4.2 observa-se que as estatísticas do modelo proposto foram as que mais se aproximaram das da série real. Na Tabela 4.3, para a série de quadros, o modelo CMAM foi o que obteve a média mais próxima da média da série real e, além disso, apresentou variância mais próxima da variância da série real do que a obtida por meio do modelo MWM, considerado um modelo com ótimo desempenho em descrever tráfego multifractal [Riedi et al. 1999], [Ribeiro et al. 2000], [Vieira e Ling 2008].

Tabela 4.4. Média e variância- série de GoPs – Matrix1.

GoPs (bits)	Média	Erro	Variância	Erro
MATRIX1	$2,082 \times 10^4$	-	$3,251 \times 10^8$	-
VVGM	$1,763 \times 10^4$	15,31%	$2,743 \times 10^8$	15,63%
MWM	$1,850 \times 10^4$	11,14%	$3,172 \times 10^8$	2,43%
CMAM	$2,284 \times 10^4$	9,74%	$3,051 \times 10^8$	6,15%

Tabela 4.5. Média e variância – série de quadros – Matrix1.

Quadros (bits)	Média	Erro	Variância	Erro
MATRIX1	$2,626 \times 10^3$	-	$1,595 \times 10^7$	-
VVGM	$3,589 \times 10^3$	36,69%	$8,513 \times 10^6$	46,62%
MWM	$3,070 \times 10^3$	16,93%	$9,896 \times 10^6$	37,95%
CMAM	$3,319 \times 10^3$	26,41%	$2,043 \times 10^7$	28,08%

A Tabela 4.4 e a Tabela 4.5 apresentam estatísticas do vídeo Matrix1. Na Tabela 4.4 observa-se que as estatísticas do modelo proposto são próximas as da série real. Na Tabela 4.5, para a série de quadros, o modelo CMAM foi o que obteve a variância mais próxima do real e média mais próxima do real do que o modelo VVGM.

Resultados semelhantes foram obtidos para as séries de tráfego de redes sem fio consideradas. Observa-se a partir da Tabela 4.6 e da Tabela 4.7 que, comparativamente aos outros modelos considerados, resultados mais próximos aos das séries reais foram obtidos utilizando o modelo CMAM.

Tabela 4.6. Média e variância – USCtrace01.

Série (<i>bytes</i>)	Média	Erro	Variância	Erro
USCtrace01	244,97		$2,055 \times 10^5$	
VVGM	231,51	5,49%	$6,622 \times 10^4$	67,78%
MWM	205,67	16,04%	$1,535 \times 10^5$	25,29%
CMAM	241,05	1,60%	$7,430 \times 10^4$	63,85%

Tabela 4.7. Média e variância– USCtrace02.

Série (<i>bytes</i>)	Média	Erro	Variância	Erro
USCtrace02	203,51		$3,707 \times 10^5$	
VVGM	268,26	31,82%	$1,415 \times 10^5$	61,84%
MWM	261,73	28,61%	$5,174 \times 10^5$	39,58%
CMAM	242,95	19,38%	$2,570 \times 10^5$	30,66%

Desta forma é possível afirmar que o modelo CMAM, quando comparado aos modelos VVGM e MWM, de uma forma geral, apresentou estatísticas como média e variância mais próximas do real, tanto para o tráfego de redes sem fio quanto para as séries de GoPs e de quadros do tráfego de vídeo MPEG-4. No entanto, estas estatísticas não constituem a única forma de avaliar o desempenho de um modelo em representar o tráfego real. As subseções seguintes apresentam outros meios de avaliar o desempenho do modelo CMAM proposto em descrever as características do tráfego real.

4.5.2 A função de autocorrelação

A função de autocorrelação (ACF-AutoCorrelation Function) e o coeficiente de correlação refletem as estatísticas de segunda ordem de uma série; fornecendo uma idéia a respeito da longa-dependência nos dados. O coeficiente de correlação pode ser visto como a covariância normalizada de um processo.

Seja uma série $y(t)$ com média μ_t e desvio-padrão σ_t , e a mesma série deslocada no tempo $y(t+k)$ com média μ_{t+k} e desvio-padrão σ_{t+k} . O coeficiente de correlação para este processo $y(t)$ é dado por:

$$\rho(k) = E[(y(t+k) - \mu_{t+k})(y(t) - \mu_t)] / \sigma_{t+k} \sigma_t \quad (4.21)$$

Uma série gerada sinteticamente a partir de um modelo específico deve apresentar um decaimento da função de autocorrelação próxima da série real, pois este é um indício de que a série sintética possui características relacionadas à dependência entre amostras semelhantes à série real.

A seguir são apresentadas as ACFs obtidas a partir das séries sintéticas geradas a partir do modelo proposto e dos outros métodos considerados, tanto para as séries de tráfego de vídeo como para as séries de tráfego de redes sem fio.

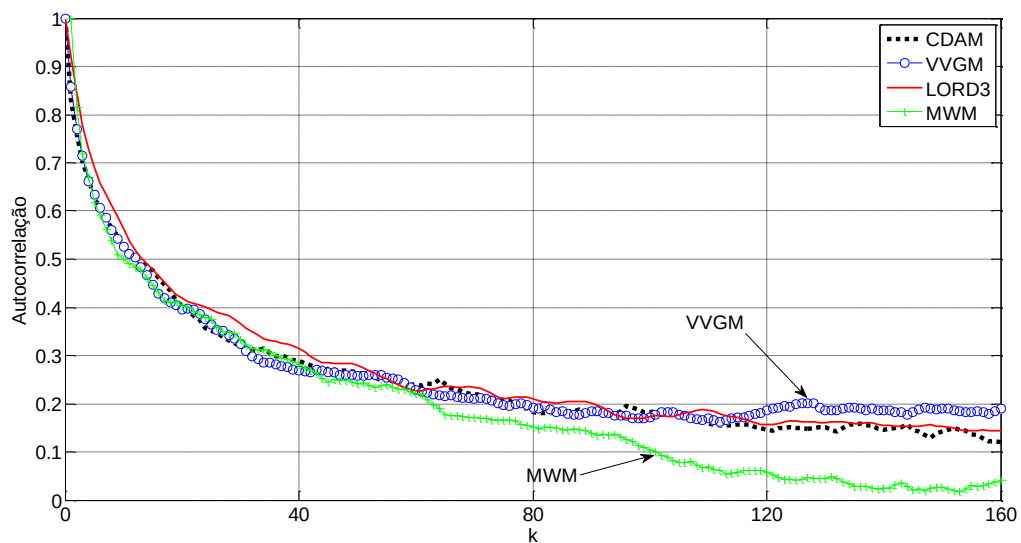


Figura 4.7. Função de autocorrelação – Série de GoPs – Lord3.

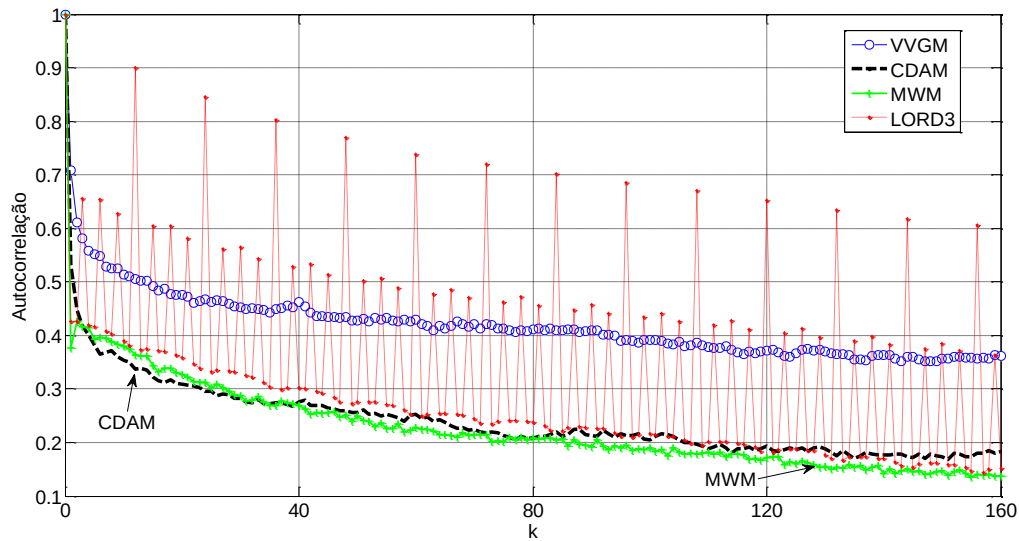


Figura 4.8. Função de autocorrelação – Série de Quadros – Lord3.

A Figura 4.7 mostra a função de autocorrelação para a série de GoPs do vídeo Lord3, assim como para as séries obtidas segundo os modelos CMAM, MWM e VVGM. Observa-se que o modelo CMAM descreve bem a função de autocorrelação, pois dentre os modelos comparados foi a que melhor representou essa característica para o traço real.

Na Figura 4.8, observa-se que a ACF da série real apresentou um comportamento periódico que as séries sintéticas não foram capazes de representar. No entanto, demonstra-se que o modelo CMAM possui eficiência semelhante também para a série de quadros, pois descreve o decaimento da função de autocorrelação (ACF) do tráfego com desempenho comparável ao importante modelo MWM. Assim, a eficiência do modelo CMAM em descrever a ACF da série de GoPs, assim como a série de quadros é destacada. Além disso, ressalta-se que as séries reais utilizadas apresentam um decaimento lento da função de autocorrelação e que este comportamento remete a dependência de longa duração entre as amostras de tráfego. O processo CMAM gerado foi capaz de descrever esta característica e, portanto, pode ser utilizado para representar o comportamento de longa dependência das séries reais de tráfego de vídeo. Resultados semelhantes foram obtidos para outras séries de tráfego de vídeo analisadas.

A Figura 4.9 e a Figura 4.10 apresentam os resultados coletados de decaimento da função de autocorrelação para as séries de tráfego de redes sem fio em comparação aos outros modelos considerados.

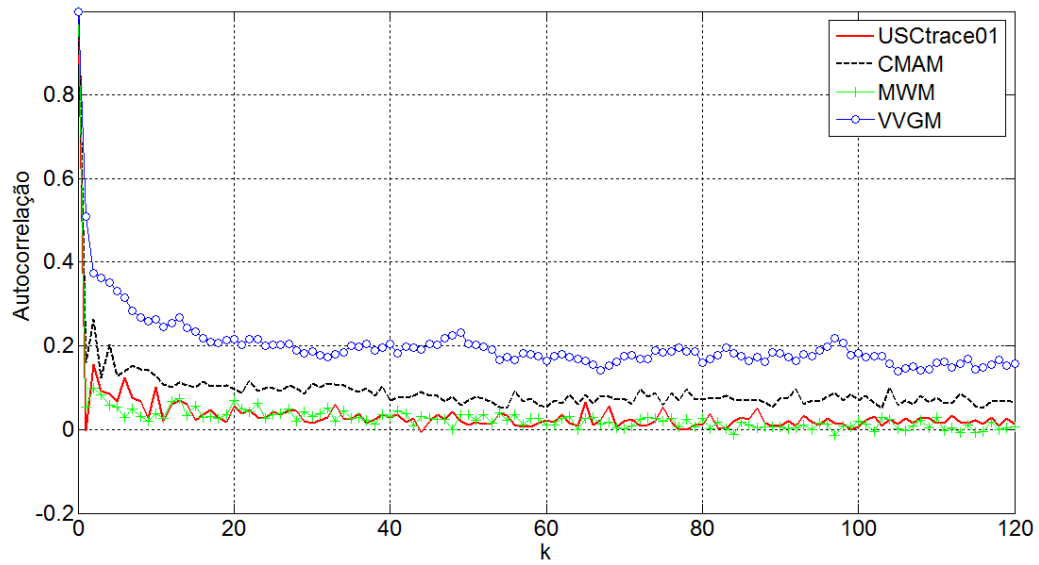


Figura 4.9. Função de autocorrelação – Série USCtrace01.

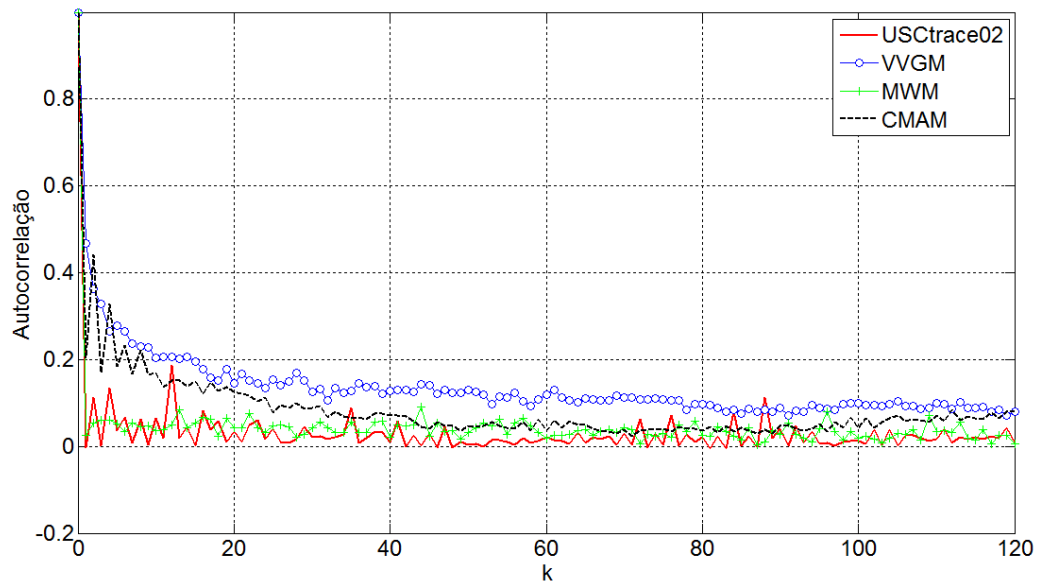


Figura 4.10. Função de autocorrelação – Série USCtrace02.

Observa-se a partir destas figuras que o modelo CMAM é superior ao modelo VVGM em representar o decaimento da função de autocorrelação, no entanto resultados mais próximos à ACF da série real foram obtidos por meio do modelo MWM.

De uma forma geral, ao serem analisadas as ACFs apresentadas para as séries de vídeo MPEG-4 (série de quadros e série de GoPs) e para as séries de tráfego de redes sem fio, conclui-se que o modelo CMAM proposto é superior ao VVGM e comparável ao MWM em termos de representação do decaimento da função de autocorrelação. No entanto, o modelo CMAM é mais simples que o modelo MWM, pois se baseia apenas no processo de construção

da cascata multiplicativa e em processos autorregressivos de ordem 1. Por outro lado, o modelo MWM, representado no domínio *wavelet*, necessita de uma quantidade maior de parâmetros para a síntese de séries temporais.

4.5.3 Espectro multifractal

Através da transformada de Legendre o espectro multifractal foi calculado para os processos gerados segundo os modelos CMAM, MWM e VVGM.

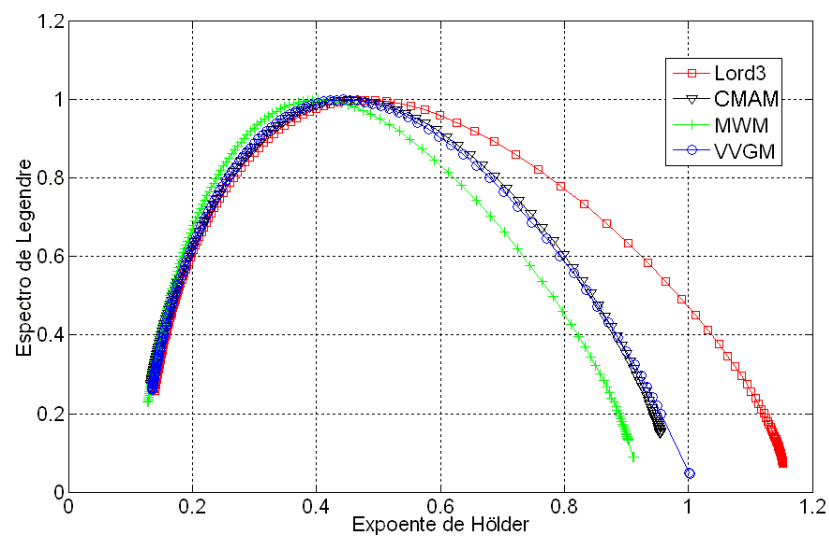


Figura 4.11. Espectro multifractal - Série de GoPs – Lord3.

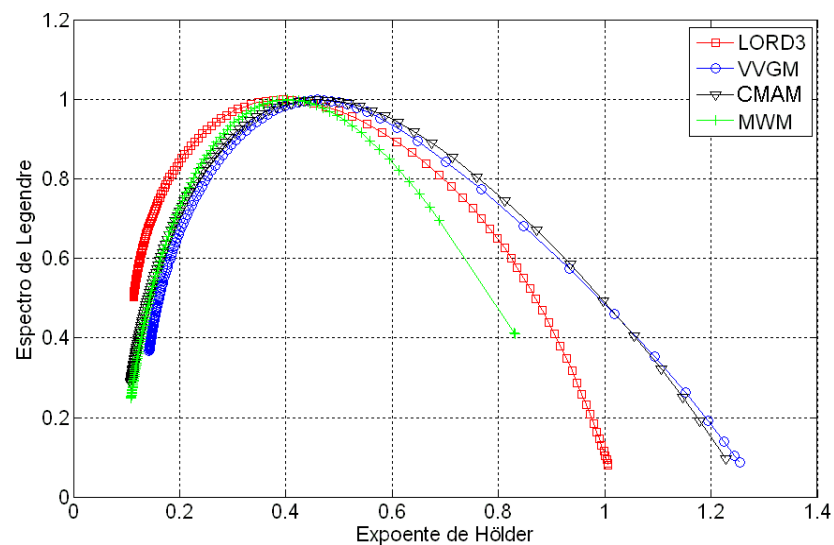


Figura 4.12. Espectro multifractal - Série de Quadros – Lord3.

A Figura 4.11 e a Figura 4.12 apresentam o espectro de Legendre das séries de GoPs e quadros do vídeo Lord3. O espectro de Legendre representado na Figura 4.11, e também na Figura 4.12, é largo, o que é mais uma evidência de ‘multifractalidade’ do tráfego de vídeo [Pavlov e Anishchenko 2007]. Pode-se observar que o modelo CMAM é comparável ao modelo VVGM e superior ao MWM em termos de representação do espectro multifractal da Figura 4.11 e por consequência a ‘multifractalidade’ das séries de vídeo reais quando comparado com outros modelos. Na Figura 4.12, observa-se que o modelo CMAM tem desempenho comparável a outros modelos.

A Figura 4.13 e a Figura 4.14 também apresentam o espectro de Legendre, mas para as séries de GoPs e quadros do vídeo Matrix1. Mais uma vez constata-se, por estas figuras, que o espectro de Legendre das séries de vídeo é largo e que o modelo proposto é capaz de representá-lo de forma igual ou superior aos modelos comparados.

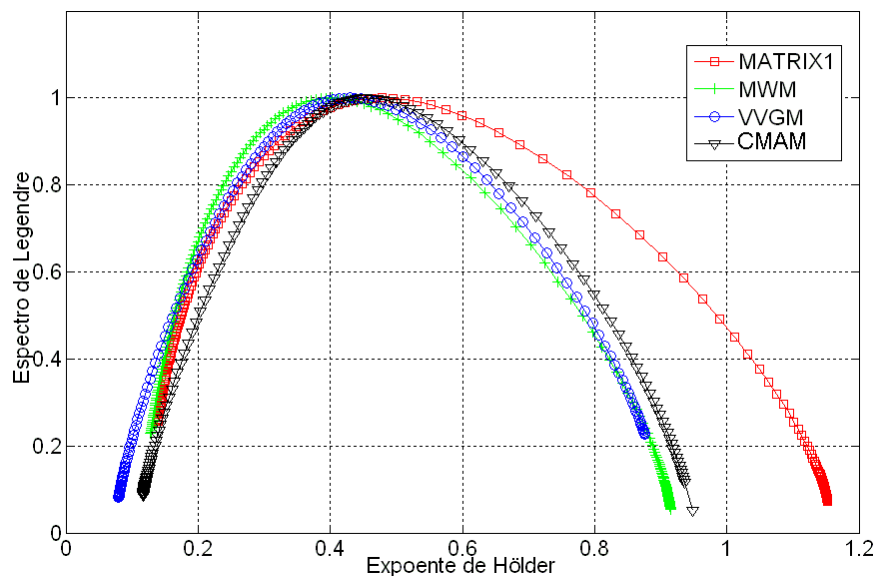


Figura 4.13. Espectro multifractal - Série de GoPs – Matrix1.

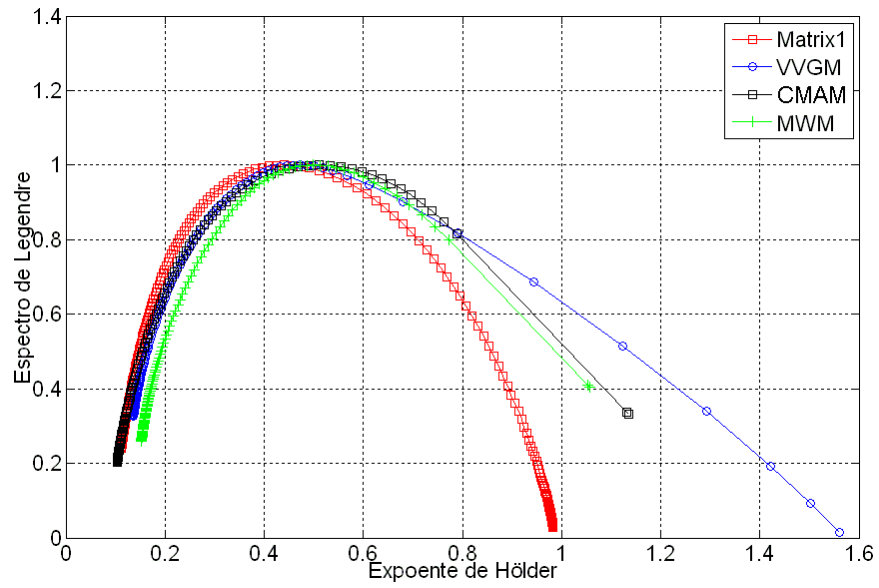


Figura 4.14. Espectro multifractal - Série de Quadros – Matrix1.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para as séries de tráfego de redes sem fio.

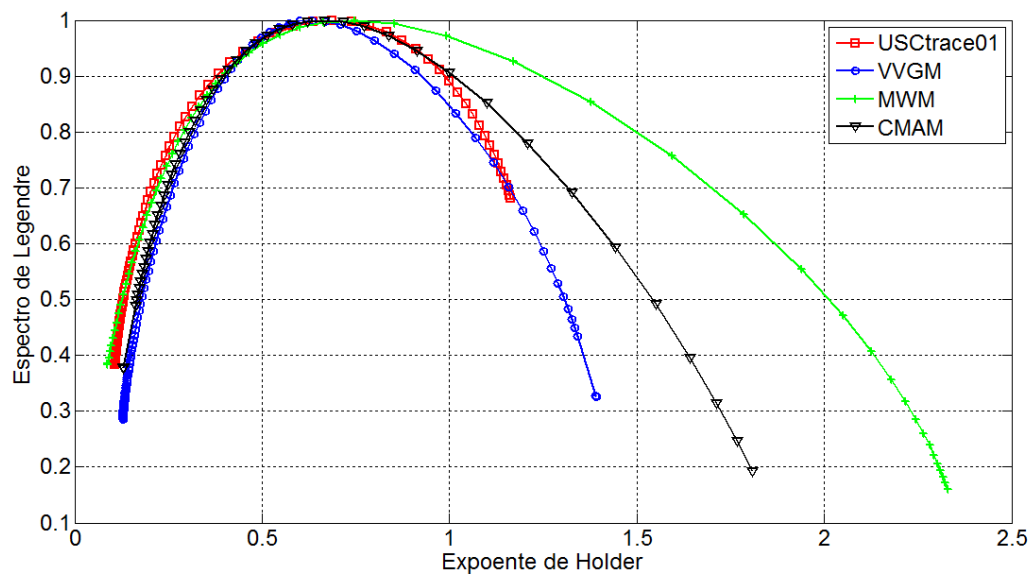


Figura 4.15. Espectro multifractal – Série USCTrace01.

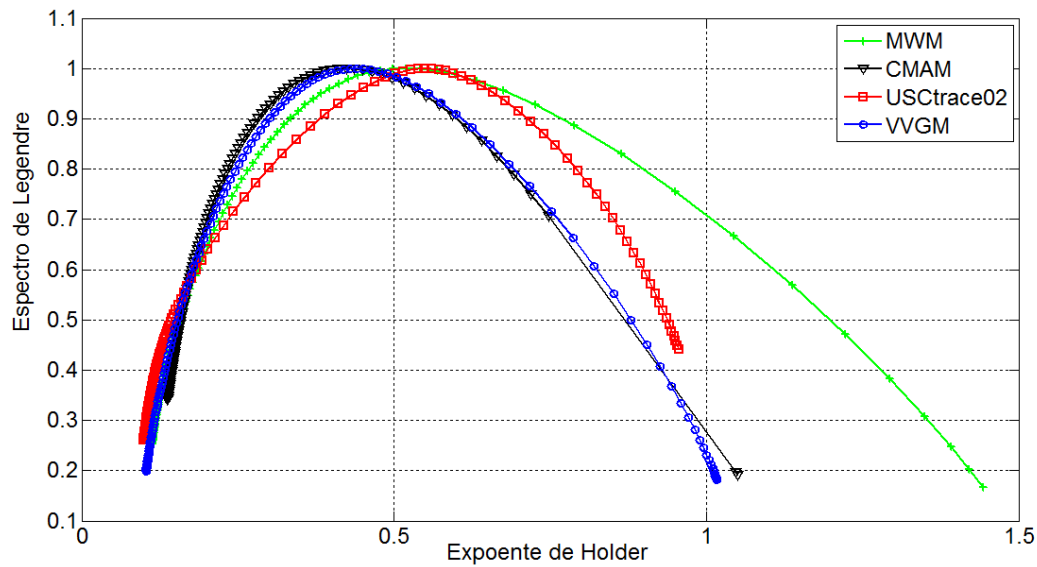


Figura 4.16. Espectro multifractal – Série USCtrace02.

Observa-se, a partir da Figura 4.15 que o espectro multifractal da série sintética gerada segundo o modelo CMAM é largo, apresentando, portanto, uma multiplicidade de valores para os expoentes de Hölder compatível com a série real e apresentando também uma concavidade mais próxima da série real quando comparada aos modelos VVGM e MWM. Já a Figura 4.16 apresenta para o modelo CMAM um espectro comparável àquele gerado segundo o modelo VVGM, no entanto, nenhum dos três modelos foi capaz de representar satisfatoriamente o comportamento do espectro multifractal desta série real de rede sem fio, uma vez que a média dos expoentes de Hölder é bem diferente daquela obtida por meio do tráfego real.

Conclui-se, de uma forma geral, a partir das figuras apresentadas nesta subseção que o modelo CMAM apresenta desempenho comparável aos modelos VVGM e MWM em termos de representação do espectro multifractal.

4.5.4 Testes de verificação do comportamento de fila

Considerou-se como modelo de simulação de um enlace, um servidor com *buffer* finito sendo alimentado pelo processo CMAM, a fim de avaliar o desempenho do modelo proposto em descrever o comportamento de fila no *buffer* para séries reais de tráfego de redes, mais especificamente séries de tráfego de redes sem fio e séries de tráfego de vídeo MPEG-4. Para

tanto, alocou-se, como taxa de transmissão, a média da série real considerada e foi analisada a porcentagem de perda em função da variação do tamanho do *buffer*, ou seja, dado um tamanho de *buffer* x , estimou-se a probabilidade de perda de *bytes* $P(Q > x)$, sendo Q o processo de tamanho da fila no *buffer*, pela seguinte expressão [Rolls et al. 2005]:

$$P(Q > x) \cong N_x / N_t \quad (4.22)$$

onde N_x corresponde ao número de *bytes* descartados que não podem ser armazenados no *buffer* de tamanho x e N_t é o número total de *bytes* a ser atendido.

A Figura 4.17 e a Figura 4.18 mostram a relação entre a taxa de perda de *bytes* e o tamanho do *buffer* para as séries de GoPs e de quadros do vídeo Lord3.

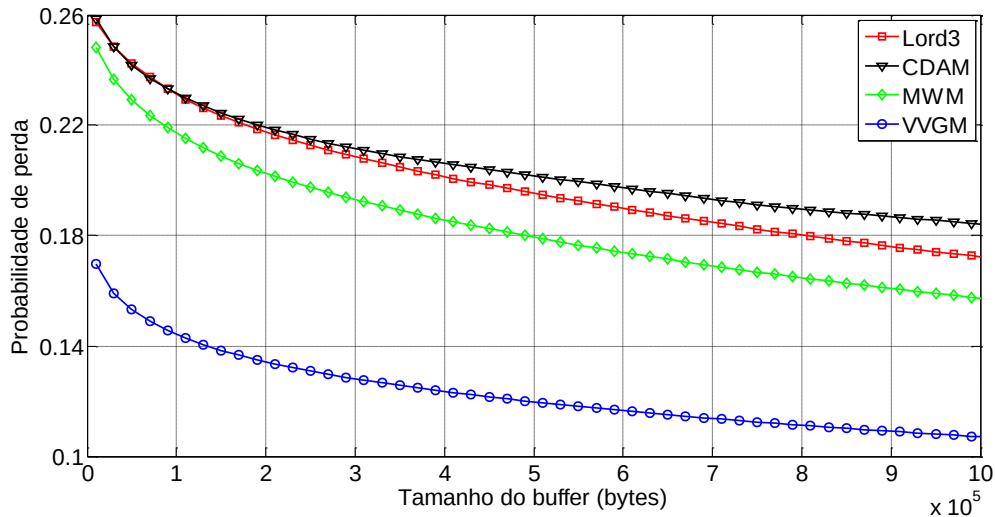


Figura 4.17. Probabilidade de perda - Série de GoPs – Lord3.

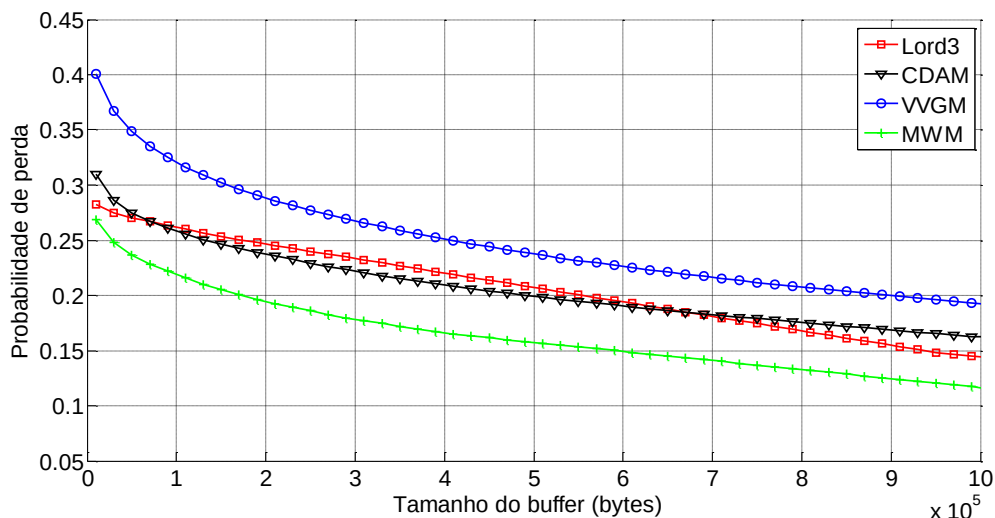


Figura 4.18. Probabilidade de perda - Série de Quadros – Lord3.

Da mesma forma, a Figura 4.19 e a Figura 4.20 mostram a relação entre a probabilidade de perda de *bytes* estimada (taxa de perda) e o tamanho do *buffer* para as séries de GoPs e de quadros do vídeo Matrix1.

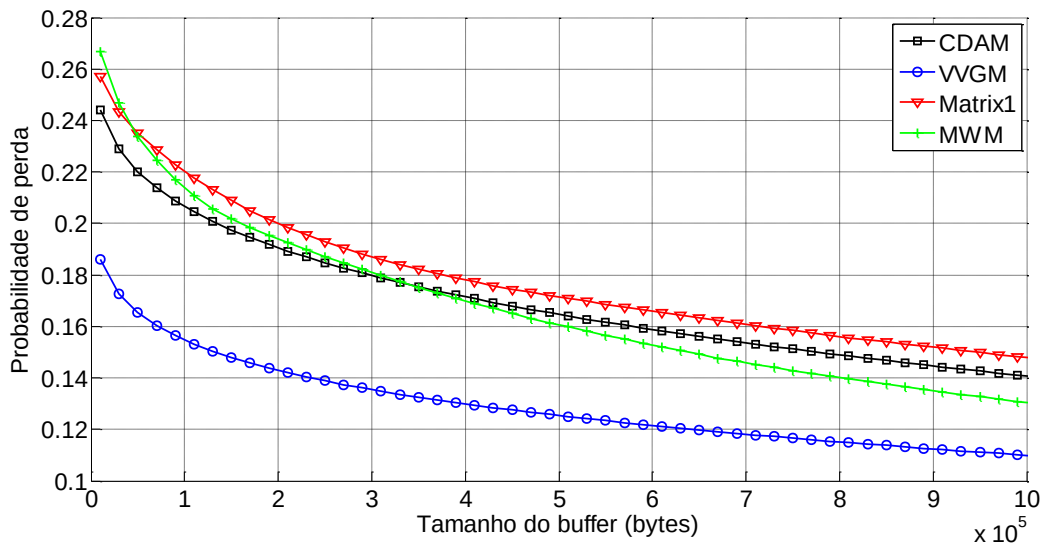


Figura 4.19. Probabilidade de perda - Série de GoPs – Matrix1.

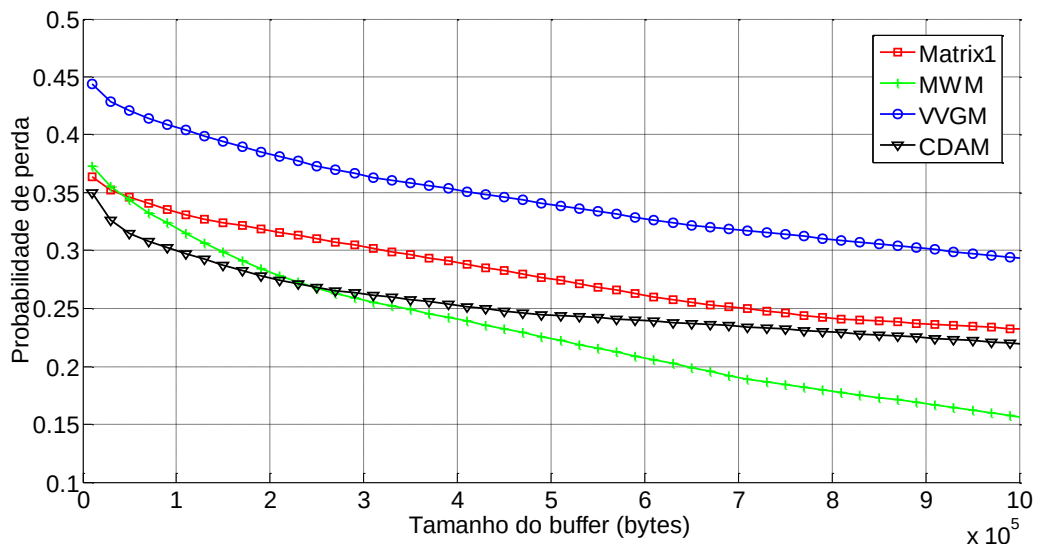


Figura 4.20. Probabilidade de perda - Série de Quadros – Matrix1.

Nota-se que o modelo CMAM apresenta melhores resultados (resultados mais próximos aos da simulação com a série de tráfego real) que os modelos comparados, tanto para a série de GoPs quanto para a série de quadros. Observa-se também que os resultados dos outros

modelos apresentaram comportamentos distintos para as séries de GoPs e quadros. O VVGM subestimou em muito a probabilidade de perda da série de GoPs, no entanto apresentou resultado oposto (superestimação) para a série de quadros. Já o MWM que apresentou bom resultado para a série de GoPs, por sua vez teve o desempenho degradado, subestimando a probabilidade de perda da série de quadros. Em ambos os casos, o modelo proposto apresentou desempenho superior ao VVGM e ao MWM, o que comprova sua eficiência. A fim de eliminar quaisquer erros devido à aleatoriedade dos processos envolvidos, os resultados apresentados foram obtidos a partir da média de 100 realizações.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para as séries de tráfego de redes sem fio.

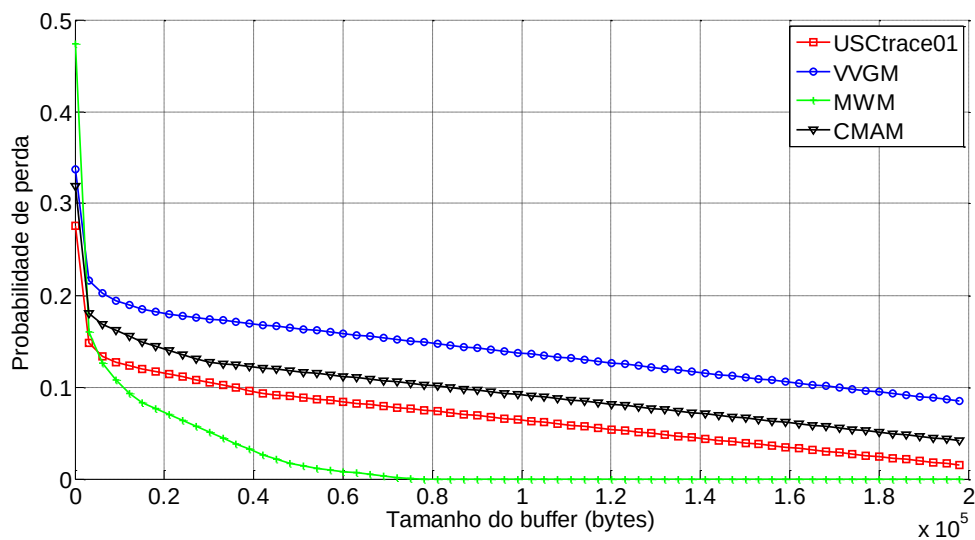


Figura 4.21. Probabilidade de perda – Série USCTrace01.

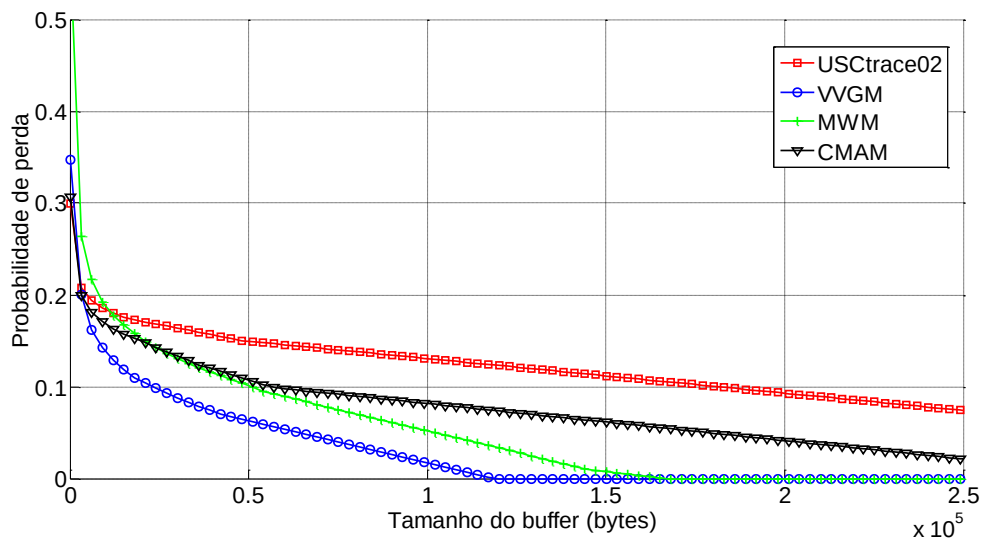


Figura 4.22. Probabilidade de perda – Série USCTrace02.

Observa-se a partir da Figura 4.21 e também a partir da Figura 4.22 que a simulação em uma fila com servidor único trouxe melhores resultados utilizando o modelo CMAM proposto, mostrando que tanto para a modelagem de vídeo como para a modelagem do tráfego de redes sem fio, o modelo proposto é consistente. Ou seja, obtêm-se estimativas mais precisas para a probabilidade de perda para o tráfego de redes ao estimar os multiplicadores da cascata multifractal por meio de um processo autorregressivo.

4.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos relacionados às técnicas de modelagem do tráfego de redes. Alguns importantes modelos multifractais presentes na literatura foram descritos, como o modelo VVGM [Krishna et al. 2003] e o modelo MWM [Riedi et al. 1999]. Um modelo multifractal baseado em cascata multiplicativa que utiliza processos autorregressivos para modelagem dos multiplicadores foi proposto, com base na deficiência dos modelos existentes em modelar os multiplicadores reais de uma cascata multiplicativa utilizada para representar uma série de tráfego real. Em seguida, o modelo proposto foi validado por meio de análise e comparação do modelo proposto em relação aos outros modelos em termos de:

- Estatísticas como média e variância;
- Função de autocorrelação;
- Espectro multifractal;
- Probabilidade de perda de *bytes* em um enlace.

Desta forma, conclui-se que as séries de GoPs, as séries de quadros do tráfego de vídeo MPEG-4, assim como o tráfego de redes sem fio (WLANs) podem ser eficientemente representados utilizando o modelo CMAM.

4.7 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO

- 1.** Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Modelagem de Tráfego de Vídeo MPEG-4 Utilizando Cascata Multifractal com Distribuição Autorregressiva dos Multiplicadores” In: International Information Telecommunication Symposium, Florianópolis, 2009.
- 2.** Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Modeling of MPEG-4 Video Traffic Using a Multifractal Cascade with Autoregressive Multipliers”. Revista IEEE América Latina. (Submetido em 22.07.2010).
- 3.** Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Modelagem e Controle da Taxa de Vídeo MPEG-4 Utilizando Cascata Multifractal com Multiplicadores Autorregressivos”. XXIX Brazillian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC 2011). (Submetido em 20.12.2010)

Capítulo 5. ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA DE DADOS BASEADA EM MODELAGEM DE TRÁFEGO

A análise multifractal é uma importante ferramenta para análise do tráfego de redes e pode proporcionar mecanismos mais eficientes para provisão de QoS. Um dos mais importantes parâmetros do tráfego de redes é a probabilidade de perda de dados. Altos valores de perda podem estar relacionados a problemas como congestionamento, *buffers* mal dimensionados, servidores com baixa capacidade e condições inadequadas do canal de comunicação. Além disso, limiares de perda podem ser estabelecidos em um contrato de serviço, para garantir que um enlace de comunicação possa atender a requisitos de qualidade de serviço. Assim, assumindo uma modelagem multifractal de tráfego com características multifractais, é proposta uma expressão matemática para estimação da probabilidade de perda de *bytes* dos fluxos de tráfego de redes. Posteriormente, esta expressão é aplicada a um cenário de rede sem fio baseado no OFDM/TDMA para avaliar seu desempenho em termos de taxa de perda de *bytes*.

O capítulo está organizado da seguinte forma: na seção 5.1, são introduzidos conceitos sobre a probabilidade de perda. Na seção 5.2, discursa-se sobre vários métodos de estimação de probabilidade de perda existentes na literatura, na seção 5.3 é proposta uma expressão para estimação de probabilidade de perda que leva em consideração o decaimento de energia dos coeficientes *wavelets* associados ao processo de tráfego. Na seção 5.4 é apresentado um cenário de rede sem fio baseado no OFDM/TDMA no qual as simulações são realizadas, na seção 5.5 são apresentados os resultados das simulações e finalmente, na seção 5.6, conclui-se.

5.1 PROBABILIDADE DE PERDA

Primeiramente, um sistema de fila única é considerado com um servidor de capacidade c e um *buffer* de comprimento b .

O chamado processo de carga de trabalho (*workload*) $W(t)$ é a quantidade total de trabalho (total de *bytes*) armazenado no *buffer* no intervalo de tempo $[0, t)$, ou seja,

$$W(t) = A(t) - ct \quad (5.1)$$

onde $A(t)$ é a quantidade total de trabalho acumulado que chega ao *buffer* no intervalo $[0, t)$ e c é taxa de serviço (capacidade do servidor).

Para estimar a probabilidade de perda, é necessário calcular o tamanho máximo da fila no *buffer*, expresso por Q . Isto é, o tamanho máximo da fila no estado de equilíbrio da fila quando o sistema esteve em funcionamento por um longo período de forma que o tamanho da fila inicial não tenha influência no sistema. Utilizando a equação de Lindley [Lindley 1952], tem-se:

$$Q = \sup_{t \geq 0} W(t) \quad (5.2)$$

onde se assume que $W(0) = 0$.

A partir de um *buffer* finito b , e das considerações apresentadas, a probabilidade de perda está presente, pois quando o tamanho da fila aumenta de forma que haja transbordo, a perda deve ser computada. Matematicamente, tem-se:

$$P(T) = \sum_{t=0}^T \max(Q(t) - c, 0) \quad (5.3)$$

onde $Q(0)$ é assumido ser 0, P é o conjunto de perda e T é o intervalo de tempo considerado. Então, a probabilidade de perda do modelo de fila imediatamente após o período de tempo T pode ser estimada por:

$$P(Q > b) = P(T) / A(T) \quad (5.4)$$

Por outro lado, o tráfego agregado de chegada entre os instantes $[0, r)$, onde r é a escala de tempo, pode ser expresso por K_r . Então, K_r refere-se a série de tráfego agregada na escala de tempo r .

Seja $K_0 = 0$, e assumindo que a fila estava vazia em um tempo passado, então a equação (5.2) pode ser escrita como [Crouse et al. 2000]:

$$Q = \sup_{r \in \mathbb{N}} (K_r - rc) \quad (5.5)$$

Note que (5.5) fornece uma relação direta entre o tamanho da fila Q e o processo de chegada de tráfego agregado K_r em múltiplas escalas de tempo r .

Para escalas de tempo diádicas 2^m , o tráfego agregado também está relacionado com K_{2^m} , onde $m \in (0, \dots, n)$ e n é o número de escalas consideradas.

5.2 MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA DE DADOS

Nesta seção são apresentados os principais métodos de estimação de probabilidade de perda baseados em modelagem de tráfego de redes presentes na literatura.

Um destes métodos baseia-se na teoria dos grandes desvios (LDT-*Large Deviation Theory*), que avalia pequenas probabilidades em uma escala exponencial [Dembo e Zeitouni 1998], [Vieira 2006], e é aplicado em sistemas de fila onde o tamanho do *buffer* b é considerado grande [Chang 1994], [Duffield 1994]. Na teoria dos grandes desvios diz-se que a probabilidade de perda decai exponencialmente em função do tamanho do *buffer* e pode ser parametrizada pela constante assintótica β e pela taxa de decaimento η , conforme equação (5.6):

$$P(q(t) \geq b) \leq \beta e^{-b\eta} \quad (5.6)$$

onde $q(t)$ é o número de *bytes* na fila no instante t .

Outros resultados a respeito da teoria dos grandes desvios aplicada à estimação de probabilidade de perda podem ser encontrados em [Vieira 2006].

Em outra abordagem para estimação de probabilidade de perda apresentada em [Duffield e O’Connell 1993], os autores consideram a distribuição do tamanho da fila para processos que têm parâmetro de *Hurst* no intervalo (0,5;1) como um limitante inferior, dada pela equação abaixo:

$$\lim_{b \rightarrow \infty} b^{-2(1-H)} \ln P(Q > b) = -a^{-2(1-H)} (a + c)^2 / 2 \quad (5.7)$$

onde $a = c/H - c$.

Da equação (5.7) podem ser obtidas aproximações razoavelmente precisas para *buffer* b grande, como aquela apresentada em [Vieira 2006], mas para outros valores de b os valores de probabilidade de perda dados por (5.7) podem subestimar os valores reais de $P(Q > b)$ [Kim e Shroff 2001].

Dentre as propostas que não consideram o limite assintótico de *buffers* grandes, destaca-se aquela baseada na estimação de banda efetiva usando a teoria assintótica de muitas fontes, obtendo assim uma estimativa menos conservadora (banda menor, mas que atende à probabilidade de perda estipulada) para *buffers* menores [Choudhury et al., 1994]. Este resultado ocorre porque a teoria assintótica de *buffer* grande não leva em consideração o possível ganho de multiplexação quando fontes de tráfego independentes são multiplexadas, o que é considerado pela teoria assintótica de muitas fontes. Na teoria assintótica de muitas fontes, estuda-se o decaimento da probabilidade de perda $P(Q > b)$ com o aumento do número de entradas de tráfego independentes, enquanto o tamanho do *buffer* por entrada e a taxa de serviço por entrada permanecem fixos [Vieira 2006].

Dentre as propostas de cálculo de probabilidade de perda presentes na literatura, os modelos no domínio *wavelet* baseados em cascatas também merecem destaque, como o modelo MWM [Riedi et al. 1999], que fornecem fórmulas explícitas para K_r para escalas de tempo diádicas (i.e., $r = 2^m$). Para estes processos a seguinte aproximação é válida [Crouse et al. 2000]:

$$P[Q < b] \approx \prod_{i=0}^n P[K_{2^i} < b + c2^i] \quad (5.8)$$

onde n é o número de escalas consideradas.

Esta abordagem é conhecida como MSQ (*MultiScale Queuing*). Uma outra abordagem, similar ao MSQ, é chamada de CDTSQ (*Critical Dyadic Time-Scale Queue*) [Crouse et al. 2000].

A abordagem CDTSQ provém da utilização do conceito de escala de tempo crítica (CTS – *Critical Time Scale*), definida em (5.9),

$$r^* = \arg \sup_{r \in \mathbb{N}} P[K_r - cr > b] \quad (5.9)$$

como estimador da probabilidade de perda especificamente para escalas de tempo diádicas $r = 2^m$ onde $m \in (0, \dots, n)$, conforme (5.10):

$$CDTSQ := P[K_{r^*} - cr^* > b] \quad (5.10)$$

Os desempenhos das abordagens MSQ e CDTSQ serão comparados com a expressão de probabilidade de perda proposta na seção seguinte, em termos de representação da perda de dados computada utilizando séries reais de tráfego de redes com fio. Na seção 5.5, são feitas avaliações utilizando séries reais de tráfego de redes sem fio.

5.3 ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA BASEADA EM MODELAGEM MULTIFRACTAL

Neste trabalho, a probabilidade de perda de dados é avaliada em sistemas de fila cujos enlaces possuem sempre *buffer* finito. Estabelece-se ainda que estes sistemas estudados sejam limitados ao cenário de regime permanente, onde $Q(0) = 0$ quando $t=0$.

Agora, pode-se enunciar a seguinte proposição para o tráfego multifractal, com base na definição de perda de dados dada em (5.4).

Proposição 1. Seja $X(t)$ um processo multifractal cujos multiplicadores A_j do modelo multifractal correspondente no domínio wavelet possuem uma distribuição de probabilidade simétrica, b é o tamanho do buffer e c é a capacidade do servidor. A probabilidade de perda deste servidor é dada por:

$$P(Q > b) \approx 1 - \prod_{i=0}^n \left[1 - \frac{E[U_{0,0}] \prod_{j=0}^{n-1} E\left(\frac{1+A_j}{2}\right)}{(b+c2^i)} \right] \quad (5.11)$$

Prova:

Seja X uma variável aleatória não negativa e a um valor possível que X possa assumir. Então, a inequação de Markov garante que [Papoulis 1991]:

$$P\{X \geq a\} \leq \frac{E[X]}{a} \quad (5.12)$$

Pode-se facilmente notar que:

$$P\{X < a\} > 1 - \frac{E[X]}{a} \quad (5.13)$$

Adicionalmente, a inequação (5.13) pode ser reescrita para processos diádicos K_r como:

$$P[K_{2^i} < b + c2^i] > 1 - \frac{E[K_{2^i}]}{b + c2^i} \quad (5.14)$$

A partir de simulações realizadas utilizando a equação (5.14), observou-se que o limite superior de $P[K_{2^i} < b + c2^i]$ é, geralmente, próximo de $1 - E[K_{2^i}]/(b + c2^i)$. Assim, o resultado obtido na equação (5.14) pode ser introduzido, na forma de igualdade, na equação (5.8) para produzir a seguinte aproximação:

$$P[Q < b] \approx \prod_{i=0}^n \left[1 - \frac{E[K_{2^i}]}{b + c2^i} \right] \quad (5.15)$$

A esperança matemática do tráfego agregado em escalas de tempo diádicas, presente na equação (5.15), pode ser reescrita utilizando os coeficientes $U_{0,0}$ e A_j do domínio *wavelet* (relacionados com a síntese de um processo de cascata multifractal apresentada na seção 4.3), da seguinte forma [Riedi et al. 1999]:

$$E[K_r] = E[U_{0,0}] \prod_{j=0}^{n-1} E\left(\frac{1+A_j}{2}\right) \quad (5.16)$$

Substituindo a equação (5.16), em (5.15), tem-se:

$$P(Q < b) \approx \prod_{i=0}^n \left[1 - \frac{E[U_{0,0}] \prod_{j=0}^{n-1} E\left(\frac{1+A_j}{2}\right)}{(b+c2^i)} \right] \quad (5.17)$$

Alternativamente, obtém-se a expressão de probabilidade de perda desejada:

$$P(Q > b) \approx 1 - \prod_{i=0}^n \left[1 - \frac{E[U_{0,0}] \prod_{j=0}^{n-1} E\left(\frac{1+A_j}{2}\right)}{(b+c2^i)} \right] \quad (5.18)$$

□

A expressão (5.18) fornece uma relação direta entre o tamanho da fila Q e o processo de chegadas K_r em múltiplas escalas de tempo r . Isto é, o comportamento do tráfego representado pelos multiplicadores A_j influenciará o valor da probabilidade de perda para uma dada fila.

Como exemplo da utilização da expressão proposta para estimação de probabilidade de perda de *bytes*, a Figura 5.1 apresenta resultados de uma simulação obtida de um servidor, com capacidade alocada em 1,5 vezes a média da série de tráfego entrante. O servidor é alimentado pela série de tráfego de rede dec-pkt-1, cujas características multifractais foram apresentadas no Capítulo 3.

Os resultados são obtidos para diferentes tamanhos de *buffer*, em comparação com as abordagens MSQ e CDTSQ [Crouse et al. 2000]. Resultados semelhantes são apresentados na Figura 5.2, tendo como série de tráfego de entrada do servidor a série dec-pkt-2, cujas características de comportamento monofractal foram apresentadas no Capítulo 3.

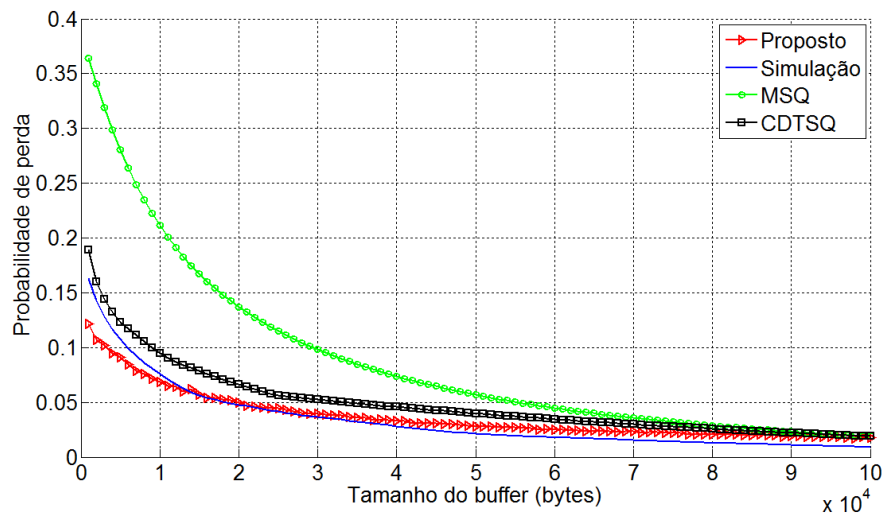


Figura 5.1. Probabilidade de perda de *bytes* em função do tamanho do *buffer*. Esquema proposto e outras abordagens. Série dec-pkt-1.

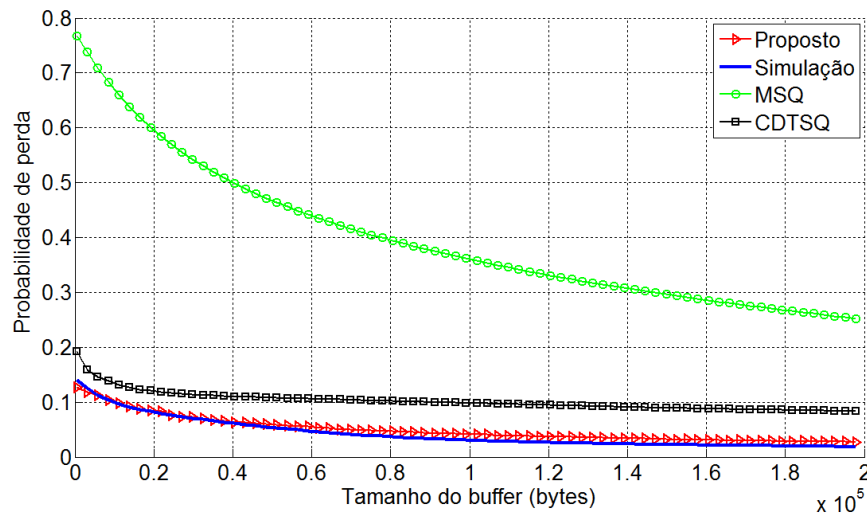


Figura 5.2. Probabilidade de perda de *bytes* em função do tamanho do *buffer*. Esquema proposto e outras abordagens. Série dec-pkt-2.

A partir da Figura 5.1 e da Figura 5.2, observa-se que a expressão de probabilidade de perda proposta apresentou melhores resultados do que as abordagens MSQ e CDTSQ. De fato, os valores de probabilidade de perda encontrados pela expressão proposta, para diferentes tamanhos de *buffer*, se aproximaram mais dos valores obtidos por meio de simulação com o tráfego real de rede, tanto para tráfego monofractal quanto multifractal. O que é reiterado ao serem observados os resultados apresentados na Figura 5.3.

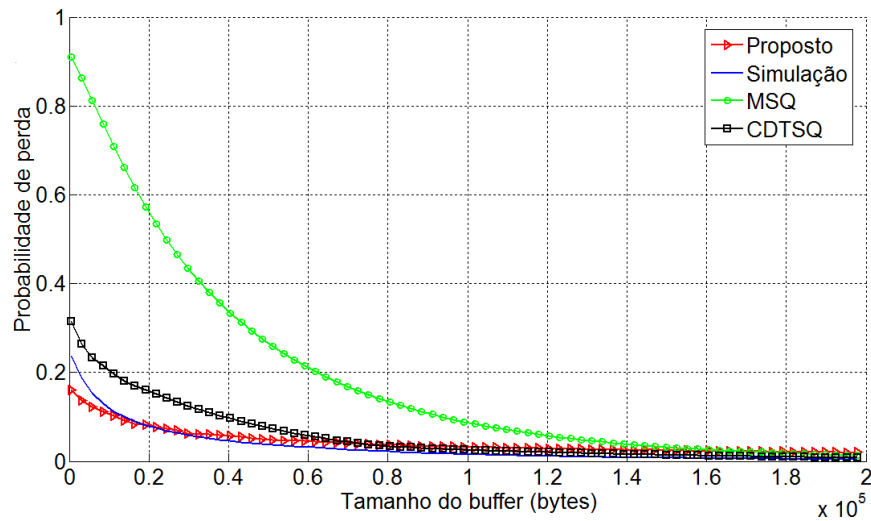


Figura 5.3. Probabilidade de perda de bytes em função do tamanho do *buffer*. Esquema proposto e outras abordagens. Série sintética fBm gerada a partir dos parâmetros estatísticos da série dec-pkt-2.

A partir desta figura é possível concluir que a expressão para estimação de probabilidade de perda proposta também é aplicável ao tráfego sintético fBm, que possui características monofractais, pois melhores resultados foram obtidos em relação aos demais esquemas comparados.

Os resultados obtidos com a expressão proposta em comparação às simulações com tráfego real comprovam que o limite superior de $P[K_{2^i} < b + c2^i]$ é, geralmente, próximo de $1 - E[K_{2^i}]/(b + c2^i)$, e que a expressão (5.18) é eficiente para estimar a probabilidade de perda observada no tráfego real de redes.

5.4 REDE SEM FIO BASEADA EM OFDM/TDMA

Pretende-se avaliar a eficiência da abordagem proposta para estimação de probabilidade de perda aplicada a um cenário de rede sem fio baseado no OFDM/TDMA (uma avaliação prévia para o tráfego de rede em um sistema de fila com servidor único foi apresentado na Figura 5.1 e na Figura 5.2, a Figura 5.3 apresenta os resultados obtidos para o tráfego fBm gerado sinteticamente). Para isto, um esquema de transmissão OFDM similar àquele encontrado em [Niyato e Hossain 2005] foi considerado, com N usuários e M canais de tráfego (ou seja, subportadoras) como retratado pela Figura 5.4.

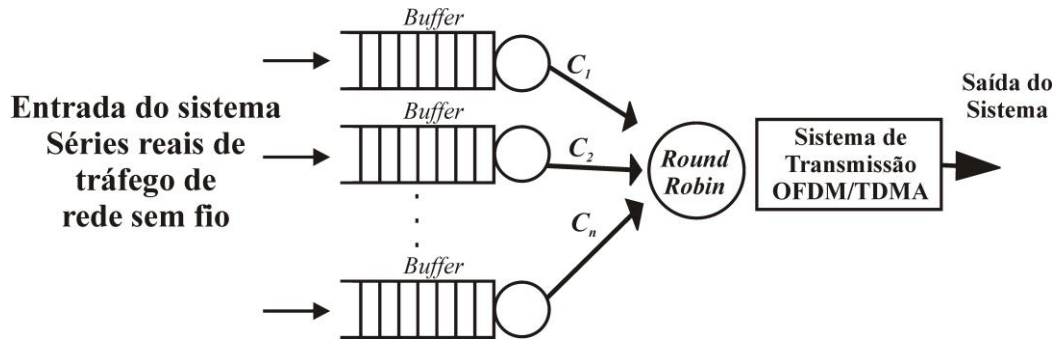


Figura 5.4. Cenário de rede sem fio baseado no OFDM/TDMA.

No sistema de rede sem fio considerado, o tráfego de dados para cada usuário é armazenado em uma fila independente e o tamanho do *buffer* é finito. Considerou-se um cenário com características de múltiplo acesso baseadas no TDMA e cujo algoritmo de escalonamento de serviço aplicado é o *round-robin*. Assumiu-se também que a informação do estado do canal de transmissão está disponível no sistema de transmissão (ou seja, a relação sinal/ruído (SNR)), e a largura de banda total para transmissão é B . Portanto, cada subportadora possui uma largura de banda de $\Delta f = B/M$ Hz [Niyato e Hossain 2005].

Utilizando modulação e codificação adaptativas (AMC – *Adaptive Modulation and Coding*), o número máximo de bits por símbolo (por Hz), denotado por $c_{m,n}(t)$ que a subportadora m para o usuário n pode transmitir por unidade de tempo durante uma janela de tempo t pode ser expressa em função da SNR e da taxa de erro de bit (BER-*Bit Error Rate*) desejada. Embora, haja algumas aproximações para esta função (uma delas pode ser encontrada em [Czylwik 1996]), todas elas têm por limitante superior a seguinte expressão para capacidade [Niyato e Hossain 2005]:

$$C_{m,n}(t) = \left\lfloor \log_2 \left(1 + \frac{-1.5}{\ln(5P_{ber})} \gamma_{m,n}(t) \right) \right\rfloor \quad (5.19)$$

onde $\gamma_{m,n}(t)$ é a SNR instantânea na janela de tempo t , m é a subportadora relativa ao usuário n e P_{ber} é a taxa de erro de bit (BER) desejada.

5.5 AVALIAÇÃO DA ABORDAGEM DE ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA PROPOSTA

Nesta seção, a estimação de probabilidade de perda de dados proposta é aplicada no sistema de rede sem fio baseado no OFDM/TDMA retratado pela Figura 5.4.

Os parâmetros de simulação foram configurados como relatado a seguir. Para o sistema OFDM/TDMA especificado, considerou-se um cenário com 128 subportadoras (ou seja, $M=128$) e uma largura de banda total B de 1,920 MHz. O tamanho da janela de tempo foi configurado para 10 ms e assumiu-se que o tamanho médio dos pacotes fosse de 256 bits.

A largura de banda Δf de cada subportadora é de 15 kHz. Com o objetivo de capturar o efeito do desvanecimento seletivo em frequência, a SNR média para cada subportadora é escolhida de uma distribuição Gaussiana com média 15 dB. A taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*) desejada foi configurada para 10^{-4} . São apresentados resultados relacionados ao desempenho da abordagem de estimação de probabilidade de perda para o sistema considerado com diferentes números de usuários.

A Figura 5.5 e a Figura 5.6 mostram a probabilidade de perda média de *bytes* em função do tamanho do *buffer*. Os resultados apresentados foram coletados a partir das simulações realizadas no cenário considerado. O número de filas e de usuários da rede sem fio relacionado com a Figura 5.5 é diferente daquele da Figura 5.6. Mais precisamente, na Figura 5.5 o número de usuários do sistema foi configurado para 10 (ou seja, $N=10$) e nela é representada a probabilidade de perda considerando como tráfego de entrada a série USCtrace01[USC 2006], ou seja, considera-se que os usuários do sistema possuem comportamentos iguais àqueles dados pela série real de tráfego USCtrace01. A Figura 5.6 representa a probabilidade de perda para outra série de tráfego de rede sem fio coletada do pacote de séries de tráfego USC06_spring_trace, chamada neste trabalho de USCtrace02 [USC 2006], como tráfego de entrada, onde N (o número de usuários) foi configurado para 5.

Nota-se que a expressão proposta fornece valores mais precisos (mais próximos dos resultados da simulação) do que os outros métodos considerados. Observa-se também que os outros métodos apresentam resultados próximos daqueles obtidos por meio de simulação apenas para alguns poucos tamanhos de *buffer*. Por outro lado, o método proposto apresenta bom desempenho para uma maior variedade de tamanhos de *buffer*.

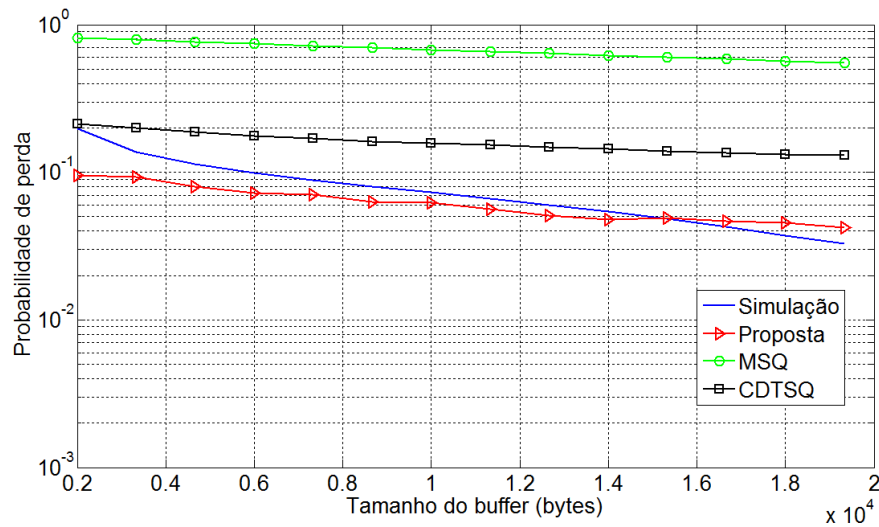


Figura 5.5. Comparação entre a probabilidade de perda média de *bytes* obtida com a expressão proposta e outros métodos, em função do tamanho do *buffer*, para a série USTrace01 ($N=10$).

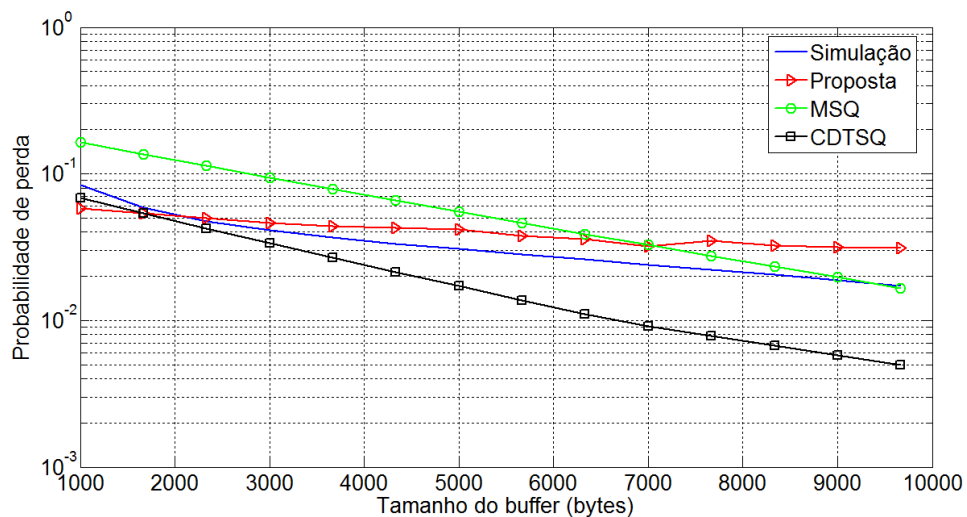


Figura 5.6. Comparação entre a probabilidade de perda média de *bytes* obtida com a expressão proposta e outros métodos, em função do tamanho do *buffer*, para a série USTrace02 ($N=5$).

Conclui-se, portanto, que comparativamente aos outros métodos analisados, a expressão para estimação de probabilidade de perda proposta é eficiente, pois apresentou resultados, para diferentes séries e para diferentes números de usuários, mais próximos da simulação.

5.6 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram revistos alguns conceitos sobre o cálculo da probabilidade de perda em redes de computadores. Em seguida, foram apresentadas abordagens para cálculo de

probabilidade de perda baseadas em modelagem multifractal existentes na literatura e propõe-se uma expressão para estimação de probabilidade de perda que leva em consideração as propriedades multifractais do tráfego de redes, capturando características como o decaimento de energia dos coeficientes *wavelets* do processo de tráfego envolvido. O desempenho da proposta em um sistema de fila com servidor único é avaliado e, após ser apresentado um cenário de rede sem fio baseado em OFDM/TDMA, é avaliado novamente o desempenho da expressão proposta em comparação a outros esquemas aplicados neste cenário, especificamente para o tráfego de redes sem fio.

5.7 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO

- 1.** Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T., Santos Jr, J. A. “A Multifractal Based Approach for Loss Probability Estimation for OFDM/TDMA Based Systems” In: The 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Recife/PE/Brazil, 2010.
- 2.** Santos Jr, J. A., Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C. “A Policing Algorithm for WiMAX Systems Considering Multifractal Traffic” In: The 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Recife/PE/Brazil. 2010.
- 3.** Santos Jr, J. A., Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “A Traffic Policing Mechanism for WiMAX Systems Based on Multifractal Modeling” In: 7th International Telecommunication Symposium (ITS 2010), Manaus, 2010.
- 4.** Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Loss Probability Estimation for OFDM/TDMA Based Wireless Systems Considering Multifractal Traffic Characteristics”. European Transactions on Telecommunications. (Submetido em 13.09.2010).
- 5.** Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Santos Jr, J. A. “Loss Probability Estimation and Control for OFDM/TDMA Wireless Systems Considering Multifractal Traffic Characteristics”. Computer Communications. (Submetido em 22.12.2010).

Capítulo 6. CONTROLE DE ADMISSÃO DE FLUXOS DE TRÁFEGO DE REDES BASEADO EM ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA

O controle de admissão (CAC – *Connection Admission Control*) é uma ferramenta muito útil na operação de redes de computadores. Ele permite a utilização dos recursos da rede de forma mais efetiva levando em consideração o atendimento a requisitos de qualidade de serviço (QoS). De fato, funções de controle de admissão terão um papel muito importante nas próximas gerações de redes, inclusive de redes sem fio [Knightly e Shroff 1999], [Kvackaj e Baronak 2006]. Neste contexto, muitos métodos de controle de admissão têm sido propostos, com diferentes aplicações e nichos específicos [Kvackaj e Baronak 2006].

Neste capítulo, são apresentados, inicialmente, na seção 6.1, alguns dos métodos de controle de admissão existentes baseados em estimação de probabilidade de perda e modelagem de tráfego. Na seção 6.2 é apresentado o método de controle de admissão proposto, baseado em estimação de probabilidade de perda. Na seção 6.3, resultados obtidos por meio de simulações são mostrados e finalmente, na seção 6.4, conclui-se.

6.1 MÉTODOS DE CONTROLE DE ADMISSÃO DE CONEXÕES

Os métodos de controle de admissão existentes têm por objetivo determinar se um novo fluxo de tráfego pode ser admitido na rede de forma que os usuários admitidos possam ser atendidos pelos requisitos de desempenho estabelecidos.

Assim como em outras tecnologias que visam proporcionar melhor desempenho ao tráfego de redes o controle de admissão torna-se uma desafiante tarefa quando o tráfego de redes com características multifractais é considerado. Em [Vieira 2006] são listadas algumas das classes de algoritmos de controle de admissão, sendo elas baseadas em: taxa média e taxa de pico; banda efetiva aditiva; curva de perda; máxima variância; e refinamentos da banda efetiva.

Um exemplo de CAC baseado em taxa média e taxa de pico é dado em [Ferrari e Verma 1990], onde um modelo *on-off* (baseado em cadeia de Markov de dois estados) é considerado para estimação da probabilidade de perda em um multiplexador sem *buffer*, sendo esta estimativa utilizada como critério para admissão de novos fluxos. Já nos esquemas baseados em banda efetiva aditiva, considera-se que a capacidade do enlace deve ser sempre maior que a soma das bandas efetivas de todas as conexões [Berger e Whitt 1998], detalhes sobre banda efetiva podem ser encontrados em [Vieira 2006], [Kvackaj e Baronak 2006].

Os métodos baseados em curva de perda levam em consideração a relação entre probabilidade de perda e tamanho de *buffer*, a fim de prover admissão de fluxos de tal modo que a curva de perda resultante seja semelhante àquela observada por meio de simulações. Nos métodos baseados na máxima variância, considera-se que a probabilidade de perda máxima ocorrerá quando a máxima variância do processo de tráfego ocorrer, relacionando a admissão de novos fluxos com o atendimento ao requisito de probabilidade de perda estabelecido. Por fim, os mecanismos baseados em refinamentos da banda efetiva são aqueles que não consideram uma banda efetiva aditiva, mas sim aquela calculada segundo a teoria de muitas fontes, o que pode proporcionar aceitação de um número maior de fluxos em relação aos mesmos requisitos de QoS, quando comparado com a banda efetiva aditiva. Maiores detalhes sobre a teoria das muitas fontes podem ser encontrados em [Duffield e O’Connell 1993], [Vieira 2006].

O mecanismo de controle de admissão proposto neste trabalho baseia-se na estimação de probabilidade de perda, por isso ele pode ser enquadrado na classe daqueles baseados em curva de perda.

6.2 MECANISMO DE CONTROLE DE ADMISSÃO PROPOSTO

Propõe-se uma abordagem simples para o controle de admissão de fluxos de tráfego de rede sem fio que se baseia na estimação de probabilidade de perda de dados, apresentada no Capítulo 5 e dada pela expressão (5.18). Objetiva-se verificar o impacto no número de fluxos admissíveis quando a expressão de probabilidade de perda é utilizada para controle de admissão no sistema OFDM/TDMA (Figura 5.4). Além disso, o desempenho da abordagem proposta para controle de admissão é comparada com os métodos MSQ e CDTSQ [Crouse et al. 2000].

A abordagem proposta para controle de admissão se baseia no seguinte procedimento: suponha que existam N conexões no sistema OFDM/TDMA da Figura 5.4, quando o tamanho da fila Q_i excede o tamanho do *buffer* b_i , para cada conexão i das N conexões, ocorre perda de dados. Quando a probabilidade de perda média das N conexões do sistema OFDM/TDMA excede o limitante superior de probabilidade de perda desejado, expresso por ε , novas conexões ao sistema não são admitidas.

Matematicamente, o limitante de taxa de perda para o controle de admissão é dado por:

$$\frac{\sum_{i=1}^N P(Q_i > b_i)}{N} < \varepsilon \quad (6.1)$$

Desta forma é possível controlar a entrada de novos usuários no sistema considerado com base na probabilidade de perda registrada para os fluxos de tráfego que fluem pelo sistema. A seguir são apresentados alguns dos resultados de simulações realizadas.

6.3 AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO CONTROLE DE ADMISSÃO EM UM SISTEMA OFDM/TDMA

A Figura 6.1 e a Figura 6.2 mostram a probabilidade de perda de *bytes* em termos de número de usuários no sistema OFDM/TDMA. Os resultados foram coletados por meio de simulações do cenário considerado, retratado na Figura 5.4.

As simulações foram realizadas utilizando duas diferentes séries de tráfego de rede sem fio, chamadas neste trabalho de USCtrace01 e USCtrace02 [USC 2006]. As simulações também foram avaliadas utilizando dois tamanhos de *buffer*.

A Figura 6.1 representa a probabilidade de perda média considerando como tráfego de entrada para todos os usuários a série USCtrace01, onde o tamanho do *buffer* foi configurado como $0,8 \times 10^4$ *bytes* para cada fila de usuário, e a Figura 6.2 representa a probabilidade de perda média considerando como tráfego de entrada a série USCtrace02, onde o tamanho do *buffer* foi configurado para $2,0 \times 10^3$ *bytes*. Considerou-se que os usuários têm o mesmo comportamento, ou seja, o tráfego de cada usuário é equivalente ao da série USCtrace01 no primeiro caso (Figura 6.1), e igual ao da série USCtrace02 no segundo caso (Figura 6.2).

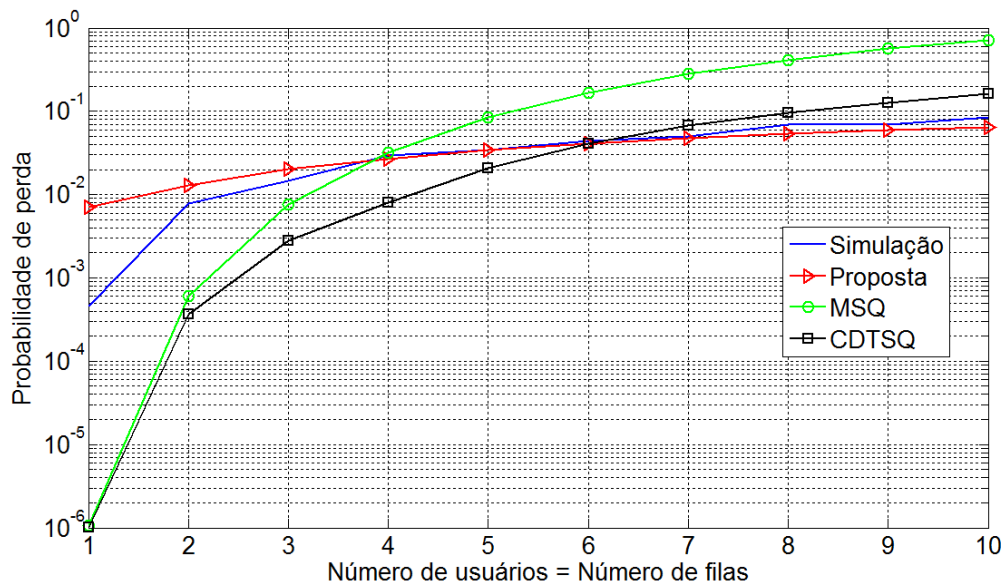


Figura 6.1. Probabilidade de perda média versus número de usuários do sistema OFDM/TDMA – USCtrace01 – $b=0,8 \times 10^4$ bytes.

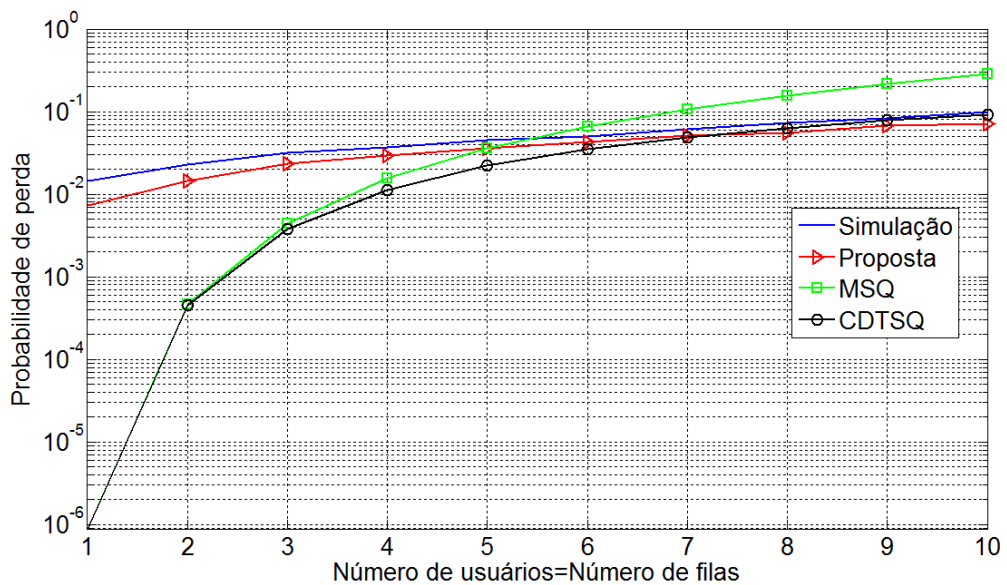


Figura 6.2. Probabilidade de perda média versus número de usuários do sistema OFDM/TDMA – USCtrace02 – $b=2,0 \times 10^3$ bytes.

Por meio da Figura 6.1 e da Figura 6.2, pode-se notar que o esquema de controle de admissão proposto baseado na estimação de probabilidade de perda dada pela expressão (5.18) fornece valores próximos dos da simulação. Observa-se também que os outros métodos não apresentaram resultados tão próximos daqueles obtidos por meio de simulação quanto a abordagem proposta. Por outro lado, a expressão proposta acompanha a curva de probabilidade de perda obtida por simulação para uma maior gama de números de usuários.

A Tabela 6.1 está relacionada com a Figura 6.1 e a Tabela 6.2 está relacionada com a Figura 6.2. Elas mostram quantos usuários são aceitos no sistema OFDM/TDMA quando o limitante superior de probabilidade de perda ε é considerado. A Tabela 6.1 e a Tabela 6.2 apresentam diferentes resultados para diferentes valores de ε , quanto maior o valor de ε maior o número de usuários aceitos no sistema. Nota-se que o esquema proposto apresenta resultados melhores, ou comparáveis, aos dos métodos MSQ e CDTSQ.

Tabela 6.1. Número de usuários aceitos no sistema OFDM/TDMA em relação a ε (USCtrace01).

ε	Simulação	Proposta	MSQ	CDTSQ
$1,0 \cdot 10^{-2}$	2	1	3	4
$2,5 \cdot 10^{-2}$	3	3	3	5
$5,0 \cdot 10^{-2}$	7	7	4	6
$7,5 \cdot 10^{-2}$	9	10	4	7
$1,0 \cdot 10^{-1}$	10	10	5	8

Tabela 6.2. Número de usuários aceitos no sistema OFDM/TDMA em relação a ε (USCtrace02).

ε	Simulação	Proposta	MSQ	CDTSQ
$1,0 \cdot 10^{-2}$	0	1	3	3
$2,5 \cdot 10^{-2}$	2	3	4	5
$5,0 \cdot 10^{-2}$	6	6	5	7
$7,5 \cdot 10^{-2}$	8	10	6	8
$1,0 \cdot 10^{-1}$	10	10	6	10

Os resultados experimentais considerando um cenário de rede sem fio baseado no OFDM/TDMA mostraram que a expressão (5.18), utilizada para estimação de probabilidade de perda, é adequada para ser usada como base para um esquema de controle de admissão, uma vez que se verificou que o esquema proposto apresentou melhores resultados do que o MSQ e o CDTSQ. Ou seja, as estimativas de probabilidade de perda para certo número de

usuários são mais precisas. Com isso, pode-se alocar um número mais preciso de usuários (número mais próximo ao encontrado por meio da simulação) para atender a um mesmo requisito de probabilidade de perda especificado, em um contrato de serviço, por exemplo.

6.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada uma proposta de controle de admissão de fluxos de tráfego de redes sem fio em um cenário baseado no OFDM/TDMA. O método de controle de admissão é baseado na estimação de probabilidade de perda proposta no Capítulo 5. Simulações foram realizadas com o propósito de verificar o desempenho do esquema proposto, comparações com esquemas baseados em estimação de probabilidade de perda utilizando MSQ e CDTSQ foram realizadas e comprovaram a eficiência de desempenho do método apresentado para diferentes números de usuários e para diferentes valores de ε .

6.5 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO

1. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Controle de Admissão de Fluxos de Tráfego Baseado em Estimação de Probabilidade de Perda Através de Modelagem Multifractal”. XXIX Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC 2011). (Submetido em 20.12.2010).

Capítulo 7. ALOCAÇÃO ADAPTATIVA DE TAXA DE TRANSMISSÃO BASEADA EM MODELAGEM MULTIFRACTAL

No cenário de controle de tráfego de redes, vários algoritmos e métodos de controle de congestionamentos e alocação de taxas de transmissão têm sido propostos [Karnik e Kumar 2005], [Durrezi et al. 2006], [Wang et al. 2007], [Carvalho et al. 2009]. Alguns deles não utilizam mecanismos adaptativos, como em [Hu e Petr 2000], onde os autores apresentam um esquema de controle de taxa utilizando um modelo *fuzzy*. Outras propostas baseiam-se em tecnologias de rede ou em protocolos específicos, como aqueles apresentados em [Chen et al. 2003], [Nejad et al. 2006]. Dentre as propostas de controle de taxa de transmissão e alocação de recursos existentes, pode-se destacar o algoritmo adaptativo apresentado em [Trinh e Miki 1999], por ter apresentado ótimo desempenho para o tráfego de redes com características autossimilares.

Neste capítulo, é apresentado um algoritmo de alocação de taxas de transmissão em enlaces com tráfego real de redes que utiliza a expressão para estimação de probabilidade de perda proposta no Capítulo 5. Várias simulações são realizadas a fim de demonstrar a eficiência do algoritmo de alocação de taxa de transmissão proposto e comparações com outro esquema de alocação adaptativa de recursos, presente na literatura [Trinh e Miki 1999], que se baseia em propriedades monofractais do tráfego de redes, são conduzidas. Desta forma, este capítulo apresenta uma comparação entre dois algoritmos de alocação adaptativa de taxa de transmissão: o algoritmo proposto que leva em consideração as características multifractais do tráfego de redes e outro que pressupõe características monofractais, cujo algoritmo é apresentado na seção 7.1. Além disso, são feitas comparações com um método não adaptativo (estático) de alocação de taxa. Na seção 7.2, o método de alocação de taxa proposto é apresentado, e na seção 7.3, um comparativo dos resultados obtidos para os dois métodos adaptativos e para o método estático é apresentado. Na seção 7.4, são apresentadas as conclusões obtidas e considerações finais.

7.1 UM MÉTODO DE ALOCAÇÃO DINÂMICA DE RECURSOS BASEADO EM MODELAGEM MONOFRACTAL

Com o propósito de comparação, o esquema de alocação dinâmica de recursos (*Dynamic Resource Allocation* - DRA) proposto em [Trinh e Miki 1999] foi implementado. O DRA é aplicável ao tráfego de redes com características monofractais e baseia-se na predição do tráfego de entrada e na estimação de parâmetros como o H (parâmetro de *Hurst*) e μ (a média da taxa de tráfego de entrada). O algoritmo DRA é aplicado a um sistema de fila a fim de controlar os valores de taxas de transmissão do enlace adaptativamente a medida que um preditor de tráfego e um estimador de parâmetros fornece informações ao controlador de taxa, conforme representado pela Figura 7.1:

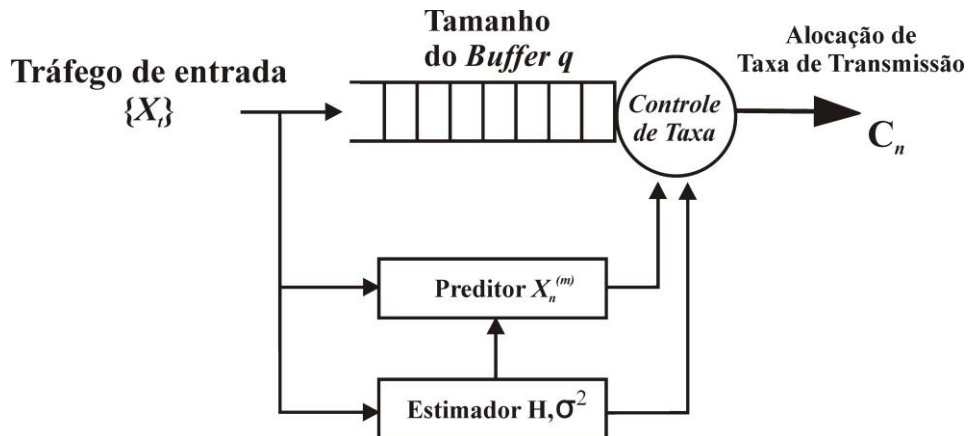


Figura 7.1. Esquema de alocação dinâmica de recursos (DRA – *Dynamic Resource Allocation*), adaptado de [Trinh e Miki 1999].

No DRA, define-se uma variável $X_n^{(m)}$ chamada de média em blocos do processo de tráfego como:

$$X_n^{(m)} = \frac{1}{m} (X_{nm-m+1} + \dots + X_{nm}) \quad (7.1)$$

onde $m, n = \{1, 2, \dots\}$, m é o tamanho do bloco e n o número do bloco.

Dessa forma, um preditor para $X_n^{(m)}$ pode ser dado por [Beran 1994]:

$$\hat{X}_n^{(m)} = aX_{n-1}^{(m)} + (1-a)\mu \quad (7.2)$$

onde $a = (2^{2H} - 2)/2$ e a está contido no intervalo aberto $(0,1)$, ou seja, $a \in (0,1)$. H é o parâmetro de *Hurst*.

A taxa alocada C para o bloco n é dada por :

$$C_n = \hat{X}_n^{(m)} + \Delta C \quad (7.3)$$

Segundo os autores em [Trinh e Miki 1999], a seguinte aproximação é válida para se estimar ΔC :

$$\Delta C \approx \left\{ \frac{(-2 \ln \varepsilon + 2 \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} y^{-1} \right))^{\frac{1}{2}} \sigma (1-a) H^H (1-H)^{1-H}}{b^{1-H}} \right\}^{\frac{1}{H}} \quad (7.4)$$

onde ε é a probabilidade de violação do tamanho do *buffer*, σ é o desvio padrão do tráfego considerado e b é o tamanho do *buffer*, onde a variável y está relacionada com a seguinte aproximação:

$$\varepsilon \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} y^{-1} \exp\left(-\frac{1}{2} y^2\right) \quad (7.5)$$

Em [Trinh e Miki 1999], os autores consideram o DRA como um método eficiente para alocação dinâmica de taxa, quando comparado ao serviço de taxa fixa, já que este esquema apresenta melhor utilização dos recursos enquanto provê as mesmas garantias de qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*).

No entanto, é possível que o DRA não consiga capturar eficientemente características do tráfego de redes, tais como rajadas de tráfego persistentes em diversas escalas de tempo. Uma vez que ao aplicar o esquema adaptativo de alocação de taxa de transmissão ao tráfego de entrada, o método DRA considera a média como única estatística pertinente para cada bloco de tráfego. Os demais parâmetros utilizados no método, como σ e H são obtidos para toda série de tráfego, e por esse motivo não traduzem fielmente as características de cada bloco de tráfego.

Na seção seguinte será apresentado o método proposto de alocação de taxa de transmissão que considera características multifractais do tráfego de redes. Na seção 7.3 serão apresentados os resultados obtidos em comparação ao DRA.

7.2 ALOCAÇÃO ADAPTATIVA DE TAXA DE TRANSMISSÃO BASEADA EM ESTIMAÇÃO DE PROBABILIDADE DE PERDA

Nesta seção, é proposto um esquema de alocação adaptativa de taxa de transmissão baseado nas características multifractais do tráfego de redes, que utiliza a aproximação dada pela equação (5.18). Este método baseia-se no cálculo dos multiplicadores A_j de uma cascata multifractal no domínio *wavelet*. Estes multiplicadores são calculados para cada janela de tráfego de entrada e por estarem relacionados ao decaimento de energia dos coeficientes *wavelets*, é possível que uma alocação adaptativa de taxa de transmissão mais eficiente pode ser obtida, já que o decaimento de energia dos coeficientes *wavelets* associados a um modelo de cascata multiplicativa constitui um importante parâmetro de caracterização do tráfego [Feldmann et al. 1998], [Park e Willinger 2000].

Uma vez conhecida a capacidade do canal a ser utilizada, expressa pela variável c , a expressão (5.18) fornece uma alternativa analítica para estimação da probabilidade de perda, que é um importante parâmetro de qualidade de serviço. Por outro lado, se a capacidade do canal não for conhecida, mas dado um valor limite de probabilidade de perda a ser atendido, é possível estimar a taxa de transmissão a ser alocada a fim de que violações a esta métrica sejam evitadas utilizando a expressão proposta.

Como a expressão (5.18) estabelece uma relação entre a probabilidade de perda e a capacidade do enlace, se fosse possível isolar c na expressão (5.18) ter-se-ia, de forma direta, uma estimativa da capacidade adequada para o enlace. No entanto, a expressão (5.18) é complexa o bastante para não permitir que a variável c seja isolada. Assim, propõe-se, neste trabalho, a aplicação de um algoritmo de busca binária para o cálculo do valor de c , uma vez conhecido o valor de $P(Q > b)$.

7.2.1 Algoritmo de busca binária

O algoritmo de busca binária consiste em uma alternativa mais eficiente do que a busca linear com vetor ordenado [Knuth 2004]. A busca linear com vetor ordenado baseia-se em inspecionar um vetor ordenado, elemento por elemento, sequencialmente, em busca de um valor desejado [Knuth 2004]. Sendo assim, na busca linear caso um vetor $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$

qualquer possua $n=100$, ou seja, seja constituído de 100 elementos, não se pode garantir que menos de 100 iterações serão realizadas.

Por outro lado, na busca binária, a busca no vetor ordenado $c=(c_1, c_2, \dots, c_n)$ é feita, inicialmente, por meio de uma estimativa, onde a posição estimada é a posição mediana do vetor. Assim, a primeira posição analisada é a entrada no meio do vetor. Se não for a entrada buscada, analisa-se a metade superior (se o elemento encontrado tem valor menor que o que se busca) ou a inferior (em caso contrário). O procedimento assim se repete, até que se encontre o elemento que se busca [Knuth 2004].

O algoritmo de busca binária pode ser sintetizado a partir dos seguintes passos:

1. Inicialize um vetor auxiliar a $[c_1, c_2, \dots, c_n]$ chamado $[k_1 < k_2 < k_3, \dots, < k_n]$, onde $k_1 \leq c_1$ e $k_n \geq c_n$, garantindo que a condição $k_1 \leq c \leq k_n$ seja satisfeita, onde c é o elemento a ser encontrado.
2. Faça $\text{inf} = k_1$ e $\text{sup} = k_n$.
3. Encontre a mediana do vetor k , utilizando $m = \lfloor (\text{inf} + \text{sup})/2 \rfloor$, onde m é a mediana.
4. Compare, se $m = c$, fim do algoritmo.
5. Compare, se $m > c$, faça $\text{sup} = m$ e vá para o passo 3.
6. Compare, se $m < c$, faça $\text{inf} = m$ e vá para o passo 3.

A grande vantagem do algoritmo de busca binária é que ele garante que, após a inspeção do elemento mediano, não haverá mais do que aproximadamente $\log_2 n$ operações, onde n é o número de elementos do vetor de busca [Knuth 2004].

Este algoritmo será utilizado para que dado um valor de probabilidade de perda de referência (um limiar superior que não deve ser ultrapassado) seja calculada a taxa de transmissão necessária a ser alocada para o enlace.

7.2.2 Cálculo adaptativo de taxa de transmissão utilizando janelamento temporal

Algoritmos adaptativos são mais adequados para aplicações em tempo real nas redes atuais devido ao processamento ‘on-line’ das informações [Liu e Hsu 2006]. Tendo em vista isso,

apresenta-se um esquema de alocação de taxa de transmissão onde os valores de taxa de transmissão são obtidos de forma adaptativa utilizando a expressão matemática proposta em (5.18) por meio do cálculo adaptativo dos multiplicadores A_j da modelagem multifractal considerada em janelas de tempo à medida que dados de tráfego de entrada são disponibilizados.

O principal benefício em usar janelamento temporal está em se conseguir adaptação dos valores dos multiplicadores A_j , e consequentemente da taxa de transmissão a ser alocada, com maior precisão. O janelamento permite a captura de várias características do tráfego de redes em tempo real, que proporcionarão diferentes decisões ao projetista.

Assim, o mecanismo de alocação adaptativa de taxa de transmissão proposto funciona conforme a seguir.

Algoritmo Proposto 2: Alocação adaptativa de taxa de transmissão

1. Define-se um limiar superior de probabilidade de perda $P(Q > b)$ a ser atendido pela rede.
2. Para uma dada janela de tempo de tráfego que chega ao sistema, são estimados os multiplicadores A_j do domínio *wavelet*.
3. Para a janela de tráfego do passo 2, os parâmetros encontrados nos passos 1 e 2 são substituídos na expressão (5.18).
4. Utilizando o algoritmo de busca binária na expressão resultante do passo 3, o valor da capacidade c a ser alocada correspondente a esta janela de tráfego é encontrado.
5. Para a janela de tráfego seguinte o algoritmo de alocação de taxa se repete a partir do passo 2.

Desta forma é possível calcular adaptativamente os valores de taxa de transmissão a serem alocados utilizando janelamento, o algoritmo de busca binária e a expressão para estimação de probabilidade de perda proposta no Capítulo 5. Como forma de justificar a utilização do método adaptativo proposto, na seção 7.3, são apresentados, além das comparações entre os dois métodos adaptativos, resultados da alocação de taxa utilizando a expressão proposta sem adaptação de parâmetros, onde uma única taxa é alocada para toda a série de tráfego

considerada. A seguir são apresentados os meios utilizados para avaliar o desempenho do esquema proposto e os resultados obtidos por meio de simulações.

7.3 RESULTADOS OBTIDOS

Testes e simulações para avaliar o desempenho do algoritmo adaptativo de cálculo de taxa de transmissão foram realizados. Objetivou-se demonstrar que a expressão proposta pode ser utilizada como uma ferramenta analítica muito útil para atender a requisitos de qualidade de serviço pré-estabelecidos em um contrato de serviço. Para tal, séries reais de tráfego de redes foram utilizadas, a maioria com características multifractais, conforme apresentado no Capítulo 3. As séries de tráfego utilizadas estão disponíveis em [DEC 2000]. Os cálculos e simulações foram realizados utilizando o software MATLAB da MathWorks®.

Serão apresentados os resultados obtidos para várias séries de tráfego diferentes, chamadas neste trabalho de dec-pkt-1, dec-pkt-2, lbl-pkt-4, lbl-pkt-5 e 4-7-I-9 disponíveis em [DEC 2000]. As características multifractais destas séries foram avaliadas no Capítulo 3 em termos de função de escala, diagrama multiescala e espectro multifractal.

Além dos resultados utilizando a alocação adaptativa de taxa de transmissão proposta, também são apresentados os resultados obtidos utilizando o método DRA. Os resultados obtidos são encontrados utilizando os dois métodos, considerando estimativas de probabilidade de perda, tamanho da fila no *buffer* e utilização média do enlace.

A utilização média do enlace (u) mede a fração da capacidade do servidor usada para servir o fluxo de dados observados no período de tempo T , calculada por:

$$u = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \min \left\{ \frac{r_t}{C_t}, 1 \right\} \quad (7.6)$$

onde r_t denota o valor observado da taxa de tráfego e C_t a capacidade do servidor no instante de tempo t .

Além disso, o desempenho do esquema de alocação adaptativa de taxa de transmissão é avaliado utilizando o conceito de Fator de Adequação Médio (*Average Goodness Factor* – AGF). O AGF mede o grau com o qual a taxa de transmissão alocada é capaz de acompanhar,

em termos de rapidez e proximidade, a dinâmica da taxa de entrada do tráfego de redes [Tran e Ziegler 2005].

A ideia básica é a de que, em um caso ideal, a utilização do enlace seja mantida constante em um nível ótimo, chamado de u_{opt} . O valor de u_{opt} é obtido experimentalmente relacionando as métricas de QoS a serem alcançadas e a utilização do enlace de uma rede com características de tráfego específicas. Mais especificamente, o valor de u_{opt} é obtido ao utilizar-se um modelo de tráfego Gaussiano para o tráfego considerado a fim de deduzir uma relação ótima entre a utilização do enlace e o atendimento aos parâmetros de QoS considerados.

Para um tráfego de redes que pode ser descrito por um processo Gaussiano, ou seja, um tráfego dito ‘bem comportado’, o valor de u geralmente é alto, ao contrário dos valores de u observados para um tráfego com características multifractais, como várias das séries de tráfego tratadas neste trabalho. Para este tipo de tráfego, por apresentar estrutura de correlação com longa dependência e tráfego em rajadas que persistem em diferentes escalas de tempo [Riedi et al. 1999], o valor médio de u é, geralmente, mais baixo. Uma utilização média eficiente exige a alocação de uma taxa de transmissão para o enlace que seja suficiente para garantir as métricas de QoS e que seja robusta diante das variações bruscas do tráfego de redes [Feldmann et al. 1998], [Park e Willinger 2000]. Neste sentido, algoritmos adaptativos de alocação de taxa são mais adequados para se obter uma utilização mais eficiente dos recursos. Matematicamente, o valor de AGF é obtido conforme a seguir:

Assumindo que para uma dada janela j , a taxa de transmissão alocada para o enlace seja c_j e a taxa de tráfego para esta mesma janela j seja r_j , define-se o Fator de Adequação (*Goodness Factor* - GF) como [Tran e Ziegler 2005]:

$$GF_j := \left\{ \begin{array}{ll} \frac{c_j - r_j}{u_{opt}} & \text{se } c_j \leq r_j \\ \frac{r_j / c_j}{u_{opt}} & \text{se } c_j > r_j \text{ e } r_j / c_j \leq u_{opt} \\ \frac{u_{opt}}{r_j / c_j} & \text{se } c_j > r_j \text{ e } r_j / c_j > u_{opt} \end{array} \right\} \quad (7.7)$$

O valor de AGF é obtido por meio da média de GF_j , ou seja, a média dos valores de GF obtidos para cada janela j , utilizando [Tran e Ziegler 2005]:

$$AGF = \sum_1^M GF_j / M \quad (7.8)$$

onde M representa a quantidade total de janelas.

A interpretação do valor de AGF é feita da seguinte forma: quanto maior o grau de superdimensionamento ou subdimensionamento do enlace, menor o valor de AGF. Quanto maior a acurácia do esquema de provisão de taxa de transmissão, mais próximo o valor de AGF será de 1.

São apresentados na Tabela 7.1 algumas estatísticas das séries de tráfego de redes utilizadas, estas estatísticas são utilizadas pelo método DRA para alocação adaptativa de taxas de transmissão.

Tabela 7.1. Estatísticas das séries de tráfego.

Série de tráfego	Média (μ) bytes	Desvio padrão (σ) bytes	Parâmetro de Hurst (H)
dec-pkt-1	$3,4474 \times 10^3$	$2,8376 \times 10^3$	0,7784
lbl-pkt-5	$2,5920 \times 10^3$	$2,2961 \times 10^3$	0,7769
lbl-pkt-4	$3,1965 \times 10^3$	$2,2378 \times 10^3$	0,7800
4-7-I-9	$1,2198 \times 10^4$	$2,3206 \times 10^3$	0,7732
dec-pkt-2	$9,9285 \times 10^3$	$6,5590 \times 10^3$	0,7783

A Tabela 7.2 apresenta as configurações de capacidade de *buffer* utilizadas nas simulações e utilização ótima u_{opt} encontrada para cada série de tráfego analisada.

Tabela 7.2. Configurações do sistema – capacidade do *buffer* e utilização ótima.

Série de tráfego	Capacidade do <i>buffer</i> (bytes)	Utilização ótima (u_{opt})
dec-pkt-1	$3,50 \times 10^4$	0,9770
lbl-pkt-5	$2,60 \times 10^4$	0,9746
lbl-pkt-4	$1,25 \times 10^4$	0,9590
4-7-I-9	$5,00 \times 10^4$	0,6452
dec-pkt-2	$5,25 \times 10^4$	0,9253

A seguir são apresentados os resultados de perda média, perda máxima e AGF obtidos nas simulações para as cinco séries de tráfego consideradas. Todos os resultados foram obtidos para o esquema proposto de alocação adaptativa de taxa de transmissão baseado em estimação de probabilidade de perda, para este mesmo esquema proposto, porém sem adaptação, chamado esquema estático e para o método DRA. Para facilitar a comparação entre os dois métodos adaptativos, o passo de atualização da janela de tráfego do método proposto foi configurado com valor igual ao tamanho do bloco de tráfego do método DRA.

Tabela 7.3. Resultados de taxa de perda e AGF

Série de tráfego	Taxa de perda média			Taxa de perda máxima			AGF		
	DRA	Prop.	Estático	DRA	Prop.	Estático	DRA	Prop.	Estático
dec-pkt-1	0,026	0,013	0,000	0,136	0,067	0,000	0,855	0,899	0,433
lbl-pkt-5	0,041	0,029	0,003	0,127	0,087	0,022	0,895	0,934	0,517
lbl-pkt-4	0,042	0,022	0,017	0,140	0,087	0,116	0,865	0,914	0,693
4-7-I-9	0,110	0,024	0,239	0,424	0,113	0,759	0,693	0,852	0,824
dec-pkt-2	0,0219	0,0218	0,0923	0,120	0,079	0,328	0,909	0,978	0,943

É possível observar a partir dos resultados apresentados na Tabela 7.3, que o esquema de alocação de taxa proposto é eficiente pois apresenta, para diferentes séries analisadas, menores perdas e valores de AGF maiores do que o algoritmo DRA. Observa-se também que o uso de um método adaptativo é justificável, pois utilizando um método estático tem-se, ora valores de AGF muito baixos (dec-pkt-1, lbl-pkt-5 e lbl-pkt-4), expressando baixíssima utilização do *buffer*, ora valores de probabilidade de perda altíssimos (4-7-I-9 e dec-pkt-2) que ultrapassam muito o limiar de probabilidade de perda aceitável fixado em 0,1.

São apresentados também, nesta seção, resultados e estatísticas detalhados relacionados à probabilidade de perda, ao tamanho médio da fila e a utilização média do enlace para três das séries de tráfego consideradas, cujos resultados principais foram apresentados na Tabela 7.3.

Para a série dec-pkt-1, resultados de probabilidade de perda e taxa alocada adaptativamente são apresentados, respectivamente, na Figura 7.2 e na Figura 7.3:

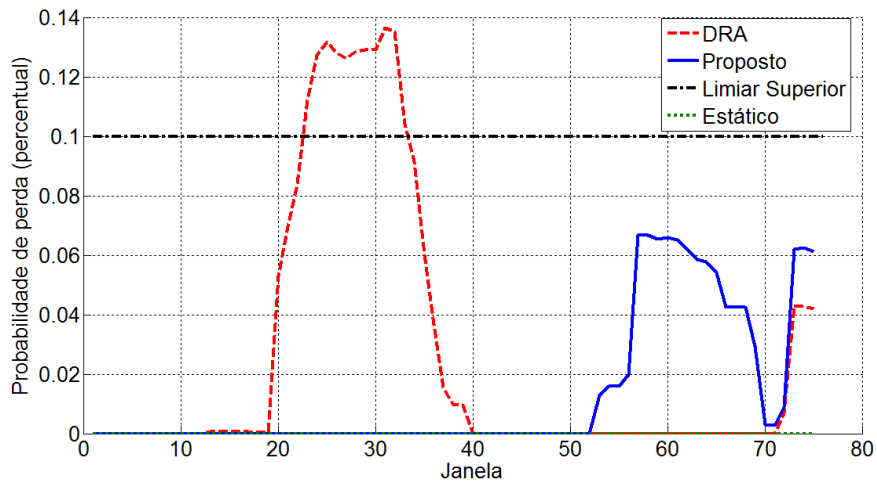


Figura 7.2. Comparação entre taxas de perda para a série dec-pkt-1, janela = 128 amostras.

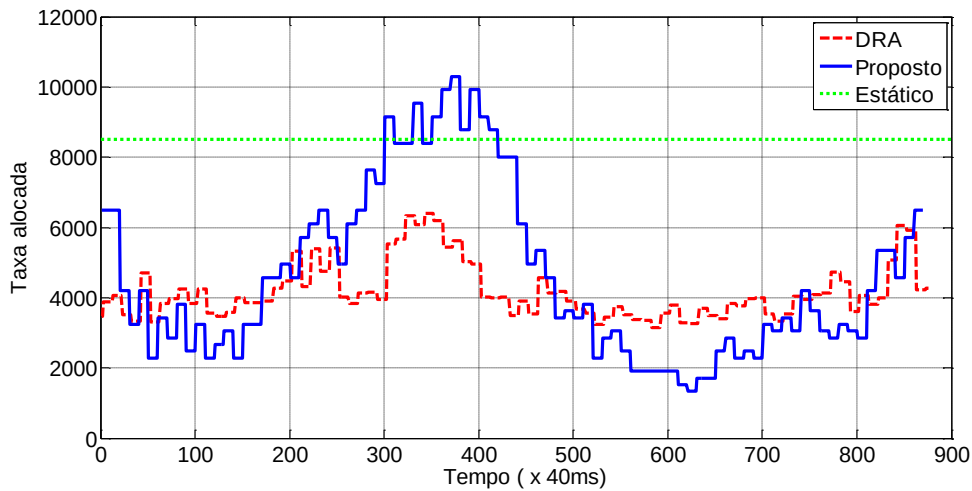


Figura 7.3. Comparação entre esquemas adaptativos de alocação de taxa de transmissão para a série dec-pkt-1.

Como pode ser observado por meio da Figura 7.2, foi estabelecido um limiar superior de probabilidade de perda igual a 0,1 a ser atendido pelo algoritmo de alocação de taxa para a série de tráfego dec-pkt-1. A partir das equações (7.4) e (7.5) pode-se demonstrar que para $\varepsilon = 0,1$, obtém-se a equação (7.9), apresentada abaixo.

$$\Delta C \approx \left\{ \frac{(-2 \ln \varepsilon - 2,65)^{1/2} \sigma (1-a) H^H (1-H)^{1-H}}{q^{1-H}} \right\}^{1/H} \quad (7.9)$$

A medida dada pela equação (7.9) foi utilizada para obter os resultados de alocação adaptativa de recursos do método DRA apresentados na Figura 7.3.

Pode-se observar que o esquema adaptativo proposto apresentou melhor desempenho que o método DRA, pois em 100% do tempo foi alocada taxa de transmissão necessária para que não houvesse violações ao limite de probabilidade de perda de bytes imposto, ao contrário do que ocorreu com o DRA, onde violações superiores a 0,1 foram registradas.

Já na Figura 7.3, também referente à série dec-pkt-1, é apresentado um comparativo entre a taxa alocada adaptativamente por meio do esquema proposto e a taxa alocada utilizando o DRA. É possível observar que as taxas alocadas por meio do esquema proposto adaptam-se às características do tráfego de forma a evitar grandes perdas e, por outro lado, economiza recursos ao alocar taxas menores para janelas de tráfego que demandam menores taxas de transmissão.

A Tabela 7.4, abaixo, apresenta algumas estatísticas das curvas apresentadas na Figura 7.2.

Tabela 7.4. Estatísticas registradas de taxa de perda para a série dec-pkt-1.

Série dec-pkt-1 Taxa de perda	DRA	Proposto	Estático
Valor mínimo	0,0000	0,0000	0,0000
Valor máximo	0,1364	0,0667	0,0000
Média	0,0261	0,0131	0,0000
Desvio padrão	0,0464	0,0237	0,0000

Como pode ser observado através da Tabela 7.4, os resultados apresentados para o esquema proposto corroboram com as conclusões apresentadas para a Figura 7.2 e para a Figura 7.3, já que as estatísticas, dentre elas a média e o valor máximo, encontradas utilizando o esquema proposto são menores que os valores encontrados com o esquema DRA. O método estático não apresentou perda ao passo que a utilização do *buffer* e do enlace foram baixas, como apresentado nas tabelas a seguir.

Ainda sobre a série de tráfego dec-pkt-1, a Tabela 7.5 apresenta os resultados obtidos para o tamanho médio da fila computado e a Tabela 7.6 os resultados obtidos para a utilização média do enlace.

Tabela 7.5. Estatísticas de utilização média do *buffer* - série dec-pkt-1.

Série dec-pkt-1 Utilização média do <i>buffer</i> (x100%)	DRA	Proposto	Estático
Valor mínimo	0,0000	0,0000	0,0000
Valor máximo	1,0000	1,0000	0,6154
Média	0,2127	0,2748	0,0171
Desvio padrão	0,3212	0,3190	0,0696

A utilização do *buffer* é definida como sendo a razão entre o tempo total de serviço fornecido aos pacotes pelo tempo total de uso do *buffer* [Krishna et al. 2003]. Um valor de utilização do *buffer* próximo de 1 indica que o *buffer* está constantemente sendo usado e consequentemente há uma maior probabilidade de descarte de dados.

Em relação à ocupação do *buffer* (tamanho médio da fila), um valor muito abaixo de 0,4, significa que o *buffer* está sendo subutilizado, um valor entre 0,4 e 0,7 é considerado adequado em redes reais [Krishna et al. 2003]. Obviamente, a utilização do *buffer* depende da capacidade alocada para o servidor, ou seja, da taxa em que os dados são transmitidos.

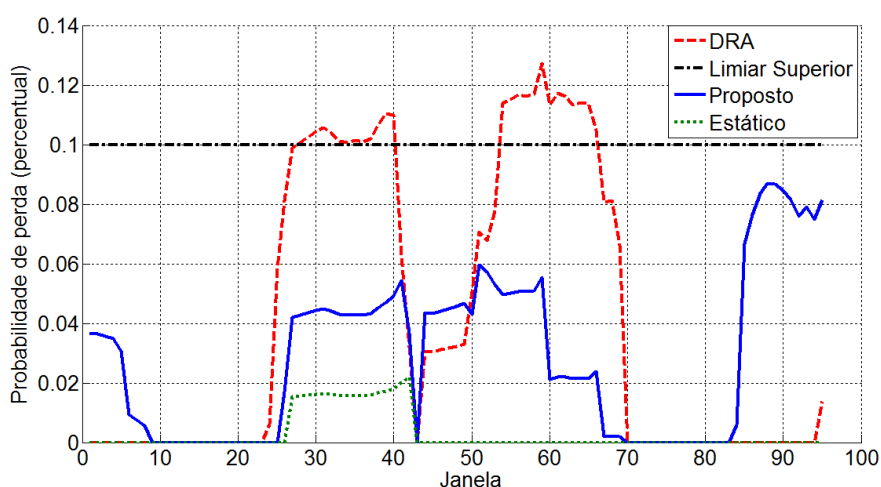
Nota-se através da Tabela 7.5 que a média dos valores de tamanho médio de fila computados para todas as janelas foi inferior ao valor considerado ideal, tanto para o esquema proposto como para o DRA, denotando uma subutilização do *buffer*. Por outro lado, o método proposto apresentou um tamanho médio de fila maior que o DRA, estando portanto mais próximo dos valores considerados adequados.

Tabela 7.6. Estatísticas de utilização média do enlace para a série dec-pkt-1.

Série dec-pkt-1 Utilização média (x100%)	DRA	Proposto	Estático
Valor mínimo	0,5949	0.4956	0,2396
Valor máximo	0,9907	1.0000	0,7159
Média	0,8189	0.8292	0,4225
Desvio padrão	0,1220	0.1640	0,1411

A Tabela 7.6 apresenta os resultados das estatísticas de utilização média do enlace para todas as janelas de tráfego consideradas. Através desta tabela, é possível observar que as estatísticas para os dois métodos considerados são semelhantes, mas o método proposto apresentou utilização média um pouco maior que o DRA. Além disso, o AGF pode ser visto como uma forma de mensurar a utilização de forma mais completa que a utilização média [Tran e Ziegler 2005], e, ao se observar a Tabela 7.3, verifica-se que o método proposto também apresentou valor de AGF maior que o DRA. Conclui-se que o esquema proposto foi mais eficiente que o DRA, uma vez que seu valor de AGF é alto e está mais próximo de 1.

Resultados semelhantes foram colhidos para outra série de tráfego de redes, conhecida como lbl-pkt-5. Estes resultados são apresentados a seguir.

**Figura 7.4. Comparativo entre taxas de perda para a série lbl-pkt-5, janela = 128 amostras.**

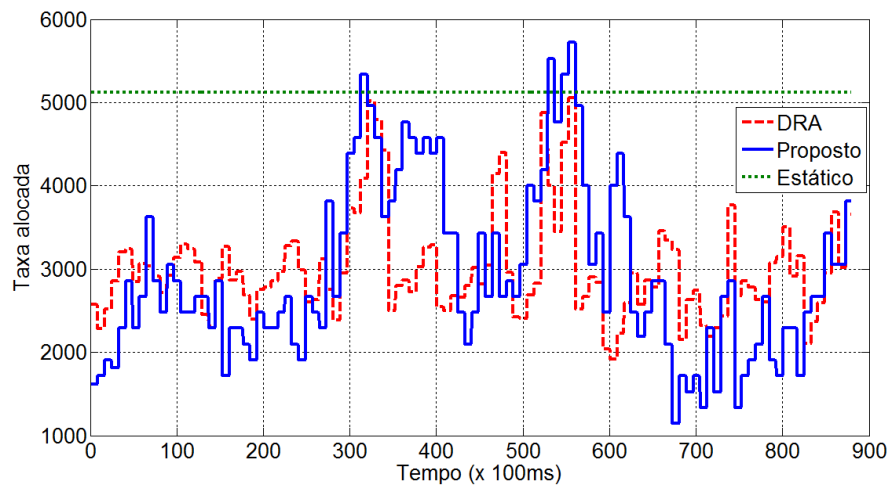


Figura 7.5. Comparativo entre alocações adaptativas de taxa de transmissão para a série lbl-pkt-5.

Como pode ser observado pela Figura 7.4, também foi estabelecido um limiar superior de probabilidade de perda igual a 0,1 para a série de tráfego lbl-pkt-5. Pode-se observar que o esquema adaptativo proposto apresentou melhor desempenho que o método DRA, pois em todo o tempo foi alocada taxa de transmissão necessária para que não houvesse violações acima do limiar superior estabelecido, ao contrário do que ocorreu com o DRA, onde foram registradas violações superiores ao limiar.

Já na Figura 7.5, também referente à série lbl-pkt-5, é apresentado um comparativo entre a taxa alocada adaptativamente por meio do esquema proposto e a taxa alocada utilizando o DRA.

A Tabela 7.7, exibida em seguida, apresenta algumas estatísticas das curvas apresentadas na Figura 7.4.

Tabela 7.7. Estatísticas de taxa de perda para a série lbl-pkt-5.

Série lbl-pkt-5 Taxa de perda	DRA	Proposto	Estático
Valor mínimo	0,0000	0,0000	0,0000
Valor máximo	0,1272	0,0870	0,0219
Média	0,0409	0,0290	0,0028
Desvio padrão	0,0485	0,0276	0,0064

Como pode ser observado por meio da Tabela 7.7, os resultados apresentados para o esquema proposto corroboram com as conclusões apresentadas para a Figura 7.4, já que a maioria das estatísticas, dentre elas a média e o valor máximo, encontradas utilizando o esquema proposto são menores que os valores encontrados com o esquema DRA.

Ainda sobre a série de tráfego lbl-pkt-5, a Tabela 7.8 apresenta os resultados obtidos para o tamanho médio da fila computado e a Tabela 7.9 os resultados obtidos para a utilização média do enlace.

Tabela 7.8. Estatísticas de utilização média do *buffer* para a série lbl-pkt-5.

Série lbl-pkt-5 Utilização média do <i>buffer</i> (x100%)	DRA	Proposto	Estático
Valor mínimo	0,0000	0,0000	0,0000
Valor máximo	1,0000	1,0000	1,0000
Média	0,1539	0,3848	0,0575
Desvio padrão	0,2703	0,3392	0,1850

Nota-se através da Tabela 7.8 que a média dos valores de tamanho médio de fila computados para todas as janelas utilizando o método proposto está muito próximo de 0,4, valor acima do qual considera-se que o *buffer* não está mais sendo subutilizado. Por outro lado, utilizando o

método DRA, um valor muito baixo para utilização do *buffer* foi encontrado, denotando uma grande subutilização do *buffer*.

Tabela 7.9. Estatísticas de utilização média do enlace para a série lbl-pkt-5.

Série lbl-pkt-5 Utilização média do enlace (x100%)	DRA	Proposto	Estático
Valor mínimo	0,6828	0,6195	0,3553
Valor máximo	0,9217	1,0000	0,6978
Média	0,8290	0,8678	0,5120
Desvio padrão	0,0551	0,1273	0,0916

Por meio da Tabela 7.9, observa-se que para o método proposto uma utilização média do enlace maior do que a do DRA foi obtida. Resultado este corroborado por um valor de AGF maior, utilizando o esquema proposto, do que o obtido utilizando o DRA, conforme apresentado pela Tabela 7.3.

Conclui-se, mais uma vez, que o cálculo adaptativo proposto baseado em estimação de probabilidade de perda foi mais eficiente do que o DRA (método de alocação adaptativa de recursos descrito em [Trinh e Miki 1999]), uma vez que seu valor de AGF é alto e está mais próximo de 1.

Para a série dec-pkt-2, que, em oposição às séries dec-pkt-1 e lbl-pkt-5, possui características monofractais, conforme apresentado no Capítulo 3, resultados de probabilidade de perda e taxa alocada adaptativamente são mostrados, respectivamente, na Figura 7.6 e na Figura 7.7:

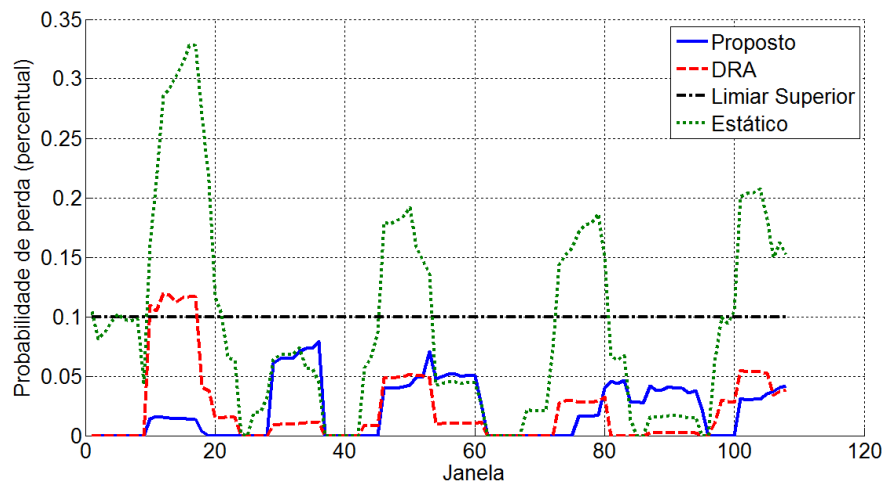


Figura 7.6. Comparação entre taxas de perda para a série dec- pkt-2, janela = 64 amostras.

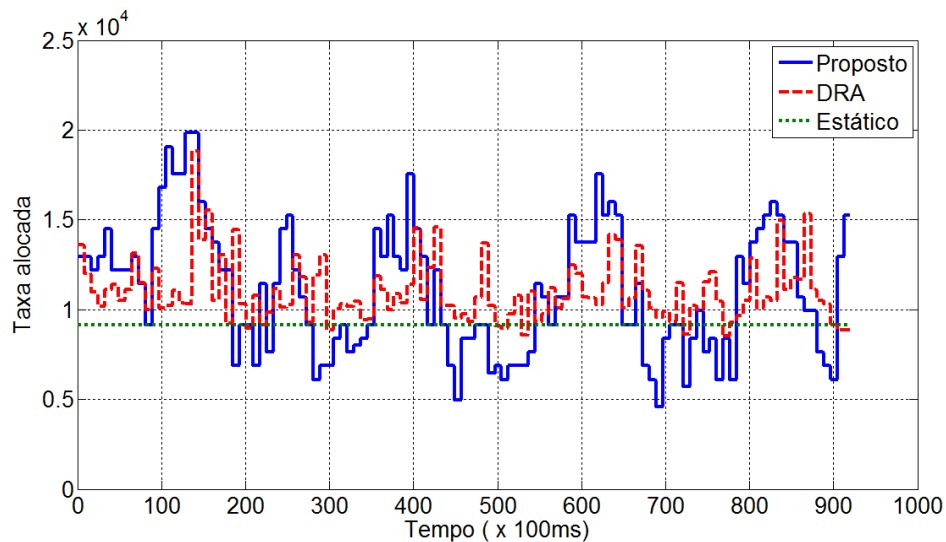


Figura 7.7. Comparação entre esquemas adaptativos de alocação de taxa de transmissão para a série dec-pkt-2.

Pode-se observar que o esquema adaptativo proposto apresentou melhor desempenho que o método DRA, pois em 100% do tempo foi alocada taxa de transmissão necessária para que não houvesse violações ao contrário do que ocorreu com o DRA, onde violações superiores a 0,1 foram registradas.

A Tabela 7.10, abaixo, apresenta algumas estatísticas das curvas apresentadas na Figura 7.6.

Tabela 7.10. Estatísticas registradas de taxa de perda para a série dec-pkt-2.

Série dec-pkt-2 Taxa de perda	DRA	Proposto	Estático
Valor mínimo	0,0000	0,0000	0,0000
Valor máximo	0,1200	0,0790	0.3282
Média	0,0219	0,0218	0.0923
Desvio padrão	0,0315	0,0234	0.0859

Como pode ser observado através da Tabela 7.10, as estatísticas encontradas utilizando o esquema proposto são menores que os valores encontrados com o esquema DRA. Ainda sobre a série de tráfego dec-pkt-2, a Tabela 7.11 apresenta os resultados obtidos para o tamanho médio da fila computado e a Tabela 7.12 os resultados obtidos para a utilização média do enlace.

Tabela 7.11. Estatísticas de utilização média do *buffer*- série dec-pkt-2.

Série dec-pkt-2 Utilização média do <i>buffer</i> (x100%)	DRA	Proposto	Estático
Valor mínimo	0,0000	0,0000	0,0000
Valor máximo	1,0000	1,0000	1,0000
Média	0,2048	0,3279	0,4939
Desvio padrão	0,2992	0,3436	0,3784

Nota-se através da Tabela 7.11 que a média dos valores de utilização do *buffer* computados para todas as janelas foi inferior ao valor considerado ideal, tanto para o esquema proposto como para o DRA, denotando uma subutilização do buffer. Por outro lado, o método proposto apresentou um tamanho médio de fila maior que o DRA, estando portanto mais próximo dos valores considerados adequados.

Tabela 7.12. Estatísticas de utilização média do enlace para a série dec-pkt-2.

Série dec-pkt-2 Utilização média do enlace (x100%)	DRA	Proposto	Estático
Valor mínimo	0,6905	0,6252	0,7744
Valor máximo	0,9518	1,0000	1,0000
Média	0,8431	0,8637	0,9377
Desvio padrão	0,0596	0,0954	0,0612

A Tabela 7.12 apresenta os resultados das estatísticas de utilização média para todas as janelas de tráfego consideradas. Através desta tabela, é possível observar que o método proposto apresentou utilização média maior que o DRA.

Além dos resultados detalhados para as séries dec-pkt-1, lbl-pkt-5 e dec-pkt-2, observando a Tabela 7.3 é possível concluir que o método proposto é mais eficiente que o DRA também para outras séries consideradas, uma vez que com o método proposto obtém-se taxas de perdas menores e valores de AGF maiores que aqueles encontrados utilizando o DRA.

7.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, utilizando um algoritmo de busca binária aplicado na expressão para estimação de probabilidade de perda proposta no Capítulo 5, foi encontrada uma taxa de transmissão necessária a ser alocada para que um valor limite superior de probabilidade de perda não seja ultrapassado. Posteriormente, utilizou-se janelamento para calcular adaptativamente a taxa de transmissão a ser alocada. Para tanto, uma modelagem multifractal baseada em *wavelets* foi utilizada para calcular adaptativamente os multiplicadores A_j , registrando para cada janela, as perdas encontradas para cada valor de taxa de transmissão.

Verificou-se que o esquema adaptativo de alocação de taxa de transmissão proposto é eficiente, pois em comparação com outro método de alocação dinâmica de recursos, denominado DRA, apresentou melhores resultados para taxa de perda, utilização do enlace e AGF, além de resultados de utilização do *buffer* mais próximos do ideal que o DRA.

7.5 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO

- 1.** Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Alocação Adaptativa de Taxa de Transmissão Baseada em Estimação de Probabilidade de Perda para Tráfego de Redes Considerando Características Multifractais”. Revista da SBA (Sociedade Brasileira de Automática). (Submetido em 18.02.2011).
- 2.** Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. Abordagem para Alocação de Banda Baseada em Modelagem Multifractal para Tráfego de Redes sem Fio In: VII Seminário de Pós-Graduação da UFG, Goiânia. 2010.

Capítulo 8. CONTROLE DA TAXA DE TRÁFEGO DE VÍDEO MPEG-4

Conforme abordado no Capítulo 2, por existirem semelhanças entre os quadros sucessivos gerados a partir de uma mesma cena, o MPEG-4 é uma técnica de compressão que utiliza codificação tanto de redundância espacial (*intra-frames*) quanto codificação de redundância temporal (*inter-frames*) [ISO/IEC 2000]. No MPEG-4 existem três tipos diferentes de quadros, os quadros do tipo I, os quadros do tipo P e os quadros do tipo B. Os quadros do tipo I são os quadros mais importantes, com número maior de bits e que carregam o maior número de informações importantes, estes quadros não dependem de nenhum outro. Já os quadros do tipo P dependem de quadros tipo I ou tipo P anteriores, enquanto os quadros do tipo B dependem de quadros anteriores e sucessivos dos tipos I e P.

Os quadros dos tipos I, P e B são organizados em grupos chamados de GoPs (*Group of Pictures* – Grupo de Imagens), cada GoP é composto por um quadro do tipo I, de um certo número de quadros do tipo P e opcionalmente de alguns quadros do tipo B localizados entre os quadros I e P, e entre quadros do tipo P consecutivos. Uma série de GoPs compõe uma série de vídeo.

Com a finalidade de gerar séries sintéticas de tráfego de vídeo MPEG-4, compostas por séries de quadros do tipo I, P e B, foi empregado o modelo multifractal baseado em cascata multiplicativa CMAM, introduzido no Capítulo 4. Um modelo de tráfego multifractal foi escolhido por já ter sido mostrado que o tráfego de vídeo MPEG-4 possui características multifractais, tais como diferentes leis de escala, decaimento lento da função de autocorrelação e rajadas que persistem em diferentes escalas [Fei e Zhimei 2003], [Wang e Qiu 2005], [Rocha e Vieira 2009].

Assim, neste capítulo propõe-se um esquema de controle de taxa de tráfego de vídeo MPEG-4 baseado no modelo CMAM do tráfego de vídeo e em uma modelagem exponencial para o fator de escala relacionado com o parâmetro quantização Q . Para tal, na seção 8.1 é apresentada a modelagem proposta para a função de fator de escala relacionada ao Q . Na

seção 8.2 o esquema proposto de controle de tráfego de vídeo na fonte é apresentado e os resultados das simulações realizadas são mostrados. Na seção 8.3, apresentam-se as conclusões obtidas. Note que diferentemente do capítulo anterior, que trata de alocação de taxa para um servidor, este capítulo trata do controle de taxa da fonte de tráfego de vídeo.

8.1 MODELAGEM DA FUNÇÃO DE FATOR DE ESCALA

Nesta seção, é mostrado que ao analisar-se diferentes séries de vídeo MPEG-4, constata-se que cada série de vídeo pode ser submetida a um processo de decomposição em três outras séries, a saber, séries de quadros tipo I, tipo P e tipo B. Cada uma destas séries pode ser modelada por um processo CMAM diferente, e, posteriormente estas séries podem ser entrelaçadas em um processo de composição para formar o processo CMAM resultante.

O parâmetro de quantização Q determina a resolução espacial da imagem codificada com MPEG-4 [Zainaldin et al. 2008]. Quando o valor de Q é modificado, a taxa de tráfego e a qualidade do vídeo também são modificadas. Outra constatação pode ser feita quando uma série de vídeo com diferentes parâmetros de quantização Q é analisada [ISO/IEC 2000]. É possível observar que as diferenças entre as séries de quadros dos tipos I, P e B, para diferentes valores de Q , residem em um **fator de escala**. De forma que não é necessário modelar as séries de vídeo para todos os valores de Q . Apenas um processo gerado segundo o modelo CMAM para um dado valor de Q é necessário, e os demais são obtidos ao se multiplicar os valores do processo gerado por um fator de escala. Este fator de escala é diferente para cada tipo de quadro, mas é muito útil por fornecer séries sintéticas para quaisquer valores de Q a partir de apenas um valor de Q , chamado de Q de referência, ou simplesmente Q_{ref} .

Assim, após uma etapa de modelagem das séries de quadros I, P e B, é possível obter uma série sintética do vídeo original ao se entrelaçar os quadros I, P e B. Desta forma, obtém-se uma série de quadros que poderá ser avaliada, quanto a sua similaridade em relação à série original. Na próxima seção, estes conceitos serão utilizados para a elaboração do esquema de controle adaptativo de tráfego de vídeo proposto.

Desta forma, propõe-se o seguinte algoritmo de modelagem e uso da função de fator de escala para obtenção de um processo CMAM resultante para qualquer valor de Q .

Algoritmo Proposto 3: Modelagem da função de fator de escala

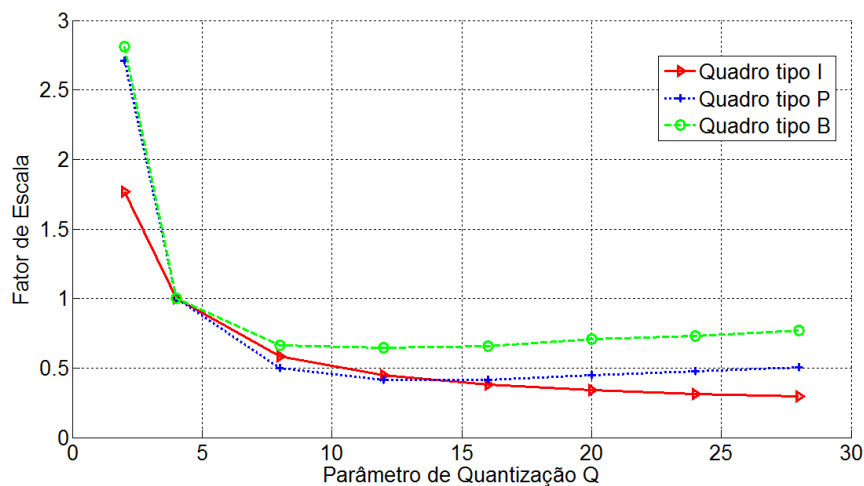
- 1) Escolhe-se uma fonte de vídeo e codifica-se esta fonte com MPEG-4 para alguns parâmetros de quantização Q diferentes.
- 2) Decompõe-se cada série da etapa 1 em três séries distintas, sendo elas: série de quadros I, P e B.
- 3) Escolhe-se um valor de Q dentre os valores de Q da etapa 1 como Q_{ref} .
- 4) Dividem-se as séries de quadros tipo I, P e B obtidas pela série correspondente que possui o Q_{ref} . A média de cada quociente realizado é chamada de fator de escala, e expresso como $f_I(Q)$, $f_P(Q)$ e $f_B(Q)$.
- 5) Utilizando um algoritmo de ajuste de curva (*curve fitting*) obtém-se um modelo exponencial para os valores de $f(Q)$ na forma $f(Q) = a \cdot e^{-b \cdot Q} + c$. Desta forma é possível obter $f(Q)$ para qualquer valor de Q , estando ele presente ou não na etapa 1.
- 6) Obtêm-se séries sintéticas utilizando-se o CMAM como modelo para séries de quadros tipo I, P e B para um dado Q , por meio do algoritmo apresentado no Capítulo 4, na subseção 4.4.3 (Modelo CMAM).
- 7) Obtêm-se séries sintéticas de quadros I, P e B para quaisquer valores de Q ao multiplicar-se as séries da etapa 6 por $f_I(Q)$, $f_P(Q)$ e $f_B(Q)$.
- 8) Entrelaça-se as séries da etapa 6 ou 7 para obter o processo CMAM resultante para quaisquer valores de Q .

Os resultados exemplificados nesta seção são provenientes de estudos com séries que possuem diferentes parâmetros de quantização Q . O exemplo de modelagem de tráfego apresentado na Tabela 8.1 possui parâmetro de quantização de referência Q_{ref} igual a 8, resultados de desempenho similares foram obtidos pelo modelo CMAM ao serem utilizados outros valores de Q .

Tabela 8.1. Média e variância - série de quadros – S.LAMBS.

S.LAMBS (bits)	Média		Variância	
	Real	Modelo	Real	Modelo
Quadro I	$3,447 \times 10^4$	$3,267 \times 10^4$	$7,083 \times 10^8$	$2,574 \times 10^8$
Quadro P	$1,418 \times 10^4$	$1,422 \times 10^4$	$2,289 \times 10^8$	$1,686 \times 10^8$
Quadro B	$8,310 \times 10^3$	$8,656 \times 10^3$	$7,324 \times 10^7$	$9,034 \times 10^7$
Entrelaçado	$1,141 \times 10^4$	$1,269 \times 10^4$	$2,182 \times 10^8$	$2,030 \times 10^8$

A Tabela 8.1 apresenta as estatísticas de média e variância das séries reais e sintéticas geradas para os quadros dos tipos I, P e B, além de mostrar também as estatísticas das séries reais e sintéticas de quadros após entrelaçamento. Observa-se que ao serem modelados os processos individualmente obtêm-se séries sintéticas com médias muito próximas das médias reais e variâncias distantes dos processos reais. No entanto, ao realizar-se o processo de síntese do CMAM resultante, ou seja, ao realizar-se o entrelaçamento dos modelos das séries tipo I,P e B individuais, obtém-se uma série sintética que reproduz bem tanto a média quanto a variância do processo real.

**Figura 8.1. Fator de escala versus parâmetro de quantização Q – série de vídeo S.LAMBS.**

A Figura 8.1 apresenta o fator de escala em relação à variação do parâmetro Q para as séries de quadros tipo I, P e B do vídeo S.LAMBS, onde $Q_{ref} = 4$.

Seja $f(Q)$ o fator de escala e assumindo que esta função possa ser modelada por uma função exponencial, então, pode-se obter $f(Q)$ da seguinte forma:

$$f(Q) = a \cdot e^{-b \cdot Q} + c \quad (8.1)$$

onde a , b e c são parâmetros da função exponencial que podem ser determinados por um algoritmo de ajuste de curvas. Para tal, neste trabalho foi utilizado o algoritmo de *curve fitting* do *software* Matlab da MathWorks®.

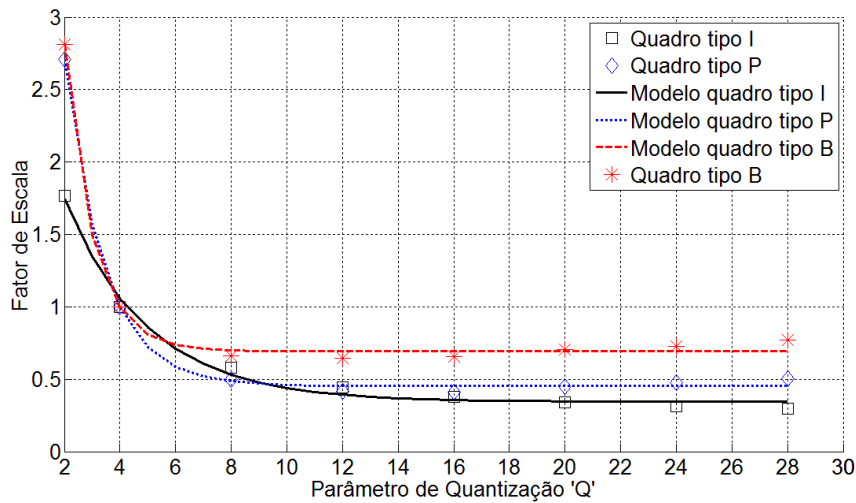


Figura 8.2. Modelagem exponencial dos fatores de escala.

A Figura 8.2 apresenta os resultados para modelagem exponencial das funções de fator de escala dos quadros tipo I, P e B, respectivamente, $f_I(Q)$, $f_P(Q)$, $f_B(Q)$, onde, por exemplo, $f_I(Q)$ pode ser modelado pela seguinte função:

$$f_I(Q) = 2,745e^{-0,3364Q} + 0,3448 \quad (8.2)$$

ou seja, $a=2,745$, $b=0,3364$ e $c=0,3448$, onde o erro quadrático médio (MSE-Mean Square Error) calculado foi igual a 0,00265.

8.2 CONTROLE DE TAXA DA FONTE DE VÍDEO MPEG-4

O CBR (*Constant Bit Rate*/Taxa de bit constante) e o VBR (*Variable Bit Rate*/Taxa de bit variável) são dois métodos de controle de vídeo MPEG-4. No CBR o vídeo é transmitido a uma taxa constante, e desta forma os valores de atraso são geralmente conhecidos. O CBR

depende da mudança do parâmetro de quantização Q , em nível de GoP, que é feito através da fixação da quantidade de bits alocados para cada GoP [ISO/IEC 1992]. As principais desvantagens desta técnica são a mudança contínua na qualidade do vídeo e a introdução do atraso de suavização do *buffer* cujo papel é remover a variabilidade de taxa.

No VBR, o vídeo é transmitido com variações de taxa (objetivando obter qualidade constante) que dependem da atividade e complexidade das cenas [Zainaldin et al. 2008]. Desta forma, no VBR a taxa da fonte varia indiscriminadamente, acompanhando as variações das cenas, utilizando um valor fixo para o parâmetro de quantização Q , e nenhum controle para a variabilidade da taxa da fonte é aplicado. No entanto, isto pode resultar em uma série com alto grau de rajadas devido às diferenças existentes entre os tamanhos dos quadros do tipo I em comparação com os quadros dos tipos P e B. Para evitar as desvantagens das duas técnicas, propõe-se um esquema de controle adaptativo de taxa da fonte de tráfego de vídeo que combina os benefícios das duas técnicas supracitadas. Este esquema será chamado de algoritmo VBR com controle de taxa da fonte, onde um processo de modelagem exponencial para o fator de escala associado ao parâmetro Q é aplicado.

O algoritmo VBR com controle de taxa da fonte combina os benefícios do CBR e do VBR ao permitir variabilidade de taxa, como no VBR tradicional, sem deixar de impor restrições a taxa de bits do codificador MPEG-4.

A Figura 8.3 apresenta o esquema de controle de taxa da fonte de tráfego de vídeo MPEG-4 proposto.

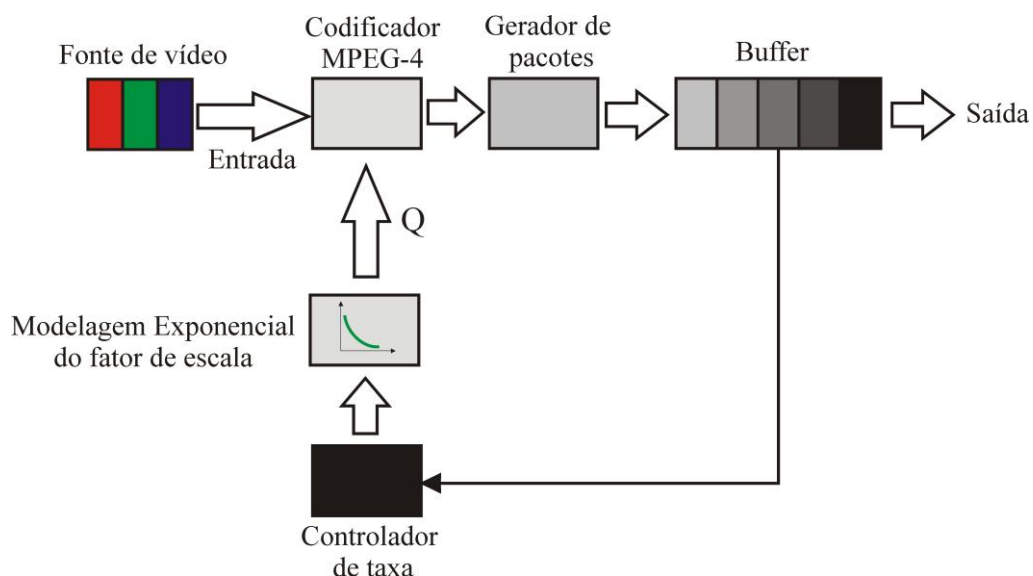


Figura 8.3. Esquema VBR com controle de taxa da fonte.

No esquema proposto na Figura 8.3, o controlador de taxa é utilizado para garantir que o tamanho da fila no *buffer* permaneça dentro de um intervalo especificado. Isto é feito através de uma contínua inspeção do tamanho da fila no *buffer*. O intervalo especificado é composto de um limite superior e um limite inferior, caso um deles seja violado o controlador de taxa informa o codificador MPEG-4 para que o valor de Q seja alterado. O novo valor de Q será aquele obtido através da inspeção da curva obtida na etapa de modelagem exponencial do fator de escala, especificado no algoritmo de modelagem e uso da função de fator de escala, apresentado na seção 8.1. As alterações dos valores de Q ocorrem em nível de GoP, ou seja, mesmo que o controlador de taxa identifique a necessidade de mudança do valor de Q , este será alterado apenas quando um novo GoP for iniciado. Desta forma, garante-se que a qualidade dos quadros dentro de um mesmo GoP não será afetada.

Ressalta-se aqui a importância da utilização de um modelo para o tráfego de vídeo que consiga descrever bem as características existentes entre os GoPs de uma série, como àquelas observadas através da função de autocorrelação (*ACF-AutoCorrelation Function*). No Capítulo 4 e em [Rocha e Vieira 2009], é demonstrado que o modelo CMAM é capaz de descrever bem o decaimento lento das *ACFs* das séries de GoPs de vídeos MPEG-4.

Também é importante ressaltar que a taxa de mudanças no valor de Q que ocorre no esquema proposto é muito menor que aquele observado no tráfego CBR em virtude dos limites impostos ao tamanho da fila no *buffer* e a constante inspeção do mesmo. Desta forma a qualidade do vídeo, de uma forma geral, não é depreciada, e, ao contrário disso, é possível obter um vídeo com taxa de quantização Q constante quando possível e com taxa de quantização Q variável quando necessário.

O número de pacotes no *buffer* é contabilizado por um contador X instalado logo após o gerador de pacotes. O valor de X é atualizado sempre que um pacote sai ou chega ao *buffer*. O valor de X não pode ultrapassar os limites do intervalo $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$, onde $X_{\min}$ é o tamanho mínimo que a fila no *buffer* poderá ter (geralmente configurado para $X_{\min}=0$, a fim de que o servidor não fique excessivamente ocioso) e $X_{\max}$ o tamanho máximo da fila no *buffer* permitido (a fim de evitar atrasos e eventuais perdas).

Exemplificando, são demonstrados os resultados obtidos para duas séries de vídeo, uma delas já utilizada anteriormente e denominada S.LAMBS, a outra é proveniente do filme “*Star Wars*

IV” (Guerra nas Estrelas IV). E esta última série é chamada neste trabalho apenas de SW4 e possui as mesmas características da série de vídeo S.LAMBS, compressão MPEG-4 parte 2, resolução de 352 x 288 pixels, taxa de 30 quadros por segundo e agrupamento de 16 quadros por GoP ordenados da seguinte forma (IBBBPBBBPBBBPBBB – G16B3).

Para avaliação do esquema proposto configurou-se o cenário retratado pela Figura 8.3 para operar com uma capacidade de servidor fixa, igual a média da série de tráfego de entrada para $Q=Q_{ref}$. A Figura 8.4 apresenta a dinâmica do *buffer* observada para o algoritmo VBR proposto com controle de taxa da fonte MPEG-4 que utiliza Q adaptativo, em comparação ao esquema VBR sem controle de taxa da fonte, que utiliza um valor de Q fixo, tendo como entrada do sistema o vídeo S.LAMBS com parâmetro de quantização $Q_{ref}=8$. Observa-se através desta figura que com o VBR original o *buffer* assume valores extremos, ora permanecendo com valores altos, violando o limite do *buffer* que é de 10^7 bits, ora assumindo valores iguais ou inferiores a zero (*buffer* nulo e capacidade ociosa). Já com o esquema VBR com controle de taxa, tem-se uma ocupação média do *buffer* em torno de 50% de seu tamanho total, com perda zero para o tamanho de *buffer* utilizado.

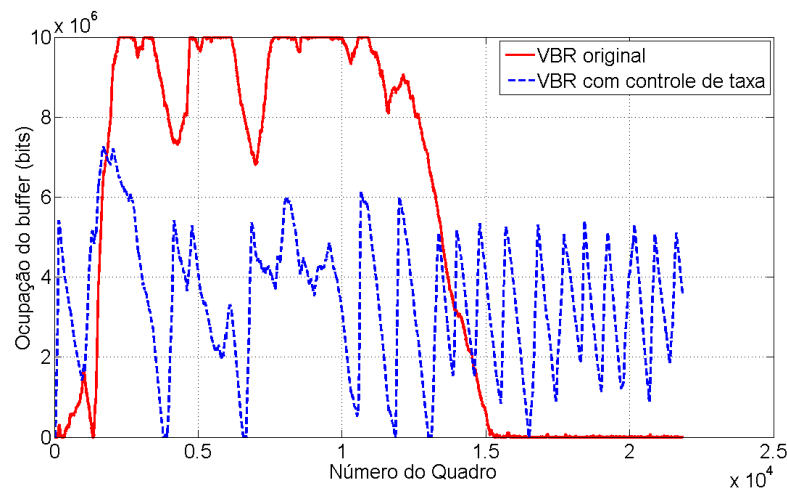


Figura 8.4. Ocupação média do *buffer* – S.LAMBS.

A Figura 8.5, assim como a Figura 8.6, apresenta os resultados obtidos em termos de probabilidade de perda em função do tamanho do *buffer*. Consta-se através destas figuras que para um grande intervalo de tamanhos de *buffer* a perda para o algoritmo VBR proposto com controle de taxa da fonte MPEG-4 é menor que aquele observado sem controle de taxa.

Para grande parte dos tamanhos de *buffer* a perda constatada, com o esquema de controle de taxa, foi zero.

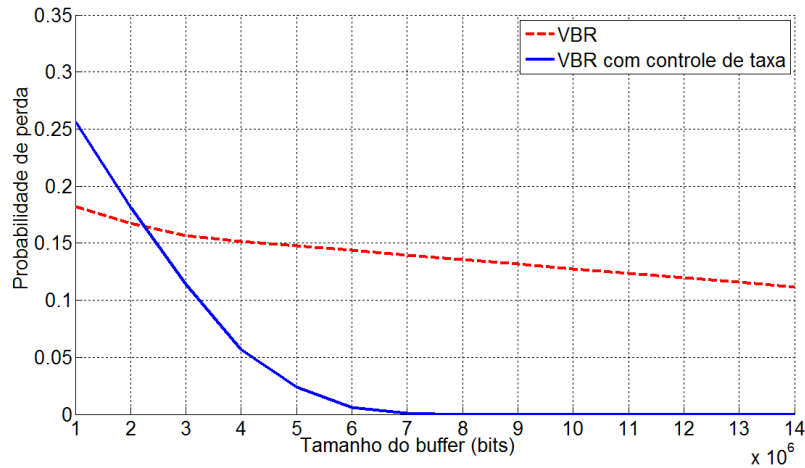


Figura 8.5. Probabilidade de perda – S.LAMBS.

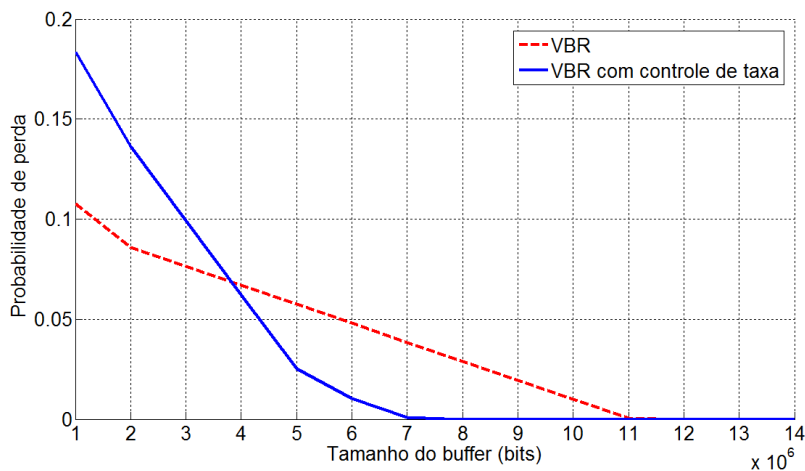


Figura 8.6. Probabilidade de perda – SW4.

A Figura 8.7 corrobora com a afirmação de que uma melhor utilização do enlace é obtida através de esquemas adaptativos de controle de taxa, como o algoritmo VBR com controle de taxa proposto. O algoritmo VBR com controle de taxa possui um desempenho mais eficiente, visto que a utilização do enlace cresce exponencialmente com o tamanho do *buffer* e estabiliza-se em torno de 99%, mantendo, portanto uma margem de 1% em relação à utilização máxima.

Desta forma conclui-se que com o algoritmo VBR de controle de taxa da fonte que lança mão de um algoritmo de modelagem exponencial para o fator de escala, associado ao valor de Q , é

possível obter uma ocupação média do *buffer* mais suave, conjugado a uma menor probabilidade de perda e a uma utilização mais eficiente dos recursos de enlace disponíveis.

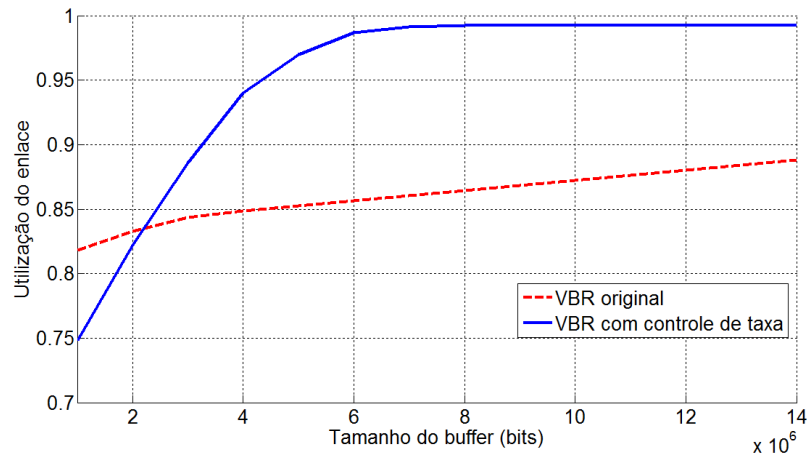


Figura 8.7. Utilização do enlace – S.LAMBS.

8.3 RESUMO DO CAPÍTULO

A partir deste capítulo, pode-se concluir que o esquema VBR proposto com controle de taxa da fonte de tráfego de vídeo MPEG-4 é eficiente, pois permite controlar o comportamento da fila no *buffer*, evitar perdas, e promover um aproveitamento eficiente do enlace de comunicação. O esquema proposto utiliza uma modelagem exponencial para a função de escala associada ao parâmetro de quantização Q , que é utilizada para cada tipo de quadro. Dado os resultados obtidos, considerou-se que o esquema proposto é uma ótima alternativa para modelagem e controle em malha fechada do tráfego de vídeo MPEG-4.

Estas afirmações foram comprovadas por meio de testes estatísticos, das análises dos comportamentos das séries em um sistema de fila e por meio de comparação com um esquema VBR tradicional sem controle de taxa da fonte.

8.4 ARTIGOS PUBLICADOS E SUBMETIDOS RELACIONADOS A ESTE CAPÍTULO

1. Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T. “Modelagem e Controle da Taxa de Vídeo MPEG-4 Utilizando Cascata Multifractal com Multiplicadores Autorregressivos”. XXIX

Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC 2011).
(Submetido em 20.12.2010).

Capítulo 9. CONCLUSÕES E TRABALHOS

FUTUROS

A partir dos resultados obtidos nesta dissertação e dos muitos trabalhos existentes na literatura que relacionam análise de tráfego de redes e multifractais, conclui-se que a análise multifractal é uma ferramenta muito útil para a descrição e controle do tráfego de redes. De fato, neste trabalho foi demonstrado que o comportamento das redes de comunicações, descritas por séries de tráfego, podem apresentar características multifractais como, autossimilaridade, longa dependência entre amostras e regularidades locais que variam a cada escala e que podem ser representadas por uma multiplicidade de valores para os expoentes de Hölder. A presença destas características foi averiguada em diferentes séries de tráfego, como séries de tráfego de redes TCP/IP, séries de tráfego de redes sem fio e séries de vídeo codificadas com MPEG-4 (tanto para séries de GoPs como para séries de quadros). Para tal, as definições de função de escala, de diagrama multiescala e de espectro multifractal foram utilizadas.

A partir dos indícios de ‘multifractalidade’ presentes nas séries de tráfego consideradas, um modelo multifractal baseado em cascata multiplicativa para descrição do tráfego de redes foi proposto. O modelo foi chamado de CMAM (Cascata Multifractal com Modelagem Autorregressiva para os Multiplicadores) e mostrou ser muito eficiente em comparação a outros modelos multifractais existentes na literatura, como o VVGM e o MWM.

Uma vez que a utilização da análise multifractal tem também por objetivo a melhoria do desempenho das redes visando a provisão de qualidade de serviço para os usuários finais, neste trabalho foi considerada uma das mais importantes métricas de QoS, a probabilidade de perda de dados. Foi proposta uma expressão que se constitui em uma ferramenta analítica muito útil para estimação da probabilidade de perda de dados de um servidor. Simulações foram realizadas e comprovaram que a abordagem proposta é mais eficiente do que outras abordagens como o MSQ e o CDTSQ. Além da utilização da expressão para estimar perda em um servidor alimentado por séries de tráfego de redes cabeadas, foi-se além e averiguou-se o

desempenho da expressão em estimar probabilidade de perda de dados em um cenário baseado no OFDM/TDMA, utilizando séries de tráfego de redes sem fio reais.

Posteriormente, com base na expressão proposta para estimação de probabilidade de perda, um esquema para controle de admissão de novos fluxos no cenário OFDM/TDMA foi proposto. O esquema proposto demonstrou ser eficiente para diferentes números de usuários e para diferentes valores de probabilidade de perda, já que apresentou resultados muito próximos aos das simulações.

Diante da eficiência de algoritmos adaptativos em relação a algoritmos estáticos e da necessidade de algoritmos eficientes que garantam a utilização ótima dos enlaces de transmissão, outra contribuição deste trabalho foi a proposição de um esquema de alocação adaptativa de taxa transmissão com base em características multifractais do tráfego de redes. Por outro lado, o esquema proposto não é restritivo, pois comparações com um esquema dinâmico baseado em características monofractais do tráfego comprovaram que o esquema proposto aloca taxas em um enlace de forma mais eficiente que o método monofractal, tendo como entrada para o enlace tanto séries de tráfego com características monofractais como multifractais. Para comprovar a eficiência do esquema proposto, métricas como probabilidade de perda, ocupação média do *buffer*, utilização do enlace e AGF foram utilizadas.

Por fim, contribui-se ainda com um algoritmo de controle de taxa de tráfego de vídeo MPEG que utiliza uma modelagem exponencial para o fator de escala associado ao parâmetro de quantização Q do codificador de vídeo. Demonstrou-se por meio de simulações que o esquema em malha fechada de controle de taxa é mais eficiente que o tradicional VBR, pois une os benefícios dos algoritmos CBR e VBR, proporcionando resultados interessantes que incluem melhor utilização do enlace, ocupação mais suave do *buffer* e menor probabilidade de perda de dados.

As inovações apresentadas nesta dissertação, obtidas utilizando simulações e técnicas analíticas, constituem ferramentas muito úteis para o projeto e controle de redes de comunicações e podem ser utilizadas em diferentes cenários e envolvendo diferentes tecnologias. Como proposta futura de continuação deste trabalho pode-se citar o cálculo adaptativo dos multiplicadores do modelo CMAM, a implementação do método de controle de admissão de fluxos em um simulador de rede e a ampliação do cenário de redes sem fio considerado para abranger outras tecnologias além de redes baseadas em OFDM/TDMA. Além do mais, pretende-se considerar em outros trabalhos redes WiMAX com diferentes

classes de serviço e outras redes que incluam tecnologias como LTE (*Long Term Evolution* – Evolução de Longo Prazo) e 3G.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abichar, Z., Peng, Y., e Chang, M. (2006) “WiMAX: The Emergence of Wireless Broadband.” *IT Pro*, pp. 44–48.
- Abry, P. e Veitch D. (1998) “Wavelet analysis of long-range dependent traffic”. *IEEE Transactions on Information Theory*; **44**(1): 2–15.
- Aquino, V. A. e Barria, J. A. (2006) “Multiresolution FIR neural-network-based learning algorithm applied to network traffic prediction”. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-C*, vol. 36, no.2, pp.208-220.
- ANSI/IEEE Std 802.11, Part 11 (1999) “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”.
- Berger, A. W. e Whitt, W. (1998). “Extending the effective bandwidth concept to networks with priority classes”. *IEEE Communications Magazine*, 36(8), 78–84.
- Björck, A. (1996) “Numerical Methods for Least Squares Problems”. SIAM, Philadelphia, PA.
- Carvalho, P. H. P., Barreto, P. S., Ceppo, Silva (2009). Uma Metodologia de Planejamento e Roteamento Adaptativo em Redes Multimídia. *Revista IEEE América Latina*, v. 7, p. 673-680.
- Carvalho, P. H. P., Soares, A. J. M., Abdalla Jr, H., Barreto, P. S. (2005) “Analysis of the Influence of Self-Similar Traffic in the Performance of Real Time Applications”. In: IASTED International Conference on ACIT - Communication Systems (ACIT-CS 2005), Novosibirsk, Russia. IASTED International Conference on ACIT - Communication Systems (ACIT-CS 2005) v. 1. p. 1-6.
- Chang, R. W. e Gibby, R. A. (1968) “A theoretical study of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme”. *IEEE Trans. on. Communications*, 16 (4): pp. 529-540.
- Chang, C. (1994). Stability, queue length and delay of deterministic and stochastic queueing networks. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 39, 913–931.
- Chen, B. S., Yang, Y. S., Lee, B. K. e Lee, T.H. (2003). “Fuzzy adaptive predictive flow control of ATM network traffic”. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 11(4): 568–581.
- Choudhury, G. L., Lucantoni, D. M., e Whitt, W. (1994). “On the effectiveness of effective bandwidths for admission control in ATM networks”. In *In Proc. of the 14th International Teletraffic Congress (ITC-14)*, (pp. 411–420)., North Holland. Elsevier Science B. V.
- Chui, C. K. (1992) “An Introduction to Wavelets”. San Diego: Academic.
- Cox, D. (1984) “Long Range Dependence: A Review”. *Statistics: An Appraisal*, pp. 55-74.
- Cimini, L. J. (1985) “Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing”. *IEEE Trans. on Communications*, 33(7): pp. 665:675.
- Crouse, M. S., Baraniuk, R.G., Ribeiro, V.J., Riedi, R.H. (2000) “Multiscale queueing analysis of long-range dependent traffic”. *IEEE INFOCOM*, 2:1026-1035.
- Crovella, M. E., Bestavros, A. (1996). Self-similarity in world wide web traffic - evidence and possible causes. In *Proceedings of ACM Sigmetrics* (pp. 160–169).

- Cruz, L. J., Pallares, E. e Alins, J. J. (1998) "Self-similar traffic generation using a fractional ARIMA model. Application to the VBR MPEG video traffic," in Telecommunications Symposium, 1998. ITS'98 Proceedings. SBT/IEEE International, vol. 1, pp. 102-107.
- Czylwik, A. (1996) "Adaptive OFDM for wideband radio channels". *Proc. IEEE GLOBECOM*; **1**:713-718.
- Dang, T.D., Molnar, S., Maricza, I. (2003) "Queuing performance estimation for general multifractal traffic". *Int. J. Commun. Syst.*; **16**(2):117-136.
- Dembo, A. e Zeitouni, O. (1998). "Large Deviations Techniques and Applications". Springer-Verlag.
- Duffield, N. G. (1994). Exponential bounds for queues with markovian arrivals. *Queueing systems*, 17, 413–430.
- Duffield, N. G. e O'Connell, N. (1993). "Large deviations and overflow probabilities for the general single-server queue, with applications". DIAS STP, UK.
- Durresi, A., Sridharan, M. e Jain, R. (2006). "Congestion control using adaptive multilevel early congestion notification". *International Journal of High performance Computing and Networking* 4(5).
- Ehlers, R. S. (2003) "Análise de séries temporais". Ricardo Sanders Ehlers.
- Feder, J. (1989) "Fractals". New York, Plenum Press.
- Fei, H. e Zhimei, W. (2003) "Multifractal analysis and model of the MPEG-4 video traffic," in Performance, Computing, and Communications Conf., vol. 9–11, pp. 463–467.
- Feldmann, A., Gilbert, A.C., Willinger, W. (1998) "Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic". *Proceedings of ACM/SIGCOMM*, Vancouver, Canada; pp. 25-38.
- Feng, W. C. (1996) "Video-on-Demand Services: Efficient Transportation and Decompression of Variable Bit Rate Video" Ph.D. dissertation, University of Michigan.
- Ferrari, D. e Verma, D. (1990). "A scheme for real-time channel establishment in wide-area networks". *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 8, 368–379.
- Figueiredo, F. L. (2007) "Fundamentos da Tecnologia WiMAX". Technical Report. CPqD.
- Garg, V. K. (2007) "Wireless Communications and Networking" The Morgan Kaufman Series in Networking. 1º Ed., Elsevier, p. 723.
- Haykin, S. (2005) *Modern Wireless Communications*. Bookman. 1st edition. p. 135.
- Heyman, D., Tabatabai, A. e Lakshman, T. V. (1992) "Statistical analysis and simulation study of video conference traffic in ATM networks," *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 2, no. 1, pp.49-59.
- Hu, R. Q. e Petr, D. W. (2000). "A Predictive Self-tuning Fuzzy-logic Feedback Rate Controller". *IEEE/ACM Transactions on Networking* 8(6): 697–709.
- Huang, C., Devetsikiotis, M., Lambadaris, I. e Kaye, A. R. (1995) "Fast Simulation for Self-Similar Traffic in ATM Networks." In *Proc. IEEE ICC*, Pages 438-444.
- ISO/IEC/JTC1/SC29/WG11. (2000) "Overview of the MPEG-4 standard".
- ISO/IEC/JTC1/SC29/WG11 MPEG Test Model 2 (1992) "Coded Representation of Picture and Audio Information".

- Karnik, A. e Kumar, A. (2005). "Performance of TCP congestion control with explicit rate feedback". *Networking, IEEE/ACM Transactions on* 13(1): 108–120.
- Kim, H. S. e Shroff, N. B. (2001). "Loss probability calculations and asymptotic analysis for finite buffer multiplexers". *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 9(6).
- Knightly, E. e Shroff, N. (1999). "Admission control for statistical QoS: Theory and practice". *IEEE Network*, 13(2), 20–29.
- Krishna, M. P., Gadre, V. M. e Dessay, U. B. (2003) "Multifractal based network traffic modeling". Kluwer Academic Publishers.
- Kvackaj, P., Baronak, I. (2006) "Evaluation of Three CAC Methods: Gaussian Approximation Method, Method of Effective Bandwidth and Diffusion Approximation Method". *Journal of Electrical Engineering*, vol. 57, N. 6, 360-364.
- Lee, I. W. C. e Fapojuwo, A. O. (2005) "Stochastic processes for computer network traffic modelling". *Computer Communications*, vol. 29, pp.1-23.
- Lindley, D.V. (1952) The theory of queues with a single server. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*; **48**: 277–289.
- Liu, H. H., Hsu, P. L. (2006) "Design and simulation of adaptive fuzzy control on the traffic network". In *International Joint Conference SICE-ICASE*, pp. 4961-4966.
- Maglaris, B., Anastassiou, D., Sen, P., Karlsson, G. e Robbins, J. (1988) "Performance Models of Statistical Multiplexing in Packet Video Communications", vol. 36, no. 7, pp. 834-844.
- Mallat, S. (1989) "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation". *IEEE Transactions on PAMI*, 11 (7), pp. 674-693.
- Mallat, S. (2008) "A Wavelet Tour of Signal Processing". 3ª edição. Academic Press.
- Mandelbrot, B. B. (1990) "Limit log_normal multifractal measures". In *Frontiers of Physics: Landau Memorial Conference*. Number 163, pages 309-340, (Tel Aviv, 1998) Ed. by E.A. Gostman et al. New York, Pergamon.
- Mandelbrot, B. B. e Ness, J.W.V. (1968) "Fractional brownian motions, fractional noises and applications". *SIAM Review*; 10: 422–437.
- Nejad, H. V., Yaghmaee, M. H. e Tabatabaee, H. (2006). "Fuzzy TCP: Optimizing TCP Congestion Control". *Asia-Pacific Conference on Communications (APCC '06)*, pp. 1– 5.
- Neumaier, A. e Schneider, T. (2001) "Estimation of parameters and eigenmodes of multivariate autoregressive models". *ACM Trans. Math. Softw.* 27, 1 (Mar.), 27–57.
- Niyato, D. e Hossain, E. (2005) "Queueing Analysis of OFDM/TDMA Systems". *IEEE GLOBECOM*.
- Norros, I. (1994) "A storage model with self-similar input". *Queueing Systems*, vol. 16, pp. 387-396.
- O'Hara, B. e Petrick, A. (1999) "IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion". New York: IEEE Press.
- Ouyang, Y. C., Yang, C. W. e Lian, W. S. (2006). "Neural networks based variable bit rate traffic prediction for traffic control using multiple leaky bucket". *Journal of High Speed Networks*. vol. 15, no.2, pp.11-122.

- Pahlavan, K. e Krishnamurthy, P. (2002) “Principle of Wireless Networks — A Unified Approach.” Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Papoulis, A. (1991) “Probability, Random Variables, and Stochastic Processes”. McGraw-Hill, New York. 3ª edição.
- Park, K. e Willinger, W. (2000) “Self-similar Network Traffic and Performance Evaluation”. Wiley: New York, USA.
- Paula, J. (2009) “16m: WiMAX ‘super móvel’”. (Disponível em: <http://www.e-thesis.inf.br/index.php>, último acesso em 08-11-2011).
- Pavlov, A. N., Anishchenko, V. S. (2007) “Multifractal analysis of complex signals”. *Phys.-Usp.* Vol. 50, pp. 819-834.
- Paxson, V. e Floyd, S. (1995). “Wide-area traffic: The failure of Poisson modeling”. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(3), 226–244.
- Peltier, R. e Véhel, J. L. (1995). “Multifractional brownian motion”. INRIA Research Project 2645.
- Perlingeiro, F. R. e Ling, L. L. (2005). Estudo de estimação de banda efetiva para tráfego autossimilar com varância infinita. In SBrT, (pp. 326–331), Campinas.
- Pinto, E. L. e Albuquerque, C. P. (2002) “A técnica de transmissão OFDM”. *Telecomunicações*, 5(1). pp. 5-15.
- Rajagopal, S., Reisslein, M., Ross, K.W. (1998) “Packet multiplexers with adversarial regulated traffic”. In: *Proceedings of IEEE INFOCOM 98*. p. 347–55. Março.
- Reisslein, M. (2003) “Traffic and Quality Characterization of Scalable Encoded Video: A Large-Scale Trace-Based Study” Arizona State University, Dept. of Elect. Eng., Tech. Rep. Séries de vídeo disponíveis em <http://trace.eas.asu.edu> (último acesso em 02.02.2011).
- Reisslein, M., Ross, K.W., Rajagopal, S. (2002) “A framework for guaranteeing statistical QoS”. *IEEE/ACM Transactions on Networking*; p.19.
- Ribeiro, V. J., Riedi, R.H., Crouse, M.S. e Baraniuk, R.G.(2000) Multiscale queueing analysis of long-range dependent traffic, *Proc. IEEE Infocom*.
- Riedi, R. H. (1998). “Introduction to multifractals”. Technical report, Rice University Department of ECE, Houston, TX, USA.
- Riedi, R. H., Crouse, M.S., Ribeiro, V.J., Baraniuk, R.G. (1999) “A multifractal wavelet model with application to network traffic”. *IEEE Trans. on Information Theory*; **45**(3): 992–1018.
- Riedi, R. H., Véhel, J. L. (1997). “Tcp traffic is multifractal: a numerical study”. Technical Report 3129, INRIA Research report.
- Rocha, F. G. C. e Vieira, F. H. T. (2009) “Modelagem de tráfego de vídeo MPEG-4 utilizando cascata multifractal com distribuição autorregressiva dos multiplicadores”. I2TS, Florianópolis, SC.
- Rocha, F. G. C., Vieira, F. H. T., Santos Jr, J.A. (2010) “A Multifractal Based Approach for Loss Probability Estimation for OFDM/TDMA Based Systems” In: *The 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, Recife/PE/Brazil.

- Rolls, D. A., Michailidis, G., Hernández-Campos, F. (2005) "Queueing analysis of network traffic: methodology and visualization tools". *Computer Networks* 48, pp. 447-473, Janeiro.
- Ruangchaijaturon, N. e Ji, Y. (2009) "Resource Allocation for Guaranteed Service in OFDMA based Systems". *IEEE WCNC 2009 Proceedings*, Budapest.
- Santos, C. B., Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Marques, F. S., Araújo, S. G., Pereira, J. B. J. (2010) "Traffic Modeling and Analysis of PLC Networks using Markov Chains" In: *LASCAS 2010 - IEEE Latin American Symp. on Circuits and Systems*, Foz do Iguaçu.
- Santos Jr, J. A., Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C. (2010) "A Policing Algorithm for WiMAX Systems Considering Multifractal Traffic" In: *The 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, Recife/PE/Brazil.
- Schneider, T., Neumaier, A. (2001). "Algorithm 808: ARFIT—A Matlab package for the estimation of parameters and eigenmodes of multivariate autoregressive models". *ACM Trans. Math. Softw.* 27, 1 (Mar.), 58–65.
- Seeling, P., Reisslein, M., Kulapala, B. (2004) "Network Performance Evaluation Using Frame Size and Quality Traces of Single-Layer and Two-Layer Video: A Tutorial". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 6, No. 3, pp 58-78.
- Seuret, S. e Gilbert, A. C. (2000). Pointwise hölder exponent estimation in data network traffic. In *ITC Specialist Semina*, Monterey.
- Stallings, W. (2010). "Cryptography and Network Security: Principles and Practice". Prentice Hall. 5ª Edição.
- Tanenbaum, A. S. (2003) "Redes de Computadores". Ed. Campus. 4º Edição, pp. 311-330.
- The Internet traffic archive (2000) (disponível em <http://ita.ee.lbl.gov>, último acesso em 22.09.2010).
- The ISF_wifidog traffic traces (2007) (disponível em <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/data.php>, último acesso em 25.09.2010).
- The USC Wireless LAN Traces (2006) (disponível em <http://nile.cise.ufl.edu/MobiLib>, último acesso em 25.09.2010).
- Tran, H. T., Ziegler, T. (2005) "Adaptive Bandwidth Provisioning with Explicit Respect to QoS Requirements". *Computer Communications*, 28, 1862-1876.
- Trinh, N. C. e Miki, T. (1999) "Dynamic resource allocation for self-similar traffic in ATM networks". *Communications APCC/OECC '99. Fifth Asia-Pacific Conference on...and Fourth Optoelectronics and Communications Conference*.
- Tudor, P. N. e Wells, N. D. (1994) "Digital vídeo compression: standardisation of scalable coding schemes". BBC Research & Development. Department Report N° 10.
- Véhel, J. L. e Riedi, R. (1997). "Fractional Brownian motion and data traffic modeling: The other end of the spectrum". *Fractals in Engineering*. Springer.
- Veitch, D. D. (2005) Veitch's Matlab code for the estimation of scaling exponents (disponível em <http://www.emulab.ee.mu.oz.au>, último acesso em 22.09.2010).
- Vieira, F. H. T. (2006) "Contribuições ao cálculo de banda e de probabilidade de perda para tráfego multifractal de redes". Campinas, SP: [s.n.].

- Vieira, F. H. T. e Ling, L. L. (2006). "Performance Bounds for a Cascade based Multifractal Traffic Model with Generalized Multiplier Distributions". *Journal of Communication and Information Systems*, v. 21, p. 165-175.
- Vieira, F. H. T. e Ling, L. L. (2008) "Modelagem de Tráfego de Redes Utilizando Cascata Multifractal Generalizada". *RITA*, Vol.15, No. 2.
- Vieira, F. H. T. e Ling, L. L. (2009) "Adaptive wavelet-based multifractal model applied to the effective bandwidth estimation of network traffic flows". *IET Communications*; **3**: p. 906.
- Vieira, F. H. T. e Ling, L. L. (2010). "An admission control approach for multifractal network traffic flows using effective envelopes". *AEÜ. International Journal of Electronics and Communications*, v. 64, p. 629-639.
- Vieira, F. H. T. e Rocha, F. G. C. (2011) "An Adaptive Fuzzy Model Using Orthonormal Basis Functions Based on Multifractal Characteristics Applied to Network Traffic Control". A ser publicado na revista *Neurocomputing* (Amsterdam).
- Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Garcez, S. G., Santos, C. B. (2010a) "A Fuzzy Model for Network Traffic Prediction Using Orthonormal Basis Functions Based on Multifractal Characteristics" In: *LASCAS 2010 - IEEE Latin American Symp. on Circ. and Syst*, Foz do Iguaçu.
- Vieira, F. H. T., Rocha, F. G. C., Lemos, R. P. (2010b) "An Algorithm for Adaptive Prediction of Local Singularities of Network Traffic Flows" In: *The 13th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, Recife/PE/Brazil.
- Yeo, J. e Agrawala, A. (2004) "Multiscale Analysis for Wireless LAN Traffic Characterization". Technical Report, CS-TR-4571. (disponível em <http://hdl.handle.net/1903/1345>, último acesso em 20.12.2010).
- Wang, C., Liu, J., Sohraby, K. e Hou, Y. (2007). "LRED: A Robust and Responsive AQM Algorithm Using Packet Loss Ratio Measurement". *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on* 18(1): 29–43.
- Wang, S. H. e Qiu, Z. D. (2005) "A Novel Multifractal Model of MPEG-4 Video Traffic". *Proceedings of ISCIT2005*.
- Wang, S. H. e Qiu, Z. D. (2006) "Multifractal Analysis and Prediction of VBR Video Traffic". *6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings*.
- Zainaldin, A., Lambadaris, I., e Nandy, B. (2008) "Adaptive rate control low bit-rate video transmission over wireless zigbee networks". *Proceedings of ICC2008*.
- Zhang, Z., Ribeiro, V., Moon, S., Diot, C. (2003) "Small-Time Scaling behaviours of Internet backbone traffic: An Empirical Study". *IEEE INFOCOM*, San Francisco, USA.
- Zou, D., Zhang, X., Wang, W. (2008) "Multi-service traffic models of heterogeneous wireless communication networks". *Proc. of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp.495-498.