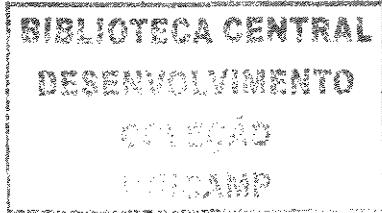


200602542

**Modelagem e Computação de Banda Passante
Equivalente de Fluxos Multifractais**

César Augusto Viana Melo

Tese de Doutorado



Instituto de Computação
Universidade Estadual de Campinas

Modelagem e Computação de Banda Passante Equivalente de Fluxos Multifractais

César Augusto Viana Melo

8 de Novembro de 2004

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca
Instituto de Computação (IC), UNICAMP (Orientador)
- Prof. Dr. Hélio Waldman
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), UNICAMP
- Prof. Dr. Dalton Soares Arantes
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), UNICAMP
- Dr. Jorge Moreira de Souza
Fundação para Inovações Tecnológicas (FITEc)
- Prof. Dr. Edmundo R. M. Madeira
Instituto de Computação (IC), UNICAMP
- Prof. Dr. Célio Cardoso Guimarães
Instituto de Computação (IC), UNICAMP
- Dr. Marcos Rogério Salvador
CPqD Telecom & IT Solutions

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	M491m
V	EX
TOMBO BC/	06155
PROC 16-	123-06
C <input type="checkbox"/>	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	25/11/06
Nº CPD	

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IMECC DA UNICAMP**

Bibliotecária: Maria Júlia Milani Rodrigues CRB8a/2116

Melo, César Augusto Viana

M491m Modelagem e Computação de Banda Passante Equivalente de Fluxos Multifractais / César Augusto Viana Melo – Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Nelson Luis Saldanha da Fonseca

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação.

1. Redes de Computadores. 2. Fractais. 3. Sistemas de Computação. I. da Fonseca, Nelson Luis Saldanha. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Computação. III. Título.

Título em inglês: Modeling and Computing of Equivalent Bandwidth of Multifractal Flows.

Palavras-chave em inglês (keywords): 1. Computer Networks. 2. Fractals. 3. Computing Systems

Área de Concentração: Redes de Computadores

Titulação: Doutor em Ciência da Computação

Banca Examinadora: Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca (UNICAMP)

Prof. Dr. Hélio Waldman (UNICAMP)

Prof. Dr. Dalton Soares Arantes (UNICAMP)

Dr. Jorge Moreira de Souza (FITEC)

Prof. Dr. Edmundo R. M. Madeira (UNICAMP)

Prof. Dr. Célio Cardoso Guimarães (UNICAMP)

Dr. Marcos Rogério Salvador (CPqD)

TERMO DE APROVAÇÃO

Tese defendida e aprovada em 15 de dezembro de 2004, pela Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:

Hélio Waldman

Prof. Dr. Hélio Waldman
FEEC - UNICAMP

Dalton Soares Arantes

Prof. Dr. Dalton Soares Arantes
FEEC - UNICAMP

Jorge Moreira de Souza

Prof. Dr. Jorge Moreira de Souza
FITEC

Marcos Rogério Salvador

Prof. Dr. Marcos Rogério Salvador
CPqD

Edmundo Roberto Mauro Madeira

Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira
IC - UNICAMP

Célio Gardoso Guimarães

Prof. Dr. Célio Gardoso Guimarães
IC – UNICAMP

Nelson Luis Saldanha da Fonseca

Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca
IC - UNICAMP

Modelagem e Computação de Banda Passante Equivalente de Fluxos Multifractais

Este exemplar corresponde à redação final da Tese devidamente corrigida e defendida por César Augusto Viana Melo e aprovada pela Banca Examinadora.

Campinas, 15 de Dezembro de 2004.



Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca
Instituto de Computação (IC), UNICAMP
(Orientador)

Tese apresentada ao Instituto de Computação, UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciência da Computação.

*Sempre me agrada o que a Ti parece justo.
És quem comanda e não me aparto do Teu querer,
pois conhecesse os meus desejos.*

Dante, A Divina Comédia

Agradecimentos

Agradeço a minha família pelo seu amor incondicional, sem o qual nada disso seria possível. Não posso deixar de falar das “especiarias” enviadas, pois elas nunca me deixaram esquecer do cheiro e do sabor de minha casa.

Aqui um agradecimento ao amigo e orientador prof. Nelson Fonseca, de quem recebi grandes lições. Esse foi um período de grande aprendizado!

Caro leitor, caso você não saiba, é muito difícil conviver com um doutorando em períodos de grande escuridão. Mesmo sabendo que posso cometer alguma injustiça, quem sabe até várias, quero me lembrar de: Ani Seixas, Arlindo, Guialbu, Pimentel, Karcius, Adilson, Jean, Tiago, Marcelo, Jansen, Pistolinhas(Zé, ToyBoy, Guto, Guido), Jane, André, Borin, Juliana, Magrão, Dario, Elis..., a todos vocês meus amigos, MUITO OBRIGADO!

Um agradecimento todo especial ao corpo administrativo e ao corpo docente do Instituto de Computação pela generosidade demonstrada ao dedicarem, em algum momento, parte do seu tempo a esse que a vós “fala”.

O desenvolvimento deste trabalho recebeu o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Resumo

O fenômeno do cascateamento caracteriza-se pela ausência de uma escala de tempo específica, na qual a explosividade do tráfego possa ser caracterizada. Faz-se necessário, portanto, que esse tráfego seja descrito em diferentes escalas de tempo. Esse fenômeno foi identificado pela primeira vez em traços de tráfego de redes locais. Verificou-se em traços de tráfego do protocolo Internet Protocol (IP), composto majoritariamente por tráfego gerado por conexões TCP, o fenômeno do cascateamento em pequenas escalas de tempo, bem como a existência de dependências de longa duração. Além disso, nesses traços o tráfego apresenta alta variabilidade, cascateamento não-uniforme e a distribuição marginal das suas medições (bytes e/ou pacotes) é não-gaussiana. Estas características são típicas de processos multifractais.

A banda passante equivalente de um fluxo é a quantidade mínima de banda passante requerida para que os requisitos de Qualidade de Serviço (QoS) desse fluxo possam ser atendidos. Dispor de métodos eficientes para computar a banda passante equivalente de um fluxo permite realizar alocação eficiente de banda passante, o que é essencial em redes de alta velocidade. A computação da banda passante equivalente de um fluxo requer a solução de um sistema de filas alimentado por esse fluxo, que, por sua vez, requer a computação do instante de tempo em que esse sistema alcança o seu máximo em termo de trabalho não-realizado. Uma representação minimalista do fluxo que alimenta um sistema de filas, obtida com o uso de processos envelope, permite a derivação de soluções, que apresentam boa precisão, para esse sistema.

Nesta tese, introduz-se um processo envelope, chamado de processo envelope do movimento Browniano multifractal (mBm), que é um limitante superior para o volume de trabalho gerado por um processo mBm . A derivação do processo envelope do mBm baseia-se na propriedade de auto-similaridade local de um processo mBm . Esta propriedade estabelece que os incrementos de um processo mBm , em escalas de tempo pequenas, são realizações de processos movimento Browniano fractal (fBm). O processo envelope do mBm foi extensivamente validado para se verificar a sua ca-

pacidade de representar o tráfego de um fluxo. Usou-se tanto fluxos de tráfego real quanto fluxos de tráfego sintético na validação desse processo envelope.

Expressões para o cálculo da escala de tempo de interesse de um sistema de filas alimentado por fluxos multifractais são derivadas. Estas expressões são utilizadas pelo algoritmo que implementa a heurística, proposta nesta tese, para computação da banda passante equivalente de um fluxo multifractal. Demonstra-se a efetividade destas expressões ao se avaliar o ganho obtido com a multiplexação estatística de fluxos multifractais.

Introduz-se, também, um mecanismo baseado em janelas para o policiamento de tráfego multifractal.

Abstract

Scaling in network traffic can be identified as the absence of a typical time scale at which traffic burstiness can be characterized. Internet Protocol (IP) traffic presents both scaling and long-range dependence. Moreover, at small time scales, IP traffic shows non-uniform scaling and high variability. Moreover, the marginal distribution of counting process is non-gaussian, which clearly differentiates IP traffic from Local Area Network traffic, which is accurately modelled by monofractal (self-similar) processes. Such patterns can be precisely modelled by multifractal processes.

The equivalent bandwidth of a traffic flow is the minimum amount of bandwidth which should be given to that flow in order to support its Quality of Service (QoS) requirements. Efficient algorithms for estimating the equivalent bandwidth of a flow is of paramount importance for network dimensioning and provisioning of QoS in high speed networks. The computation of the equivalent bandwidth requires solving a queueing system fed by this flow, and specially the identification of the time scale at which the queue length reaches its maximum value. A minimalist representation of the traffic flow such as those obtained by the use of envelope process is needed for the derivation of the solution of the queueing system.

In this thesis, an envelope process, called mBm envelope process, is introduced. This process is an upper bound to the amount of work arrived in a multifractal Brownian motion (mBm). The definition of the mBm envelope process is based on the local self-similarity property of the mBm process. The mBm envelope process was extensively validated using both real network traffic and synthetic generated traffic.

An expression for the time scale at which a queueing system fed by a multifractal flow is derived. This expression is used in a proposed algorithm for the computation of the equivalent bandwidth of a multifractal flow. The effectiveness of such algorithm is assessed by the evaluation of the multiplexing gain of several multifractal flows.

A policing mechanism appropriate for multifractal flows is also introduced in this thesis.

Conteúdo

Agradecimentos	vii
Resumo	x
Abstract	xii
1 Introdução	1
1.1 O Conteúdo desta Tese	5
1.2 Contribuições desta Tese	6
1.3 Publicações Realizadas pelo Autor	8
1.3.1 Publicações Realizadas pelo Autor Relacionadas a esta Tese .	8
1.3.2 Outras Publicações	8
2 Conceitos básicos em Modelagem de Tráfego	11
2.1 Processo Envelope	11
2.1.1 O processo envelope D-BIND	13
2.1.2 Processo Envelope Limitante de Explosividade Soma de Exponenciais	17
2.1.3 Processo Envelope do Movimento Browniano Fractal	20
2.2 A Transformada Wavelet Discreta	23
2.3 O Processo Movimento Browniano Multifractal	24
2.4 Um Estimador para a Função Cascateamento $H(t)$	26
2.5 Modelos para Tráfegos com Dependência de Longa Duração	34
2.5.1 O movimento Browniano Fractal	35
2.5.2 Modelos baseados em árvore multiescala	36
2.5.3 O Modelo Cascata Multiplicativa	39

2.6	Resumo Conclusivo do Capítulo 2	40
3	Análise Multifractal de Traços de Tráfego IP	43
3.1	Detecção de Multifractalidade	43
3.2	Avaliação Experimental da Multifractalidade de Fluxos IP	45
3.3	Quando uma Modelagem Multifractal é Pertinente	53
3.4	Resumo Conclusivo do Capítulo 3	54
4	Um Processo Envelope para Tráfego Multifractal	57
4.1	O Processo Envelope do mBm	58
4.2	Validação do Processo Envelope do mBm	58
4.3	Resumo Conclusivo do Capítulo 4	64
5	Análise de um Sistema de Filas Alimentado por Fluxos Multifractais	67
5.1	A Solução do Sistema	68
5.2	Escala de Tempo de Interesse de um Sistema Alimentado por um Fluxo Multifractal	70
5.3	Escala de Tempo de Interesse de um Sistema Alimentado por Vários Fluxos Multifractais	77
5.4	Resumo Conclusivo do Capítulo 5	81
6	Computação de Banda Passante Equivalente de Fluxos Multifractais	83
6.1	Uma Heurística para a Computação de Banda Passante Equivalente de Fluxos Multifractais	84
6.1.1	Avaliação da Precisão da Heurística	87
6.2	Ganho Obtido com a Multiplexação Estatística	89
6.2.1	Avaliação do Ganho	92
6.3	Resumo Conclusivo do Capítulo 6	95
7	Policimento de Tráfego Multifractal	98
7.1	O Mecanismo Balde Furado e o Tráfego Multifractal	99
7.2	O Mecanismo Balde Furado Multifractal	100
7.3	Avaliação do Balde Furado Multifractal	101
7.4	Resumo Conclusivo do Capítulo 7	104

8 Conclusões e Trabalhos Futuros	107
8.1 Conclusões	107
8.2 Trabalhos Futuros	109
Bibliografia	112

Lista de Tabelas

3.1	Traços de tráfego real usados nas simulações	46
4.1	Parâmetros do PE do fBm estimados de traços multifractal	61
5.1	Descritores de traços de tráfego sintético usados para alimentar um sistema de filas	75
6.1	Medidas de desempenho obtidas do sistema de filas.	88
6.2	Descritores de traços de tráfego sintético usados para alimentar um sistema de filas	92

Listas de Figuras

2.1	O processo envelope D-BIND	15
2.2	O processo envelope fBm	22
2.3	O algoritmo do gerador de processo mBm	26
2.4	Traços de tráfego sintético gerados com diferentes funções cascataamento	27
2.5	Função cascataamento estimada para traços da Coleção Digital	30
2.6	Função cascataamento estimada para traços da coleção Auckland	30
2.7	Função cascataamento estimada para traços da coleção NLANR	31
2.8	Função cascataamento estimada para traços da coleção NLANR (Parte II)	32
2.9	Funções cascataamento estimadas $\hat{H}(t)$ versus Funções cascataamento $H(t)$	33
2.10	Árvore Multiescala	36
2.11	Árvore Multiescala gerada pelo IWM	37
2.12	Árvore Multiescala gerada pelo MWM	38
3.1	Coleção de traços da Digital	47
3.2	Coleção de traços da Digital II	48
3.3	Coleção de traços de Auckland	49
3.4	Coleção de traços da NLANR	50
3.5	Coleção de traços da NLANR (parte II)	51
3.6	Coleção de traços da NLANR (Parte III)	52
3.7	Cascataamento em um processo multifractal	53
3.8	A escala de tempo limite identificada nas diferentes coleções de traços	55
4.1	Avaliação do processo envelope mBm usando tráfego real (Parte I) . .	59
4.2	Avaliação do processo envelope mBm usando tráfego real (Parte II) .	60
4.3	Avaliação do processo envelope do mBm usando traços de tráfego sintético	62

4.4	Avaliação do processo envelope do fBm usando tráfego real	63
4.5	Processos envelopes derivados usando uma aproximação polinomial para a função Holder	65
5.1	Probabilidade de perda medida e calculada em diferentes cenários . .	71
5.2	Probabilidade de perda medida e calculada em diferentes cenários para o traço 20000125-143640-1	72
5.3	Evolução do tamanho da fila de um sistema alimentado por um fluxo de tráfego real e o MaxTS do sistema em cenários com diferentes níveis de utilização	74
5.4	Evolução do tamanho da fila de um sistema alimentado por tráfego sintético e o MaxTS do sistema em cenários com diferentes níveis de utilização	76
5.5	Evolução do trabalho não-realizado no sistema alimentado por vários fluxos e o MaxTS do sistema em cenários com diferentes níveis de utilização	80
6.1	O Algoritmo para computar a banda passante equivalente	85
6.2	Evolução do trabalho não-realizado em um sistema alimentado por fluxos multifractais e servido por suas respectivas bandas passante equivalentes	90
6.3	Ganho Obtido com Multiplexação Estatística usando traços de tráfego sintético	93
6.4	Ganho obtido com Multiplexação Estatística usando traços de tráfego real	94
6.5	Comparação dos ganhos obtidos com a Multiplexação Estatística usando as modelagens Monofractal e Multifractal	95
6.6	Comparação dos ganhos obtidos com a Multiplexação Estatística de traços de tráfego real usando as modelagens Monofractal e Multifractal	95
7.1	Tamanho de Balde versus a razão taxa média de chegada e taxa de geração de fichas.	100
7.2	O Mecanismo Balde Furado Multifractal	102
7.3	Uma comparação entre BFMF e BF no policiamento de fluxos que violam o contrato de tráfego.	103
7.4	Análise de Sensibilidade do BFMF	105

Capítulo 1

Introdução

A banda passante equivalente de um fluxo de dados é a quantidade mínima de banda passante requerida por esse fluxo tal que seus requisitos de Qualidade de Serviço (QoS) sejam atendidos. Um grande número de estudos tem investigado o conceito de banda passante equivalente [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] sob diferentes suposições de quais estatísticas são relevantes na caracterização do tráfego. O interesse demonstrado pelo conceito de banda passante advém do fato de que ele estabelece uma ligação entre as redes baseadas em multiplexação estatísticas e as redes baseadas em comutação de circuitos que foram amplamente estudadas. Além disso, dispor de um método para computar a banda passante equivalente de um fluxo permite, por exemplo, alocar banda passante dinamicamente e em tempo real, o que é essencial em uma rede que apresenta alta capilaridade, para uma melhor utilização dos recursos disponíveis.

A computação da banda passante equivalente de um fluxo requer a solução do sistema de fila alimentado por esse fluxo. A teoria dos Grandes Desvios pode ser empregada na obtenção de uma solução para esse sistema [8, 9]. Entretanto, tal opção implica em suposições não-realistas acerca dos recursos do sistema, mais especificamente dos tamanhos dos bufferes. Uma representação minimalista do fluxo que alimenta um sistema de fila, obtida com o uso de processos envelopes, permite a derivação de soluções aproximadas para este sistema sem que se faça suposições não-realistas.

Tendo um fluxo sido admitido no domínio de uma rede, deve-se garantir que o tráfego nesse fluxo esteja de acordo com descritores previamente divulgados. Um mecanismo ideal de policiamento permite que o tráfego de um fluxo entre no domínio de uma rede se, e somente se, este tráfego estiver de acordo com os seus descritores. Em caso contrário, o tráfego nesse fluxo deve ser descartado ou identificado como

tendo baixa prioridade em relação aos demais. Dessa forma, um mecanismo de policiamento garante que a banda passante equivalente calculada para um determinado fluxo seja respeitada.

A representação exata do processo probabilístico (tráfego) que alimenta um sistema de fila produz modelos que apresentam custo computacional elevado. Estes modelos se tornam inviáveis quando respostas imediatas acerca desse sistema são requeridas. Um modelo de tráfego minimalista utiliza uma representação simplificada do tráfego que alimenta o sistema, o que representa uma tentativa de estabelecer uma boa relação entre o custo computacional, de se derivar uma solução para o modelo, e a precisão com que se representa esse tráfego. Dessa forma, uma abordagem que pode ser usada na definição de um modelo de tráfego minimalista consiste em limitar o volume de tráfego que chega ao sistema por um processo envelope. A consequência direta desta abordagem é a transformação que se faz do problema a ser resolvido. Em outras palavras, transforma-se um problema de se determinar a solução de um sistema probabilístico em um problema menos difícil que é o de determinar a solução de um sistema determinístico.

O conceito de escala de tempo de interesse tem sido estudado em diferentes contextos. Em [10], o conceito de escala de tempo de interesse é empregado na proposição de mecanismos de controle que operam em múltiplas escalas de tempo. Em [11], o conceito de escala de tempo de interesse é utilizado para determinar a pertinência das diferentes abordagens de caracterização de fluxos fractais. Em [5, 12, 13], expressões para a escala de tempo de interesse de um sistema de fila alimentado por fluxos fractais são derivadas. Nestes estudos, a escala de tempo de interesse é definida como o instante de tempo em que a fila alcança o seu tamanho máximo, em termo de trabalho não-realizado.

O fenômeno do cascateamento (do inglês *scaling*) foi identificado pela primeira vez em traços de tráfego de redes locais [14]. Esse fenômeno caracteriza-se pela ausência de uma escala de tempo específica na qual a explosividade do tráfego possa ser caracterizada. Faz-se necessário, portanto, uma descrição desse tráfego em diferentes escalas de tempo. Em processos onde se verifica a ocorrência do fenômeno do cascateamento identifica-se, também, a existência de correlações duradoras. Essas duas características são próprias de processos auto-similares e que, por essa razão, têm sido usados para caracterizar o tráfego de rede que apresenta o fenômeno do cascateamento.

O processo auto-similar(fractal) mais utilizado na modelagem do tráfego que apre-

senta o fenômeno do cascateamento (tráfego fractal) é o movimento Browniano fractal (do inglês *fractional Brownian motion-fBm*). Em [14], o modelo de tráfego proposto para caracterizar tráfego fractal tem apenas três parâmetros, que são: a média, a variância e o parâmetro Hurst. O parâmetro Hurst mede o grau de correlação no tráfego ou, equivalentemente, controla o cascateamento verificado no tráfego. O processo fBm é um modelo preciso para tráfego que apresenta cascataamento quando [15]: i) o tráfego modelado é resultado da agregação do tráfego gerado por fontes que operam em baixas taxas quando comparadas com a banda passante do canal, ii) o impacto dos mecanismos de controle sobre as estatísticas do tráfego é irrelevante e iii) a escala de tempo de interesse do tráfego encontra-se em regiões em que a sua natureza fractal se manifesta. Um cenário que não apresenta as características citadas anteriormente é o de conexões individuais TCP (*Transmission Control Protocol*). Neste cenário, a ação dos mecanismos de controle tem grande influência nas estatísticas do tráfego gerado e o canal que serve a conexão opera sempre em níveis de utilização alto [16].

Verificou-se em traços de tráfego IP (*Internet Protocol*), composto majoritariamente por tráfego gerado por conexões TCP, o fenômeno do cascataamento em pequenas escalas de tempo, bem como a existência de dependências de longa duração. Além disso, o tráfego nesses traços apresenta alta variabilidade, o cascataamento não é controlado por um único parâmetro (cascataamento não-uniforme) e a distribuição marginal das suas medições (bytes e/ou pacotes) é não-gaussiana [15, 17, 16]. Estas características são típicas de processos multifractais e são chamadas de estatísticas multifractais. O processo movimento Browniano multifractal (do inglês *multifractional Brownian motion-mBm*) generaliza o processo fBm e é capaz de captar o cascataamento não-uniforme.

Nesta tese, introduz-se um processo envelope, chamado de processo envelope do mBm, que é um limite superior para o volume de trabalho gerado por um processo movimento Browniano multifractal (mBm). A derivação do processo envelope do mBm baseia-se na propriedade de auto-similaridade local de um processo mBm. Esta propriedade estabelece que os incrementos de um processo mBm, em escalas de tempo pequenas, são realizações de processos fBm. O processo envelope do mBm é validado extensivamente em sua capacidade de representar o tráfego em um fluxo. Usou-se tanto fluxos de tráfego real quanto fluxos de tráfego sintético no processo de validação. Os traços de tráfego real usados no processo de validação estão disponíveis publicamente e foram coletados em redes de ambientes acadêmicos e de ambientes

industriais no período que compreende os anos de 1995 a 2003.

Um processo envelope para tráfego fractal é apresentado em [12] e validado em [5]. Esse processo é um caso especial do processo envelope do mBm apresentado nesta tese. Avaliações realizadas mostram que caracterizar fluxos multifractais através de um modelo fractal tem como consequência a superestimação dos recursos requeridos por esses fluxos. Avalia-se a limitação da modelagem de fluxos multifractais realizado com o processo envelope do fBm. Analisa-se, também, o impacto de uma modelagem fractal nos ganhos obtidos com multiplexação estatística de fluxos multifractais.

Considerando-se que o fluxo que alimenta um sistema de filas é limitado pelo processo envelope do mBm, um modelo de tráfego minimalista é derivado nesta tese. A precisão deste modelo é avaliada comparando-se as probabilidades de violação do limitante máximo definido para o volume de trabalho não-realizado no sistema. Essas probabilidades foram obtidas a partir da resolução numérica do modelo proposto e através de experimentos de simulação que verificaram o comportamento do sistema em termo de trabalho não-realizado.

A escala de tempo de interesse, definida pelo instante de tempo em que um sistema de filas alcança o seu máximo em termo de trabalho não-realizado, é fundamental para o dimensionamento de redes com fluxos multifractais. Expressões matemáticas para o cálculo de um limitante superior para a escala de tempo de interesse são derivadas. Este limitante, chamado de escala de tempo de interesse máxima, é estabelecido resolvendo-se um sistema de fila que tem o seu processo de chegadas limitado pelo processo envelope do mBm. Expressões para o cálculo da escala de tempo de interesse quando o sistema é alimentado por um único fluxo multifractal ou por um agregado de fluxos multifractais são, também, derivadas.

Uma heurística para a computação de banda passante equivalente, utiliza o fato do fluxo que alimenta um sistema de filas poder ser caracterizado por um processo envelope do mBm, é apresentada. O algoritmo que implementa essa heurística tem seu custo computacional determinado. Avalia-se, também, se a banda passante derivada com essa heurística de fato satisfaz os requisitos de QoS do fluxo que alimenta o sistema de filas. Um estudo é realizado para determinar os ganhos gerados pela multiplexação estatística de fluxos multifractais. A banda passante equivalente desses fluxos é computada usando a heurística proposta.

Em [5], o mecanismo de policiamento Balde Furado é avaliado quando o tráfego policiado apresenta estatísticas fractais. Mostrou-se que o Balde Furado é ineficiente no policiamento desse tipo de tráfego. Nesta tese, o Balde Furado tem seu desem-

penho verificado quando o tráfego policiado é gerado por fluxos multifractais. Um mecanismo de policiamento, chamado Balde Furado Multifractal, é introduzido e tem a sua eficácia avaliada.

1.1 O Conteúdo desta Tese

O foco desta tese é a modelagem de tráfego multifractal através de modelos minimalistas (processos envelopes), em especial o processo envelope derivado a partir do processo movimento Browniano multifractal. A definição desse processo envelope e a sua posterior utilização na caracterização de fluxos multifractais requer o conhecimento de conceitos que são apresentados no Capítulo 2.

Na Seção 2.1, descreve-se o conceito de processo envelope e mostra-se exemplos representativos das diferentes abordagens de construção destes processos. A transformada wavelet é apresentada na Seção 2.2. Destaca-se a adequabilidade dessa transformada na análise de processos que apresentam o fenômeno de cascateamento. O processo movimento Browniano multifractal é apresentado, na Seção 2.3, juntamente com um procedimento para geração desse processo. Um estimador de função cascateamento baseado na decomposição de um processo pela transformada wavelet discreta é apresentado na Seção 2.4. Mostra-se funções cascateamento de traços de tráfego real e de traços de tráfego sintético. Na Seção 2.5, descreve-se modelos capazes de caracterizar o tráfego que possui cascateamento.

No Capítulo 3, apresenta-se os resultados do estudo que evidencia o fenômeno de cascateamento não-uniforme (multifractalidade) em traços de tráfego IP. Utiliza-se a abordagem proposta em [18, 19], na qual o tráfego é analisado no domínio da transformada wavelet discreta. Mostra-se, também, uma análise no domínio do tempo que confirma a ocorrência de multifractalidade bem como a escala de tempo que limita a sua ocorrência.

No Capítulo 4, apresenta-se a definição do processo envelope proposto para caracterizar tráfego multifractal. Este processo envelope, chamado de processo envelope do mBm, é validado extensivamente utilizando-se tanto traços de tráfego real quanto traços de tráfego sintético. Mostra-se, ainda, que o processo envelope do mBm é uma generalização do processo envelope do fBm derivado em [12].

No Capítulo 5, estuda-se um sistema de fila alimentado por um fluxo multifractal limitado pelo processo envelope do mBm. Uma expressão matemática para escala de tempo de interesse é apresentada bem como a sua validação. Deriva-se, também, uma

expressão para a escala de tempo de interesse do sistema de fila alimentado por um fluxo limitado pelo processo envelope do fBm. Este estudo tem por objetivo ilustrar a validade da expressão baseada no Processo Envelope do mBm, mais genérica, para o caso em que o fluxo é caracterizado pelo processo envelope do fBm. Essas expressões consideram a evolução do sistema de fila ao longo do tempo e não somente um período de ocupação, como definido em [5]. Experimentos de simulação foram realizados para avaliar o impacto no dimensionamento dos recursos de um sistema quando se caracteriza um fluxo multifractal a partir de um processo monofractal. Mostra-se, também, a solução de uma fila alimentada por um fluxo gerado pela agregação de vários fluxos multifractais. A partir desse modelo deriva-se uma expressão para estimar a escala de tempo deste tipo de fila, bem como resultados da sua validação.

No Capítulo 6, define-se uma heurística para a computação da banda passante equivalente de um fluxo multifractal. O algoritmo que implementa a heurística é analisado e o seu custo computacional determinado. A heurística proposta é empregada no estudo realizado para determinar o ganho obtido quando se realiza multiplexação estatísticas de fluxos multifractais. Deriva-se expressões para a determinação desse ganho quando o fluxo de tráfego que alimenta o sistema é gerado pela agregação de fluxos multifractais. Compara-se o impacto no ganho obtido com a multiplexação estatística de fluxos multifractais quando estes são caracterizados tanto por processos multifractais quanto por processos monofractais.

No Capítulo 7, estuda-se o policiamento de tráfego multifractal. Avalia-se a efetividade do mecanismo Balde Furado no policiamento desse tráfego e um novo mecanismo de policiamento, chamado de Balde Furado Multifractal, é proposto. Analisa-se a capacidade do mecanismo Balde Furado Multifractal de identificar violações dos descritores do tráfego policiado e a sua sensibilidade aos períodos de observação (tamanho de janela) do tráfego policiado.

No Capítulo 8, as conclusões desta tese são apresentadas. Delineia-se trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos com a teoria proposta nesta tese.

1.2 Contribuições desta Tese

- Detecção do fenômeno do cascateamento em traços de tráfego coletado em diferentes períodos (anos de 1995, 1999, 2000 e 2003) e ambientes (acadêmico e industrial), (Capítulo 3) [20];

- Definição de um processo envelope, chamado de processo envelope do mBm, capaz de caracterizar tráfego que apresenta estatísticas multifractais, (Capítulo 4) [21, 20];
- Caracterização de diferentes fluxos de tráfego multifractal usando-se o processo envelope do mBm, (Capítulo 4) [21, 20];
- Demonstração de que uma caracterização baseada em um modelo fractal superestima a dinâmica do tráfego multifractal, (Capítulo 4) [20, 22];
- Análise de um sistema de fila alimentado por um fluxo multifractal. No modelo de tráfego proposto considera-se não apenas um único período de ocupação mas toda a evolução da fila ao longo do tempo, (Capítulo 5)[23, 22, 24];
- Definição de uma expressão matemática para a escala de tempo de interesse de sistemas de filas alimentados por um único fluxo multifractal, (Capítulo 5)[23, 22, 24];
- Definição de uma expressão matemática para a escala de tempo de interesse de um sistema de fila alimentado por um fluxo multifractal que é caracterizado pelo processo envelope do fBm. A expressão apresentada por Fonseca, Mayor e Viana Neto [5] considera um único período de ocupação do sistema, enquanto a expressão apresentada nesta tese considera a evolução da fila ao longo do tempo, (Capítulo 5)[22];
- Análise de um sistema de fila alimentado por vários fluxos multifractais. No modelo de tráfego proposto considera-se a evolução do sistema de fila ao longo do tempo, ao invés de se caracterizar um único período de ocupação, (Capítulo 5)[22];
- Definição de uma expressão matemática para calcular a escala de tempo de interesse de um sistema de fila alimentado por um fluxo multifractal gerado a partir da agregação de vários fluxos multifractais, (Capítulo 5)[24];
- Definição de uma heurística para computação da Banda Passante Equivalente de fluxos multifractais, (Capítulo 6)[22, 24];
- Definição de expressões para calcular ganhos com a multiplexação de estatística de fluxos multifractais, (Capítulo 6)[22, 24];

- Definição e avaliação de um mecanismo de policiamento, chamado de Balde Furado Multifractal, para tráfego multifractal. O mecanismo é avaliado na sua capacidade de reação à violação dos descritores do tráfego, bem como a sensibilidade aos tamanhos de janela de observação do tráfego, (Capítulo 7)[22];

1.3 Publicações Realizadas pelo Autor

1.3.1 Publicações Realizadas pelo Autor Relacionadas a esta Tese

As seguintes publicações têm como base os resultados apresentados nesta tese.

- [20] Cesar A. V. Melo and N.L.S. Fonseca, “An Envelope Process for Multifractal Traffic Modeling”, IEEE International Conference on Communications, pp. 2168-2173, Paris, June, 2004.
- [23] Cesar A. V. Melo and N.L.S. Fonseca, “Statistical Multiplexing of Multifractal Flows”, IEEE International Conference on Communications, pp. 1135-1140, Paris, June, 2004.
- [22] Cesar A. V. Melo and N.L.S. Fonseca, “Envelope Process and Computation of the Equivalent Bandwidth of Multifractal Flows”, Submetido para The Computer Networks Journal, 2004.
- [24] Cesar A.V. Melo e N.L.S. Fonseca, “Computação de Banda Passante Equivalente de Fluxos Multifractais”, XXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Páginas 73-86, Gramado, Maio 2004.
- [21] Cesar A.V. Melo e N.L.S Fonseca. “Um Processo Envelope para Modelagem de Tráfego Multifractal”. XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. Páginas 87-101, Natal, Maio 2003.

1.3.2 Outras Publicações

O autor também contribuiu com as seguinte publicações. Essas publicações contêm resultados que não fazem parte dessa tese.

- Cesar A. V. Melo and N.L.S. Fonseca, “A Greedy Policy for the Admission Control of Self-Similar Traffic”, Journal of the Brazilian Telecommunications Society, pp 218-224, Vol 18, no 2, 2003.
- Cesar A.V. Melo e N.L.S. Fonseca, “Um estudo comparativo de processos envelopes para modelagem de tráfego multifractal”, Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, Campinas, Agosto, 2003.
- Cesar A.V. Neto and N.L.S. Fonseca, “Network Self-Sizing under Fractal Traffic by Use of Envelope Processes”, 9th IEEE Workshop on Computer-Aided Modeling, Analysis and Design of Communication Links and Network, New York, 2002.
- Cesar A.V. Neto e N.L.S. Fonseca, “Modelagem de tráfego usando Processo Envelope”, Workshop de Qualidade de Serviço e Mobilidade, 2002, Angra dos Reis - Brasil, 2002.

Capítulo 2

Conceitos básicos em Modelagem de Tráfego

Neste capítulo, os conceitos que serão utilizados no desenvolvimento desta tese são apresentados. Na Seção 2.1, o conceito de processo envelope é apresentado e descrevem-se processos envelopes que são representativos. Na Seção 2.2, apresenta-se o conceito de Transformada Wavelet Discreta usado na construção do detector de multifractalidade e do estimador da função cascataamento $H(t)$, também discutidos neste capítulo. Na Seção 2.3, mostra-se o processo movimento Browniano multifractal usado na definição do processo envelope multifractal introduzido no Capítulo 4, e um gerador de processo multifractal sintético. Na Seção 2.4, apresenta-se o estimador da função de cascataamento $H(t)$, que mede a explosividade do processo multifractal localmente. Este estimador é usado em experimentos de medição que derivaram as funções cascataamento de traços de tráfego real e de traços de tráfego sintético. Na Seção 2.5, apresenta-se modelos de tráfego propostos para caracterizar o tráfego em que o fenômeno do cascataamento ocorre.

2.1 Processo Envelope

Uma descrição exata de um fluxo de tráfego é uma tarefa difícil e que pode apresentar um custo computacional elevado. Modelos limitantes de tráfego (Processos Envelopes) são abordagens que tentam balancear o custo computacional e a precisão, estabelecendo limitantes para o volume de tráfego em um fluxo. Estes limitantes podem ser utilizados pelos mecanismos de controle de admissão de conexão e poli-

ciamento na tarefa de gerenciar os recursos de uma rede[25, 26, 27]. Os Processos Envelopes (PEs) podem ser classificados em duas categorias: determinísticos e probabilísticos.

Os PEs determinísticos são limitantes absolutos e possibilitam uma análise de pior caso. Nestes PEs são derivados limites absolutos para métricas de QoS como por exemplo atraso e vazão. Em um PE determinístico uma função limitante $\hat{A}(t)$ é definida, tal que o PE empírico:

$$\varepsilon(t) = \sup_{s \geq 0} A[s, s + t], \quad (2.1)$$

que corresponde ao máximo de um fluxo $A(t)$ no intervalo de tempo t , seja limitado superiormente.

A principal vantagem desta abordagem é o reduzido número de parâmetros usado na caracterização do tráfego. O dimensionamento dos mecanismos de controle de uma rede a partir dos limitantes absolutos estabelecidos pelos PEs determinísticos tem como consequência a utilização conservadora dos recursos da rede[27].

Na abordagem probabilística as propriedades estocásticas de um fluxo de tráfego são utilizadas. Diferentemente da abordagem determinística, os limitantes derivados em uma abordagem probabilística não são absolutos, isto é, o PE empírico (Equação 2.1) pode violar o limitante estabelecido pela função limitante de um PE probabilístico. A vantagem desta abordagem está na utilização menos conservadora dos recursos da rede pelos mecanismos de controle. Por outro lado, os modelos probabilísticos apresentam uma estrutura mais complexa requerendo informações sobre o fluxo que são, geralmente, mais difíceis de se obter, por exemplo, função de correlação.

A despeito da grande quantidade de pesquisa desenvolvida, nos últimos quinze anos, na área de modelagem de tráfego usando processos envelopes nesta seção, apresenta-se, somente, a definição de três processos envelopes. O critério usado para a escolha, principalmente dos dois primeiros PEs, é a relevância de cada um deles em suas respectivas categorias.

O primeiro processo envelope apresentado é o processo envelope D-BIND que pertence a categoria de PEs determinísticos. O PE D-BIND generaliza o PE (σ, ρ) , sendo este PE definido como a saída de um mecanismo Balde Furado com taxa de geração de fichas ρ e tamanho de balde σ . O PE (σ, ρ) é um dos mais discutidos na literatura. O PE D-BIND também é utilizado na definição dos PEs H-BIND e RV. Os PEs H-BIND e RV são abordagens híbridas que caracterizam os fluxos a partir

de estatísticas obtidas de um fluxo caracterizado pelo PE D-BIND.

O segundo PE apresentado é o processo envelope limitante de explosividade soma de exponencial que pertence a categoria de PEs probabilísticos. Nesta categoria, considera-se que o acumulado de um fluxo no intervalo de tamanho t pode ultrapassar o limitante estabelecido pelo PE (σ, ρ) , e esse evento tem função de distribuição de probabilidade que é dependente de σ . Os dois primeiros PEs desenvolvidos na categoria probabilística consideram que os eventos de violação da função limitante têm função de distribuição de probabilidade exponencial, enquanto o último PE considera essa função uma função Weibullian. O PE limitante de explosividade soma de exponencial é uma generalização do PE limitante de explosividade exponencial, o primeiro PE desenvolvido na categoria probabilística. Além disso, toda a teoria desenvolvida na definição do PE limitante de explosividade soma de exponencial é utilizada na definição do PE limitante de explosividade Weibullian.

O terceiro processo envelope apresentado é o PE do movimento Browniano fractal. Este PE apresenta características da categoria probabilística, permitindo que o fluxo viole o limite estabelecido por sua função limitante. Entretanto, ele pode ser visto como uma extensão do PE (σ, ρ) quando os seus parâmetros, fator probabilístico e variância, são apropriadamente ajustados. Em outras palavras, o PE do movimento Browniano fractal pode ser visto como um PE capaz de caracterizar tráfego com diferentes estatísticas.

2.1.1 O processo envelope D-BIND

O Processo Envelope (PE) D-BIND [28] (do inglês *Deterministic Bounding Interval Dependent*) é próprio para caracterizar tráfego que apresenta padrões de comportamento bem definidos em intervalos de tempo de tamanhos diferentes. Esse PE é definido por um conjunto de tuplas $T = \{(R_k, I_k) | k = 1, \dots, n\}$, onde R_k é um limite para a taxa de tráfego que pode ser gerada por um fluxo em intervalos de tempo que têm duração máxima I_k . Em outras palavras, as taxas R_k limitam o tráfego e os intervalos I_k indicam os instantes em que os diferentes padrões verificados no tráfego se manifestam.

A função limitante $\hat{A}(t)$ associada ao PE D-BIND é da seguinte forma:

$$\hat{A}(t) = \begin{cases} \frac{R_k I_k - R_{k-1} I_{k-1}}{I_k - I_{k-1}}(t - I_k) + R_k I_k & \text{se } I_{k-1} < t \leq I_k \\ R_n I_n & \text{se } t > I_p \\ R_1 t & \text{se } t < I_1 \\ 0 & \text{se } t = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

A Figura 2.1 mostra a caracterização da seqüência de vídeo JURASSIC disponível em [29] pelo PE D-BIND. Essa seqüência foi obtida com a codificação de cenas do filme Jurassic Park no padrão MPEG4 com os frames I, B e P agrupados em quadros na forma IBBPBBPBBPBBP. O tráfego em uma rede gerado pela transmissão dessa seqüência de vídeo estabelece um padrão de comportamento, tal que um modelo de tráfego apropriado para caracterizá-lo deve captar as mudanças no volume do tráfego, frames I, B e P, e identificar os instantes em que estas mudanças ocorrem.

A Figura 2.1.a mostra o comportamento da família de tuplas taxa-intervalo estimada da seqüência de vídeo JURASSIC. Os valores de I_k são múltiplos de 0.04 segundos, que é o tempo de um frame em um quadro. Para I_1 a taxa R_1 derivada corresponde à taxa de pico registrada na seqüência, que é de 0.45 Mbps. Aumentando-se os valores de I_k , as taxas R_k calculadas aproximam-se da taxa média da seqüência, que é de 0.15 Mbps. Em outras palavras, o PE D-BIND utiliza os intervalos I_k para captar os diferentes níveis de explosividade e as taxas R_k para captar os diferentes volumes de tráfego gerados nos frames I, B e P.

A Figura 2.1.b mostra a função limitante $\hat{A}(t)$ do PE D-BIND e o PE empírico $\varepsilon(t)$ (Equação 2.1) obtido a partir da seqüência de vídeo JURASSIC. As curvas na Figura 2.1.b são similares em termos qualitativos, ou seja, a maioria das variações de comportamento registradas em $\varepsilon(t)$ são reproduzidas pela função $\hat{A}(t)$. Além disso, a função $\hat{A}(t)$ é claramente um limitante superior para $\varepsilon(t)$. Se por um lado, a geração de limitantes absolutos é uma característica dos PEs determinísticos, por outro o emprego desses limitantes no dimensionamento dos recursos de uma rede causa a subutilização dos mesmos.

O processo envelope (PE) D-BIND é a generalização de alguns processos envelopes determinísticos. O PE (σ, ρ) [25, 30] descreve o tráfego em termos de uma taxa ρ e de um fator de explosividade σ . A função limitante $\hat{A}(t)$ associada ao PE (σ, ρ) é definida por $\hat{A}(t) = \rho t + \sigma$. O PE $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ [31] é uma generalização do PE (σ, ρ) , com função limitante definida por $\hat{A}(t) = \min_{1 \leq i \leq N} \{\sigma_i + \rho_i t\}$, onde n é o número de pares (σ, ρ) . A função $\hat{A}(t)$ do PE $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$ apresenta um comportamento côncavo sob os

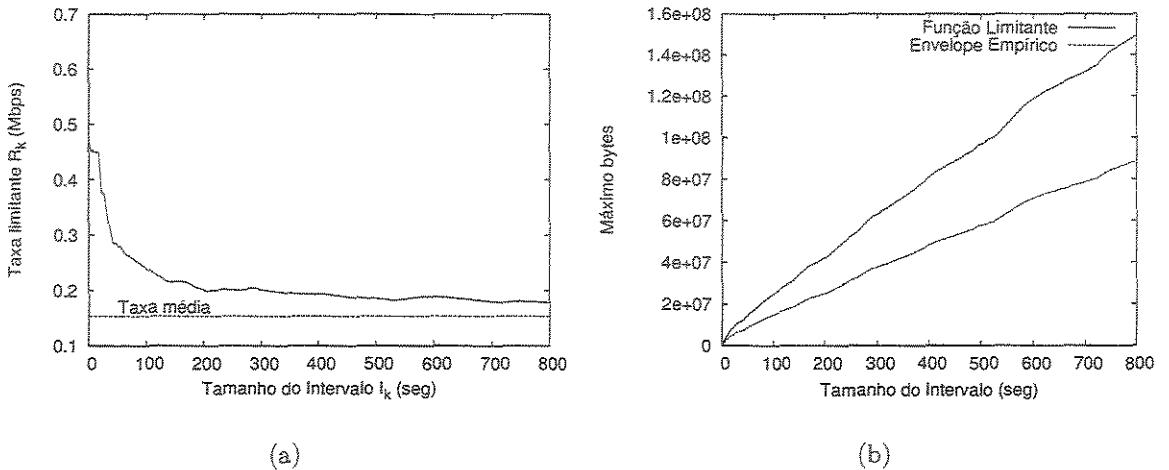


Figura 2.1: O processo envelope D-BIND

diversos segmentos lineares identificados no tráfego, enquanto que função $\hat{A}(t)$ do PE D-BIND apresenta um comportamento linear nestes mesmos segmentos, mostrando que o PE D-BIND é uma generalização dos PEs (σ, ρ) e $(\vec{\sigma}, \vec{\rho})$.

No PE $(X_{min}, X_{ave}, I, S_{max})$ [32], a fonte de tráfego é limitada usando os seguintes critérios: i) deve existir um espaçamento mínimo X_{min} entre os pacotes; ii) o tamanho máximo dos pacotes é definido por S_{max} ; iii) em intervalos de tamanho I a fonte de tráfego não pode transmitir mais que I/X_{ave} pacotes. A função limitante $\hat{A}(t)$ associada a esse PE é definida por $\hat{A}(t) = \gamma(t) + \min\{\lceil(\frac{t}{I} - \lfloor\frac{t}{I}\rfloor)\frac{I}{X_{min}}\rceil, \frac{I}{X_{ave}}\}S_{max}$, $\gamma(t) = \lfloor\frac{t}{I}\rfloor \frac{IS_{max}}{X_{ave}}$. O resultado obtido com a avaliação da função \min é um limitante para a explosividade do tráfego, enquanto $\gamma(t)$ é um limitante para a taxa média do tráfego gerado pela fonte. O PE $(X_{min}, X_{ave}, I, S_{max})$ também pode ser expresso pelo PE D-BIND através da interpolação de diversas funções.

Em [27], o Processo Envelope (PE) D-BIND é usado na definição do PE H-BIND (do inglês *Hybrid Bounding Interval Dependent*). O PE H-BIND permite a derivação de limitantes estatísticos para medidas de QoS explorando a aleatoriedade de fluxos caracterizados de forma determinística. Cada fluxo b_i é regulado por um PE D-BIND. Assume-se que b_i é gaussiano. As estatísticas de primeira e de segunda ordem usadas na definição do PE H-BIND foram estimadas da caracterização do fluxo, feita pelo PE D-BIND. Apesar dessa caracterização determinística, mostrou-se ser possível atingir níveis altos de utilização do sistema [27]. Além disso, a abordagem H-BIND/D-BIND suporta simultaneamente garantias de QoS estritas e não-restritas, servindo com maior prioridade os fluxos gerados por fontes que requisitam garantias de QoS

estritas.

O processo envelope (PE) Taxa-Variância (do inglês *Rate-Variance-RV*) [33] é uma extensão do PE D-BIND/H-BIND. A medida RV de um fluxo,

$$RV(t_k) = \text{Var} \left\{ \frac{A(s, s + t_k)}{t_k} \right\}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (2.3)$$

descreve a variância da taxa de chegada de um fluxo tomada em intervalos de tamanho t_k , permitindo que a estrutura de correlação de um processo de chegada seja caracterizada.

Em [33], mostra-se que três segmentos lineares, obtidos numa escala *log – log*, da curva $RV(t)$, são suficientes para caracterizar a estrutura de correlação de traços de vídeo. Mostra-se que o PE RV permite níveis maiores de utilização, entretanto, a tarefa de policiar e monitorar os fluxos é mais complexa devido ao tipo de informação usado para derivá-lo. Na definição do PE RV duas funções limitantes, chamadas de envelope adversário e envelope não-adversário, são derivadas. A função limitante envelope adversário é definida por :

$$RV_j^*(t) = \frac{\phi_j b_j(t)}{t} - \phi_j^2 \quad (2.4)$$

onde, $\phi_j = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{b_j(t)}{t}$ e $b_j(t)$ é uma função limitante que impõe um limite superior para o processo de chegada. Em [33], usou-se o PE D-BIND para definir a função limitante $b_j(t)$ na avaliação do envelope adversário.

A função limitante envelope não-adversário é definida por :

$$\widehat{RV}_j(t) = \frac{A_j}{\lambda_{j,1}^3} [((\lambda_{j,1} v_j(t) - 1)^2 + 1) e^{\lambda_{j,1} v_j(t)} - 2] - \phi_j^2 \quad (2.5)$$

onde, $v_j(t)$ é a taxa envelope determinística do tráfego, ϕ_j a taxa média do tráfego , $\lambda_{j,1}$ é a solução não-trivial de;

$$e^{\lambda_{j,1} v_j(t)} + \frac{1 + \phi_j \lambda_{j,1}}{(v_j(t) - \phi_j) \lambda_{j,1} - 1} = 0 \quad (2.6)$$

e A_j é :

$$A_j = \frac{\lambda_{j,1}}{e^{\lambda_{j,1} v_j(t)}} \quad (2.7)$$

Em [33], mostra-se a derivação desses envelopes e uma avaliação dos limites obtidos com esses envelopes. Em termos qualitativos, enfatiza-se que as estruturas de correlação, não triviais no tráfego caracterizado, são reproduzidas por $RV^*_j(t)$ e

$\widehat{RV}_j(t)$. Em termos quantitativos, ambos os envelopes são limites largos para o tráfego caracterizado.

2.1.2 Processo Envelope Limitante de Explosividade Soma de Exponenciais

A teoria desenvolvida para se definir o PE Limitante de Explosividade Soma de Exponencial é apresentada a seguir. Esta teoria é uma generalização da teoria desenvolvida na definição do primeiro PE da categoria probabilística, o PE Limitante de Explosividade Exponencial, e serviu de base para definição do PE Limitante de Explosividade Weibullian. Primeiramente, apresenta-se as características da função de probabilidade de violação. Em seguida, mostra-se as características de um processo limitado estocasticamente, e, por fim, descreve-se um processo com explosividade limitada estocasticamente. A partir destas definições, deriva-se três teoremas que são usados na modelagem do tráfego em um sistema de filas em diferentes momentos (entrada, circulação e saída). Esta caracterização permite a derivação de limitantes probabilísticos para as métricas de QoS do sistema e, por consequência, o dimensionamento de mecanismo de controle.

Definição 1 (Função de probabilidade de violação) Seja \mathcal{F} o conjunto de todas as funções $f(\sigma)$, tal que para qualquer ordem n a n -ésima integral de $f(\sigma)$, descrita por $(\int_{\sigma}^{\infty} du)^n f(u)$, esteja definida para algum $\sigma \geq 0$.

Definição 2 (Processo SBB) Seja $R(t)$ a taxa instantânea de um fluxo F e $A(t_1, t_2)$ o volume de tráfego gerado por F no intervalo $[t_1, t_2]$, ou seja, $A(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} R(t)dt$. $R(t)$ tem explosividade limitada estocasticamente (do inglês Stochastically Bounded Burstiness-SBB) com taxa superior ρ e função de probabilidade de violação $f(\sigma)$, se:

- i) $f(\sigma) \in \mathcal{F}$
- ii) $\Pr \{A(t_1, t_2) \geq \rho(t_2 - t_1) + \sigma\} \leq f(\sigma)$ para todo $\sigma \geq 0$ e todo $0 \leq t_1 < t_2$.

Definição 3 (Processo SB) Seja $W(t)$ o trabalho não-realizado no sistema. $W(t)$ é limitado estocasticamente (do inglês Stochastically Bounded-SB) com função de probabilidade de violação $f(\sigma)$, se:

- i) $f(\sigma) \in \mathcal{F}$

ii) $\Pr \{W(t) \geq \sigma\} \leq f(\sigma)$ para todo $\sigma \geq 0$ e todo $t \geq 0$.

A condição i) das definições 2 e 3 é fundamental para a análise de um sistema que tem como entrada um processo SB. Esta condição caracteriza uma função de probabilidade de violação $f(\sigma)$, permitindo a determinação da função de probabilidade de violação $g(\sigma)$, associada a um processo de saída, tomando-se a n-ésima integral de $f(\sigma)$ reescalada por um fator constante (Teorema 3). A condição ii) das definições 2 e 3 permite que $W(t)$ e $A(t)$ violem seus limites (σ e $\rho(t-s) + \sigma$) e estabelece que a probabilidade de que esse evento ocorra é dependente de σ .

A caracterização dos fluxos de entrada e saída e o comportamento dos fluxos, após sua entrada em um sistema, são questões importantes para a definição de mecanismos de controle desse sistema. Em [34], são estabelecidos três teoremas, tendo-se como base as definições 2 e 3, e que caracterizam o comportamento dos fluxos no sistema em diferentes momentos. O primeiro teorema caracteriza o fluxo de chegada, o segundo teorema caracteriza o fluxo gerado pela agregação de N fluxos SBB, ou seja, o fluxo dentro do sistema, e o terceiro teorema caracteriza o fluxo que deixará o sistema.

Teorema 1 (Caracterização) *Seja um sistema conservador de trabalho operando a taxa ρ e alimentado por um único fluxo de taxa $R(t)$ e $W(t)$ o trabalho não realizado nesse sistema. Se $W(t)$ é SB com função de probabilidade de violação $f(\sigma)$, então o processo de chegada do sistema é SBB com taxa superior σ e função de probabilidade de violação $f(\sigma)$.*

Teorema 2 (Agregação) *Seja $0 < p < 1$ um valor real, $\hat{\sigma} = p\sigma$ e $\bar{\sigma} = (1-p)\sigma$, $R_1(t)$ e $R_2(t)$ SBB com função de probabilidade de violação e taxa superior definidas, respectivamente, por $(f_1(\sigma), \rho_1)$ e $(f_2(\sigma), \rho_2)$. Então, o fluxo agregado gerado por $R_1(t)$ e $R_2(t)$ é SBB com taxa superior $\rho = \rho_1 + \rho_2$ e função de probabilidade de violação $g(\sigma) = f_1(\hat{\sigma}) + f_2(\bar{\sigma})$.*

Teorema 3 (Relação Entrada-Saída) *Seja um sistema conservador de trabalho operando com capacidade C alimentado pelo agregado de N fluxos, $R_{in}(t)$ a taxa de chegada do fluxo agregado, $R_o(t)$ a taxa de saída do sistema e $W(t)$ o trabalho não-realizado no sistema. Se $R_{in}(t)$ tem explosividade limitada estocasticamente com taxa superior ρ e função de probabilidade de violação $f(\sigma)$, então:*

1. $R_o(t)$ e $W(t)$ têm função de probabilidade de violação $g(\sigma)$ definida por $g(\sigma) = f(\sigma) + \frac{1}{C-\rho} \int_{\sigma}^{\infty} f(u)du$;

2. $R_o(t)$ é SBB com taxa superior ρ ;
3. $W(t)$ é SB.

Mostra-se, a seguir, o que caracteriza cada PE derivado para essa classe de processos envelopes. De fato, a teoria que serve de base para a definição do PE Limitante de Explosividade Exponencial é generalizada nos teoremas apresentados anteriormente, o que inspirou a definição do PE Limitante de Explosividade Soma de Exponencial. A definição do PE Limitante de Explosividade Weibullian estende a teoria estabelecida na definição do PE Limitante de Explosividade Soma de Exponencial, adequando-a para modelar tráfego auto-similar.

O Processo Envelope (PE) Limitante de Explosividade Exponencial [34] (do inglês *Exponential Bounded Burstiness-EBB*) considera que a função de probabilidade de violação $f(\sigma)$ é definida por:

$$f(\sigma) = Ae^{-\alpha\sigma}$$

A e α são constantes específicas do fluxo e α controla a taxa de redução (do inglês *decay rate*) da exponencial. Em [34], limites justos para a probabilidade de transbordo de um buffer são derivados mostrando que esse PE é capaz de caracterizar a maioria do tráfego vigente à época. Em [35], Seção 3.8, mostra-se que o tráfego multimídia é melhor caracterizado quando observado em suas múltiplas escalas de tempo (escala de rajada e célula). Esse fato é ignorado pelo PE EBB [36], sugerindo que os recursos da rede possam ser subutilizados no caso do emprego de controle de admissão que se baseia na caracterização feita a partir desse PE.

O PE Limitante de Explosividade Soma de Exponencial [36] (do inglês *Sum Exponential Bounded Burstiness-SEBB*) generaliza o PE EBB e é capaz de caracterizar tráfego multimídia. No PE SEBB, a função de probabilidade de violação $f(\sigma)$ é dada por:

$$f(\sigma) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-\alpha_i \sigma}$$

onde, A_i e α_i são constantes para $i = 1, \dots, N$. Em [36], realizou-se um estudo comparativo e introduziu-se limites estimados para a probabilidade de transbordo de um buffer usando os PEs EBB e SEBB. O PE SEBB é um limitante justo para o tráfego multimídia, captando suas características com a utilização de diferentes taxas

de redução da exponencial α_i , sendo estas obtidas a partir de um modelo Markoviano representativo para tráfego multiescalar. Por outro lado, o PE EBB superestima o tráfego e gera limitantes largos que é uma consequência da difícil tarefa de ajustar uma única taxa de redução da exponencial (α), usado para modelar o tráfego nas suas diferentes escalas de tempo. Apesar do PE SEBB caracterizar o tráfego com boa precisão, a definição de sua função $f(\sigma)$, a partir da soma de exponenciais, impõe um custo significativo quando a rede cresce e o número de fluxos aumenta. Em outras palavras, pelo Teorema 2 o número de exponenciais requerido para limitar o fluxo que alimenta elementos de uma rede cresce na ordem de N unidades para cada nova agregação realizada, onde N é o número de exponencias usado para caracterizar o fluxo mais recentemente agregado. Em [36], mostra-se uma heurística para derivação das funções de probabilidade de violação que apresenta baixo custo computacional. Por outro lado, reduz-se a precisão da caracterização obtida com o modelo.

A forma da função $f(\sigma)$ nos PEs EBB e SEBB pressupõe que o tráfego apresenta uma função de correlação que é exponencial. A constatação de que o tráfego de dados em LAN e WAN apresenta auto-similaridade e função de auto-correlação subexponencial em escala de tempos grandes[14, 37], motivou a definição de modelos que caracterizam de forma mais direta o tráfego auto-similar. O PE Limitante de Explosividade Weibullian [38] (do inglês *Weibullian Bounded Burstiness-WBB*) baseia-se no estudo de I.Norros [39] que determinou os máximos assintóticos em um buffer alimentado por um processo movimento Browniano fractal (do inglês *fractional Brownian Motion-fBm*), um processo auto-similar, usando uma função de distribuição de probabilidade Weibullian. O PE WBB tem função de probabilidade de violação $f(\sigma)$ definida por:

$$f(\sigma) = Ae^{-\alpha\sigma^{2(1-H)}}$$

onde, A é uma constante, α é a taxa de redução da expoencial, e H é o parâmetro Hurst que mede a explosividade do tráfego. A semelhança de $f(\sigma)$ com a função de probabilidade de transbordo de um buffer, derivada em [39], reforça a condição do PE derivado como um limitante apropriado para esse tipo de tráfego.

2.1.3 Processo Envelope do Movimento Browniano Fractal

Em [14, 37], mostrou-se que o tráfego de dados em LAN e WAN apresentava auto-similaridade e função de auto-correlação subexponencial, características ignoradas pe-

los modelos de tráfego Markovianos tradicionais. Diversos modelos de tráfego foram propostos baseado em diferentes processos auto-similares[14, 40, 41, 11]. Entretanto, os modelos de maior destaque foram aqueles baseados no processo fBm, devido, principalmente, ao reduzido número de parâmetros requerido pelo mesmo para caracterizar o tráfego que apresenta auto-similaridade.

Em [39], um modelo de armazenamento de um sistema alimentado por um fBm é definido. Neste modelo, o volume de trabalho que chega ao sistema é descrito por:

$$A_H(t) = \bar{a}t + \sigma Z_H(t) \quad (2.8)$$

onde, $Z_H(t)$ é o processo Ruído Gaussiano Fractal (do inglês *fractional Gaussian noise-fGn*), o incremento do fBm, com parâmetro Hurst H definido no intervalo $(1/2, 1)$.

A variância de $Z_H(t)$ é dada por:

$$\begin{aligned} Var[Z_H(s)] &= Var[A_H(t+s) - A_H(t)] \\ &= \sigma^2 s^{2H} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Um processo envelope para $A_H(t)$ com média \bar{a} , variância σ^2 e parâmetro Hurst H tem função limitante $\hat{A}(t)$ definida da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \hat{A}(t) &= \bar{a}t + \kappa\sqrt{\sigma^2 t^{2H}} \\ &= \bar{a}t + \kappa\sigma t^H \end{aligned} \quad (2.10)$$

onde, κ expressa a probabilidade de $A_H(t)$ exceder $\hat{A}(t)$. Ou seja,

$$\begin{aligned} \Pr\{A_H(t) > \hat{A}(t)\} &= \Pr\{Z(1) > \kappa\} \\ &= \Phi(\kappa) \end{aligned} \quad (2.11)$$

onde, $\Phi(t)$ é a função de distribuição Gaussiana normalizada. Usando-se a aproximação $\Phi(y) \approx \exp(-y^2/2)$ obtém-se a probabilidade de violação da função limitante, definida por κ , tal que $\Phi(\kappa) \leq \epsilon$. Ou seja, $\kappa = \sqrt{-2 \ln \epsilon}$.

Na Figura 2.2, mostra-se a caracterização obtida para o fluxo registrado em um traço de tráfego coletado de uma rede operacional. Este traço é o registro do volume

de bytes observado em um ponto de agregação de uma rede local instalada nos laboratórios bellcore[14]. A caracterização obtida do tráfego mostra que o PE do fBm é um limite justo para o envelope empírico (Equação 2.1) gerado a partir do traço. Verifica-se que o limitante estabelecido pelo PE fBm é violado em alguns intervalos s , principalmente para s pequenos. Entretanto, as violações verificadas estão de acordo com a probabilidade de violação estabelecida para o processo envelope que foi de $\epsilon = 10^{-3}$. Em [5], o PE do fBm é extensivamente avaliado usando tanto traços de tráfego real, quanto traços de tráfego sintético. Os resultados obtidos mostram que o PE do fBm caracteriza, com boa precisão, o tráfego que apresenta auto-similaridade.

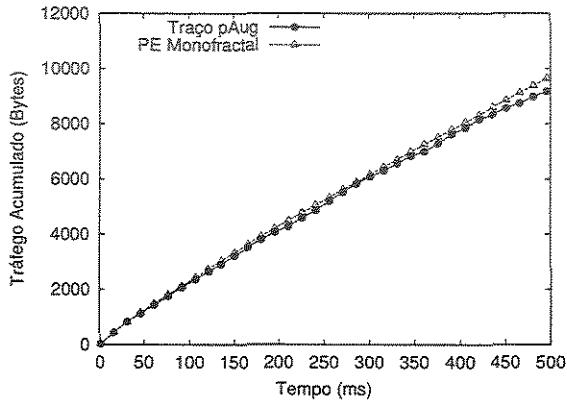


Figura 2.2: O processo envelope fBm

O PE fBm apresenta as seguintes características vantajosas:

- Reduzido número de parâmetros, i.e., com apenas três parâmetros faz-se a caracterização do tráfego;
- É capaz de caracterizar diferentes tipos de tráfego, sendo necessário apenas que seus parâmetros sejam escolhidos de forma a se ajustar com o processo envelope empírico;
- Os parâmetros \bar{a} , σ e H podem ser estimados das amostras iniciais de tráfego.

Em [5], o PE é usado na derivação de expressões para o cálculo da banda passante equivalente de fluxos de tráfego. Estuda-se, também, um sistema alimentado por fluxos que apresentam estatísticas fractais, derivando-se expressões para a determinação de escalas de tempo de interesse desse sistema. Um mecanismo para policiamento baseado no PE do fBm é apresentado em [5, 42]. Em [20], uma política

para controle de admissão de conexões é estudada, tendo-se caracterizado os fluxos das conexões através do PE do fBm. Em [43, 44] o PE do fBm é usado na definição de uma heurística para estimar a banda passante equivalente em um cenário de redes multiserviço de alta velocidade.

2.2 A Transformada Wavelet Discreta

Nesta seção, apresenta-se o conceito de transformada wavelet discreta (do inglês *Discrete Wavelet Transform - DWT*). Destaca-se as características que a torna adequada à análise de sinais (processos) que apresentam o fenômeno do cascamente e estatísticas com dependência de longa duração.

A decomposição de um processo $X(t)$, feita com as transformadas wavelet discrete, analisa $X(t)$ por intermédio de uma função $\psi_{j,k}$, onde j representa a escala de tempo e k o instante de tempo na escala j . Deslocando e alterando a escala de tempo da função wavelet mãe ψ , pode-se analisar o processo nas suas componentes escala de tempo j e instante k :

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}t - k)$$

onde a função $\psi_{j,k}(t)$ forma uma base ortogonal de funções que têm suas integrais duplas definidas. Dessa forma, qualquer processo que tenha as integrais duplas definidas pode ser aproximado por uma combinação linear finita de funções $\psi_{j,k}(t)$.

O algoritmo da DWT decompõe o processo $X(t)$ construindo uma árvore binária, onde cada nível nesta árvore registra o sinal observado com certa resolução (escala de tempo). A construção dessa árvore e, por conseguinte, a decomposição de $X(t)$ é expressa matematicamente por:

$$X(t) = \sum_k C_X(j_0, k)\phi_{j_0, k} + \sum_{j \leq j_0} \sum_k d_X(j, k)\psi_{j, k}(t). \quad (2.12)$$

O primeiro termo dessa representação é uma aproximação de $X(t)$ na maior escala de tempo j_0 e o segundo termo representa os incrementos de $X(t)$ nas escalas de tempo menores. Os $C_X(j_0, k)$ são chamados de coeficientes de mudança de escala e ϕ a função de mudança de escala. Os $d_X(j, k)$ são chamados coeficientes wavelet (detalhes) e transportam os incrementos do processo para a árvore binária construída. A implementação do algoritmo da DWT tem custo computacional $\mathcal{O}(n)$ e as operações

de decomposição do sinal restringem-se à realização de somatórios e de produtórios (Equação 2.12).

As propriedades que tornam a transformada wavelet discreta apropriada para a análise de processos que apresentam o fenômeno do cascateamento são: a insensibilidade à escala de tempo-freqüência, a insensibilidade da função wavelet mãe à não-estacionaridade e a pequena correlação verificada na série $d_X(j, k)$. Os operadores de dilatação, usados para repetidamente definir as bases wavelet em escalas j , permitem as funções geradoras dessa base reproduzir o fenômeno do cascateamento (insensibilidade à escala de tempo) presente na série. A função wavelet mãe ψ possui um número $N \geq 1$ de momentos não-definidos (do inglês *vanish moment*) $\int t^k \psi_0(t) dt \equiv 0$, $k = 0, \dots, N - 1$, permitindo à transformada wavelet remover tendências polinomiais de ordem igual ou inferior a $N - 1$, o que a torna insensível a não-estacionaridade presente na série. Supondo-se que $N \geq H + 1/2$, onde H é o parâmetro Hurst, tem-se que a dependência de longa duração verificada nos incrementos da série é transformada em dependência de curta duração, ou seja, a série definida pelos detalhes $d_X(j, k)$ apresenta correlação quase nula.

As propriedades da transformada wavelet discreta garantem: i) a captura do cascateamento verificado no processo; ii) que a presença de dependência de longa duração nos incrementos do processo não resultam em uma análise tendenciosa feita a partir da série de detalhes $d_X(j, k)$; iii) e que influências vindas de tendências polinomiais de ordem menor que $N - 1$ são removidas pela aplicação da decomposição.

2.3 O Processo Movimento Browniano Multifractal

Nesta seção, apresenta-se o processo movimento Browniano multifractal (mBm) e descreve-se suas principais propriedades. Mostra-se, ainda, um procedimento para a geração de processos mBm. Avaliações dos processos mBm gerados usando esse procedimento são também apresentados.

O movimento Browniano multifractal é um processo Gaussiano contínuo com incrementos não-estacionários e definido no intervalo $(0, \infty)$ da seguinte forma [45]:

$$W_{H(t)} = \frac{1}{\Gamma(H(t) + 1/2)} \left\{ \int_{-\infty}^0 [(t-s)^{H(t)-1/2} - (-s)^{H(t)-1/2}] dB(s) + \int_0^t (t-s)^{H(t)-1/2} dB(s) \right\}$$

onde, $B(s)$ é o movimento Browniano.

O processo movimento Browniano multifractal (mBm) é uma generalização do processo movimento Browniano fractal (do inglês *fractional Brownian motion*-fBm) e é assintoticamente auto-similar, ou seja;

$$\lim_{\rho \rightarrow 0^+} \left\{ \frac{W(t + \rho u) - W(t)}{\rho^{H(t)}} \right\}_{u \in R^+} = \{B_{H(t)}(u)\}_{u \in R^+}$$

onde, $W(t)$ é um mBm e $B_{H(t)}(u)$ é um processo fBm com parâmetro Hurst $H = H(t)$.

A regularidade local de um processo é expressa pelo expoente Holder que mede o cascataamento (do inglês *scaling*) nesse processo. O expoente Holder define o cascataamento em pequenas escalas de tempo, através de uma potência cujo expoente $h(t)$ expressa tanto dependências temporais quanto espaciais. O expoente Holder h é o maior valor que $h(t)$ pode assumir, $0 \leq h \leq 1$, tal que :

$$|X(t + \gamma) - X(t)| \leq k|\gamma|^h \text{ para } \gamma \rightarrow 0$$

Para processos monofractais o expoente Holder é um valor constante (parâmetro Hurst), enquanto que para processos multifractais este expoente é uma função aleatória chamada de função Holder (função cascataamento).

Em [45], um gerador de processos movimento Browniano multifractal (mBm) de função cascataamento $H(t)$ é proposto. Nesse gerador, cada realização do processo mBm é definido por um processo fBm com parâmetro Hurst definido pelo valor da função $H(t)$ no instante t . Dada uma função $H(t)$ contínua e o número de realizações N que se deseja gerar, então para cada valor de $H(i/N)$, $1 \leq i \leq N$, um fBm $B_H(t)$ com parâmetro Hurst $H = H(i/N)$ é gerado. O mBm $W_{H(t)}(t)$ é gerado, definindo-se:

$$W_{H(i/N)}(i/N) = B_H(i/N), \quad 1 \leq i \leq N$$

No gerador apresentado em [45], usa-se o método RMD (do inglês *Random Mid-points Displacement*) para geração dos processos fBm devido a sua simplicidade de implementação, apesar desse método gerar apenas resultados aproximados. Como sugerido em [45], na prática outros métodos podem ser utilizados para geração dos

GeradorMBM (N :tamanho amostra, $H(t)$:função cascateamento)

Início

Para $t = 1$ ate N faça

$$h = H(t/N)$$

$$B_h = fBm_chi(h, N)$$

$$W_{H(t/N)}(t/N) = B_h(t/N)$$

Fim Para

Fim

Figura 2.3: O algoritmo do gerador de processo mBm

fBms. Nos experimentos realizados nessa tese para geração de processos mBm, usa-se o método desenvolvido por V. Paxson, descrito em [46], que apresenta uma boa relação entre custo computacional e precisão do fBm gerado. Um pseudo-código do gerador de mBm é mostrado na Figura 2.3.

A Figura 2.4 mostra exemplos de processos mBm sintéticos (traços de tráfego sintético) gerados com o algoritmo apresentado anteriormente. As funções cascateamento $H(t)$ usadas para gerar os traços de tráfego sintético são dadas pelos seguintes polinômios:

$$H(t) = t/2.0 + 0.5 \quad \text{com } t \in (0, 1);$$

$$H(t) = 1.9t^2 - 1.9t + 0.975 \quad \text{com } t \in (0, 1);$$

$$H(t) = 4.9t^3 - 7.9t^2 + 3.35t + 0.51 \quad \text{com } t \in (0, 1).$$

Na Seção 2.4, estima-se as funções cascateamento $H(t)$ a partir destes traços. Os resultados obtidos com a estimativa de $H(t)$ reforçam a condição de que esse gerador é apropriado para a produção de processos multifractais. Verifica-se uma boa convergência entre os valores das funções cascateamento $H(t)$ e os valores de $\hat{H}(t)$ estimados.

2.4 Um Estimador para a Função Cascateamento $H(t)$

Nesta seção, um estimador para a função Holder (função cascateamento) é apresentado. Este estimador determina a função cascateamento de um processo multifractal

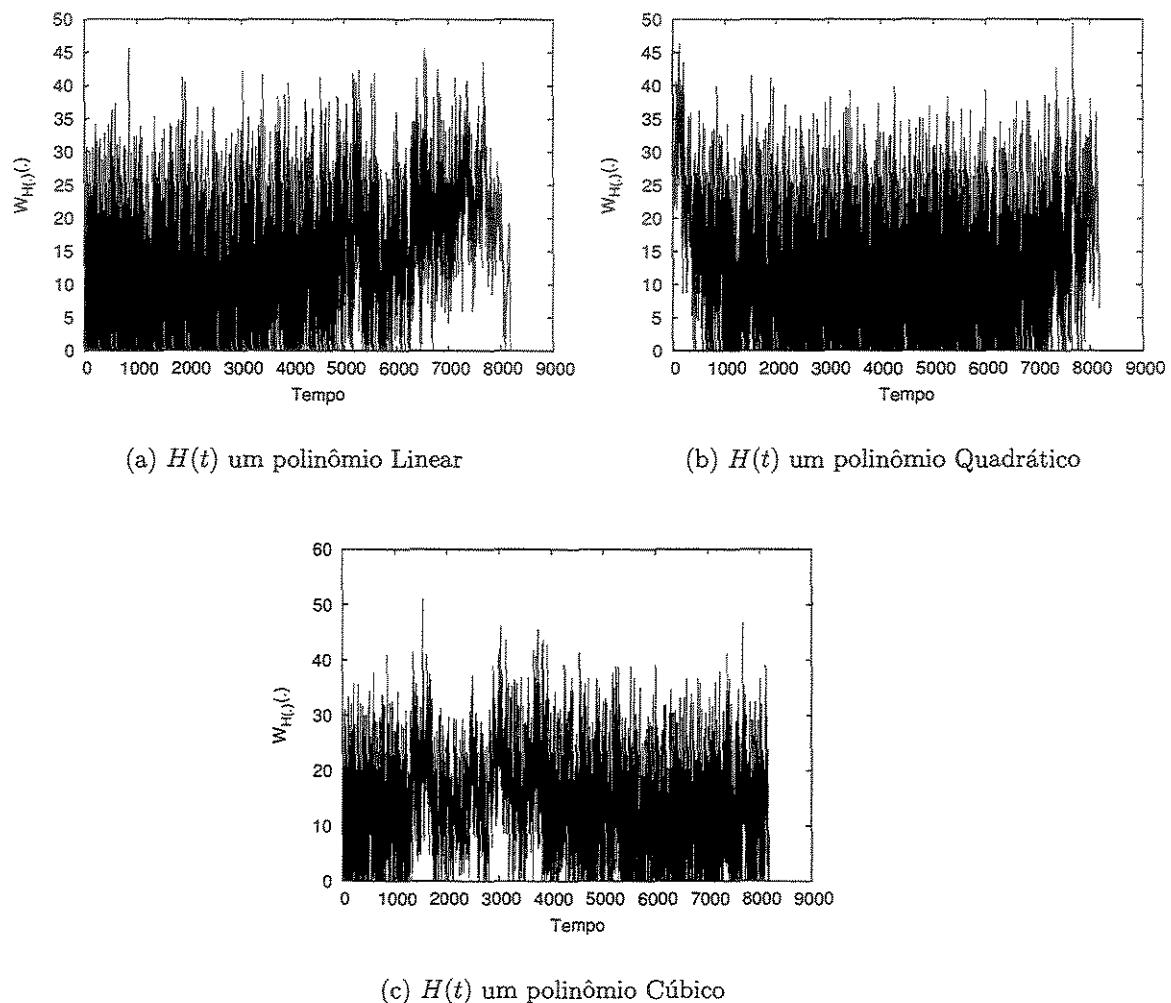


Figura 2.4: Traços de tráfego sintético gerados com diferentes funções cascataamento

decompondo-o, através da aplicação da transformada wavelet, e analisando as relações verificadas entre a função cascataamento e as séries de detalhes geradas com a decomposição do processo. Mostra-se, ainda, resultados obtidos com a estimativa de funções cascataamento de traços de tráfego real e sintético.

O segundo momento estatístico dos coeficientes de uma transformada wavelet contínua, obtido da decomposição de um processo $X(t)$, é definido por:

$$E(|TX(a, t)|^2) \approx a^{1+2H(t)}, \quad a \rightarrow 0 \quad (2.13)$$

onde, $H(t)$ é a função Holder (função cascataamento) que mede a explosividade do processo $X(t)$ no instante t .

Tomando-se

$$x_t(a) = \log(|TX(a, t)|^2),$$

$$C_2 = E [\log \{ |TX(a, t)|^2 / E (|TX(a, t)|^2) \}],$$

e

$$\epsilon_t(a) = \log \{ |TX(a, t)|^2 / E (|TX(a, t)|^2) \} - C_2,$$

chega-se a:

$$x_t(a) = C_2 + \log \{ E (|TX(a, t)|^2) \} + \epsilon_t(a) \quad (2.14)$$

As Equações 2.13 e 2.14 sugerem a existência de uma dependência linear entre a e $x_t(a)$ em uma escala log-log. Ou seja, um modelo de regressão linear pode ser definido por:

$$x_t(a) \approx c + \{2H(t) + 1\} \log(a) + \epsilon_t(a), \text{ para pequenas escalas } a \quad (2.15)$$

onde, $c = \log(C_1) + C_2$.

Uma aproximação para $x_t(a)$ são os detalhes,

$$d_x(j, k); k = 0, \dots, 2^j - 1; j = 0, \dots, J - 1,$$

resultantes da decomposição de $X(t)$ em escalas j e instantes $k2^{-j}$ por uma transformada wavelet discreta. Os detalhes $d_x(j, k)$ são aproximações da decomposição de $X(t)$ obtida com a transformada wavelet contínua $TX(a, t)$ avaliada na escala $a = 2^{-j}$ e instante $t = k2^{-j}$.

Em [47], um estimador para função cascateamento $H(t)$, baseado na Equação 2.15, é proposto. A seguir, descreve-se esse estimador que realiza o processo de estimativa em 4 etapas: i) decomposição do sinal pela transformada wavelet discreta; ii) a escolha da maior escala de tempo J' em que o processo $X(t)$ será analisado; iii) coleta dos detalhes $d_X(j, k)$ relacionados com determinada realização, intervalo I_m , do processo $X(t)$ em diferentes níveis j ; iv) cálculo da inclinação da reta, definida pelos detalhes $d_X(j, k)$ e escalas 2^{-j} em uma escala log-log, usada na expressão de cálculo de $H(t)$.

Seja o intervalo de tempo τ normalizado, tal que as realizações do processo $X(t)$ estejam definidas no intervalo $[0, 1]$. Este intervalo é particionado em 2^l subintervalos não-sobrepostos de mesmo tamanho, onde l é um inteiro, tal que $1 < l \leq (J - 1)$. Os 2^l subintervalos são da seguinte forma:

$$I_m = [(m - 1)2^{-l}, m2^{-l}); m = 1, \dots, 2^l$$

Para cada I_m , um $\hat{H}(t)$ é estimado, sendo este um valor médio da função cascateamento $H(t)$ no subintervalo I_m . O instante de tempo t , para o qual o valor $\hat{H}(t)$ foi estimado, é derivado, considerando-se o ponto médio de I_m , ou seja, $2^{-l-1}(2m - 1)$.

Para um dado subintervalo I_m , computa-se $\hat{H}(t)$ coletando os detalhes $d_X(j, k)$, tal que as escalas de tempo j estejam definidas no intervalo $J' \leq j \leq (J - 1)$, J' é um inteiro positivo, e $k2^{-j}$ pertence ao subintervalo I_m . Para cada $m = 1, \dots, 2^l$, define-se uma coleção de pontos (X_m, Y_m) , tal que:

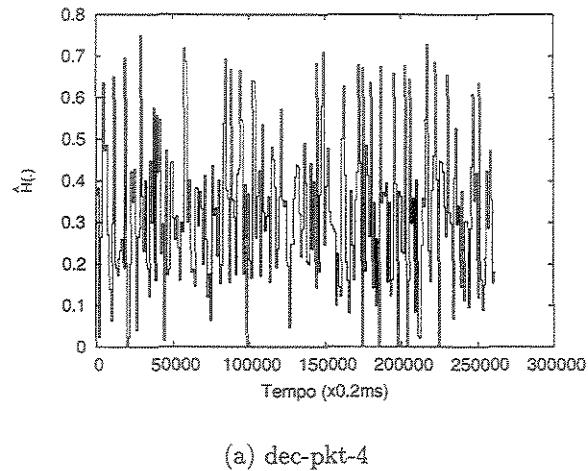
$$(X_m, Y_m) = [\{\log(2^{-j}), \log(|d_X(j, k)|^2)\} | k2^{-j} \in I_m; 0 \leq k \leq 2^j - 1, J' \leq j \leq (J - 1)].$$

A inclinação de uma reta R obtida através de uma regressão de mínimos quadrado sobre a coleção de pontos (X_m, Y_m) é usada para estimar $\hat{H}(t)$. Ou seja,

$$\hat{H}(t) = \frac{\alpha - 1}{2}$$

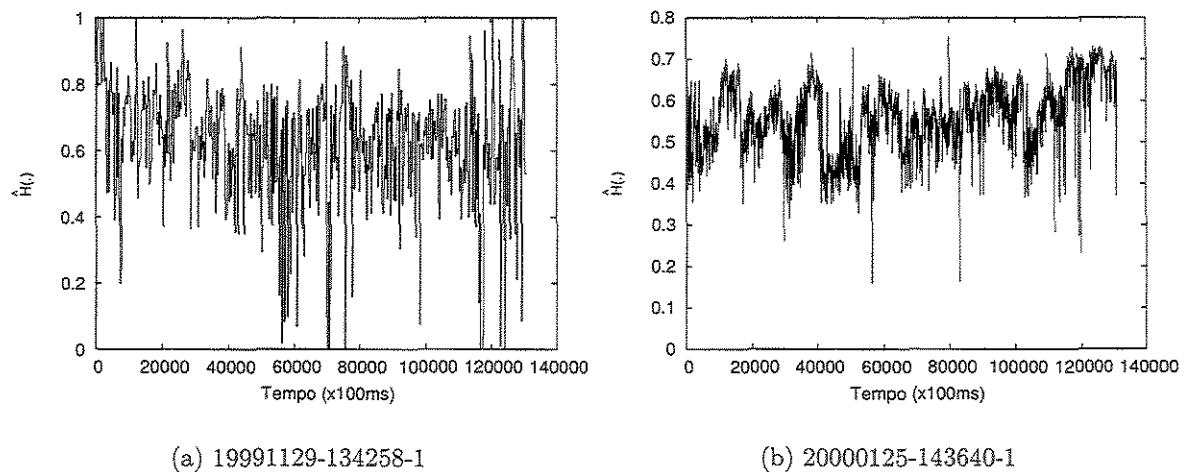
onde, α é a inclinação de R .

Os traços da Tabela 3.1 que tiveram sua natureza multifractal determinada foram avaliados e suas funções cascateamento estimadas. As Figuras 2.5 a 2.8 mostram os resultados obtidos com a estimativa da função $H(t)$. Em todos os traços, as funções $\hat{H}(t)$ estimadas apresentam um comportamento (quase) aleatório que como destacado em [18] é próprio de processos multifractais.



(a) dec-pkt-4

Figura 2.5: Função cascateamento estimada para traços da Coleção Digital



(a) 19991129-134258-1

(b) 20000125-143640-1

Figura 2.6: Função cascateamento estimada para traços da coleção Auckland

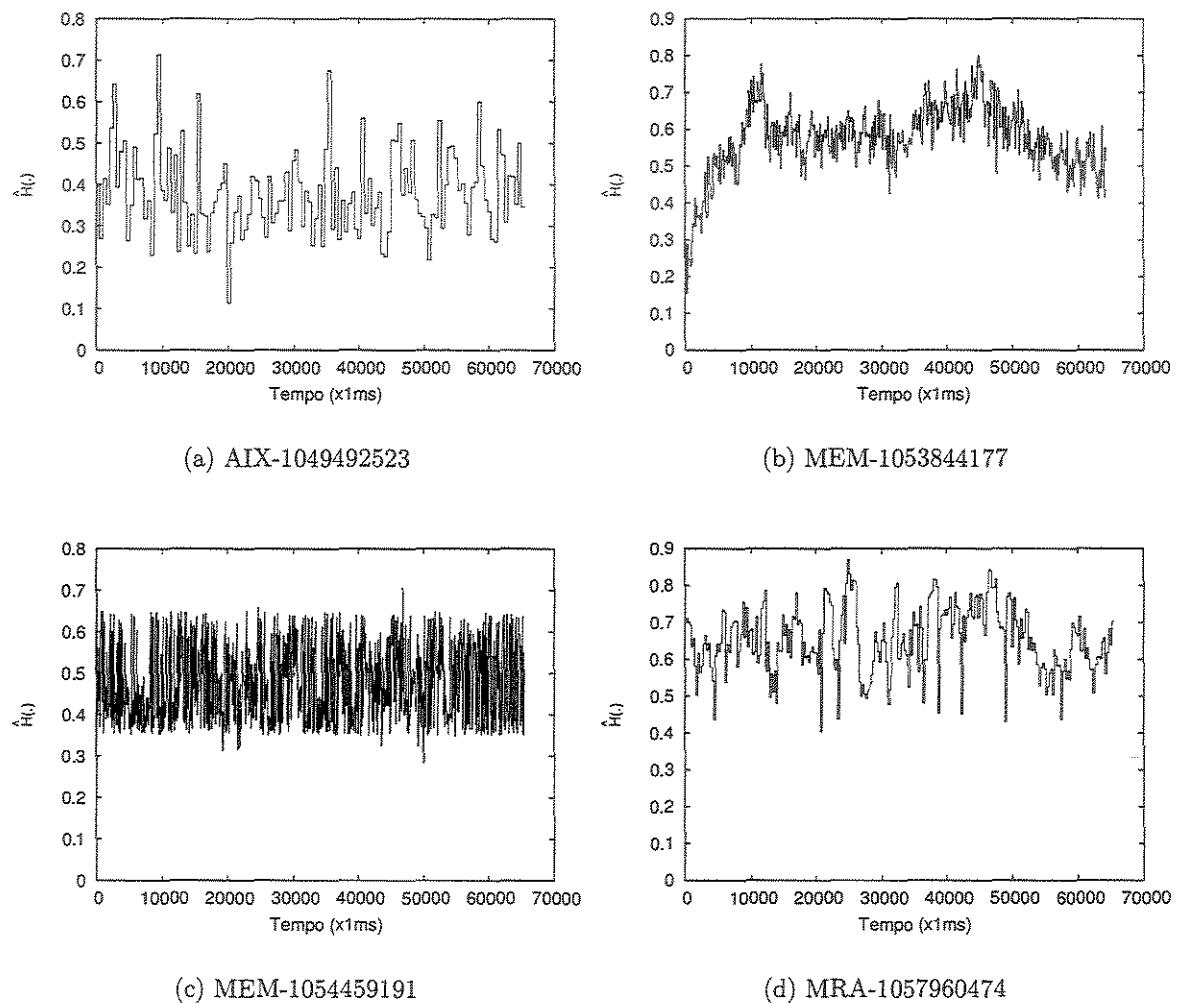


Figura 2.7: Função cascateamento estimada para traços da coleção NLANR

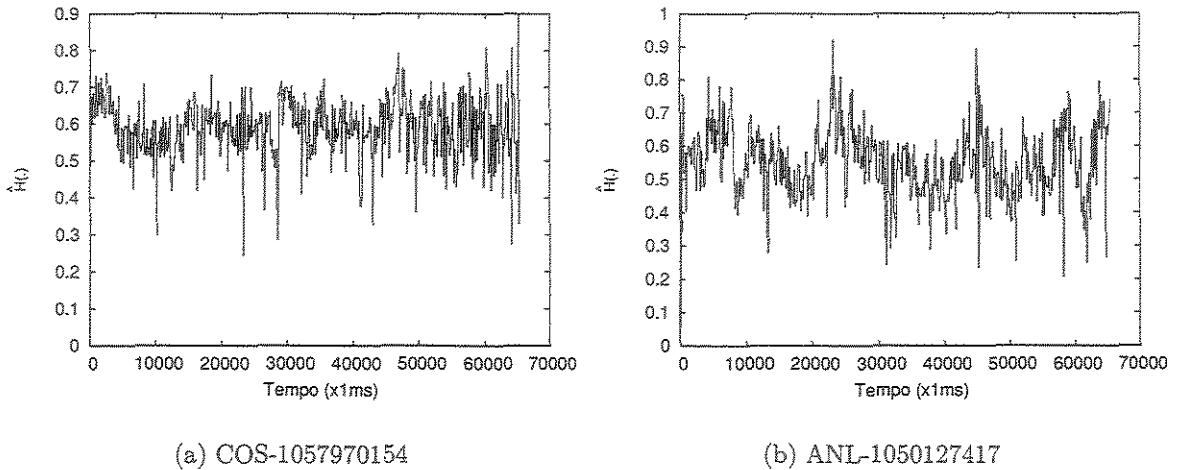


Figura 2.8: Função cascateamento estimada para traços da coleção NLANR (Parte II)

Experimentos envolvendo traços de tráfego sintético, também, foram realizados, tendo sido estes traços obtidos através do gerador de processo movimento Browniano multifractal descrito na Seção 2.3. Os traços gerados têm 8192 realizações e funções cascateamento definidas por polinômios dados por:

$$\begin{aligned} H(t) &= t/2.0 + 0.5 \quad \text{com } t \in (0, 1); \\ H(t) &= 1.9t^2 - 1.9t + 0.975 \quad \text{com } t \in (0, 1); \\ H(t) &= 4.9t^3 - 7.9t^2 + 3.35t + 0.51 \quad \text{com } t \in (0, 1). \end{aligned}$$

Estes polinômios foram utilizados por [45] na apresentação do processo mBm.

Os gráficos da Figura 2.9 mostram o comportamento das funções cascateamento estimadas $\hat{H}(t)$ e as funções cascateamento $H(t)$ definidas pelos polinômios anteriores. Verifica-se que as funções cascateamento $\hat{H}(t)$ apresentam comportamentos qualitativamente similares aos verificados nas funções cascateamento $H(t)$, com as funções $\hat{H}(t)$ reproduzindo a evolução ao longo do tempo das funções $H(t)$.

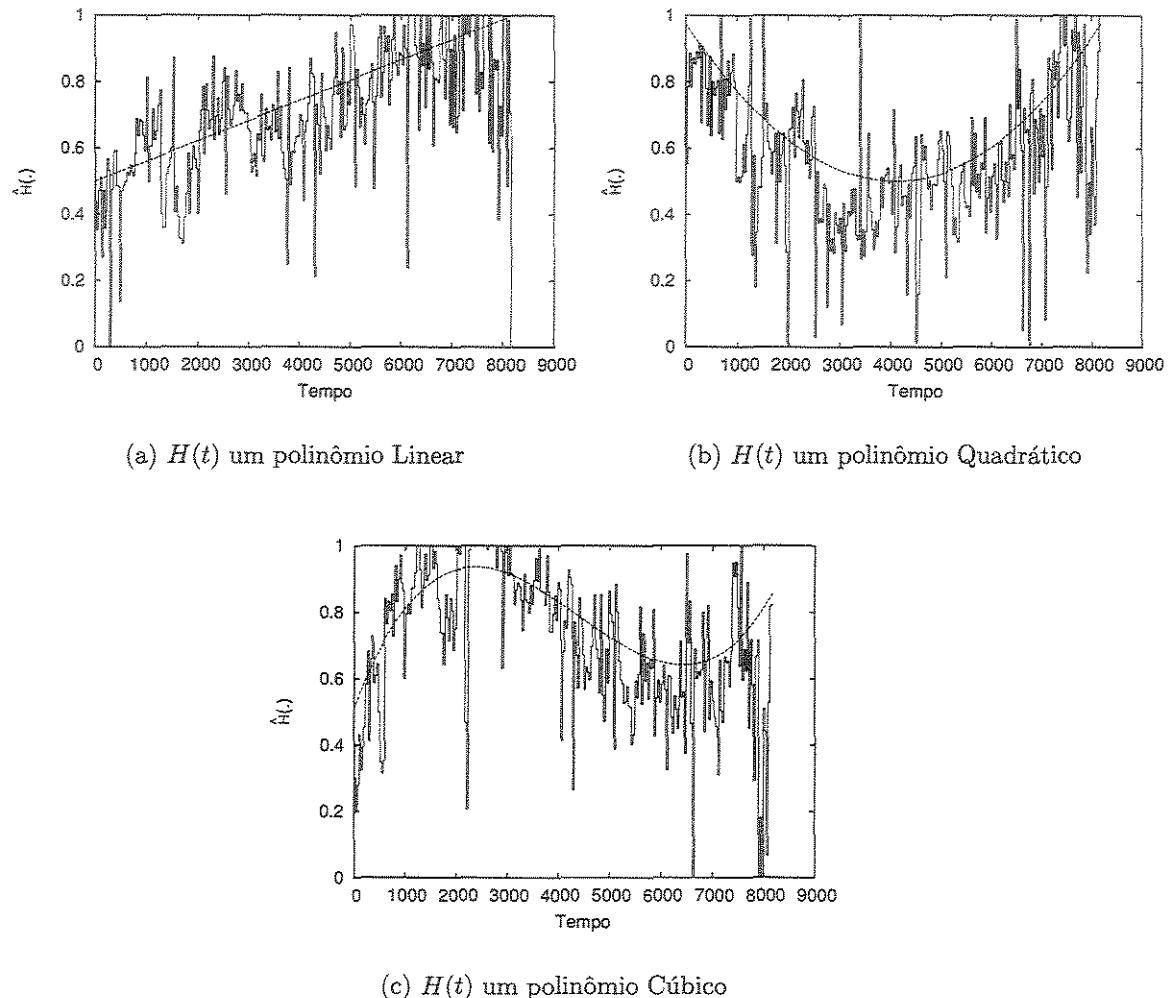


Figura 2.9: Funções cascateamento estimadas $\hat{H}(t)$ versus Funções cascateamento $H(t)$.

2.5 Modelos para Tráfegos com Dependência de Longa Duração

Modelos de tráfego são abstrações matemáticas que descrevem a dinâmica de um sistema de filas (rede de computadores). Mudanças verificadas no tráfego das redes, em diferentes momentos, motivaram a definição de novos modelos de tráfego, permitindo assim representar o tráfego vigente com maior fidelidade. A ocorrência do fenômeno do cascateamento no tráfego de redes operacionais teve como consequência o abandono dos modelos de tráfego baseados em processos Markovianos e o desenvolvimento de estudos que levaram à definição de modelos baseados em processos auto-similares. Os modelos de tráfego Markovianos supunham que o tráfego apresentava correlação fraca entre seus componentes, degenerando-se para um ruído gaussiano, quando observado em escalas de tempo maiores. Os estudos que verificaram a ocorrência do fenômeno do cascateamento demonstraram que tal suposição não se aplicava ao tráfego agregado. Os resultados desses estudos são conclusivos e mostram que o tráfego que apresenta cascateamento mantém o seu comportamento em rajadas, mesmo quando observado em escalas de tempo grandes. Esse comportamento é representado com grande precisão pelos modelos baseados em processos auto-similares.

Estudos recentes mostraram que o tráfego IP, quando observado em pequenas escalas de tempo, apresenta uma dinâmica que os modelos de tráfego baseados em processos auto-similares (monofractal) superestimam. Modelos de tráfego baseados em processos multifractais têm sido derivados para caracterizar o tráfego de IP em pequenas escalas de tempo.

Nesta seção, apresenta-se modelos de tráfego utilizados tanto na caracterização de tráfego monofractal quanto de tráfego multifractal. Os três primeiros modelos de tráfego apresentados foram derivados para caracterizar tráfego monofractal e são representativos em suas diferentes abordagens. O último modelo descrito representa o primeiro esforço na derivação de um modelo de tráfego capaz de caracterizar a dinâmica do tráfego IP, em pequenas escalas de tempo, utilizando as estatísticas de um processo multifractal.

2.5.1 O movimento Browniano Fractal

O processo movimento Browniano Fractal (do inglês *fractional Brownian motion - fBm*) foi o processo mais estudado na última década na área de teletráfego. Esses estudos foram motivados pela constatação da ocorrência do fenômeno do cascateamento no tráfego de redes e a verificação de que o fBm era capaz de captar as estatísticas próprias desse tráfego.

O fBm é um processo auto-similar, suas realizações seguem uma distribuição gaussiana e suas estatísticas são completamente definidas pelo primeiro e pelo segundo momento estatístico. Essas características tornam-o um modelo atrativo para a caracterização de tráfego que apresenta estatísticas próprias de processos auto-similar.

Seja $Z(t)$ um processo fBm normalizado com parâmetro Hurst (H) definido no intervalo $[0.5, 1]$, então, as seguintes propriedades verificam-se:

- $Z(t)$ tem incrementos estacionários definidos pelo ruído Gaussiano fractal (do inglês *fractional Gaussian noise - fGn*);
- $Z(0) = 0$, $E[Z(t)] = 0$ e $E[Z(t)^2] = t^{2H}$ para todo t ;
- $Z(t)$ tem distribuição marginal gaussiana.

Quando o parâmetro Hurst H é igual a 0.5, $Z(t)$ torna-se o movimento Browniano padrão.

Em [6], Norros apresenta os fundamentos matemáticos para o emprego do fBm na modelagem do tráfego de redes e em [39], mostra-se um modelo tráfego para um sistema de filas alimentado por um processo fGn.

Em [1], um sistema de filas alimentado por um fBm é modelado usando-se a teoria dos Grandes Desvios. Em [48], Narayan apresenta expressões para a determinação do tamanho máximo de uma fila em um sistema alimentado por um processo fBm. Usa-se a transformada de Fourier para decompor um fBm e derivar essas expressões. Em [49], apresenta-se uma expressão para estimar a probabilidade de violação de um buffer em um sistema que tem um único servidor e é alimentado por um processo gaussiano que tem estrutura de correlação arbitrária.

Vários métodos para a geração de processos fBm foram desenvolvidos. Entre esses métodos está: o RMD (do Inglês *Random Midpoint Displacement*), introduzido em [50], um método baseado em transformadas wavelet [51] e um método para geração de fGn [52].

2.5.2 Modelos baseados em árvore multiescala

Nesta seção, modelos de tráfego que caracterizam tráfego fractal são descritos. O tráfego fractal, nestes modelos, é caracterizado a partir de uma árvore multiescala. Uma árvore multiescala representa, naturalmente, o processo de construção de uma medida multifractal que se dá pela divisão sucessiva de uma medida original até que uma condição (resolução) seja satisfeita (atingida). Nos modelos de tráfego apresentados nesta seção, a medida (o tráfego) a ser caracterizada é analisada em diferentes resoluções (escalas de tempo) que são os níveis da árvore. Quanto maior a profundidade da árvore, menor é a escala de tempo em que o tráfego é analisado. Dessa forma, as folhas da árvore representam o tráfego observado (agregado) na menor escala de tempo. Os nós em uma escala intermediária j descendem de nós que pertencem a escala $j - 1$ e representam o tráfego agregado na escala de tempo 2^{-j} . Cada nó na escala j possui dois descendentes na escala $j + 1$. O nó raiz representa o tráfego agregado na maior escala de tempo. A Figura 2.10 mostra a estrutura de uma árvore multiescala. O processo de construção da árvore multiescala é o que diferencia os dois modelos discutidos a seguir. Esse processo assemelha-se ao processo de decomposição de um sinal realizado pelas transformadas wavelet, justificando o nome atribuído aos modelos.

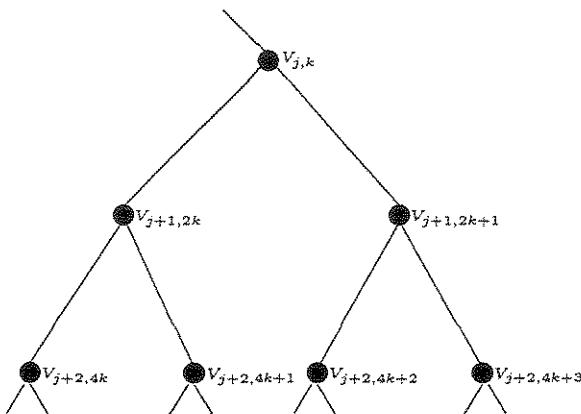


Figura 2.10: Árvore Multiescala

Em [11], apresenta-se o modelo wavelet independente (do inglês *Independent Wavelet Model* - IWM). No IWM, os nós descendentes do nó $V_{j,k}$ são definidos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V_{j+1,2k} &= (V_{j,k} + Z_{j,k})/2 \\ V_{j+1,2k+1} &= (V_{j,k} - Z_{j,k})/2 \end{aligned} \quad (2.16)$$

onde, $Z_{j,k}$ é uma variável randômica independente e distribuída de forma idêntica dentro de cada escala j . As variáveis $Z_{j,k}$, neste processo de construção da árvore multiescala, correspondem aos coeficientes wavelet Haar, na escala j , do processo resultante.

Pelo teorema do Limite Central e o efeito aditivo da variável $Z_{j,k}$ em $V_{j,k}$, quando $j \rightarrow \infty$, é razoável assumir que as variáveis $V_{j,k}$ apresentem distribuição gaussiana. A Figura 2.11 mostra como se dá a construção da árvore multiescala pelo IWM.

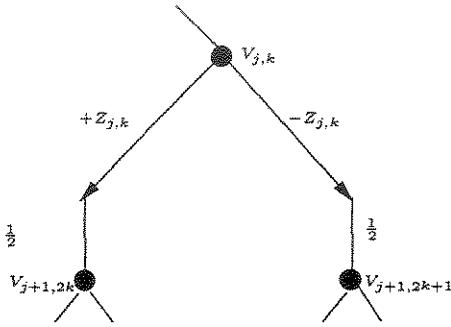


Figura 2.11: Árvore Multiescala gerada pelo IWM

Em [11], apresenta-se um algoritmo que tem custo computacional linear no tamanho da entrada para a geração de tráfego sintético, baseado na caracterização feita pelo IWM. Avaliações numéricas realizadas para aferir a capacidade do IWM em captar e reproduzir as estatísticas do tráfego mostraram que o traço de tráfego sintético, gerado com o IWM, e o traço de tráfego real possuem função de correlação que apresenta comportamento similar.

Em [11], verifica-se as expressões derivadas com o IWM para calcular a probabilidade de violação de um buffer alimentado por um processo monofractal. Os resultados mais precisos são obtidos quando se tem um tamanho do buffer reduzido. Em cenários onde o buffer do sistema apresenta valores maiores, verifica-se um distanciamento entre os valores estimados, com as expressões derivadas do IWM, e os valores coletados quando um traço de tráfego real alimenta o sistema. Os valores obtidos com a caracterização do IWM são limitantes inferiores largos. Em [53], o IWM é usado para caracterizar fluxos de tráfego gerados a partir de seqüências de

vídeo. Em [54], o IWM é usado para avaliar as escalas de tempo e as estatísticas que são relevantes para a caracterização de tráfego que apresenta componentes de longa e curta durações.

O modelo wavelet multiplicativo (do inglês *Multiplicative Wavelet Model-MWM*) foi definido por Riedi, Crouse, Ribeiro e Baraniuk em [41], e teve como principais motivações a constatação de que o tráfego coletado em redes operacionais é, essencialmente, um processo positivo e que a função de distribuição desse tráfego é não-gaussiana (lognormal).

No MWM, cada nó da árvore multiescala é definido da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V_{j+1,2k} &= (V_{j,k} * M_{j,k}) \\ V_{j+1,2k+1} &= (V_{j,k} * (1 - M_{j,k})) \end{aligned} \quad (2.17)$$

onde, $M_{j,k}$ é uma variável randômica definida no intervalo $[0, 1]$. Pelo teorema do Limite Central e considerando-se o efeito multiplicativo imposto pela variável $M_{j,k}$, na definição dos nós da árvore multiescala, é razoável assumir que em uma escala j , suficientemente grande ($j \rightarrow \infty$), a série de variáveis $V_{j,k}$ apresente função de distribuição lognormal. Na Figura 2.12, mostra-se o processo desenvolvido pelo MWM para gerar a sua árvore multiescala.

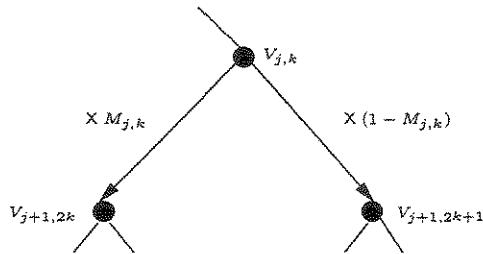


Figura 2.12: Árvore Multiescala gerada pelo MWM

Em [41], a distribuição beta, que tem sua forma facilmente ajustável, é utilizada como função de distribuição das variáveis $M_{j,k}$. O MWM definido, chamado de β MWM, é usado na caracterização de tráfego real, mostrando-se adequado para esse tráfego. Ou seja, o tráfego sintético gerado com o β MWM é um processo estritamente positivo e a distribuição marginal verificada é não-gaussiana com forma assintoticamente similar àquela verificada no tráfego real. O algoritmo apresentado em [41], para a geração de tráfego sintético a partir da caracterização feita com o MWM, tem custo computacional que é de ordem linear no tamanho da entrada.

Em [13] o MWM é usado no estudo de um sistema de filas. Deriva-se expressões para o cálculo da escala de tempo de interesse e para a definição de um limitante de ocupação do sistema. Essas expressões, chamadas de MSQ (do inglês *MultScale Queue*) e CDTSQ (do inglês *Critical Dyadic Time Scale Queue*), são avaliadas e os resultados obtidos são comparados com os resultados de expressões similares derivadas com o IWM. No cenário construído, com o tráfego caracterizado apresentando distribuição lognormal, o MWM mostrou-se um modelo mais apropriado que o IWM na caracterização do tráfego.

2.5.3 O Modelo Cascata Multiplicativa

Em [15, 55], Erramilli, Narayan, Neidhart e Saniee apresentam um modelo de tráfego, chamado de Cascata Multiplicativa, capaz de caracterizar tráfego que apresenta estatísticas multifractais. Erramilli et al. mostram a existência de uma escala de tempo θ a partir da qual o tráfego apresenta estatísticas monofractais. Para escalas de tempo menores que θ , as estatísticas multifractais do tráfego se manifestam. Esta escala de tempo é chamada de escala limitante (do inglês *cutoff scale*).

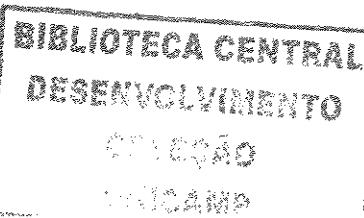
O modelo Cascata Multiplicativa caracteriza o tráfego em escalas de tempo maiores ou iguais a θ usando um processo fBm, e nas escalas de tempo menores que θ usando uma cascata multiplicativa semi-randômica com parâmetro p , para o tráfego avaliado, igual a 0.65. Expressões para planejamento de capacidade e controle de admissão, derivadas a partir da teoria dos Grandes Desvios, são introduzidas. A definição destas expressões tem como requisito a computação dos diversos momentos do tráfego. Quando as escalas de tempo são maiores ou iguais a θ , o q -ésimo momento é definido por:

$$E(A_{FBM}^q(\theta)) = \sum_{k=0}^{k \leq k/2} \binom{q}{2k} (m\theta)^{q-2k} (am\theta^{2H})^k (2k-1)!!$$

onde, $A_{FBM}(\theta) = m\theta + \sqrt{(am)}X_{FBM}(\theta)$, com $X_{FBM}(\theta)$ sendo uma variável gaussiana com média zero e variância θ^{2H} , e $(2k-1)!!$ é um fatorial duplo: $(2k-1)!! = (2k-1)(2k-3)\dots 1$.

Os diversos momentos q do tráfego, nas escalas de tempo menores que θ , são aproximados por:

$$E[A_{MFC}^q(t)] = E[A_{fBm}^q(\theta)](t/\theta)^{1-\tau(q)}$$



onde, $\tau(q)$ é a função estrutura.

Em [15], o modelo Cascata Multiplicativa é utilizado para caracterizar um sistema de filas que tem o seu desempenho avaliado quando o fluxo que alimenta esse sistema apresenta estatísticas multifractais. O sistema de filas foi alimentado com fluxos multifractais obtidos a partir de fluxos de vídeo e de traços de tráfego IP. Mostrou-se que as estatísticas multifractais nesses fluxos têm importância no desempenho do sistema quando este apresenta níveis de utilização intermediário e baixo. A escala de tempo θ identificada nas seqüências de vídeo é da ordem de sub-quadros, já os traços de tráfego IP têm θ definida na ordem de 1 (um) milissegundo, o tempo de um RTT (do inglês *Round Trip Time*).

2.6 Resumo Conclusivo do Capítulo 2

Neste capítulo, conceitos que serão utilizados no desenvolvimento desta tese foram apresentados. O conceito de processo envelope foi introduzido e descreveu-se três processos envelopes que são representativos em suas respectivas categorias. Outro conceito também introduzido neste capítulo foi a transformada wavelet discreta. Enfatizou-se sua habilidade em caracterizar as estatísticas de um processo que apresenta o fenômeno do cascamenteamento. A decomposição de um processo multifractal juntamente com a relação verificada entre os parâmetros que controlam o cascamenteamento em processo multifractal foram usados para definir um estimador da função cascamenteamento também descrito neste capítulo.

O processo movimento Browniano multifractal foi definido neste capítulo. Suas propriedades foram descritas, tendo-se destacado a sua habilidade em capturar o fenômeno do cascamenteamento em pequenas escalas de tempo. Mostrou-se, ainda, um gerador de processos mBm que tem boa precisão na produção desses processos.

Por fim, mostrou-se modelos de tráfego derivados para caracterizar o fenômeno do cascamenteamento uniforme e não-uniforme verificado no tráfego de redes. Os modelos descritos para caracterizar o tráfego que apresenta cascamenteamento uniforme foram o processo movimento Browniano fractal, o MWM e o IWM. Estes dois últimos representam uma tentativa de caracterizar o tráfego a partir de uma árvore multiescala. Descreveu-se ainda o modelo cascata multiplicativa que foi a primeira tentativa de caracterizar o fenômeno do cascamenteamento em pequenas escalas de tempo.

No próximo capítulo, apresenta-se os resultados de um estudo que identificou a ocorrência do fenômeno do cascamenteamento não-uniforme em traços de tráfego real.

Mostra-se ainda os resultados de estudos que detectaram as escalas de tempo limitante, a partir da qual é possível determinar a pertinência de caracterização baseada em modelos multifractais.

Capítulo 3

Análise Multifractal de Traços de Tráfego IP

Neste capítulo, apresenta-se os resultados de um estudo realizado para detectar a ocorrência do fenômeno do cascamenteamento em traços de tráfego IP, quando estes traços são observados(agregados) em escalas de tempo pequenas. Este estudo utiliza a abordagem proposta em [18, 19], que analisa o tráfego no domínio das transformadas wavelet discreta. Mais especificamente, define-se a função cascamenteamento no domínio das transformadas wavelet discreta e avalia-se o comportamento dessa função através do método diagrama multiescala. O comportamento da função cascamenteamento indica o tipo de cascamenteamento presente em um processo(tráfego).

Os resultados de uma análise realizada no domínio do tempo, também, são apresentados. Os resultados obtidos com essa análise confirma a ocorrência da multifractalidade e também determina a escala de tempo em que uma caracterização do tráfego pode ser realizada, usando-se modelos baseados em processos multifractais.

3.1 Detecção de Multifractalidade

Um processo auto-similar(monofractal) $X(t)$ de ordem q apresenta momentos estatísticos definidos por[18]:

$$E|X(t)|^q = E|X(1)|^q \cdot |t|^{qH} \quad (3.1)$$

onde, H é o parâmetro Hurst. Esta definição dos momentos estatísticos de um processo monofractal $X(t)$ impõe a restrição de uniformidade nas variações(explosividade)

de $X(t)$ em diferentes instantes de tempo, ou seja, assume-se que o processo possui explosividade uniforme, medida por H , em diferentes instantes de tempo. Um processo multifractal não apresenta a restrição de uniformidade nas suas variações e tem seus momentos estatísticos definidos por [18]:

$$E|X(t)|^q = E|X(1)|^q \cdot |t|^{\zeta(q)} \quad (3.2)$$

onde, $\zeta(q)$ é a função cascateamento. Esta função apresenta um comportamento não-linear para os diferentes momentos q , o que caracteriza a ocorrência de multifractalidade.

No domínio wavelet, a relação estabelecida na Equação 3.2, é definida da seguinte forma:

$$E|d_X(j, k)|^q \approx 2^{j\zeta(q)} \quad j \rightarrow -\infty \quad (3.3)$$

onde, $d_X(j, k)$ é a série de incrementos (detalhes) obtidos pela decomposição do processo $X(t)$ usando a transformada wavelet discreta. A função cascateamento $\zeta(q)$ é definida por:

$$\zeta(q) = \alpha_q - \frac{q}{2} \quad (3.4)$$

onde, α_q é chamado de expoente de cascateamento (do inglês *scaling exponent*). Este expoente tem o seu valor relacionado à explosividade do tráfego, que no caso de processos multifractais varia para os diferentes momentos estatísticos q .

Em [18, 19], descreve-se um método, chamado de diagrama multiescala (do inglês *Multiscale Diagram-MD*), para se determinar a ocorrência de multifractalidade em um processo. Este método consiste em verificar o comportamento da função $\zeta(q)$ em relação aos momentos estatísticos q . Caso a função $\zeta(q)$ apresente um comportamento não-linear tem-se, então, constatada a ocorrência de multifractalidade no processo avaliado.

A estimativa dos valores da função $\zeta(q)$ requer a determinação do expoente de cascateamento α_q , conforme definido pela Equação 3.4. A estimativa de α_q é realizada através do método diagrama logescala (do inglês *Logscale Diagram-LD*) do q -ésimo momento. Neste método, α_q é definido pela inclinação de uma reta que se aproxima da curva gerada pela relação entre μ_j e 2^j em um escala logarítmica. O valor de μ_j é dado por:

$$\mu_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_X(j, k)|^q \approx E|d_X(j, k)|^q$$

onde, n_j é número de detalhes $d_X(j, .)$, na escala de tempo j , gerados pela decomposição de $X(t)$, usando-se uma transformada wavelet discreta.

A presença de multifractalidade também pode ser detectada verificando-se o comportamento do expoente Holder h_q em relação aos momentos estatísticos q . O expoente Holder h_q é definido da seguinte forma:

$$h_q = \frac{\alpha_q}{q} - \frac{1}{2} \quad (3.5)$$

ou, equivalentemente:

$$h_q = \frac{\zeta(q)}{q}. \quad (3.6)$$

Em [18, 19], descreve-se um método, chamado diagrama linear multiescala (do inglês *Linear Multiscale Diagram-LMD*), para se determinar a ocorrência de multifractalidade em um processo. Neste método, avalia-se o comportamento da curva obtida com a estimativa do expoente Holder h_q e caso aquela apresente um comportamento não-horizontal a presença de multifractalidade é constatada. Em caso contrário, um único expoente Holder controla a dinâmica de explosividade do processo e este expoente Holder equivale ao parâmetro Hurst H .

3.2 Avaliação Experimental da Multifractalidade de Fluxos IP

Os traços de tráfego real usados nos experimentos de simulação realizados nesta tese tiveram a ocorrência de multifractalidade verificada através dos métodos diagrama multiescala e diagrama linear multiescala. Os traços usados nessa avaliação são de domínio público e contêm o registro do tráfego de redes operacionais em diferentes épocas, de 1995 a 2003, inclusive, o tráfego anterior a expansão da *web*. Os traços coletados em 2003 foram obtidos no sítio NLANR (www.nlanr.net) e registraram o tráfego em pontos de agregação das redes vBNS e Internet2 ABILENE (coleção NLANR). Os traços coletados em 1999 e 2000 registraram o tráfego na conexão estabelecida entre a Universidade de Auckland e o seu provedor de acesso a Internet[56]

Traço	Data	Pacotes	Ponto de Agregação
dec-pkt-1	08/03/95 22:00	3300000	PAI Digital
dec-pkt-2	09/03/95 02:00	3900000	PAI Digital
dec-pkt-3	08/03/95 10:00	4300000	PAI Digital
dec-pkt-4	09/03/95 14:00	5700000	PAI Digital
19991129-134258-1	29/11/99 12:42	58000000	Universidade de Auckland
20000125-143640-1	25/01/00 14:36	7000000	Universidade de Auckland
AIX-1049492523	04/04/03 13:49	9376	NASA Ames para MAE-West
MEM-1053844177	24/05/03 23:54	220904	Universidade de Memphis
MEM-1054459191	01/06/03 2:54	266708	Universidade de Memphis
MRA-1057960474	11/07/03 22:24	4137819	Merit Abilene
COS-1057970154	12/07/03 0:49	1247518	Universidade Estadual do Colorado
ANL-1050127417	11/04/03 23:12	121998	Argonne LN para STARTAP

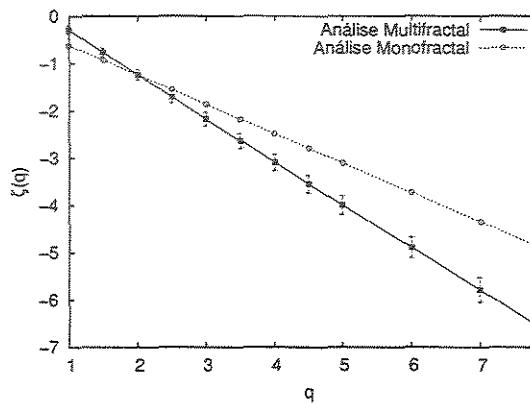
Tabela 3.1: Traços de tráfego real usados nas simulações

(coleção Auckland). Os traços coletados em 1995 registraram o tráfego de uma rede Ethernet com o principal ponto de acesso à Internet dos grupos de pesquisa da Digital em Palo Alto[57] (coleção Digital). A Tabela 3.1 mostra as características desses traços com o registro do tráfego tendo sido realizado com a precisão de microsegundos.

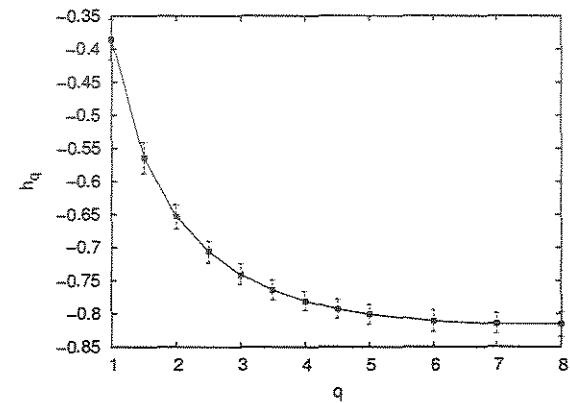
As Figuras 3.1 a 3.6 mostram os resultados dos experimentos realizados para identificar a presença de multifractalidade nos traços da Tabela 3.1. Nestas figuras, mostra-se o comportamento da função cascataamento definida a partir de uma análise multifractal e de uma análise monofractal. Além disso, mostra-se também o comportamento do expoente Holder estimado dos traços avaliados. Na análise monofractal realizada para estimar a função cascataamento supõe-se que o tráfego apresenta explosividade uniforme definida por um único expoente Holder e que as estatísticas desse tráfego são definidas completamente pelo segundo momento estatístico. Assim, na análise monofractal, a função cascataamento é definida por $\zeta(q) = qh_2$, onde h_2 é o expoente Holder estimado na análise feita com o segundo momento estatístico.

As Figuras 3.1 e 3.2 mostram os resultados obtidos com a avaliação dos traços da coleção Digital. O tráfego nos traços dessa coleção foi agregado em intervalos γ de 0,2ms, gerando as séries usadas na verificação da presença de multifractalidade. Essas séries foram avaliadas em escalas de tempo j definidas no intervalo [1, 4], ou seja, o menor(maior) intervalo de tempo usado para avaliar o tráfego foi de $2\gamma(2^4\gamma)$. Os resultados da avaliação feita com o diagrama multiescala são apresentados nas Figuras 3.1.(a) e 3.2.(a). O comportamento da função $\zeta(q)$, derivada da

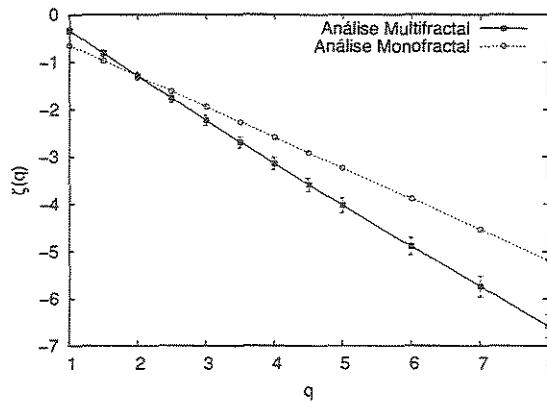
análise multifractal e monofractal dos traços dec-pkt-1, dec-pkt-2, dec-pkt-3 e dec-pkt-4, indica que o tráfego nesses traços apresenta natureza multifractal. Os valores da função $\zeta(q)$ obtidos com a análise monofractal e multifractal diferenciam-se em muito, mesmo considerando-se os intervalos de confiança derivados. Além disso, a função $\zeta(q)$ derivada na análise multifractal apresenta um comportamento não-linear. A natureza multifractal do tráfego registrado nos traços da coleção Digital é confirmada na avaliação feita com o diagrama linear multiescala, no qual se verifica um comportamento claramente não-horizontal do expoente Holder h_q .



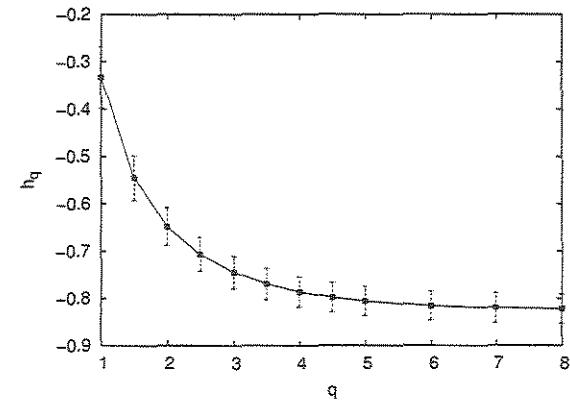
(a) dec-pkt-1(MD)



(b) dec-pkt-1(LMD)



(c) dec-pkt-2(MD)



(d) dec-pkt-2(LMD)

Figura 3.1: Coleção de traços da Digital

Os resultados da avaliação dos traços de tráfego da coleção Auckland são apresentados na Figura 3.3. O tráfego nos traços dessa coleção foi agregado em intervalos γ de 100ms, gerando-se séries que foram avaliadas em escalas de tempo j definidas

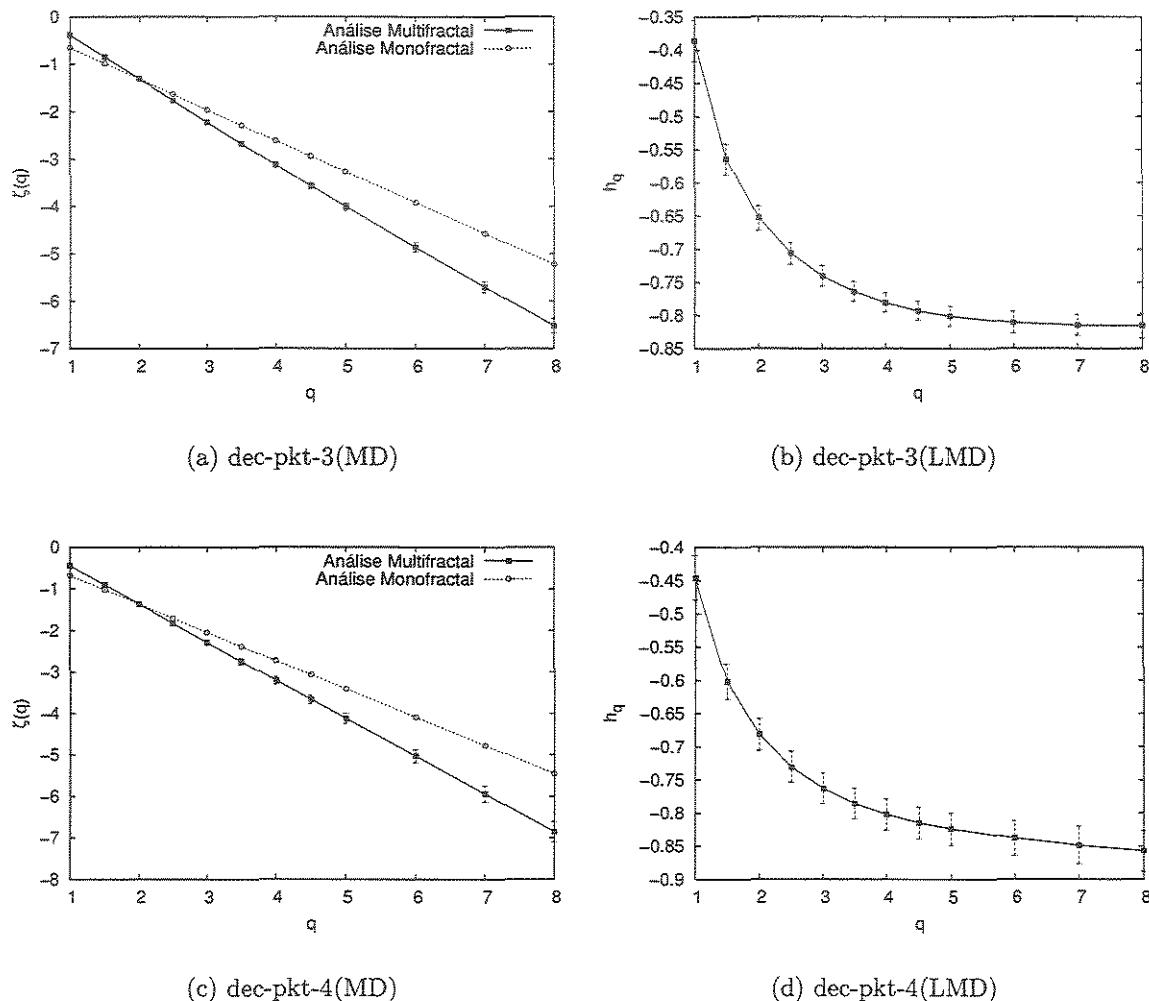


Figura 3.2: Coleção de traços da Digital II

no intervalo [1, 5]. Os gráficos do diagrama multiescala mostram um comportamento totalmente distinto entre as análises monofractal e multifractal, com um comportamento não-linear da curva multifractal. O comportamento não-horizontal da curva do expoente Holder h_q , nos gráficos do diagrama linear multiescala (Figuras 3.3.b e 3.3.c), reforça a constatação da ocorrência de multifractalidade nos traços de tráfego da coleção Auckland.

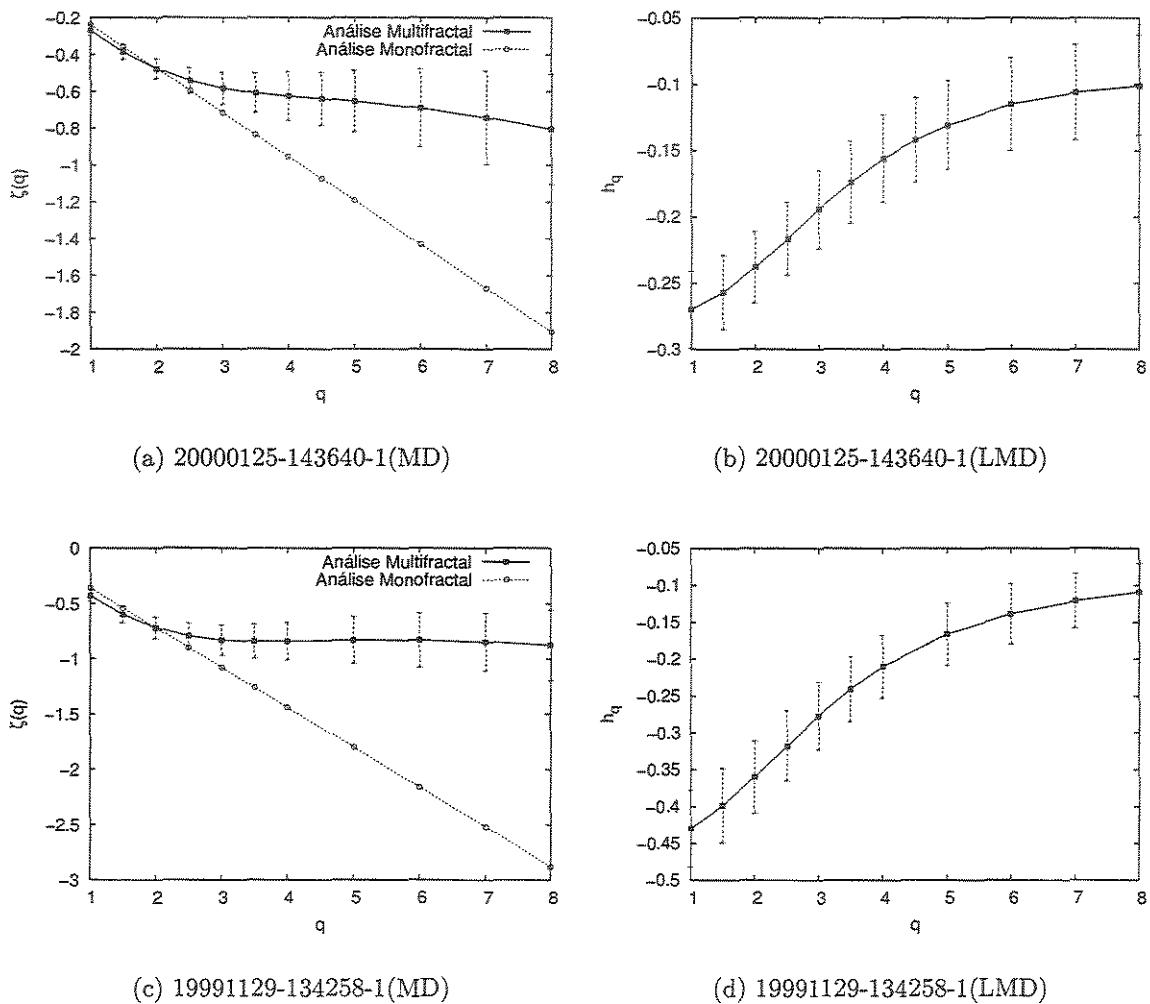
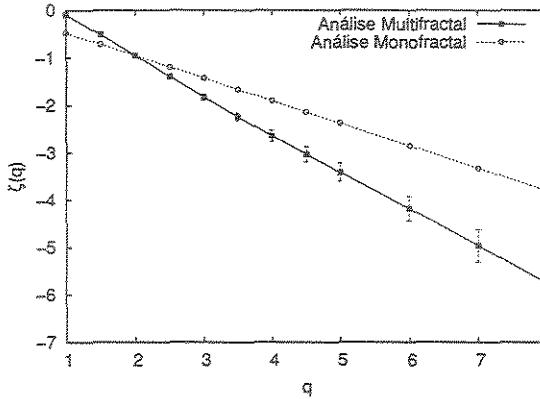


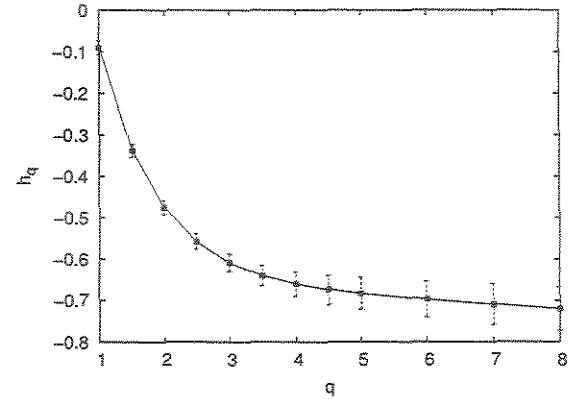
Figura 3.3: Coleção de traços de Auckland

Os resultados da avaliação de multifractalidade feita com os traços da coleção NLANR são apresentados nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6. O tráfego nos traços dessa coleção foi agregado em intervalos γ de 1ms, gerando-se as séries que foram avaliadas em escalas de tempo j , definida no intervalo [1, 4]. A análise multifractal do tráfego nos traços AIX-1049492523, MEM-1053844177, MEM-1054459191 e MRA-1057960474

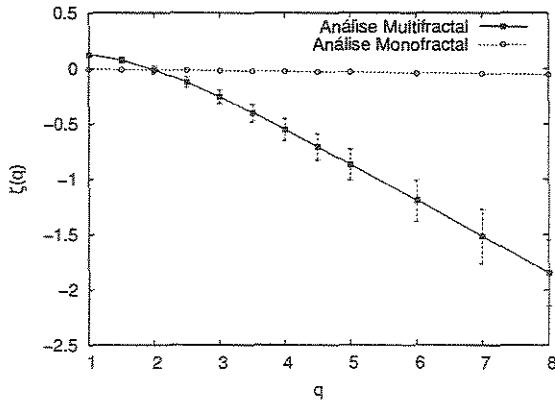
da coleção NLANR (Figuras 3.4.a, 3.4.c, 3.5.a e 3.5.c) mostra o comportamento não-linear da função $\zeta(q)$ e um claro distanciamento entre os valores obtidos com as análises monofractal e multifractal. A natureza multifractal do tráfego registrado nesses quatro traços é confirmada pelo comportamento não-horizontal das curvas do expoente Holder h_q estimadas, usando-se o método diagrama linear multiescala.



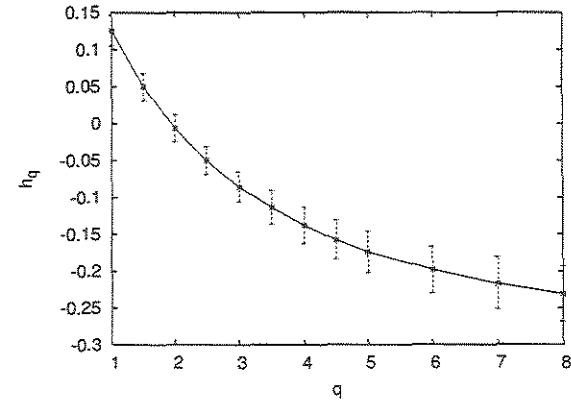
(a) AIX-1049492523(MD)



(b) AIX-1049492523(LMD)



(c) MEM-1053844177(MD)



(d) MEM-1053844177(LMD)

Figura 3.4: Coleção de traços da NLANR

Nos traços COS-1057970154 e ANL-1050127417 da coleção NLANR (Figura 3.6), verifica-se um distanciamento entre as curvas estimadas da função $\zeta(q)$, no diagrama multiescala, apenas quando se avalia os momentos estatísticos maiores que 5, o que não caracteriza claramente a ocorrência de multifractalidade. Por outro lado, não é possível afirmar que esses traços apresentam natureza monofractal. De fato, esse comportamento está de acordo com os resultados apresentados em [58], no qual a

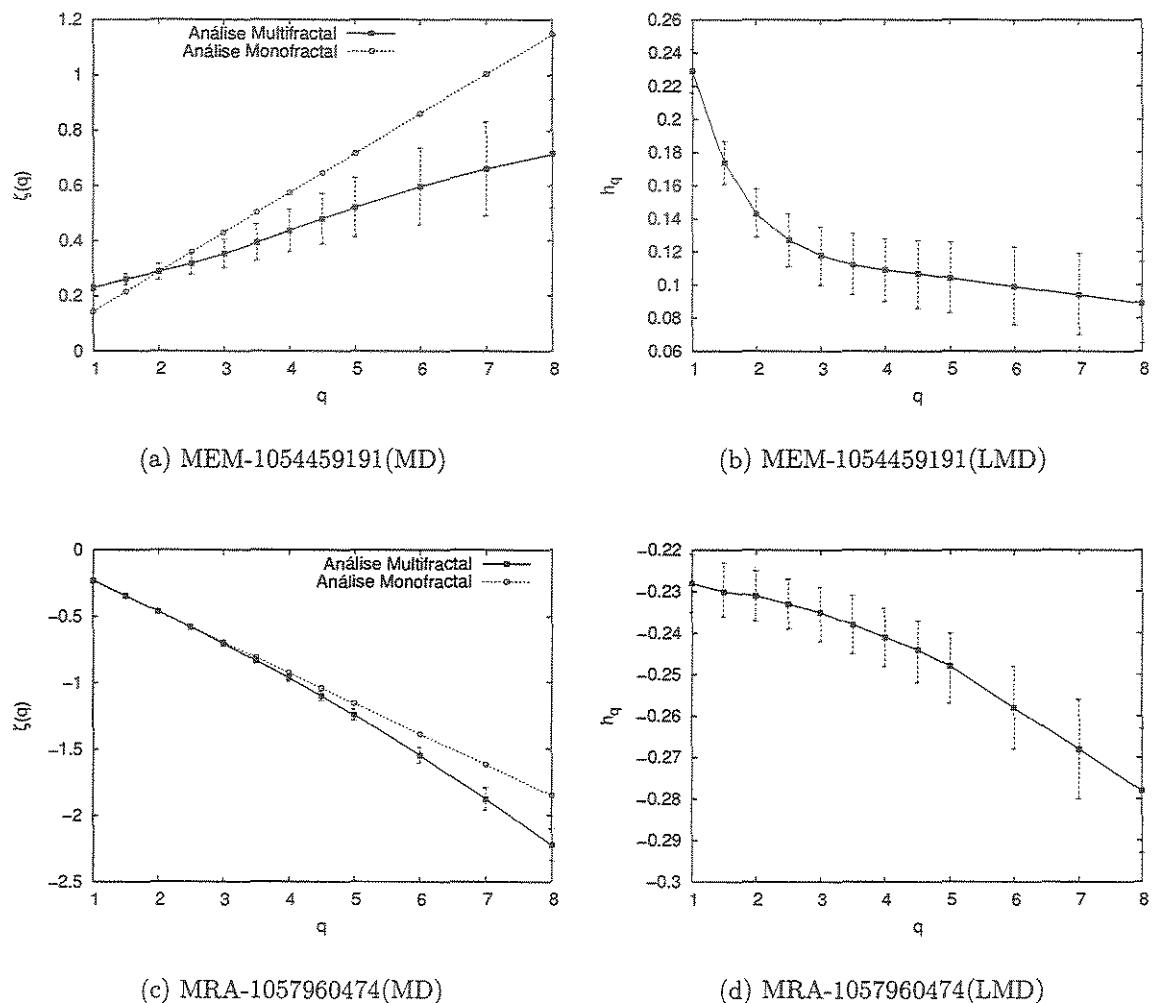


Figura 3.5: Coleção de traços da NLANR (parte II)

existência de um fenômeno chamado de bi-cascateamento (do inglês *bi-scaling*) foi identificado. Esse fenômeno caracteriza-se pelo fato de que um único expoente Holder h não capta a explosividade do tráfego em diferentes escalas de tempo, próprio da natureza monofractal. Entretanto, não é necessário uma coleção de expoentes Holder para captar a explosividade do tráfego, como no caso da presença de multifractalidade.

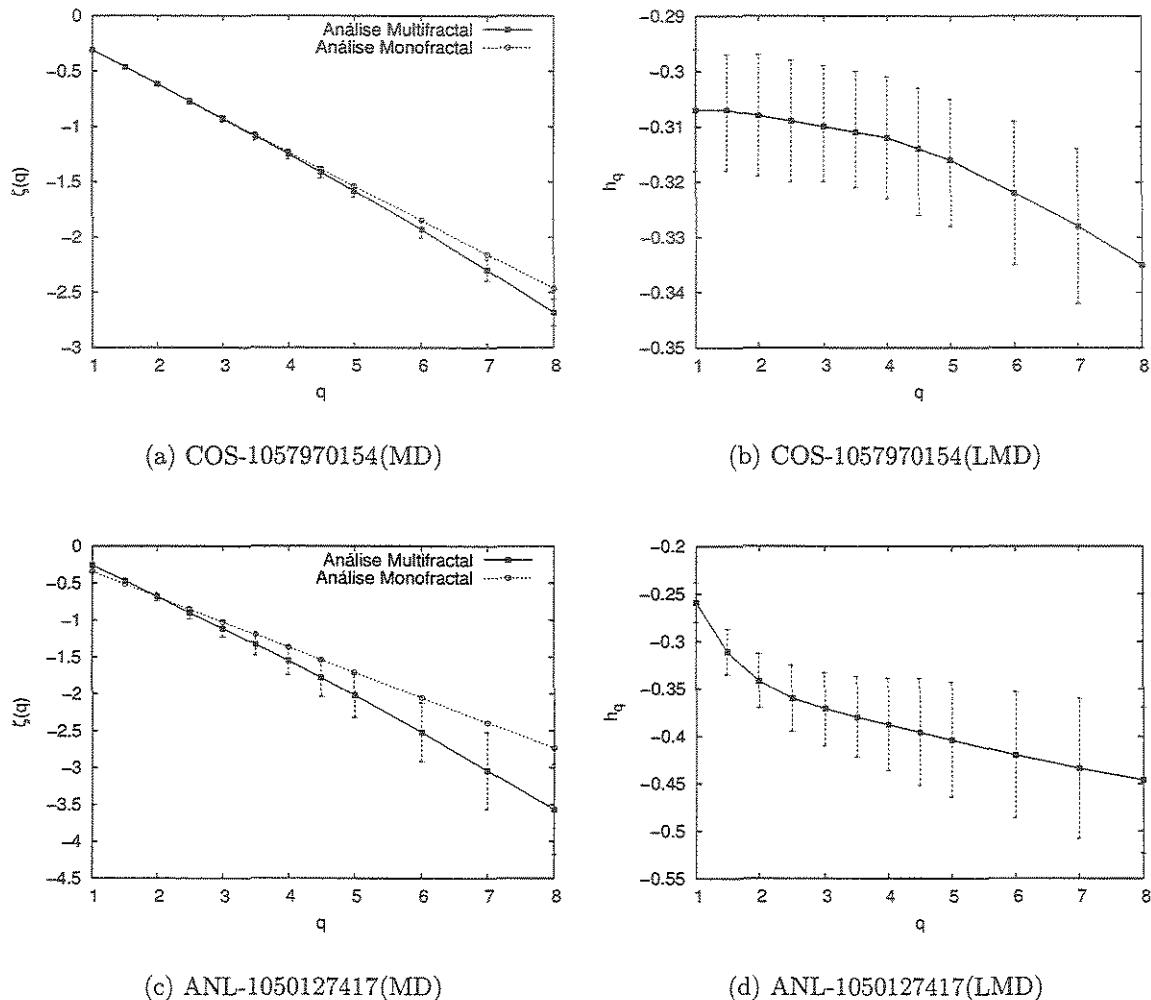


Figura 3.6: Coleção de traços da NLANR (Parte III)

3.3 Quando uma Modelagem Multifractal é Pertinente

Nesta seção, mostra-se os resultados de um estudo realizado para identificar as escalas de tempo onde uma modelagem multifractal é pertinente. Uma medida(processo) apresenta estatísticas multifractais, especificamente explosividade não-uniforme, se suas variações não são dominadas por uma constante, o parâmetro Hurst. Dessa forma, em uma escala logarítmica, a curva obtida ao se observar a relação entre os momentos estatísticos e as escalas de tempo (Δ), definida a partir da Equação 3.2, deve apresentar um comportamento não-linear, se o processo apresentar explosividade não-uniforme.

Na Figura 3.7 mostram-se os resultados obtidos quando se avalia a relação entre os momentos estatísticos e as escalas de tempo de uma medida multifractal. Esta medida é uma cascata multiplicativa binomial com os multiplicadores distribuídos conforme uma função Beta simétrica de parâmetro $p = 1.6$. Na avaliação realizada, as escalas de tempo Δ indicam o número de realizações do processo original $X(t)$ que é usado para gerar uma realização do processo agregado $X^{(\Delta)}(t)$. Podem-se destacar dois comportamentos ao se observar as curvas na Figura 3.7. O primeiro é o comportamento não-linear das curvas, principalmente quando a escala de tempo (Δ) é inferior a 3 (três) unidades. O segundo comportamento verificado é a não convergência das curvas para um valor específico e uma mudança brusca no comportamento das curvas a partir da escala de tempo $\Delta = 3$.

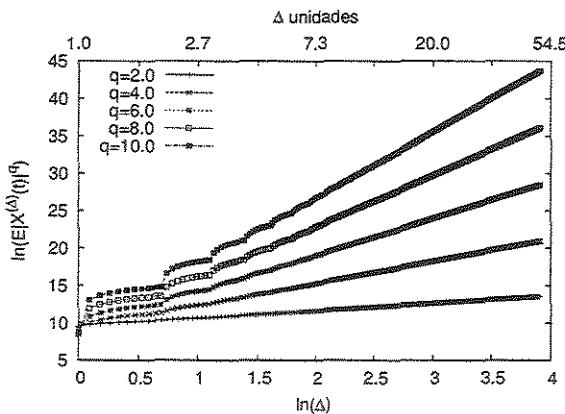


Figura 3.7: Cascateamento em um processo multifractal

Na Figura 3.8 mostram-se os resultados obtidos com a análise realizada nos traços de tráfego dec-pkt-4, MEM-1053844177 e 20000125-143640-1,que pertencem, respec-

tivamente, as coleções Digital, NLANR e Auckland. Verifica-se nos gráficos da Figura 3.8 que as curvas apresentam comportamento similar ao verificado na análise realizada com a medida multifractal, ou seja, as curvas não apresentam convergência para um valor específico e, principalmente, têm um comportamento não-linear. A não linearidade das curvas é destacada pela ocorrência da escala limitante (do inglês *cutoff scale*), conforme definição em [15], com uma mudança brusca no comportamento das curvas. Na análise dos traços de tráfego dec-pkt-4, MEM-1053844177 e 20000125-143640-1 a escala limitante apresenta diferentes valores, o que está em conformidade com resultados anteriores apresentados em [15]. As escalas limitantes são iguais a 1ms, 6ms e 1s para os traços das coleções Digital, NLANR e Auckland, respectivamente. Uma modelagem multifractal é então pertinente somente em escalas de tempo menores que a escala limitante, onde se verifica uma não linearidade das curvas, o que caracteriza a ocorrência de multifractalidade.

3.4 Resumo Conclusivo do Capítulo 3

Neste capítulo, os métodos diagrama multiescala e diagrama linear multiescala para detecção de multifractalidade em um processo foram descritos. Estes métodos foram usados para avaliar a ocorrência de multifractalidade em traços de tráfego coletados em diferentes épocas e ambientes computacionais. Comparou-se os resultados obtidos com a análise multifractal e com a análise monofractal desses traços, tendo-se constatado diferenças claras em ambas as análises. Estes resultados indicam que caracterizar um processo multifractal utilizando-se uma abordagem definida para processos monofractais produz resultados errôneos.

Mostrou-se também os resultados de um estudo que verificou a validade de uma modelagem multifractal, ao se detectar a escala limitante nos traços de tráfego das coleções NLANR, Auckland e Digital. Neste estudo, detectou-se a escala de tempo a partir da qual o tráfego apresenta estatísticas multifractais, sendo pertinente uma caracterização baseada em um modelo multifractal. Os resultados obtidos com esse estudo não só confirmaram a ocorrência de multifractalidade nos traços de tráfego, mas também revelaram que a escala em que a natureza multifractal do tráfego se manifesta é dependente do ambiente em que esse tráfego foi gerado, como sugerido em estudos anteriores.

Os traços de tráfego avaliados neste capítulo foram utilizados nos experimentos de simulação realizados no desenvolvimento desta tese.

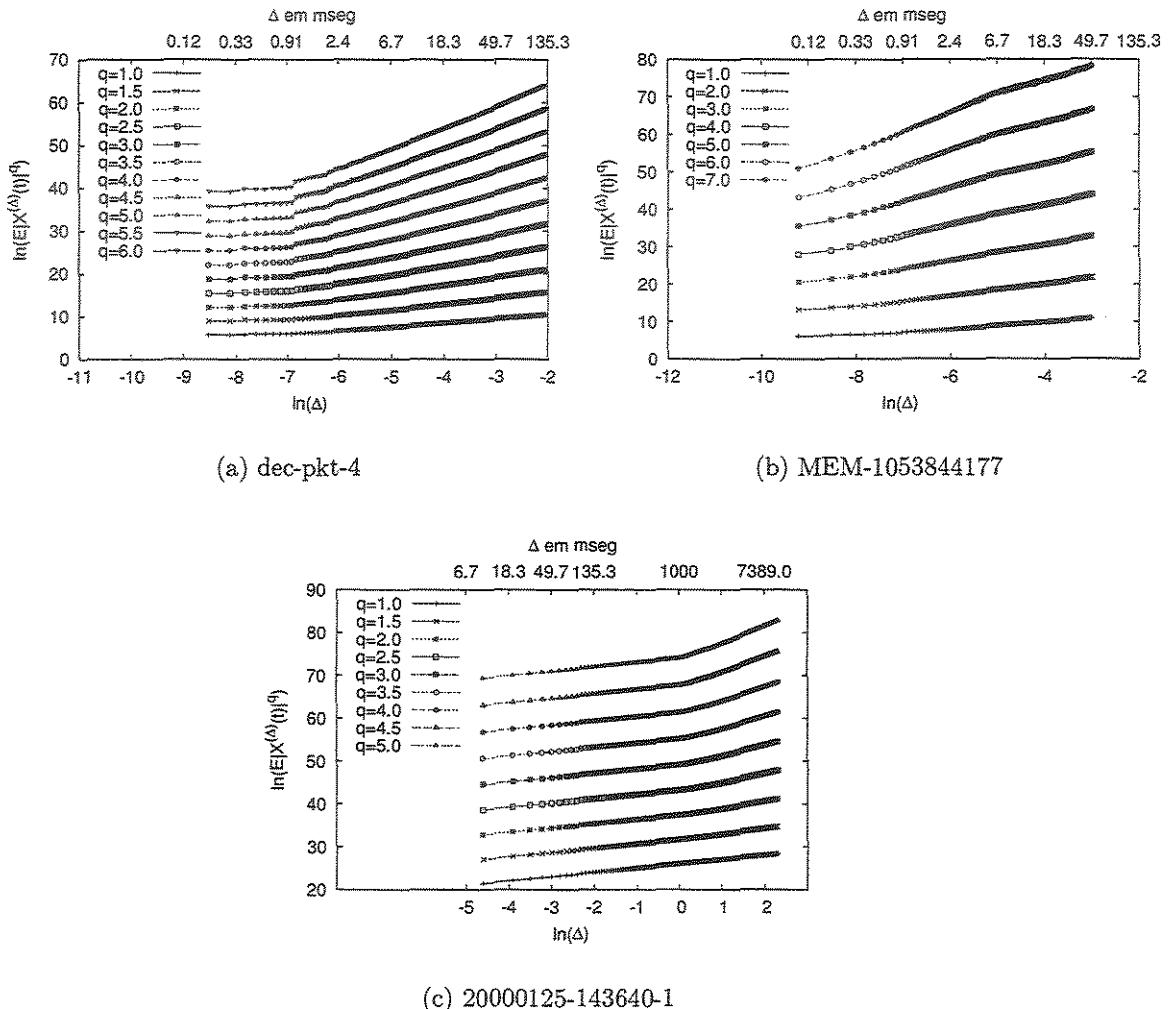


Figura 3.8: A escala de tempo limite identificada nas diferentes coleções de traços

No próximo capítulo, apresenta-se um processo envelope derivado para caracterizar tráfego multifractal. Os traços de tráfego que tiveram a sua natureza multifractal revelada são utilizados nos experimentos que verificaram a habilidade do processo envelope proposto em caracterizar tráfego multifractal.

Capítulo 4

Um Processo Envelope para Tráfego Multifractal

Neste capítulo, introduz-se um processo envelope capaz de caracterizar tráfego multifractal. O processo envelope proposto, chamado de processo envelope do mBm, pertence à categoria dos processos envelopes probabilísticos e é um limitante superior para o volume de trabalho registrado em um processo movimento Browniano multifractal.

Resultados de experimentos de simulação que avaliaram a caracterização do tráfego multifractal obtida com o processo envelope do mBm são apresentados. Nestes experimentos, processos envelopes do mBm são derivados tanto para traços de tráfego real quanto para traços de tráfego sintético.

Apresenta-se, também, neste capítulo, os resultados de um estudo que verificou a precisão de um modelo monofractal na caracterização de tráfego multifractal. Avalia-se os limitantes derivados com o processo envelope do fBm para o volume de trabalho registrado em traços de tráfego real. Além dessa avaliação, mostram-se os resultados de um estudo no qual se avaliou a precisão do limitante estabelecido para o processo envelope do mBm, quando a função Holder $H(t)$ é definida por um polinômio. Este polinômio é uma aproximação da função Holder possibilitando, portanto, estabelecer expressões matemáticas fechadas para $H(t)$.

4.1 O Processo Envelope do mBm

Um limitante superior para o acumulado do trabalho gerado por um processo pode ser computado, tomando-se o acumulado da quantidade média de trabalho gerado pelo processo acrescida da variância(incrementos) em torno dessa média. Nesta seção, apresenta-se a definição do processo envelope do movimento Browniano multifractal (mBm) que é um limitante superior para o volume de trabalho registrado em um processo mBm. Como definido na Seção 2.3, um processo mBm $W(t)$ apresenta auto-similaridade local com seus incrementos definidos da seguinte forma:

$$\lim_{\rho \rightarrow 0^+} \left\{ \frac{W(t + \rho u) - W(t)}{\rho^{H(t)}} \right\}_{u \in R^+} = \{Z_{H(t)}(u)\}_{u \in R^+}$$

onde, $Z_{H(t)}(u)$ é a realização de um processo fBm com parâmetro Hurst $H = H(t)$.

Um limite superior para os incrementos de um processo mBm é dado pelo limite superior das realizações de um fBm definido em [5], como sendo igual a:

$$Z_H(t) \leq \kappa H t^{H-1}. \quad (4.1)$$

Usando-se o limite estabelecido na Equação 4.1 e a propriedade da auto-similaridade local, verificada em um processo mBm, tem-se, então, que o processo envelope (PE) $\hat{A}(t)$ de um mBm com média \bar{a} , desvio padrão σ e função Holder $H(t)$ é dado por:

$$\hat{A}(t) = \int_0^t (\bar{a} + \kappa \sigma H(x) x^{H(x)-1}) dx. \quad (4.2)$$

Um caso particular desse PE é o processo envelope de um fBm derivado em [5] e discutido na Seção 2.1, quando $H(t)$ é um valor constante, ou seja,

$$\hat{A}(t) = \bar{a}t + \kappa \sigma t^H \quad (4.3)$$

4.2 Validação do Processo Envelope do mBm

Experimentos de simulação foram realizados para verificar a precisão do PE do mBm na caracterização de tráfego multifractal. Nestes experimentos, foram utilizados tanto traços de tráfego real quanto traços de tráfego sintético. Nas Figuras 4.1 e 4.2, os resultados obtidos com a caracterização de traços de tráfego real são apresentados. As curvas nessas figuras mostram o acumulado do tráfego registrado no traço e o

processo envelope derivado. Verifica-se que o processo envelope é um limitante superior apropriado para os diferentes traços avaliados, e que por vezes apresenta apenas pequenas violações dos limites estabelecidos. Ressalta-se que o PE do mBm é um processo envelope probabilístico, portanto, violações dos limitantes estabelecidos são próprios desse tipo de processo envelope. O fator de probabilidade é definido pela constante κ que nas avaliações realizadas teve seu valor estabelecido em 3,71, correspondendo a uma probabilidade de violação do processo envelope de 10^{-3} (ver Seção 2.1).

Em alguns resultados, em especial na Figura 4.2, verifica-se certo distanciamento entre as curvas do processo envelope derivado e as do tráfego acumulado. Na caracterização de traços de tráfego real a função $H(t)$ é estimada diretamente desses traços. Como descrito na Seção 2.4, o procedimento de estimativa da função $H(t)$ define que o valor de $H(t)$ no instante t é uma média obtida a partir de valores coletados em uma certa vizinhança de t . Essas diferenças entre os valores estimados e os valores reais da função $H(t)$ é a causa do distanciamento entre o processo envelope e o acumulado do tráfego. Apesar disso, verifica-se que as curvas nos gráficos são qualitativamente similares, uma vez que o processo envelope reproduz grande parte das variações registradas nos traços.

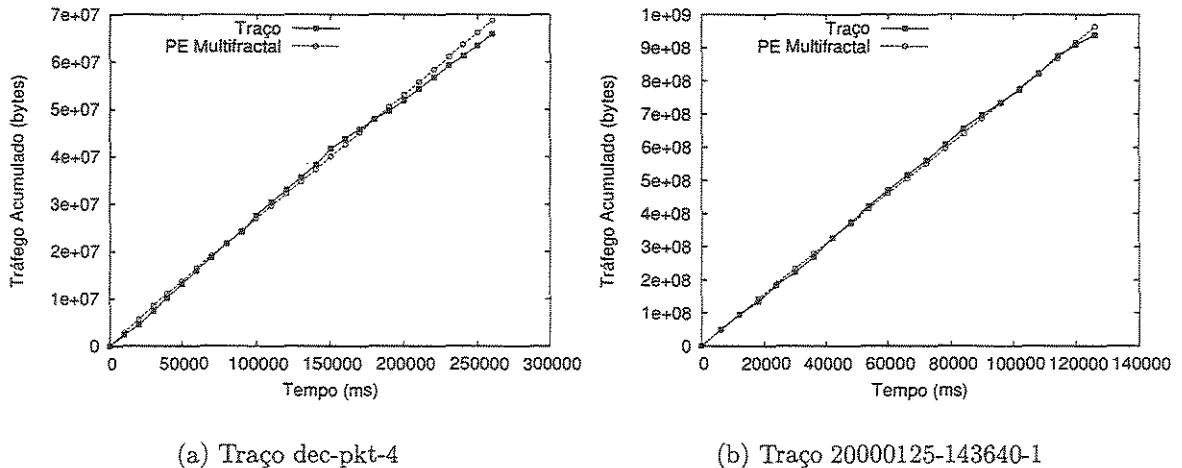


Figura 4.1: Avaliação do processo envelope mBm usando tráfego real (Parte I)

Traços de tráfego sintético, obtidos com o gerador de processos mBm, descrito em [45], foram também utilizados na verificação da precisão do processo envelope do mBm em caracterizar um processo multifractal. As funções Holder utilizadas para

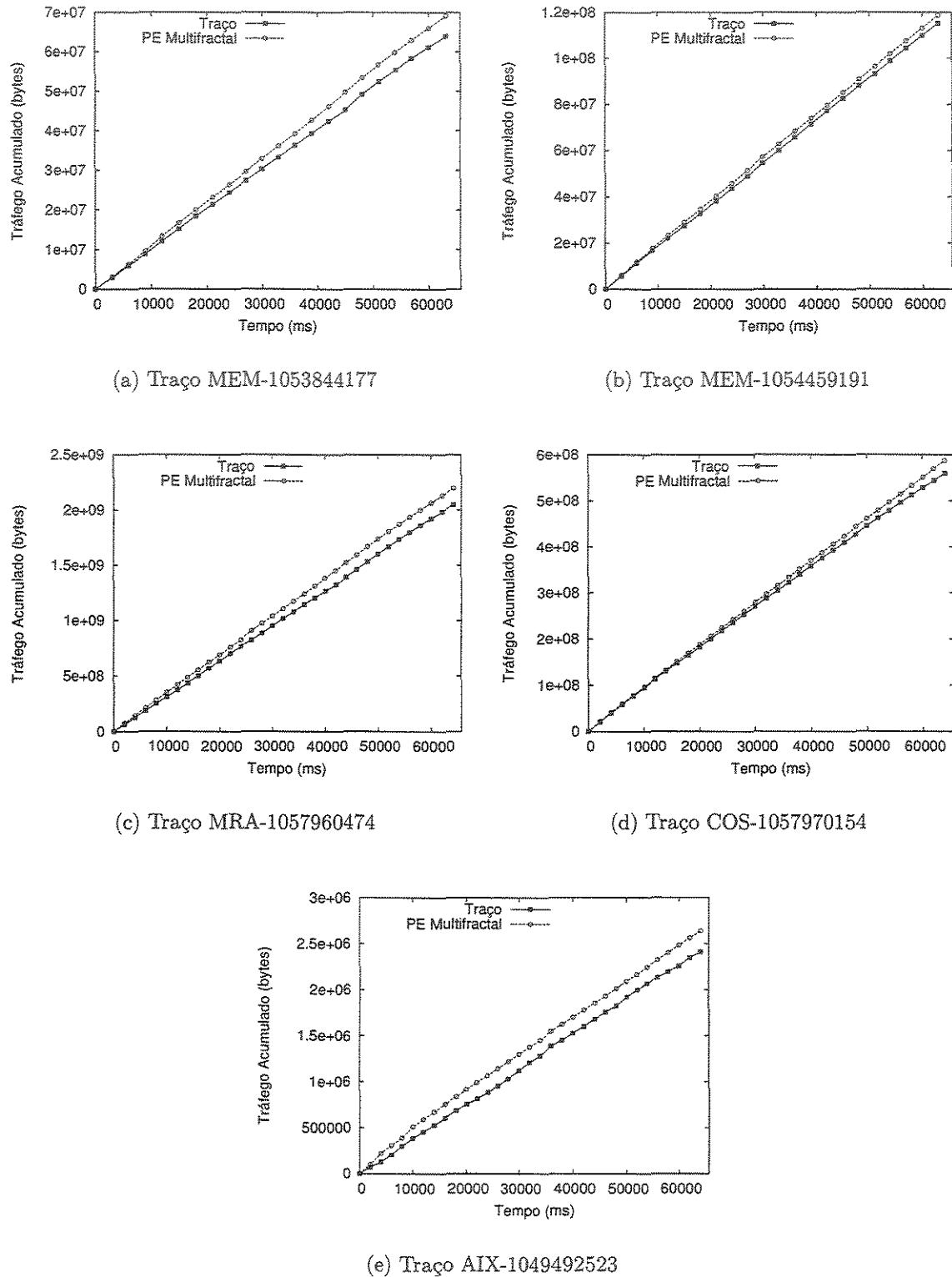


Figura 4.2: Avaliação do processo envelope mBm usando tráfego real (Parte II)

Traço	Média \bar{a}	Variância σ^2	Parâmetro Hurst H
MEM-1053844177	1.013,8	3.245.708,7	0,78
20000125-143640-1	7.354,2	37.326.523,3	0,87
dec-pkt-4	2.711,0	3.813.455,9	0,82

Tabela 4.1: Parâmetros do PE do fBm estimados de traços multifractal

gerar os diferentes processos mBm são:

$$\begin{aligned} H(t) &= t/2,0 + 0,5 \quad \text{com } t \in (0, 1); \\ H(t) &= 1,9t^2 - 1,9t + 0,975 \quad \text{com } t \in (0, 1); \\ H(t) &= 4,9t^3 - 7,9t^2 + 3,35t + 0,51 \quad \text{com } t \in (0, 1). \end{aligned} \quad (4.4)$$

As curvas em cada gráfico da Figura 4.3 são, respectivamente, o tráfego sintético acumulado e o processo envelope do mBm. Novamente, o processo envelope do mBm é um limitante superior justo para todas as funções Holder utilizadas na geração do tráfego. Violações do processo envelope são verificadas, entretanto, elas estão de acordo com o valor pré-estabelecido através da constante κ , sendo esta definida como valor de 5.25, o que equivale a uma probabilidade de violação de 10^{-6} .

Um estudo foi realizado para verificar quão precisa era a caracterização de tráfego multifractal quando esta era realizada por um modelo de tráfego monofractal. Os traços MEM-1053844177, 20000125-143640-1 e dec-pkt-4 (Tabela 3.1) foram caracterizados pelo processo envelope do fBm (Equação 4.3) com os descritores utilizados pelo modelo, média, variância e parâmetro Hurst, definidos conforme valores apresentados na Tabela 4.1. A Figura 4.4 mostra os resultados dessa caracterização. Verifica-se que o processo envelope do fBm é um limitante superior largo para o volume de tráfego registrado nos traços MEM-1053844177, 20000125-143640-1 e dec-pkt-4 (Tabela 3.1). Esse comportamento é devido ao processo envelope do fBm considerar que a explosividade do tráfego é medida por um valor uniforme, definido pelo parâmetro Hurst, superestimando a dinâmica local de explosividade, própria do tráfego multifractal.

A caracterização do tráfego a partir do processo envelope do mBm não requer que uma função Holder $H(t)$ seja definida por uma expressão fechada. Entretanto, tal expressão pode ser útil para outros propósitos tais como a definição de cenários para a avaliação numérica de mecanismos derivados a partir do processo envelope do mBm. Obtém-se aproximações polinomiais para as funções $H(t)$ estimadas a partir

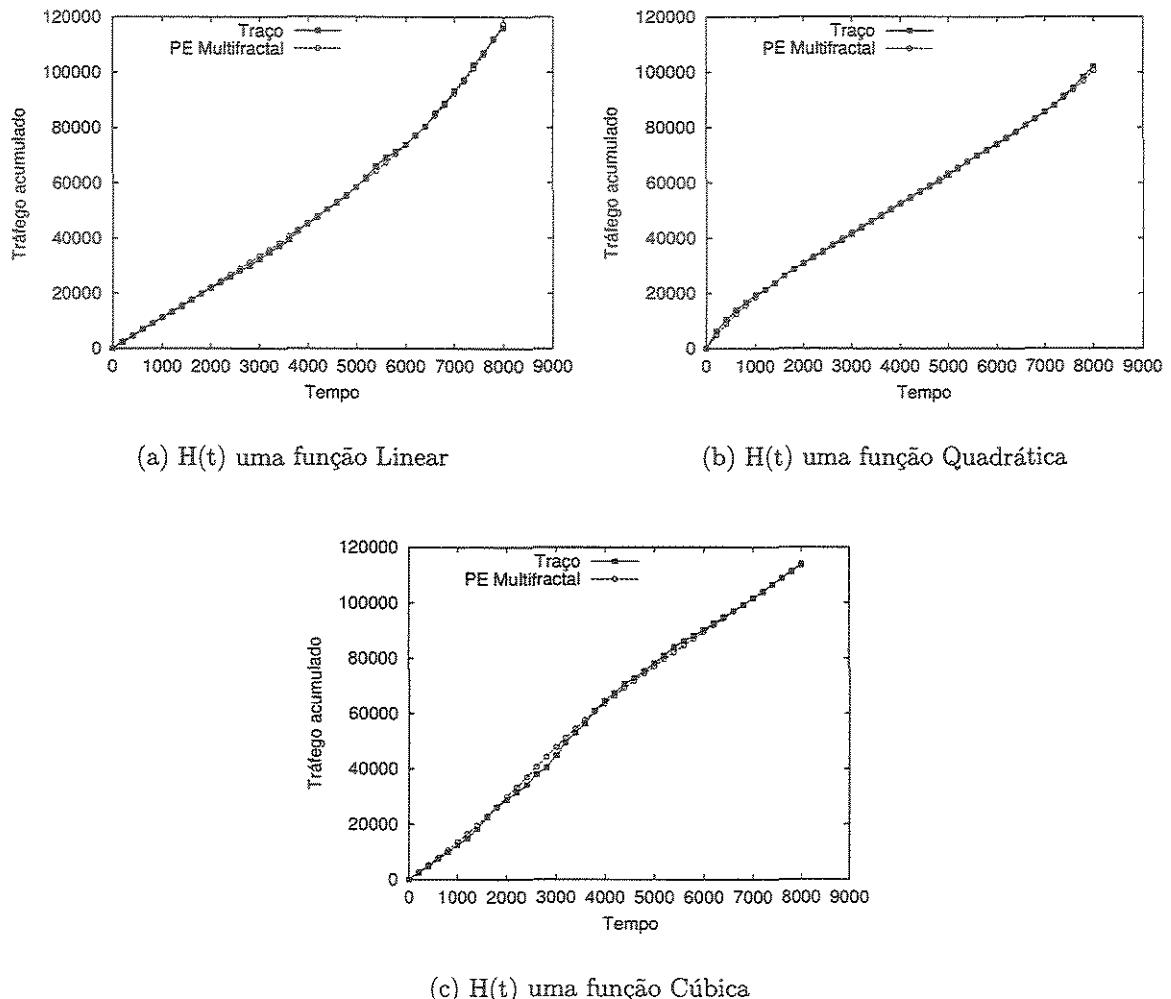
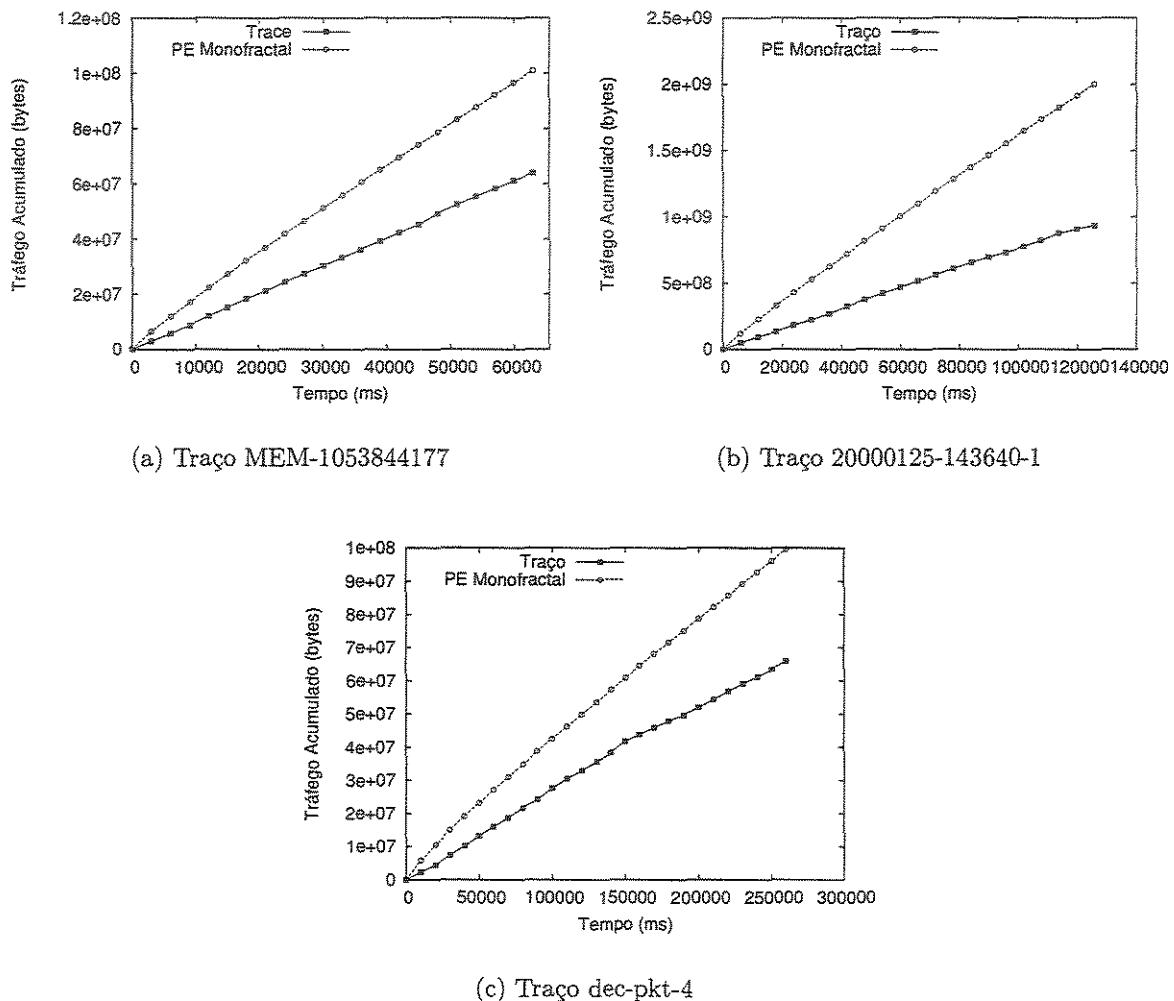


Figura 4.3: Avaliação do processo envelope do mBm usando traços de tráfego sintético

Figura 4.4: Avaliação do processo envelope do fBm usando tráfego real

de traços tráfego real. Nos experimentos realizados para avaliar essa abordagem, uma função $H(t)$ é estimada usando o procedimento descrito na Seção 2.4 e aproximações polinomiais são geradas para $H(t)$. Por fim, compara-se o volume de tráfego registrado no traço com o processo envelope derivado quando $H(t)$ é definida pela aproximação polinomial.

A Figura 4.5 mostra os processos envelopes derivados quando polinômios de grau sete são usados para aproximar a função Holder $H(t)$ estimada dos traços MEM-1053844177, 20000125-143640-1 e dec-pkt-4. Observou-se precisão similar quando o grau do polinômio foi definido no intervalo [7,15]. Limitantes largos foram derivados quando a função $H(t)$ foi aproximada por um polinômios de grau menor que sete. Assim, os polinômios de grau 7 são considerados uma boa solução para a aproximação da função $H(t)$ estimada do traço. Resultados indicam que esta é uma abordagem promissora na derivação de expressões fechadas para $H(t)$.

4.3 Resumo Conclusivo do Capítulo 4

Neste capítulo, o processo envelope do mBm foi definido e os resultados de experimentos de simulação que avaliaram a precisão desse processo envelope foram apresentados. Mostrou-se que apesar do mBm ser um processo Gaussiano, o seu processo envelope é um limitante superior justo para o volume de trabalho registrado em traços de tráfego multifractal, independente da época e do ambiente computacional em que eles foram coletados.

O processo envelope do fBm foi utilizado para caracterizar tráfego multifractal. Verificou-se que este processo envelope é um limitante superior largo para o volume de trabalho registrado em traços de tráfego multifractal. O fato da modelagem monofractal considerar a explosividade do tráfego multifractal uniforme, medindo-a através do parâmetro Hurst, gera a inadequação verificada por esta caracterização. Apesar dos estudos desenvolvidos nesta tese não requererem expressões fechadas para a função Holder $H(t)$, mostrou-se que uma aproximação polinomial dessa função produz processos envelopes que são limitantes adequados para o volume de trabalho registrado em traços de tráfego.

Ao longo desta tese, o processo envelope do mBm é empregado na realização de diferentes estudos. No próximo capítulo, analisa-se um sistema de filas que tem o seu processo de chegadas limitado pelo processo envelope do mBm. Expressões que determinam a escala de tempo de interesse de um sistema de filas são derivadas e

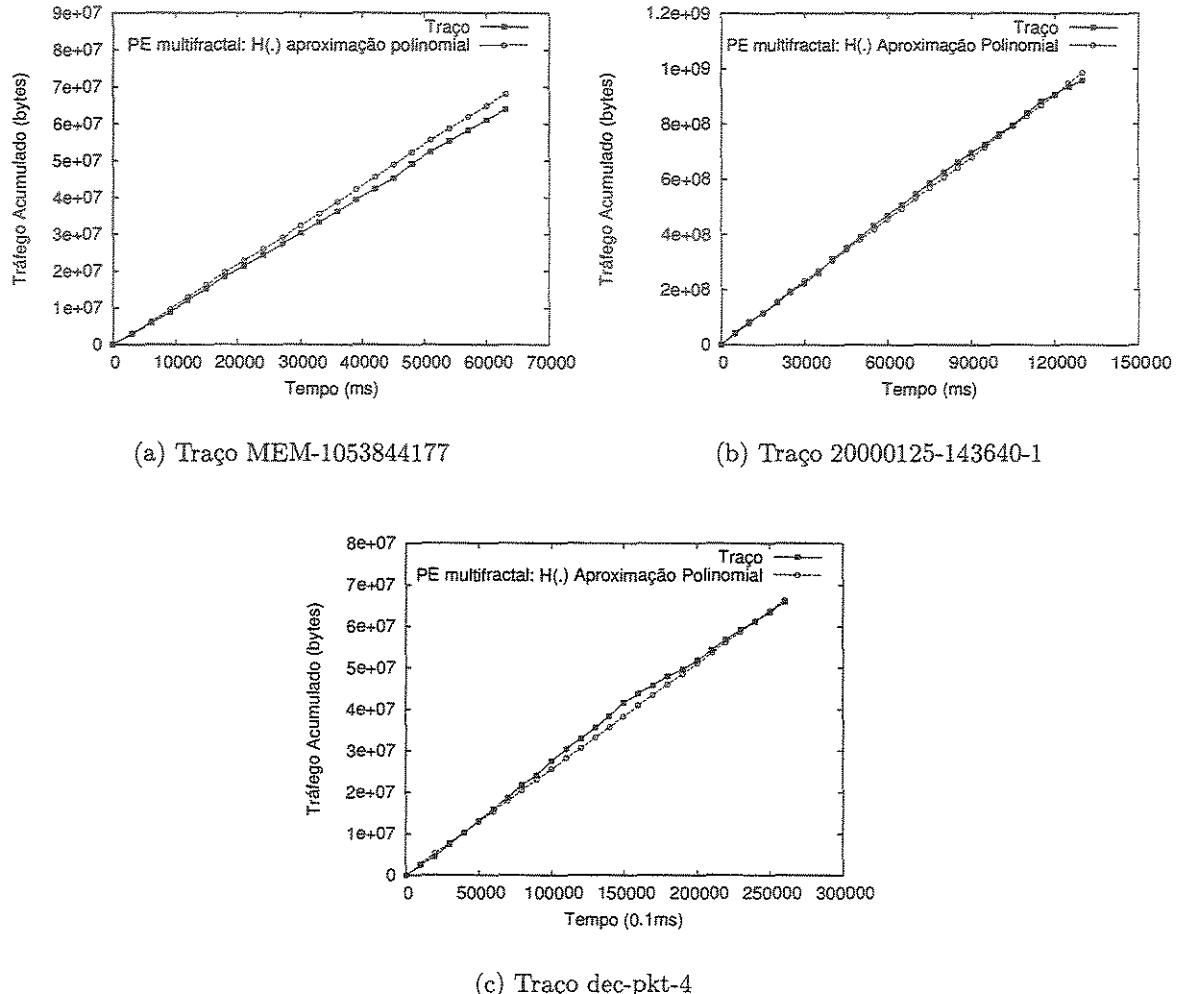


Figura 4.5: Processos envelopes derivados usando uma aproximação polinomial para a função Holder

utilizadas no Capítulo 6 em que é definida uma heurística para o cálculo da banda passante equivalente de um fluxo multifractal.

Capítulo 5

Análise de um Sistema de Filas Alimentado por Fluxos Multifractais

Neste capítulo, analisa-se um sistema de filas alimentado por fluxos que apresentam estatísticas multifractais (fluxo multifractal). A solução de um sistema de filas alimentado por um processo estocástico não é uma tarefa trivial, o que motiva o emprego de abordagens alternativas. Limitar o volume de trabalho que entra no sistema, usando-se processos envelopes, é uma dessas abordagens.

A principal vantagem de se usar processos envelopes para limitar o volume de trabalho que entra em um sistema de filas (sistema) é a transformação do problema a ser resolvido. Em outras palavras, transforma-se o problema de se obter a solução de um sistema alimentado por um processo estocástico em um problema mais fácil que é determinar a solução de um sistema alimentado por um processo determinístico. O modelo de tráfego introduzido neste capítulo considera que o volume de trabalho que entra no sistema é limitado pelo processo envelope do movimento Browniano multifractal (mBm). Usa-se este modelo na derivação de expressões que determinam o instante em que um sistema atinge o seu máximo em termos de trabalho não-realizado. Este instante de tempo é chamado de escala de tempo de interesse máxima do sistema. As expressões derivadas para calcular este instante de tempo consideram que o sistema é alimentado por um fluxo multifractal ou por um agregado de N fluxos multifractais.

5.1 A Solução do Sistema

Nesta seção, avalia-se um sistema de filas que é alimentado por fluxos multifractais. Seja $A(t)$ o trabalho que chega a um sistema de filas que opera com taxa de serviço constante C . O trabalho não-realizado $Q(t)$ neste sistema, no intervalo de tempo $[0, t]$, é dado por [59]:

$$Q(t) = A(t) - Ct - \min\{0, \inf_{t>0}\{A(t) - Ct\}\} \quad (5.1)$$

onde, $\min\{0, \inf_{t>0}\{A(t) - Ct\}\}$ contabiliza os períodos de ociosidade pelos quais passa o sistema.

A função $S(t)$ que descreve o volume de trabalho servido pelo sistema no intervalo $[0, t]$ é dada por:

$$S(t) = Ct + \min\{0, \inf_{t>0}\{A(t) - Ct\}\}, \quad (5.2)$$

ou seja:

$$S(t) = Ct + A(t^*) - Ct^* \quad (5.3)$$

onde, $A(0) = 0$ e $t^* = \arg \inf_{t>0}\{A(t) - Ct\}$ é o instante de tempo em que o sistema alcança o seu maior período ocioso no intervalo de tempo $[0, t]$.

Seja $r^* = \frac{t}{t^*}$, então $S(t)$ pode ser definida por:

$$S(t) = Ct + A(t/r^*) - Ct/r^* \quad (5.4)$$

e $Q(t)$, o trabalho não-realizado no sistema, é definido da seguinte forma:

$$\begin{aligned} Q(t) &= A(t) - S(t) \\ &= A(t) - A(t/r^*) - Ct(1 - 1/r^*). \end{aligned} \quad (5.5)$$

Um limite superior para o volume de trabalho servido pelo sistema $S(t)$ é dado por:

$$\hat{S}(t) = \hat{A}(t/\hat{r}^*) + Ct(1 - 1/\hat{r}^*) \quad (5.6)$$

onde, $\hat{A}(t)$ é o processo envelope do trabalho que chega ao sistema.

Um limitante superior, $\hat{Q}(t)$, para $Q(t)$ é obtido substituindo-se $A(t)$ e $S(t)$ na Equação 5.5 por $\hat{A}(t)$ e $\hat{S}(t)$, respectivamente, ou seja:

$$\begin{aligned}\hat{Q}(t) &= \hat{A}(t) - \hat{S}(t) \\ &= \hat{A}(t) - \hat{A}(t/\hat{r}^*) - Ct(1 - 1/\hat{r}^*)\end{aligned}\quad (5.7)$$

A efetividade do limitante definido pela Equação 5.7 foi verificada comparando-se a probabilidade de perda medida e a probabilidade de perda calculada, derivadas respectivamente a partir das Equações 5.5 e 5.7.

A probabilidade de perda medida (PPM) é definida por:

$$PPM = 1 - \frac{S(t^*) + q_{max}}{A(t^*)} \quad (5.8)$$

onde, q_{max} é um limitante para o volume de trabalho não-realizado no sistema, $S(t)$ é a função que define o volume de trabalho realmente servido pelo sistema no intervalo $[0, t]$ e $t^* = \arg \sup_{t>0} \left\{ \frac{S(t) + q_{max}}{A(t)} \right\}$. A probabilidade de perda calculada (PPC) é definida por:

$$PPC = 1 - \frac{\hat{S}(t^*) + q_{max}}{\hat{A}(t^*)} \quad (5.9)$$

onde, $\hat{S}(t)$ é um limitante para $S(t)$ e $t^* = \arg \sup_{t>0} \left\{ \frac{\hat{S}(t) + q_{max}}{\hat{A}(t)} \right\}$.

Experimentos de simulação foram realizados. Coletou-se a PPM e a PPC quando $A(t)$ e $\hat{A}(t)$ são, respectivamente, um traço de tráfego IP que apresenta estatísticas multifractais (traço multifractal) e o processo envelope do mBm derivado para este traço. Os traços multifractais utilizados nos experimentos são apresentados na Tabela 3.1. A Figura 5.1 mostra as probabilidades de perda medida (Equação 5.8) e calculada (Equação 5.9) para diferentes valores do limitante q_{max} e diferentes níveis de utilização média do canal. Os resultados mostram que a PPC é um limitante superior para a PPM.

A Figura 5.1.a mostra os resultados obtidos em um cenário no qual o canal opera com utilização média de 0,8 ($\rho = 0,8$) e o fluxo que alimenta esse sistema é o traço 20000125-143640-1. Nesse cenário, verifica-se que a PPC é um limite superior justo, quando os valores do limitante q_{max} são pequenos e médios. Quando os valores do limitante q_{max} são maiores, verifica-se uma diferença entre as probabilidades de perda medida e calculada, sendo esta diferença um valor maior que duas ordens de grandeza com a $PPM = 3,3 * 10^{-5}$ e a $PPC = 2,3 * 10^{-3}$.

Os resultados obtidos nos cenários em que o tráfego é intenso, $\rho \approx 1$, e o sistema é alimentado pelos traços MEM-1054459191, dec-pkt-4 e MEM-1053844177 são apresentados, respectivamente, nas Figuras 5.1.b, 5.1.c e 5.1.d. Nesses cenários, a maior diferença entre a PPM e a PPC é verificada quando o traço MEM-1054459191 alimenta o sistema que opera com uma utilização média de 0,95 (Figura 5.1.b). A diferença verificada é um valor menor que uma ordem de grandeza com a $PPM = 8,0 * 10^{-6}$ e a $PPC = 2,7 * 10^{-5}$. A redução na diferença entre a PPM e a PPC em um cenário de tráfego intenso ocorre devido ao maior período de tempo em que o servidor permanece ocupado, $\hat{S}(t) \approx Ct$, reduzindo, assim, o erro na contabilização dos períodos ociosos, que ocorre devido $\hat{A}(t)$ ser um limite superior para $A(t)$.

Outros experimentos de simulação avaliaram o impacto do nível de utilização do sistema na precisão dos resultados obtidos, Figura 5.2. O traço 20000125-143640-1 foi usado para alimentar um sistema que opera com diferentes níveis de utilização média ρ , definidos no intervalo [0,80; 1,10]. Quando $\rho = 0,80$, verificou-se que a maior diferença entre a PPM e a PPC é de quase duas ordens de grandeza ($PPM = 3,3 * 10^{-5}$ e $PPC = 2,3 * 10^{-3}$), enquanto essa diferença, no caso de $\rho = 1,10$, é inferior a uma ordem de grandeza ($PPM = 2,8 * 10^{-3}$ e $PPC = 8,0 * 10^{-3}$). Estes resultados mostram que o modelo de tráfego proposto apresenta boa precisão, em especial quando o sistema opera sob tráfego intenso. Nota-se ainda que, nesse modelo, o custo computacional envolvido na derivação dos limites para o sistema é baixo, sendo necessário realizar apenas operações que determinam raízes e máximos de funções determinísticas.

5.2 Escala de Tempo de Interesse de um Sistema Alimentado por um Fluxo Multifractal

Nesta seção, deriva-se uma expressão para calcular o instante tempo em que o volume de trabalho não-realizado em um sistema, alimentado por um fluxo multifractal, alcança o seu máximo. O conhecimento do instante em que um sistema atinge o seu máximo em termo de trabalho não-realizado pode ser usado para realizar testes de controle de admissão de um novo fluxo que passa pelo domínio de uma rede. Nestes testes, admite-se ou não um novo fluxo no sistema, comparando-se o volume de recurso requerido pelo fluxo que chega ao sistema com o volume de recurso disponível.

Mostra-se, nesta seção, que a partir das características de um fluxo, pode-se quan-

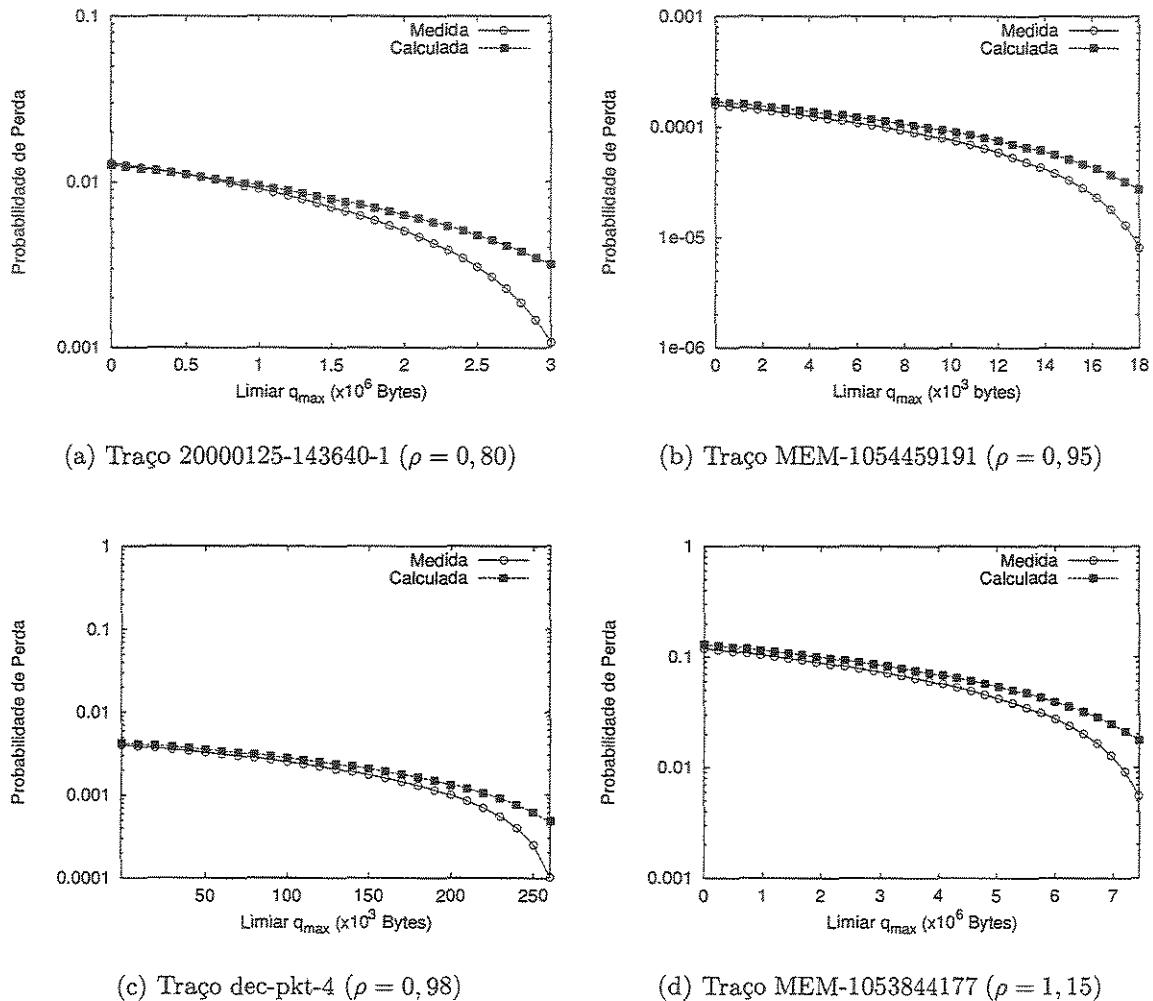


Figura 5.1: Probabilidade de perda medida e calculada em diferentes cenários

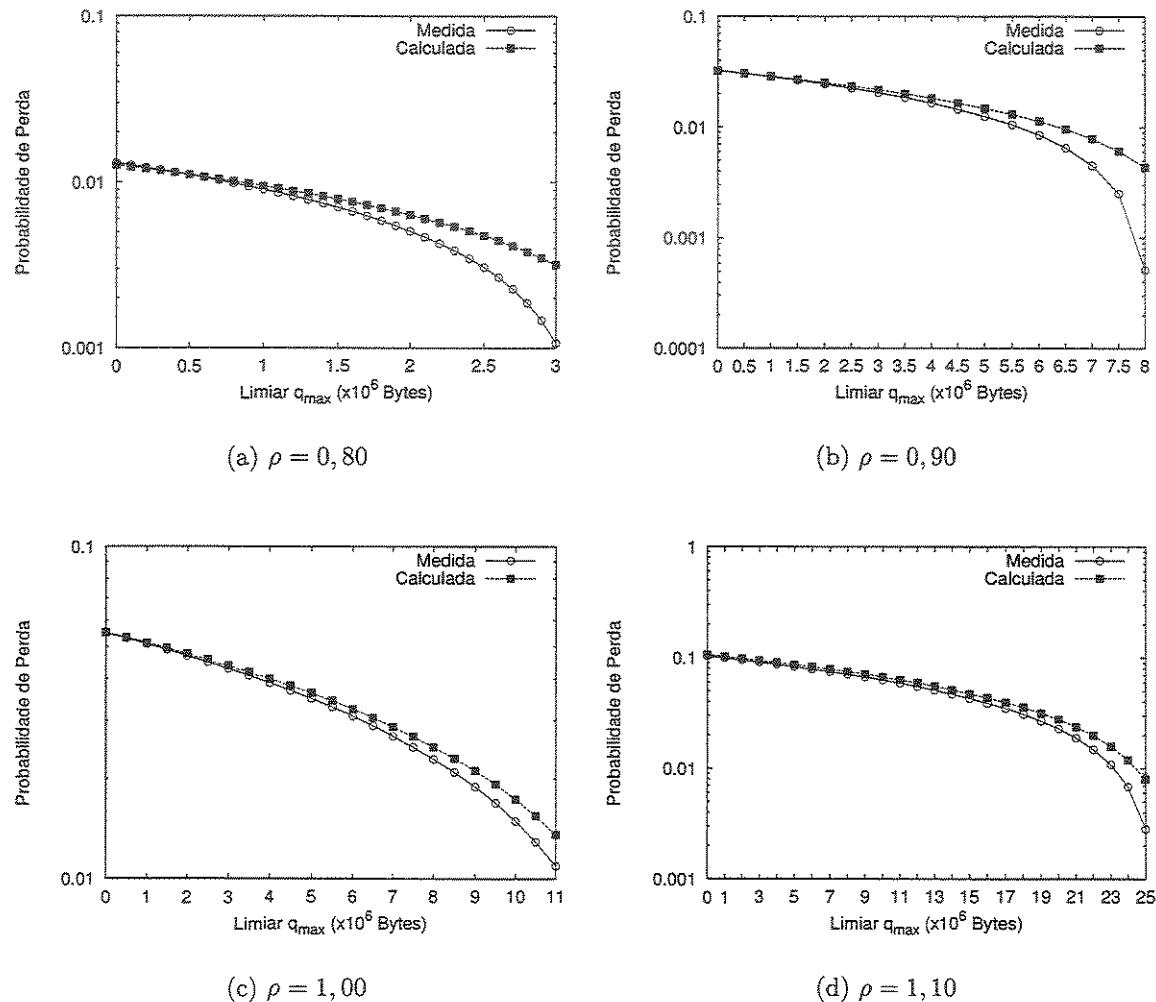


Figura 5.2: Probabilidade de perda medida e calculada em diferentes cenários para o traço 20000125-143640-1

tificar o volume de recurso requerido por este fluxo, determinando-se o volume de trabalho que o sistema pode suportar sem que ocorra desequilíbrio no mesmo. Esse volume de trabalho é definido pelo volume de trabalho realizado (servido) mais o volume de trabalho não-realizado no sistema. A escala de tempo de interesse é o instante de tempo em que o volume de trabalho não-realizado neste sistema atinge o seu máximo. Dessa forma, ao se determinar este instante de tempo, quantifica-se também o volume de recurso (tamanho do buffer) requerido pelo fluxo.

Seja um sistema de filas operando em tempo contínuo, servido por um canal de capacidade C e alimentado por um fluxo multifractal $A(t)$. Seja $\hat{A}(t)$ o processo envelope de $A(t)$. Um limitante para a ocupação máxima do sistema, considerando-se uma política de serviço FIFO (*First In First Out*), é dado por:

$$\hat{q}_{max} = \max_{t \geq 0} \{\hat{Q}(t)\}. \quad (5.10)$$

Para determinar este limitante, toma-se $\hat{Q}(t)$ conforme definido pela Equação 5.7, ou seja:

$$\begin{aligned} \hat{Q}(t) &= \hat{A}(t) - \hat{A}(t/\hat{r}^*) - Ct(1 - 1/\hat{r}^*) \\ &= \int_0^t \bar{a} + \kappa\sigma H(x)x^{H(x)-1}dx - \int_0^{t/\hat{r}^*} \bar{a} + \kappa\sigma H(x)x^{H(x)-1}dx - Ct(1 - 1/\hat{r}^*), \end{aligned} \quad (5.11)$$

onde, $\hat{A}(t)$ é o processo envelope do mBm (Equação 4.2). A escala de tempo de interesse é o instante t , definido por:

$$t^* = \arg \sup_{t \geq 0} \{\hat{Q}(t)\} \quad (5.12)$$

ou,

$$\hat{t}^* = \left[\frac{\kappa\sigma(H(\hat{t}^*)(\hat{t}^*)^{H(\hat{t}^*)} - \hat{r}^*H(\hat{t}^*/\hat{r}^*)(\hat{t}^*/\hat{r}^*)^{H(\hat{t}^*/\hat{r}^*)})}{(C - \bar{a})(1 - 1/\hat{r}^*)} \right] \quad (5.13)$$

O instante \hat{t}^* é o instante de tempo no qual $\hat{Q}(t)$ atinge o seu maior valor e este instante de tempo é chamado de Escala de Tempo de Interesse Máxima (MaxTS).

Experimentos de simulação foram realizados para verificar a precisão dos valores obtidos com a resolução da Equação 5.13. Na primeira etapa dos experimentos, mediu-se o volume de trabalho não-realizado no sistema, obtendo-se o instante t em que este volume atingiu o seu maior valor. Este instante de tempo foi chamado

de MaxTS medido. Em uma segunda etapa dos experimentos, calculou-se o valor MaxTS utilizando-se a Equação 5.13 e este valor foi chamado de MaxTS calculado.

A Figura 5.3 mostra os resultados dos experimentos de simulação realizados quando uma subseqüência de 2^{16} pontos do traço MEM-1053844177 (Tabela 3.1), agregado em uma escala de 1ms, alimenta um sistema. Esta subseqüência foi caracterizada por um processo envelope com probabilidade de violação de 10^{-3} , média $\bar{a} = 1.013,83$, variância $\sigma^2 = 3.245.708,75$, e função Holder $H(t)$ estimada conforme procedimento descrito na Seção 2.4.

As Figuras 5.3.a e 5.3.b mostram os resultados obtidos quando a utilização média do canal é igual a $\rho = 0,7$ e $\rho = 0,9$, respectivamente. Para $\rho = 0,7$, o MaxTS calculado é $45.698ms$ e apresenta um erro de 3% em relação ao MaxTS medido. Quando $\rho = 0,9$, Figura 5.3.b, o MaxTS calculado é $48.130ms$ e apresenta um erro de 0,65% em relação ao MaxTS medido. Esses resultados mostram a precisão da expressão derivada para calcular o MaxTS (Equação 5.13), em especial quando o sistema opera com altas taxas de utilização.

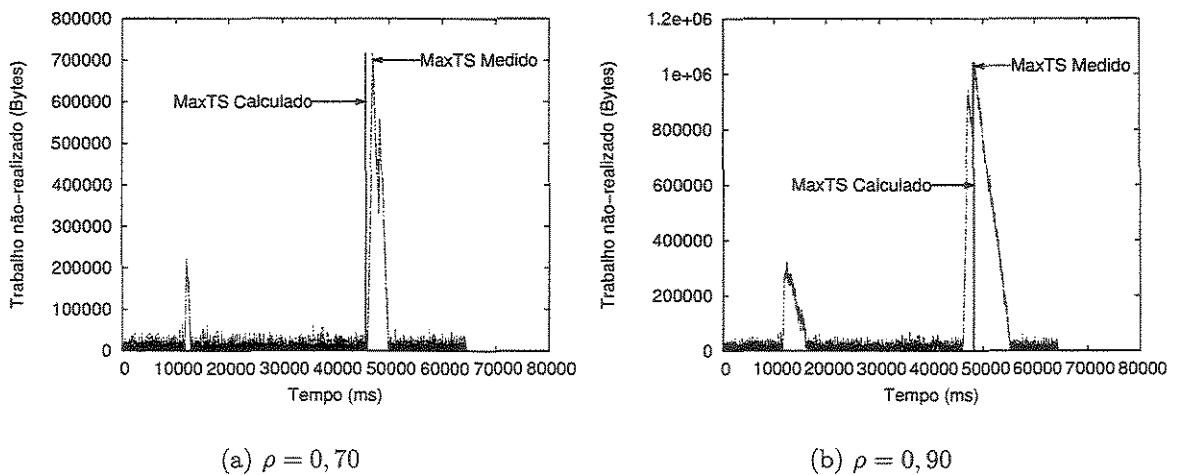


Figura 5.3: Evolução do tamanho da fila de um sistema alimentado por um fluxo de tráfego real e o MaxTS do sistema em cenários com diferentes níveis de utilização

Experimentos de simulação, também, foram realizados para verificar a precisão dos valores obtidos com a resolução da Equação 5.13 quando o sistema é alimentado por um traço de tráfego sintético. Os resultados destes experimentos são apresentados na Figura 5.4. Os traços usados nos experimentos de simulação foram gerados através

Traço	Média	Variância	Função Holder $H(t)$	Tamanho
Quadrático	12,96	88,18	$1,9t^2 - 1,9t + 0,98$	8.192 pontos
Cúbico	14,22	82,09	$4,9t^3 - 7,9t^2 + 3,35t + 0,5$	8.192 pontos

Tabela 5.1: Descritores de traços de tráfego sintético usados para alimentar um sistema de filas

do procedimento introduzido em [45] e descrito na Seção 2.3. A Tabela 5.1 mostra os valores dos descritores dos traços de tráfego sintético gerados.

As Figuras 5.4.a e 5.4.b mostram os resultados obtidos quando a função Holder $H(t)$ é um polinômio quadrático (traço Quadrático), enquanto as Figuras 5.4.c e 5.4.d mostram os resultados obtidos quando a função Holder $H(t)$ é um polinômio cúbico (traço Cúbico).

Novamente, verifica-se que o nível de utilização com que o sistema opera influencia a precisão dos valores obtidos com a resolução da Equação 5.13. No cenário em que o sistema é alimentado pelo traço Cúbico e a utilização média do sistema é de 0,90, o erro verificado entre os valores do MaxTS medido (3.765) e do MaxTS calculado (3.482) é de 8%. Quando o sistema apresenta uma utilização média maior (1,00) o erro verificado entre o MaxTS medido (4.069) e o MaxTS calculado (4.071) é de apenas 0,04%. No cenário em que o sistema é alimentado pelo traço Quadrático e opera com a utilização média de 0,80 o MaxTS Medido e o MaxTS Calculado são iguais a 665 e 670, respectivamente. Quando o sistema passa a operar com a utilização média de 1,00, o MaxTS calculado e o MaxTS medido são iguais a 1.232 e 1.236, respectivamente.

Os resultados desses experimentos confirmam que o aumento na utilização média do sistema torna a caracterização obtida com o modelo proposto mais precisa, como já verificado nos estudos realizados com traços de tráfego real. Verifica-se, ainda, que, em cenários nos quais o sistema opera com utilização média baixa, Figuras 5.4.a e 5.4.b, quanto mais justo é o limitante estabelecido pelo processo envelope do movimento Browniano multifractal menor é o erro verificado entre o MaxTS calculado e o MaxTS medido.

No estudo seguinte, verificou-se o impacto de uma modelagem monofractal na estimativa da escala de tempo de interesse de um sistema que é alimentado por um fluxo multifractal. Quando o trabalho que chega ao sistema é limitado pelo processo envelope (PE) monofractal definido na Equação 4.3, o PE do fBm, a escala de tempo

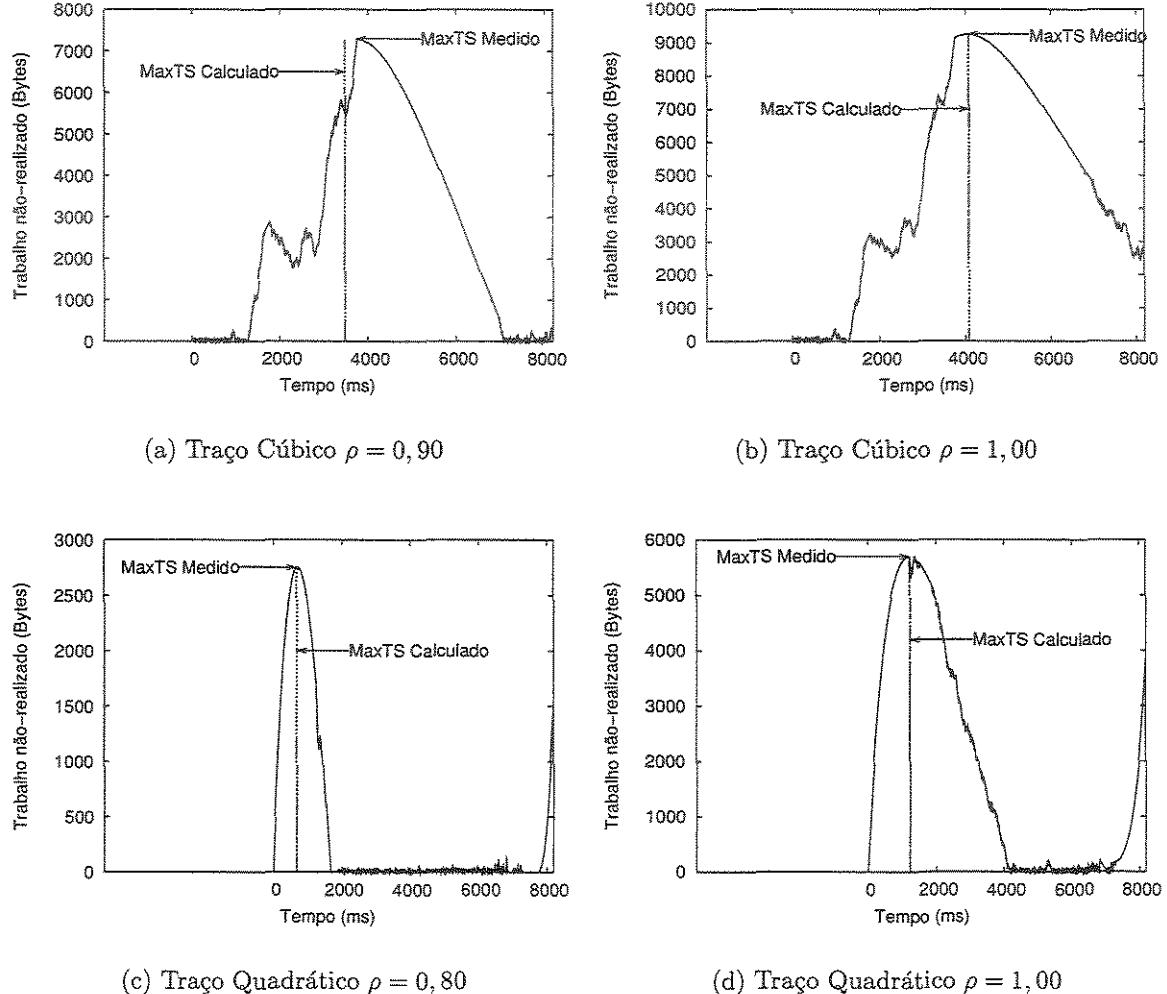


Figura 5.4: Evolução do tamanho da fila de um sistema alimentado por tráfego sintético e o MaxTS do sistema em cenários com diferentes níveis de utilização

de interesse máxima, \hat{t}^* , é definida por:

$$\hat{t}^* = \left[\frac{\kappa\sigma H(1 - (\hat{r}^*)^{(-H)})}{(C - \bar{a})(1 - 1/\hat{r}^*)} \right]^{\frac{1}{1-H}} \quad (5.14)$$

O parâmetro Hurst, H , tem papel importante nesta equação, em virtude do valor de \hat{t}^* aumentar exponencialmente com $[\frac{1}{1-H}]$. O parâmetro Hurst, H , superestima a explosividade do tráfego multifractal. Dessa forma, resultados errôneos são esperados quando o tráfego multifractal é caracterizado por um processo envelope monofractal.

A Equação 5.14 foi resolvida, considerando-se que o sistema era alimentado pelo traço MEM-1053844177 e operava com diferentes níveis de utilização média. O valor do parâmetro Hurst H do traço MEM-1053844177 é igual a 0.78, conforme estimativa realizada usando-se o estimador A-V [60]. Os valores de \hat{t}^* estimados quando a utilização média era 0,7 e 0,9 foram 231.543ms e 324.274ms. Estes valores representam erros de 491% e 669%, respectivamente, em relação aos valores do MaxTS medido (ver Figura 5.3). Esses resultados reforçam que o PE do fBm é inadequado para caracterizar fluxos que apresentam estatísticas multifractais, como já destacado no Capítulo 4.

5.3 Escala de Tempo de Interesse de um Sistema Alimentado por Vários Fluxos Multifractais

Nesta seção, deriva-se uma expressão para calcular a escala de tempo de interesse de um sistema alimentado por um agregado de N fluxos multifractais. Considera-se que o agregado dos N fluxos é limitado pelo processo envelope do movimento Browniano multifractal (mBm). Para derivar este processo envelope emprega-se a propriedade da auto-similaridade local (do inglês *locally asymptotic self-similarity-las*), verificada no processo mBm, Seção 2.3, juntamente com a propriedade da agregação de processos movimento Browniano fractal (fBm), descrita no parágrafo abaixo.

Em [39], mostra-se que o agregado de N processos fBm com parâmetro Hurst H_i , média \bar{a}_i e variância $\sigma_i^2 t^{2H_i}$ é um processo fBm com média \bar{a} e variância $\sigma^2 t^{2H}$ definidas por $\sum_{i=1}^N \bar{a}_i$ e $\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 t^{2H_i}$, respectivamente. Pela propriedade *lass*, o processo mBm tem realização definida pelas realizações de processos movimento Browniano Fractal. Estes processos têm seus parâmetros Hurst H definidos pelos valores da função Holder $H(t)$ associada ao processo mBm[45].

Aplicando-se essas duas propriedades, pode-se derivar um processo envelope baseado no processo mBm capaz de caracterizar o agregado de N fluxos multifractais. Em outras palavras, um limitante para as realizações do agregado de N mBm, no instante t , é dado pela soma dos limitantes de cada uma das N realizações de fBms em t , e o processo envelope $\hat{A}^N(t)$ é derivado como segue. Sejam N fluxos multifractais independentes definidos pelos seguintes parâmetros: média \bar{a}_i , variância σ_i^2 e função Holder $H_i(x)$. Seja $A^N(t)$ o processo gerado pela agregação desses N fluxos multifractais e $\hat{A}_i(t)$ o processo envelope do mBm definido para o i -ésimo fluxo multifractal. O processo envelope $\hat{A}^N(t)$, para o trabalho em $A^N(t)$, no intervalo de tempo $[0, t]$, é dado por:

$$\begin{aligned}\hat{A}^N(t) &= \sum_{i=1}^N \hat{A}_i(t) \\ &= \int_0^t \sum_{i=1}^N \bar{a}_i + \kappa \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 H_i(x) x^{2H_i(x)-1} \right) \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 x^{2H_i(x)} \right)^{-\frac{1}{2}} dx \quad (5.15)\end{aligned}$$

Tomando-se a definição de $\hat{S}(t)$ (Equação 5.6) e a definição do processo envelope do agregado de N fluxos multifractais (Equação 5.15), um limitante $\hat{S}^N(t)$ para o volume de trabalho servido pelo sistema alimentado pelo agregado dos N fluxos multifractais é dado por:

$$\hat{S}^N(t) = Ct + \hat{A}^N(t/\hat{r}^*) - Ct/\hat{r}^* \quad (5.16)$$

onde, $\hat{A}^N(t)$ é o processo envelope para o trabalho que chega ao sistema gerado pelo agregado de N fluxos multifractais e C é a taxa de serviço do sistema, $\hat{r}^* = \frac{t}{\hat{t}^*}$ e $\hat{t}^* = \arg \inf_{t>0} \{\hat{A}^N(t) - Ct\}$.

Um limitante superior para o trabalho não-realizado no sistema $Q^N(t)$ pode ser computado considerando-se as definições de $\hat{A}^N(t)$ e $\hat{S}^N(t)$, ou seja:

$$\begin{aligned}
\hat{Q}^N(t) &= \hat{A}^N(t) - \hat{S}^N(t) \\
&= \hat{A}^N(t) - \hat{A}^N(t/\hat{r}^*) - Ct(1 - 1/\hat{r}^*) \\
&= \int_0^t \sum_{i=1}^N \bar{a}_i + \kappa \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 H_i(x) x^{2H_i(x)-1} \right) \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 x^{2H_i(x)} \right)^{-\frac{1}{2}} dx - \\
&\quad \int_0^{t/\hat{r}^*} \sum_{i=1}^N \bar{a}_i + \kappa \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 H_i(x) x^{2H_i(x)-1} \right) \left(\sum_{i=1}^N \sigma_i^2 x^{2H_i(x)} \right)^{-\frac{1}{2}} dx - \\
&\quad Ct(1 - 1/\hat{r}^*)
\end{aligned} \tag{5.17}$$

A escala de tempo de interesse de um sistema servido por uma taxa constante C e alimentado pelo agregado de N fluxo $A^N(t)$ é o instante em que este sistema alcança a sua ocupação máxima em termos de trabalho não-realizado. Um limitante para essa ocupação máxima é definido por:

$$\hat{Q}_{max}^N = \max_{t \geq 0} \{\hat{Q}^N(t)\} \tag{5.18}$$

onde, $\hat{Q}^N(t)$ é o limitante superior para o volume de trabalho não-realizado e definido pela Equação 5.17. A escala de tempo de interesse máxima t^* é o instante de tempo t em que $\hat{Q}^N(t)$ atinge o seu máximo, ou seja:

$$t^* = \arg \sup_{t>0} \{\hat{Q}^N(t)\} \tag{5.19}$$

ou

$$t^* = \frac{\kappa \left[\left(\sum_{i=1}^N H_i(t^*) \Gamma_i(t^*) \right) \left(\sum_{i=1}^N \Gamma_i(t^*) \right)^{-\frac{1}{2}} - \left(\sum_{i=1}^N \hat{r}^* H_i(\frac{t^*}{\hat{r}^*}) \Gamma_i(\frac{t^*}{\hat{r}^*}) \right) \left(\sum_{i=1}^N \Gamma_i(\frac{t^*}{\hat{r}^*}) \right)^{-\frac{1}{2}} \right]}{(C - \sum_{i=1}^N \bar{a}_i)(1 - 1/\hat{r}^*)} \tag{5.20}$$

onde, $\Gamma_i(t) = \sigma_i^2 t^{2H_i(t)}$.

Experimentos de simulação foram realizados para verificar a precisão dos valores obtidos com a resolução da Equação 5.20. Na primeira etapa dos experimentos, mediu-se o volume de trabalho não-realizado no sistema, obtendo-se o instante t em que este volume atingiu o seu maior valor. Este instante de tempo foi chamado de MaxTS medido. Em uma segunda etapa dos experimentos, calculou-se o valor MaxTS, utilizando-se a Equação 5.13 e este valor foi chamado de MaxTS calculado.

O fluxo de tráfego usado para alimentar o sistema foi gerado agregando-se fluxos de tráfego descritos na Tabela 3.1.

A Figura 5.5 mostra os resultados obtidos com o experimento de simulação quando o fluxo que alimenta o sistema é gerado pelos traços MRA-1057960474, MEM-1053844177, COS-1057970154 e AIX-1049492523. As escalas de tempo de interesse medida e calculada têm valores que diferem em menos de 1%. No cenário definido por um nível de utilização médio de 0,80 o MaxTS calculado foi de $46.848ms$, enquanto o MaxTS medido foi de $46.805ms$, indicando uma diferença de apenas 0,09% entre estes valores. Quando o sistema opera com um nível de utilização médio de 0,9, os valores de MaxTS calculado e MaxTS medido foram $47.616ms$ e $47.607ms$, respectivamente. A diferença entre esses valores é de apenas 0,01%. Estas pequenas diferenças indicam que a precisão no cálculo do MaxTS aumenta com a utilização do sistema, reforçando os resultados obtidos com o cálculo da escala de tempo de interesse, quando o sistema é alimentado por um único fluxo (Equação 5.13).

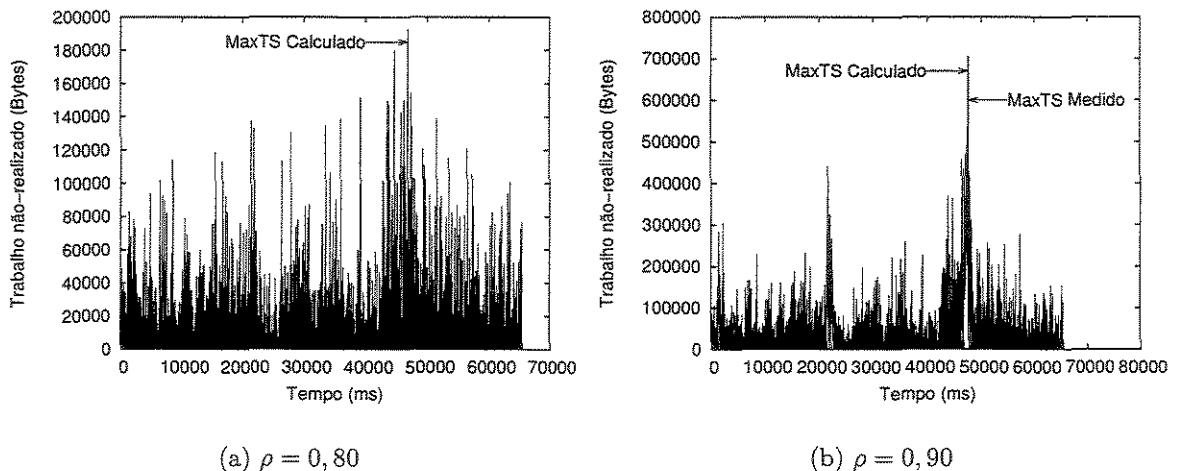


Figura 5.5: Evolução do trabalho não-realizado no sistema alimentado por vários fluxos e o MaxTS do sistema em cenários com diferentes níveis de utilização

Quando os fluxos que geram o agregado $A^N(t)$ apresentam os mesmos parâmetros, tem-se um caso especial da modelagem apresentada anteriormente. Assim sendo, o processo envelope $\hat{A}^N(t)$ é definido por:

$$\begin{aligned}\hat{A}^N(t) &= \sum_{i=1}^N \hat{A}_i(t) \\ &= \int_0^t N\bar{a} + N^{\frac{1}{2}}\kappa\sigma H(x)x^{H(x)-1}dx\end{aligned}\quad (5.21)$$

e o limitante superior para o volume de trabalho não-realizado no sistema $\hat{Q}^N(t)$ é definido por:

$$\begin{aligned}\hat{Q}^N(t) &= \hat{A}^N(t) - \hat{S}^N(t) \\ &= \hat{A}^N(t) - \hat{A}^N(t/\hat{r}^*) - Ct(1 - 1/\hat{r}^*) \\ &= \int_0^t N\bar{a} + N^{\frac{1}{2}}\kappa\sigma H(x)x^{H(x)-1}dx - \int_0^{t/\hat{r}^*} N\bar{a} + N^{\frac{1}{2}}\kappa\sigma H(x)x^{H(x)-1}dx - \\ &\quad Ct(1 - 1/\hat{r}^*).\end{aligned}\quad (5.22)$$

A escala de tempo de interesse máximo para fluxos homogêneos é dada pela seguinte equação:

$$\begin{aligned}\hat{t}^* &= N^{\frac{-1}{2}} \left[\frac{\kappa\sigma(H(\hat{t}^*)(\hat{t}^*)^{H(\hat{t}^*)} - \hat{r}^*H(\hat{t}^*/\hat{r}^*)(\hat{t}^*/\hat{r}^*)^{H(\hat{t}^*/\hat{r}^*)})}{(c - \bar{a})(1 - 1/\hat{r}^*)} \right] \\ &= N^{\frac{-1}{2}}\hat{t}_i^*\end{aligned}\quad (5.23)$$

onde, \hat{t}_i^* é a escala de tempo de interesse máximo de um único fluxo (Equação 5.13), com a capacidade normalizada pelo número N de fluxos, isto é $c = C/N$.

5.4 Resumo Conclusivo do Capítulo 5

Neste capítulo, analisou-se um sistema de filas alimentado por um fluxo que apresenta estatísticas multifractais. O modelo foi avaliado comparando-se a probabilidade de perda calculada e a probabilidade de perda medida, através da simulação de um sistema de filas. Os resultados mostraram que o modelo proposto caracteriza o sistema de filas com boa precisão.

Derivou-se também expressões para a escala de tempo de interesse máxima do sistema quando este é alimentado por um ou vários fluxos de tráfego multifractal. As expressões para o cálculo da escala de tempo de interesse foram avaliadas quando

o sistema opera com diferentes níveis de utilização. Os resultados dessas avaliações mostraram que as expressões estimam com precisão o instante de tempo em que o sistema alcança o seu máximo em termo de trabalho não-realizado.

Mostrou-se, ainda, uma expressão para cálculo da escala de tempo de interesse máxima quando o sistema de filas é caracterizado por um modelo monofractal. Esta expressão foi usada para verificar o impacto de uma modelagem monofractal para um sistema de filas que é alimentado por tráfego multifractal. Os resultados obtidos mostram que tal caracterização superestima o volume de tráfego, o que gera valores para a escala de tempo de interesse máxima que são várias ordens de grandeza maiores que os valores observados nas simulações.

No próximo capítulo, apresenta-se uma heurística para computar a banda passante equivalente de fluxos multifractais. Essa heurística baseia-se nas expressões apresentadas no presente capítulo.

Capítulo 6

Computação de Banda Passante Equivalente de Fluxos Multifractais

Neste capítulo, introduz-se uma heurística para a computação da banda passante equivalente de um fluxo multifractal. A banda passante equivalente é a quantidade mínima de banda passante requerida por um fluxo que possui requisitos de Qualidade de Serviço (QoS), por exemplo probabilidade de perdas e/ou atrasos. Dessa forma, a definição de uma heurística para calcular o valor da banda passante equivalente deve considerar os descritores do tráfego no fluxo, bem como os recursos disponíveis no sistema, como, por exemplo, o tamanho do buffer e a política de atendimento do trabalho que chega ao sistema. Além disso, ressalta-se que o atendimento aos requisitos QoS ocorre em um sentido probabilístico, uma vez que a banda passante equivalente é um valor definido em uma faixa de valores estabelecida pela taxa média e taxa de pico do fluxo que alimenta o sistema[3].

A heurística apresentada, neste capítulo, é usada para avaliar o ganho obtido com a multiplexação estatística de fluxos multifractais. Verifica-se como os descritores desses fluxos impactam no ganho obtido com a multiplexação estatística. Além disso, verifica-se o impacto de uma modelagem monofractal no ganho obtido com a multiplexação estatística de fluxos multifractais.

6.1 Uma Heurística para a Computação de Banda Passante Equivalente de Fluxos Multifractais

Nesta seção, introduz-se uma heurística para computar a banda passante equivalente de um fluxo multifractal. Mostra-se que a heurística derivada é implementada por um algoritmo que tem custo computacional linear na capacidade do canal. O problema discutido, nesta seção, pode ser definido da seguinte forma:

Dado um conjunto de fluxos descritos por suas médias \bar{a}_i , variâncias σ_i^2 e funções Holder $H_i(t)$, qual é a quantidade de banda passante equivalente para que o tamanho máximo de uma fila seja limitada por \hat{q}_{max}^N com probabilidade ϵ ?

A resposta a essa questão requer a determinação de um valor de banda passante, \hat{C} , tal que a seguinte relação seja satisfeita:

$$\begin{aligned} \max_{t \geq 0} \{\hat{A}^N(t) - \hat{A}^N(t/\hat{r}^*) - \hat{C}t(1 - 1/\hat{r}^*)\} - \hat{q}_{max}^N &= 0 \\ \max_{t \geq 0} \{\hat{Q}^N(t)\} - \hat{q}_{max}^N &= 0 \end{aligned} \quad (6.1)$$

onde, $\hat{Q}^N(t)$ é um limite superior para o tamanho da fila (Equação 5.17). O valor de \hat{C} pode ser computado através de métodos numéricos tradicionais, por exemplo, Newton-Rapshon ou Quasi-Newton [61]. Entretanto, nestes métodos a obtenção de uma solução para a equação é dependente do valor inicialmente definido com uma possível solução, tornando essa abordagem inadequada para aplicações de tempo real.

Assumindo-se que o volume de trabalho não-realizado no sistema (atraso máximo) é limitado pelo limiar q_{max}^N , que a política FIFO é usada no atendimento do trabalho que chega ao sistema e que a banda passante equivalente de um fluxo é um valor definido entre a taxa média e a taxa de pico desse fluxo, uma heurística para calcular a banda passante equivalente é apresentada na Figura 6.1. Nessa heurística, determina-se a banda passante equivalente \hat{C} , realizando-se uma busca binária não-limitada (do inglês *Unbound Binary Search* - UBS) no intervalo de valores possíveis. A busca encerra quando a Equação 6.1 é solucionada e o valor inicialmente avaliado nessa busca é definido pela taxa média do fluxo multifractal que alimenta o sistema, acrescida de um pequeno valor.

A UBS é executada em dois passos. No primeiro passo, um valor de banda passante candidato \hat{C} é definido como sendo o valor da taxa média mais um pequeno incremento $\hat{a} + \epsilon$; este valor é então inserido na Equação 6.1. Se esta equação for

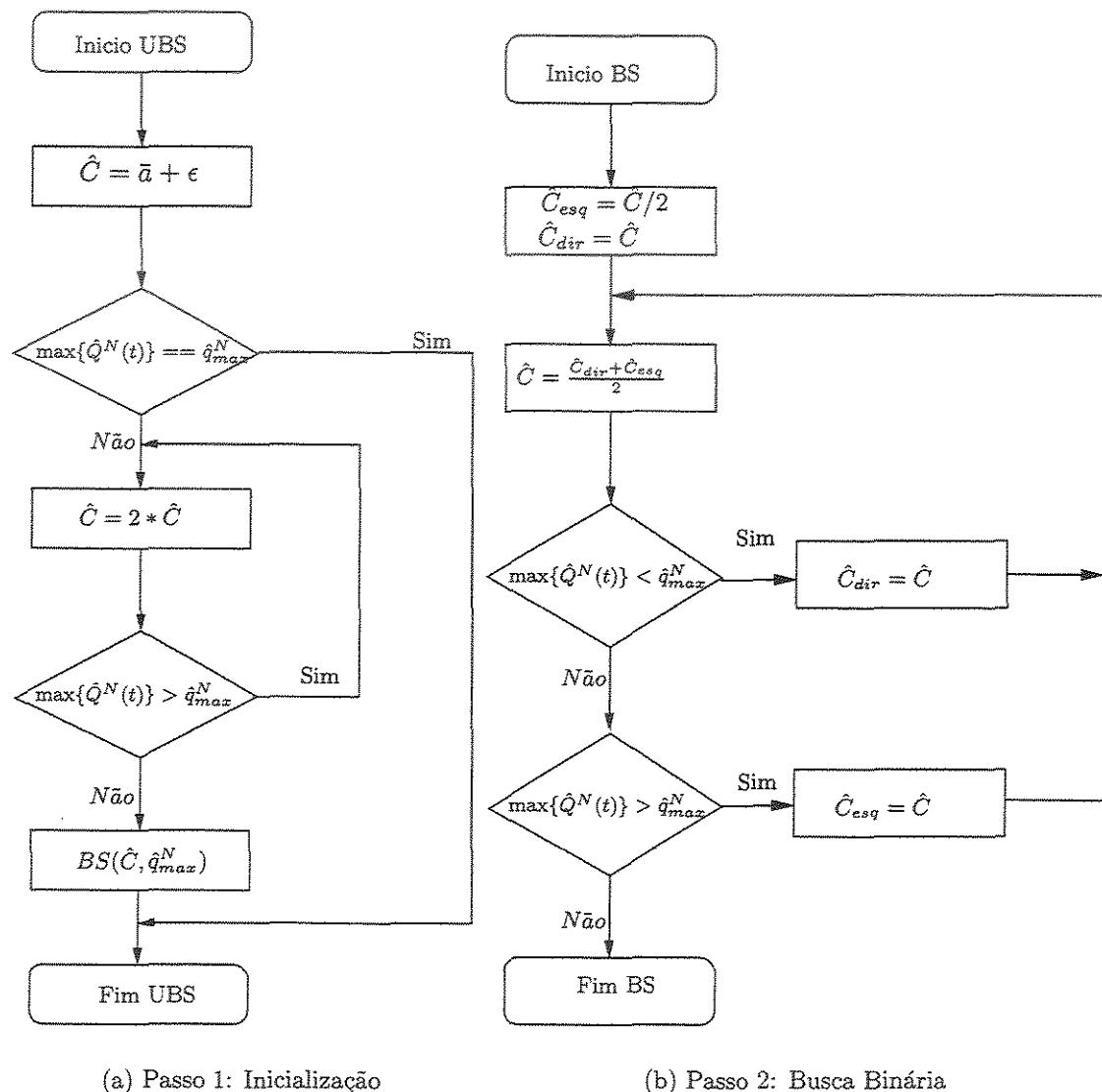


Figura 6.1: O Algoritmo para computar a banda passante equivalente

satisfeta, o valor procurado para a banda passante equivalente foi determinado. Caso contrário, o valor de \hat{C} é repetidamente duplicado até que $\hat{q}_{max}^N > \max_{t \geq 0} \{\hat{Q}^N(t)\}$. O valor de \hat{C} , obtido no primeiro passo da UBS, é usado para delimitar o intervalo $[\hat{C}/2, \hat{C})$ onde uma busca binária é realizada para se determinar o valor de banda passante equivalente. O Teorema 4 estabelece a convergência do algoritmo que implementa esta heurística.

Teorema 4 *A banda passante equivalente do agregado de N fluxos multifractais que alimenta um sistema de filas pode ser computada em no máximo*

$$n = O(\log(C)) \quad (6.2)$$

iterações, onde, C é a capacidade do canal que serve este sistema.

PROVA

Na primeira fase do algoritmo, a banda passante estimada é duplicada a cada iteração. O primeiro valor candidato a banda passante é definido pela taxa média do fluxo acrescido de um pequeno valor ($\hat{C} = \bar{a} + \epsilon$) e o valor máximo que \hat{C} pode assumir é definido pela capacidade do canal C . Portanto, a primeira fase do algoritmo é finalizada em no máximo

$$\begin{aligned} n &= \lceil \log(C - (\bar{a} + \epsilon)) \rceil \\ &= O(\log(C)) \end{aligned} \quad (6.3)$$

iterações.

Na segunda fase, uma busca Binária é realizada no intervalo $(\hat{C}/2, \hat{C}]$. Sabe-se que uma busca Binária realizada em um intervalo $[a, b]$ é concluída em no máximo

$$k = \lceil \log(m) \rceil \quad (6.4)$$

iterações [62], onde, m é a largura do intervalo. Na heurística proposta m é dado por:

$$m = \hat{C}/2.$$

Portanto, o custo computacional da segunda fase do algoritmo é dado por:

$$\begin{aligned}
 n &= \lceil \log(\hat{C}/2) \rceil \\
 &= \lceil \log(\hat{C}) - 1 \rceil \\
 &= O(\log(C))
 \end{aligned}$$

O custo computacional do algoritmo é

$$O(\log(C)) + O(\log(C)) = O(\log(C)) \quad \blacksquare \quad (6.5)$$

6.1.1 Avaliação da Precisão da Heurística

Experimentos de simulação foram realizados para avaliar a heurística proposta anteriormente. Nesses experimentos, um sistema de filas foi alimentado por diferentes fluxos multifractais e o trabalho que chegou ao sistema foi servido a uma taxa constante definida pela banda passante equivalente calculada para esses fluxos. Registrhou-se o volume de trabalho não-realizado no sistema e quanto desse volume excedeu um limiar definido por q_{max} . Calculou-se a probabilidade de violação do limiar q_{max} que é equivalente a probabilidade de transbordo de um buffer que tem o seu tamanho definido por q_{max} . A Tabela 6.1 mostra os resultados obtidos (Banda Passante Equivalente e Probabilidade de Violação) para os diferentes valores do limiar q_{max} e fluxos multifractais que alimentaram o sistema de filas.

Os traços de tráfego utilizados nesse estudo são apresentados na Tabela 3.1 e foram caracterizados (Capítulo 4) por processos envelopes do mBm com o valor da probabilidade de violação igual a 10^{-3} . O valor da probabilidade de violação desses processos envelopes é também o valor esperado para a probabilidade de violação do limiar q_{max} , conforme o modelo de tráfego empregado na definição da heurística. Na Tabela 6.1, verifica-se que os valores da probabilidade de violação estão próximos de 10^{-3} , especialmente quando q_{max} é igual a 10^5 bytes.

Os resultados obtidos são influenciados pela combinação dos seguintes fatores: a precisão da caracterização do processo envelope e a variabilidade do tráfego.

A influência desses dois fatores foi mais claramente destacada nos resultados obtidos quando os traços COS-1057970154, MRA-1057960474 e AIX-1049492523 alimentaram o sistema de filas. Os valores da probabilidade de violação, obtidos quando os traços COS-1057970154 e MRA-1057960474 alimentaram o sistema, difere do valor

Limiar q_{max} (bytes)	Traço de Tráfego	Média	Taxa Pico	Banda Passante Equivalente (bytes)	Probabilidade Violação de q_{max}
1000	dec-pkt-4	253,61	10.740	829,2	0,311083
	20000125-143640	7.354,28	45.478	9.048,9	0,078980
	MEM-1053844177	1.013,83	19.754	2.110,8	0,342978
	MEM-1054459191	1.826,91	26.049	5.330,8	0,176009
	AIX-1049492523	37,46	6.285	66,3	0,386955
	COS-1057970154	8.723,39	33.166	16.233,9	0,018974
	MRA-1057960474	32.010,06	91.192	58.885,7	0,002260
10000	dec-pkt-4			445,1	0,112519
	20000125-143640			8.895,7	0,068718
	MEM-1053844177			1.590,9	0,205606
	MEM-1054459191			2.863,2	0,248672
	AIX-1049492523			48,7	0,036448
	COS-1057970154			13.618,0	0,012936
	MRA-1057960474			52.297,7	0,002307
100000	dec-pkt-4			357,1	0,003765
	20000125-143640			8.053,6	0,068977
	MEM-1053844177			1.336,6	0,049006
	MEM-1054459191			2.145,9	0,019668
	AIX-1049492523			37,4	0,000000
	COS-1057970154			12.914,7	0,000205
	MRA-1057960474			42.482,1	0,000270

Tabela 6.1: Medidas de desempenho obtidas do sistema de filas.

definido para o processo envelope (10^{-3}) em no máximo uma ordem de grandeza. Em cenários onde o limiar q_{max} é pequeno, registrou-se valores de probabilidades de violação que apresentam maior diferença em relação ao valor estabelecido. Esses resultados são atribuídos a alta variabilidade do tráfego, que é apenas aproximada pela caracterização do processo envelope, e a sua consequência é mais destacada quando o limiar q_{max} é pequeno.

No outro extremo dessa avaliação, estão os resultados obtidos quando o traço AIX-1049492523 alimenta o sistema. O cálculo da banda passante equivalente considerou o limiar largo estabelecido pelo processo envelope, e assim superestimou o valor da banda passante equivalente de fato requerida pelo traço AIX-1049492523. Essa superestimação é, particularmente, observada quando o tamanho do limiar q_{max} é igual a 10^5 . Nesse cenário, o impacto da variabilidade do tráfego é amenizado pelo tamanho de q_{max} que juntamente com o valor superestimado da banda passante estabelecem um nível de utilização baixo ao sistema tendo como consequência a não violação do limiar q_{max} . Na Figura 6.2, mostra-se a evolução do trabalho não-realizado no sistema quando este é alimentado pelos traços AIX-1049492523, COS-1057970154 e MRA-1057960474 e o limiar q_{max} é igual a 10^5 bytes. Verifica-se com os resultados apresentados nos gráficos da Figura 6.2 os comportamentos descritos anteriormente. Em outras palavras, observa-se que a banda passante equivalente calculada quando o traço COS-1057970154 alimenta o sistema de fila é um limiar justo, enquanto que ocorre uma subestimação(superestimação) da banda passante equivalente, quando o sistema é alimentado pelo traço MRA-1057960474(AIX-1049492523).

6.2 Ganho Obtido com a Multiplexação Estatística

Nesta seção, avalia-se o ganho gerado pela multiplexação estatística de tráfego multifractal. Mostra-se as expressões matemáticas derivadas para medir os ganhos obtidos com a multiplexação estatística de fluxos multifractais. Apresenta-se, ainda, os resultados do estudo numérico que avaliou o ganho obtido ao se considerar diferentes cenários de tráfego, onde um sistema é alimentado por fluxos multifractais reais e sintéticos. O impacto de uma modelagem monofractal no ganho obtido com a multiplexação estatística de fluxos multifractais foi também medido nos estudos realizados.

A grande vantagem da multiplexação estatística é o uso eficiente dos recursos, obtido pela transferência alternada do tráfego oriundo de diferentes fluxos, o que permite o suporte a um número maior de fluxos quando comparado com o número de

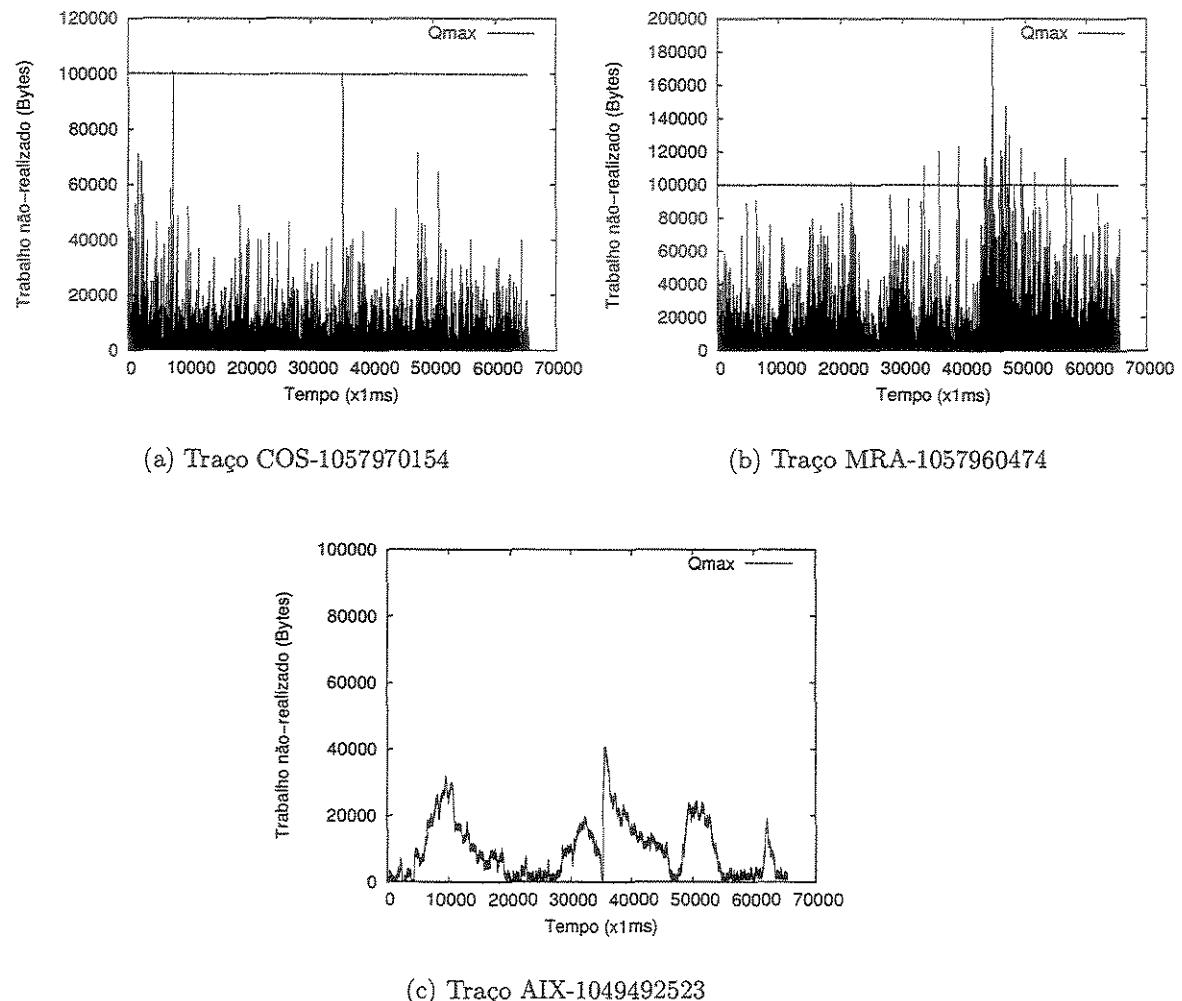


Figura 6.2: Evolução do trabalho não-realizado em um sistema alimentado por fluxos multifractais e servido por suas respectivas bandas passante equivalentes

fluxos suportado pela comutação de circuitos. Estes benefícios podem ser mensurados, calculando-se o ganho com a multiplexação estatística $G(n)$. O ganho é quantificado na razão definida pelo somatório das bandas passante equivalentes calculadas para cada fluxo, desconsiderando a multiplexação, e a banda passante equivalente calculada para o agregado gerado pelos n fluxos multiplexados, ou seja:

$$\begin{aligned} G(n) &= \frac{\sum_{i=1}^n EB_i}{EB(n)} & (6.6) \\ &= \frac{\left[\sum_{i=1}^n \int_0^{\hat{t}_i^*} \bar{a}_i + \kappa \sigma_i H_i(x) x^{H_i(x)-1} dx - \int_0^{\hat{t}_i^*/\hat{r}_i^*} \bar{a}_i + \kappa \sigma_i H_i(x) x^{H_i(x)-1} dx - K \right]}{\left[\hat{t}_i^* (1 - 1/\hat{r}_i^*) \right]} \\ &= \frac{\left[\int_0^{\hat{t}^{**}} \sum_{i=1}^n \bar{a}_i + \kappa \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 H_i(x) x^{2H_i(x)-1} \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 x^{2H_i(x)} \right)^{\frac{1}{2}}} dx - \int_0^{\hat{t}^{**}/\hat{r}_n^*} \sum_{i=1}^n \bar{a}_i + \kappa \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 H_i(x) x^{2H_i(x)-1} \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 x^{2H_i(x)} \right)^{\frac{1}{2}}} dx - K' \right]}{\left[\hat{t}^{**} (1 - 1/\hat{r}_n^*) \right]} \end{aligned}$$

onde, EB_i e $EB(n)$ são a banda passante equivalente do i -ésimo fluxo multiplexado e a banda passante equivalente do agregado de n fluxos, respectivamente. \hat{t}_i^* e \hat{t}^{**} são, respectivamente, as escalas de tempo obtidas com a computação da banda passante equivalente do i -ésimo fluxo e dos n fluxos multiplexados.

Um caso especial é a multiplexação de fluxos homogêneos. Neste caso, o ganho é definido pela razão entre a banda passante equivalente de um único fluxo multiplicado por n e a banda passante calculada para o agregado de n fluxos homogêneos. O ganho com a multiplexação estatística $G(n)$ é dado por:

$$\begin{aligned} G(n) &= \frac{nEB_1}{EB(n)} & (6.7) \\ &= \frac{\left[\int_0^{\hat{t}^*} \bar{a} + \kappa \sigma H(x) x^{H(x)-1} dx - \int_0^{\hat{t}^*/\hat{r}_1^*} \bar{a} + \kappa \sigma H(x) x^{H(x)-1} dx - K \right]}{\left[\hat{t}^* (1 - 1/\hat{r}_1^*) \right]} \\ &= \frac{\left[\int_0^{\hat{t}^{**}} \bar{a} + n^{\frac{-1}{2}} \kappa \sigma H(x) x^{H(x)-1} dx - \int_0^{\hat{t}^{**}/\hat{r}_n^*} \bar{a} + n^{\frac{-1}{2}} \kappa \sigma H(x) x^{H(x)-1} dx - K' \right]}{\left[\hat{t}^{**} (1 - 1/\hat{r}_n^*) \right]} \end{aligned}$$

onde, EB_1 e $EB(n)$ são respectivamente a banda passante equivalente de um único fluxo e a banda passante equivalente de um agregado de n fluxos. \hat{t}^* e \hat{t}^{**} são, respectivamente, as escalas de tempo obtidas com a computação da banda passante equivalente de um único fluxo e dos n fluxos. K é o tamanho do buffer no multiplexador e $K' = \frac{K}{n}$.

Traço	Função Holder $H(t)$
Linear	$t/2, 0 + 0, 5$
Quadrático	$1, 9t^2 - 1, 9t + 0, 98$
Cúbico	$2, 1t^3 - 2, 0t^2 + 0, 85$

Tabela 6.2: Descritores de traços de tráfego sintético usados para alimentar um sistema de filas

6.2.1 Avaliação do Ganho

Experimentos de simulação foram realizados para avaliar as expressões derivadas anteriormente. A Figura 6.3 mostra o ganho obtido com a multiplexação estatística quando os fluxos apresentam diferentes funções Holder (Tabela 6.2) e diferentes valores de variância. A taxa média de chegada \bar{a} é igual a 1.000 e a variância do fluxo indicada pelo nome “Baixa” é $\sigma^2 = 10.000$. As curvas chamadas de “Média” e “Alta” têm valores de variância definidos por $10\sigma^2$ e $100\sigma^2$, respectivamente. Nota-se que o valor da variância tem um impacto fundamental no valor do ganho. Quando a função Holder é definida pelo polinômio quadrático (Figura 6.3.a), o ganho máximo é de 1,35 para fluxos com baixa variância enquanto para fluxos que apresentam alta variância o ganho máximo é maior que 3,5. Um comportamento similar é observado quando a função Holder é definida pelos polinômios Cúbico (Figura 6.3.b) e Linear (Figura 6.3.c). No caso da função Holder, definida pelo polinômio Cúbico, o maior ganho com a multiplexação estatística, quando o fluxo apresenta alta variância, é de 1,81, enquanto esse valor é de apenas 1,05, quando o fluxo apresenta baixa variância. Quando a função Holder é definida pelo polinômio Linear e o fluxo multiplexado apresenta alta variância, o maior ganho verificado com a multiplexação é de 3,6, enquanto esse valor é de apenas 1,6, quando o fluxo multiplexado apresenta baixa variância.

O ganho também é influenciado pelos valores da função Holder. Na realidade, o valor médio verificado na função Holder até a escala de tempo de interesse é o valor relevante, ou seja,

$$\frac{\int_0^{t^{**}} H(x)dx}{t^{**}} \quad (6.8)$$

onde, t^{**} é a escala de tempo de interesse.

A influência dessa relação, escala de tempo de interesse e função Holder, pode ser observada comparando-se o comportamento das curvas nas Figuras 6.3.a e 6.3.b.

Verifica-se que os ganhos obtidos com a multiplexação estatísticas de traços que têm suas funções Holder definidas por um polinômio Quadrático são maiores que os ganhos obtidos com a multiplexação estatística de traços que têm suas funções Holder definidas por um polinômio Cúbico, mesmo quando ambos os traços apresentam valores de média e variância iguais. Por exemplo, fluxos com variância “média” apresentam ganho máximo de 1,9 e 1,2 quando as funções Holder são definidas pelos polinômios Quadrático e Cúbico, respectivamente.

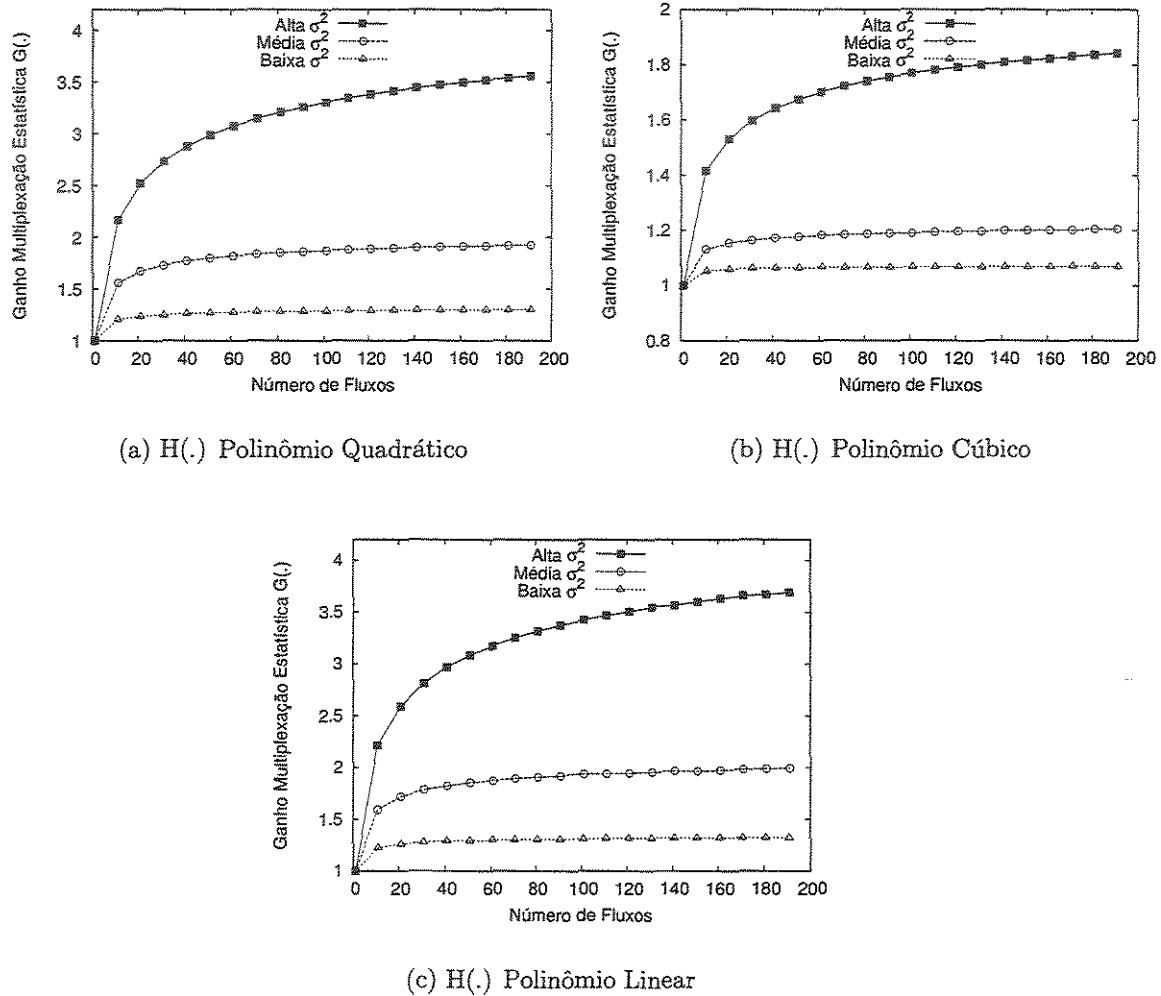


Figura 6.3: Ganho Obtido com Multiplexação Estatística usando traços de tráfego sintético

O ganho com a multiplexação estatística também foi investigado, usando-se traços de tráfego real. A Figura 6.4 mostra o resultado dos experimentos realizados quando os traços MEM-1053844177, MEM-1054459191 e 20000125-143640-1 (Tabela 3.1) são

multiplexados. O traço 20000125-143640-1 apresenta a maior variância entre os traços avaliados. O ganho obtido, quando o traço 20000125-143640-1 é multiplexado, é maior que o ganho verificado quando os demais traços são multiplexados. Novamente, verifica-se a influência da variância no ganho obtido com a multiplexação estatística. O comportamento da função Holder $H(t)$, limitada a escala de tempo de interesse, também influencia o ganho verificado. Esses resultados confirmam os resultados obtidos anteriormente quando traços de tráfego sintético são multiplexados.

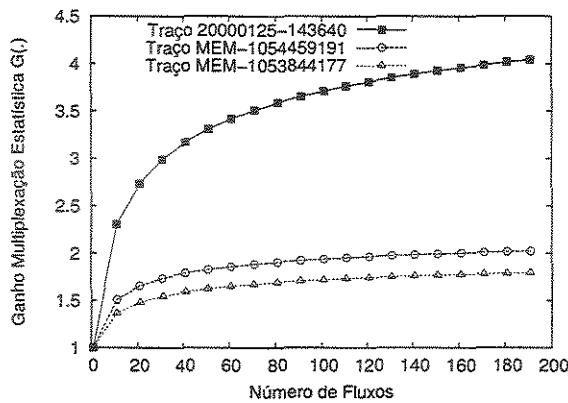


Figura 6.4: Ganho obtido com Multiplexação Estatística usando traços de tráfego real

Para verificar se uma modelagem monofractal pode ser usada para dimensionamento dos recursos em uma rede com fluxos multifractal, o processo envelope do fBm (Equação 4.3) é derivado para um traço com função Holder definida pelo polinômio Quadrático (Tabela 6.2). A Figura 6.5 mostra o ganho obtido com a multiplexação estatística, considerando-se a caracterização do fluxo realizada pelo processo envelope do mBm, denotado por $H(.)$, e pelo processo envelope do fBm, denotado por H , para valores de variância alto e médio. Verifica-se que os ganhos obtidos com as duas caracterizações são diferentes, por exemplo, quando os fluxos possuem um valor de variância “média”, a maior diferença é um pouco maior que uma unidade, enquanto essa diferença aproxima-se de duas unidades para valores de variância “alta”. Este comportamento é atribuído ao fato do parâmetro Hurst superestimar a dinâmica do tráfego multifractal resultando em uma superestimativa dos recursos, e consequentemente reduzindo o ganho com a multiplexação estatística.

A imprecisão da modelagem monofractal foi também avaliada quando o sistema era alimentado por traços de tráfego real. A Figura 6.6 mostra os resultados obtidos quando o traço 20000125-143640-1 é caracterizado pelo processo envelope do fBm.

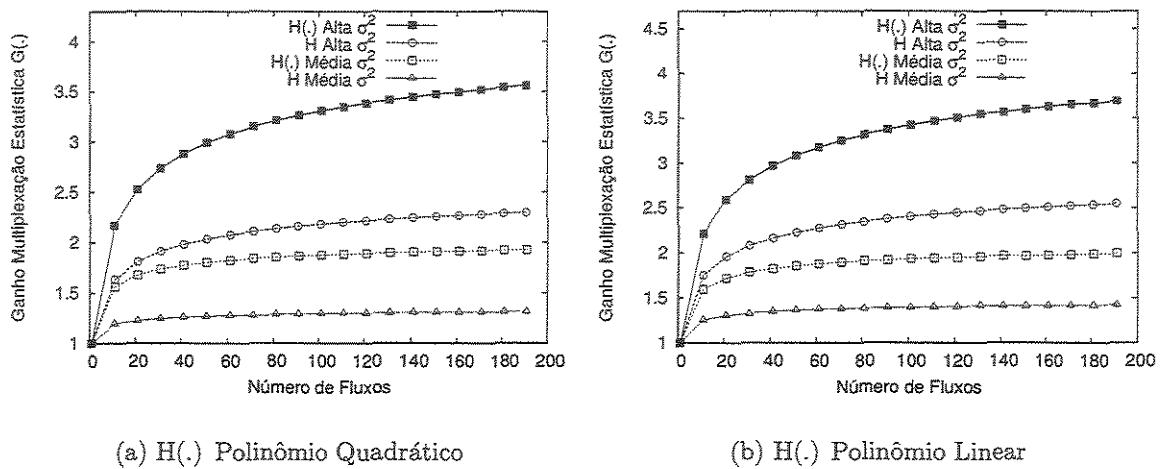


Figura 6.5: Comparação dos ganhos obtidos com a Multiplexação Estatística usando as modelagens Monofractal e Multifractal

Novamente, pode-se verificar que essa caracterização produz uma superestimativa dos recursos, e, por conseguinte, um ganho reduzido, (curva H alta σ^2), em relação ao ganho verificado com a modelagem multifractal (curva $H(\cdot)$ alta σ^2).

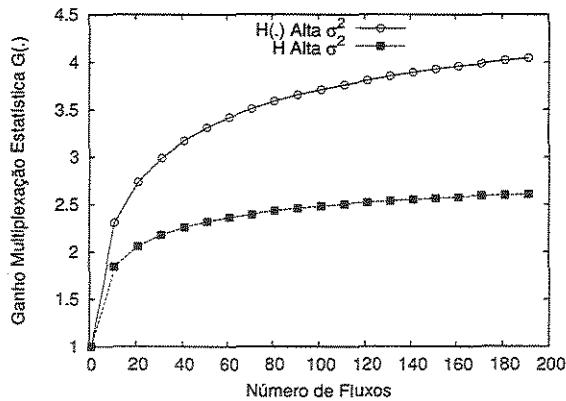


Figura 6.6: Comparação dos ganhos obtidos com a Multiplexação Estatística de traços de tráfego real usando as modelagens Monofractal e Multifractal

6.3 Resumo Conclusivo do Capítulo 6

Neste capítulo, introduziu-se uma heurística para o cálculo da banda passante equivalente de um fluxo multifractal que requer uma determinada Qualidade de Serviço. Mostrou-se que o algoritmo que implementa a heurística tem custo linear no tamanho

da capacidade do canal.

Expressões para se calcular o ganho obtido com a multiplexação estatística de fluxos multifractais foram definidas. Mostrou-se resultados dos experimentos que avaliaram estas expressões em cenários onde o sistema foi alimentado tanto por fluxos multifractais sintético e quanto por fluxos multifractais real. Nestes experimentos, a banda passante equivalente dos fluxos multiplexados foi derivada, usando-se a heurística proposta. Mostrou-se que o ganho obtido com a multiplexação estatística é influenciado pela variância dos fluxos e também pelo comportamento das funções Holder associada a esses fluxos.

Estudou-se o impacto no ganho com a multiplexação estatística de uma modelagem monofractal empregada para caracterizar fluxos multifractais. Mostrou-se que devido a superestimação da dinâmica do tráfego multifractal, gerada pela caracterização monofractal, ganhos menores são obtidos com a multiplexação, tendo-se como principal consequência a subutilização dos recursos do sistema.

No próximo capítulo, o processo envelope do mBm é utilizado na definição de um mecanismo de policiamento capaz de monitorar fluxos multifractais. Mostra-se, ainda, os resultados de um estudo que verificou o impacto das estatísticas multifractais no dimensionamento do mecanismo Balde Furado.

Capítulo 7

Policíamento de Tráfego Multifractal

Neste capítulo, estuda-se o policiamento de fluxos de tráfego que apresentam estatísticas multifractais. Tendo um fluxo sido admitido no domínio de uma rede, deve-se garantir que o volume de trabalho gerado por este fluxo esteja de acordo com os seus descritores evitando-se, assim, que a rede entre em desequilíbrio. Um mecanismo ideal de policiamento permite que o tráfego de um fluxo entre no domínio de uma rede, se, e somente se, este tráfego estiver de acordo com os seus descritores. O tráfego nesses fluxos deve ser descartado ou identificado como tendo baixa prioridade em relação aos demais, se os valores pré-estabelecidos dos descritores forem violados.

Um mecanismo de policiamento adequado para policiar tráfego multifractal é introduzido neste capítulo. Avaliou-se o tempo de reação do mecanismo de policiamento proposto em face à violação dos descritores do fluxo. Além disso, sendo o mecanismo proposto baseado em janelas, verificou-se se tal mecanismo é sensível ou não ao tamanho da janela de tempo definida para o policiamento do tráfego.

O Balde Furado é o mecanismo de policiamento adotado em diferentes padrões de arquitetura de rede. Antes de apresentar o mecanismo Balde Furado Multifractal, avalia-se o desempenho do mecanismo Balde Furado no policiamento de fluxos multifractal.

7.1 O Mecanismo Balde Furado e o Tráfego Multifractal

O mecanismo de policiamento Balde Furado (do inglês *Leaky Bucket-LB*) tem sido adotado em vários padrões de arquitetura rede. Este mecanismo limita o volume de tráfego que entra em um domínio de rede usando um processo envelope que é da seguinte forma:

$$L(t) = \rho t + \sigma \quad (7.1)$$

onde, ρ é a taxa de geração de permissões (fichas) e σ é o tamanho do balde.

O mecanismo LB opera como descrito a seguir. Um pacote de um fluxo policiado pelo LB, para entrar no domínio de uma rede, deve consumir fichas que são geradas a taxa constante ρ . Caso não haja fichas, o pacote é identificado como sendo tráfego violador de seus descritores. O tamanho do balde σ limita a quantidade máxima de tráfego que pode entrar no domínio de uma rede, em um instante t .

O mecanismo LB assume que a variância do acumulado do tráfego policiado cresce linearmente, o que não se verifica quando o tráfego é auto-similar (monofractal). Essa imprecisão do mecanismo LB pode ser compensada, definindo-se altos valores para σ . Entretanto, esta solução apresenta o problema de que rajadas de tráfego violador possam ser consideradas, erroneamente, em acordo com os descritores desse tráfego. Em [5], esse problema é discutido quando o tráfego monofractal é policiado pelo LB.

Foram realizados experimentos de simulação, usando traços de tráfego real, para mostrar que o mecanismo Balde Furado também requer tamanhos de balde não-realistas quando tráfego multifractal é policiado. A taxa de geração de fichas é definida a partir da taxa média de chegada do fluxo, e o tamanho do balde é calculado usando uma busca binária não-limitada sujeita à probabilidade de violação que se deseja verificar no fluxo policiado.

A Figura 7.1 mostra o tamanho do balde em função da razão entre a taxa média de chegada e a taxa de geração de fichas, para os traços MEM-1054459191, MEM-1053844177 e 20000125-143640-1. Verifica-se tamanhos de balde grande quando o valor da taxa de geração de fichas é definido pelo valor da taxa média de chegada. Mesmo quando a taxa de geração é duas vezes maior que a taxa média de chegada, o tamanho do balde permanece grande. Neste caso, os tamanhos do balde são 75.120, 77.866 e 967.820 bytes, respectivamente, para os traços MEM-1054459191, MEM-

1053844177 e 20000125-143640-1.

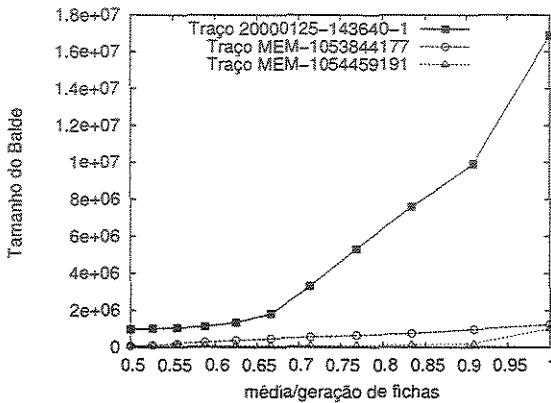


Figura 7.1: Tamanho de Balde versus a razão taxa média de chegada e taxa de geração de fichas.

7.2 O Mecanismo Balde Furado Multifractal

Nesta seção, o mecanismo de policiamento Balde Furado Multifractal é apresentado. Este mecanismo tem a sua dinâmica de policiamento baseada na dinâmica do mecanismo Balde Furado Fractal introduzido em [5] e que se mostrou adequado para policiar tráfego monofractal. O mecanismo Balde Furado Fractal é estendido para lidar com tráfego multifractal e é chamado de Balde Furado Multifractal (BFMF).

O volume de trabalho aceito pelo BFMF é dado por:

$$\hat{L}(t) = \int_0^t \bar{a} + \kappa\sigma H(x)x^{H(x)-1}dx + S \quad (7.2)$$

onde, κ é uma constante que expressa a probabilidade de violação do volume de tráfego permitido, \bar{a} , σ e $H(t)$ são, respectivamente, a taxa média de chegada, o desvio padrão e a função Holder do fluxo.

O BFMF opera como descrito a seguir. Uma janela de tempo é definida com duração de τ unidades de tempo. A taxa de chegada durante essa janela de tempo é comparada com a taxa média de chegada declarada \bar{a} . Se a taxa de chegada verificada na janela τ excede \bar{a} , o acumulado do trabalho que chegou durante a janela de tamanho τ é comparado ao valor de $\hat{L}(t)$ (Equação 7.2) calculado no intervalo de duração τ . Se ocorrer violação desse valor, os pacotes que chegam imediatamente após a janela de tempo em que ocorreu a violação são marcados com baixa prioridade.

A janela de tempo é então aumentada em τ unidades, ou seja, uma janela de tempo com duração de 2τ é agora considerada. Esta nova janela inicia no instante de tempo em que ocorreu a violação da taxa média de chegada declarada. Se o acumulado do tráfego durante a janela de tempo 2τ viola o volume de tráfego permitido por $\hat{L}(t)$, os pacotes em excesso, do volume total, são marcados também com baixa prioridade. Nesta marcação, deve-se descontar os pacotes eventualmente identificados como de baixa prioridade nas janelas anteriores. Enquanto a taxa de chegada ultrapassar a taxa média de chegada declarada, a janela de tempo é incrementada em τ unidades de tempo. Por outro lado, quando a taxa de chegada permanece abaixo do valor declarado, a janela de tempo é reduzida ao valor de τ unidades de tempo e a taxa média de chegada continua a ser verificada. Destaca-se que o BFMF opera com um processo envelope específico que pode ser redefinido dinamicamente, caso isso seja necessário, realizando medições no fluxo policiado.

Uma descrição matemática da dinâmica do BFMF é apresentada a seguir. Seja $C(\tilde{t} + n\tau)$ define o acumulado do número de pacotes chegando durante o intervalo $[\tilde{t}, \tilde{t} + n\tau]$:

$$C(\tilde{t} + n\tau) = A(\tilde{t} + n\tau) - A(\tilde{t})$$

onde, $A(.)$ é o acumulado do tráfego, em pacotes, até o instante t .

O BFMF verifica se $C(\tilde{t} + n\tau)$ excede a média de pacotes que chega durante o intervalo $n\tau$, ou seja, $\bar{a}n\tau$. Se isto ocorrer, o BFMF verifica se as chegadas excedem o limitante máximo, $\lambda(\tilde{t} + n\tau) = \hat{L}(\tilde{t} + n\tau) - \hat{L}(\tilde{t})$, permitido pelo processo envelope. Se esse limitante é também violado, o volume de trabalho em excesso não marcado na janela anterior é marcado, isto é, $C(\tilde{t} + n\tau) - \lambda(\tilde{t} + n\tau) - C(\tilde{t} + (n-1)\tau) + \lambda(\tilde{t} + (n-1)\tau)$ pacotes são marcados. Então, o BFMF aumenta a janela de tempo ($n = n + 1$) e repete todo o processo. Quando a taxa de chegada é menor que o valor declarado \bar{a} , a janela de tempo é reduzida para o valor de τ unidades de tempo ($n = 1$). A Figura 7.2 mostra a dinâmica do mecanismo BFMF, conforme descrito anteriormente.

7.3 Avaliação do Balde Furado Multifractal

Experimentos de simulação foram realizados para verificar o comportamento dos mecanismos Balde Furado e Balde Furado Multifractal no policiamento de fluxos que apresentam natureza multifractal. A Figura 7.3 apresenta as probabilidades de

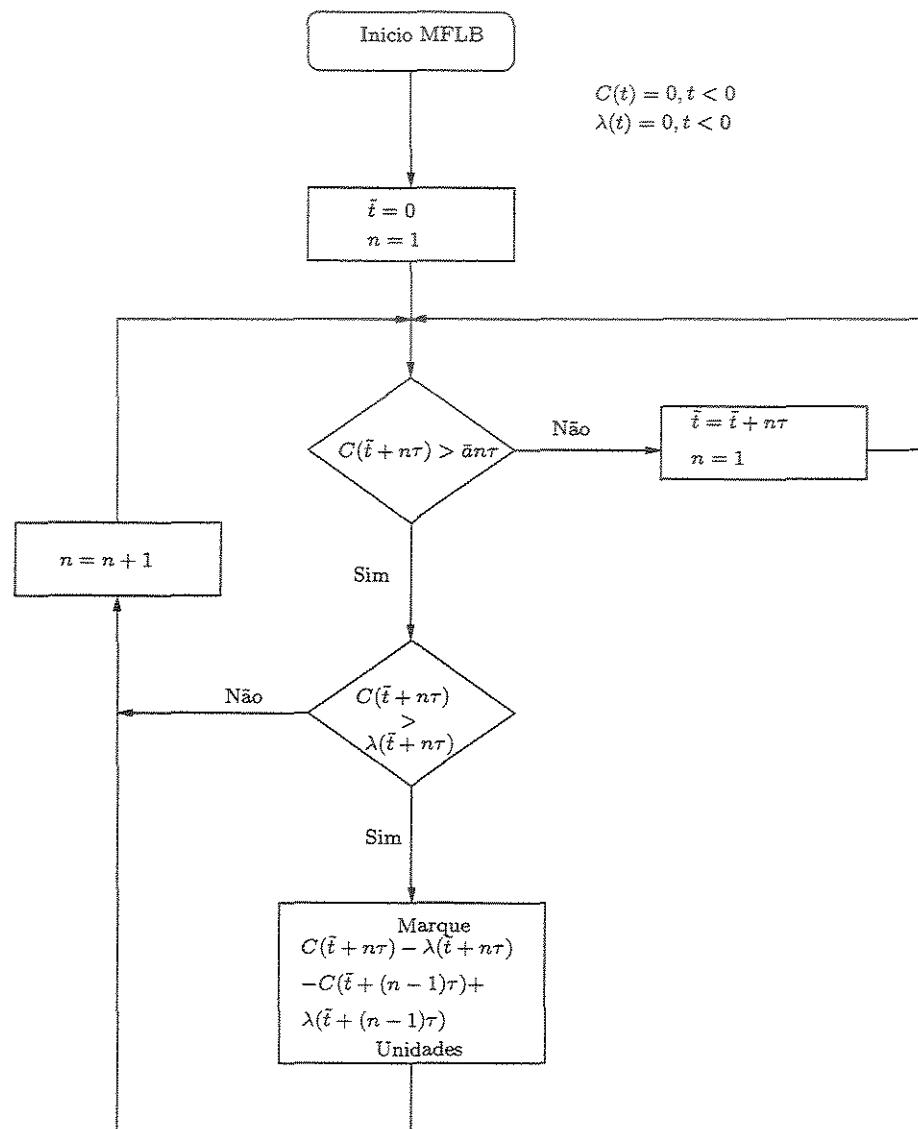


Figura 7.2: O Mecanismo Balde Furado Multifractal

violação geradas por um mecanismo ideal, bem como aquelas produzidas pelo mecanismo BFMF e BF com taxa de geração de fichas de 1,5 e de 2 duas vezes a taxa média de chegadas. Em um mecanismo ideal, a probabilidade de violação salta de um valor pequeno para 1, logo que a taxa média de chegadas declarada é violada. A probabilidade de violação do BFMF apresenta um comportamento similar ao comportamento do mecanismo ideal, exceto que a reação às violações verificadas ocorre quando estas representam 10% do valor nominal da taxa média. Esse atraso na reação é aceitável para um mecanismo não-ideal. Por outro lado, o Balde Furado não distingue claramente um fluxo violador de um fluxo em conformidade com seus descritores, mesmo quando a violação tende para 100% do valor nominal da taxa média.

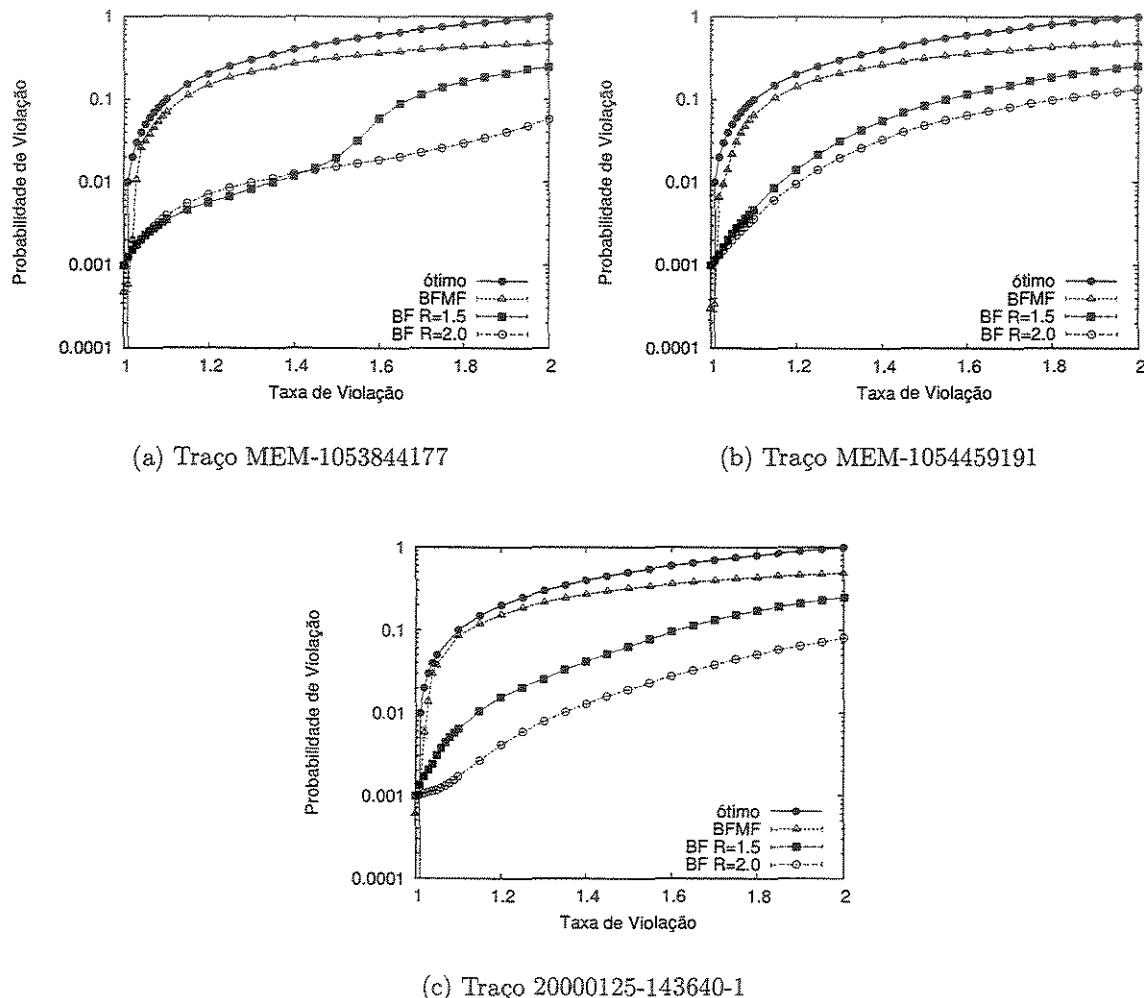


Figura 7.3: Uma comparação entre BFMF e BF no policiamento de fluxos que violam o contrato de tráfego.

O mecanismo BFMF compara o acumulado de trabalho que chega ao sistema com o acumulado de trabalho permitido pelo processo envelope do BFMF em vários instantes de tempo. A sensibilidade desses resultados ao tamanho da janela de tempo é avaliado ao se investigar o comportamento do mecanismo BFMF com janela de tempo de 100, 1000 e 5000 vezes maior que o tamanho de janela ($\tau = 1ms$) usado nos experimentos anteriores. A Figura 7.4 mostra a probabilidade de violação em função da taxa de violação imposta ao tráfego com os diferentes tamanhos de janelas. Os resultados dos experimentos confirmam a ausência de influência do tamanho da janela de tempo.

Em todos os exemplos realizados, verificou-se que o mecanismo Balde Furado Multifractal reage da mesma forma para os diferentes tamanhos de janela avaliados. Verifica-se uma pequena diferença na reação do mecanismo quando as violações ocorreram em baixas taxas. Esse comportamento é explicado pelo fato de uma janela de tempo maior acomodar variações no tráfego, não detectando de imediato as violações dos descritores. Quando as violações aumentam, o mecanismo reage da mesma forma para os diferentes tamanhos de janela. Esses resultados reforçam a robustez do mecanismo Balde Furado Multifractal, como um mecanismo de policiamento adequado ao monitoramento de fluxos multifractais.

7.4 Resumo Conclusivo do Capítulo 7

Neste capítulo, um novo mecanismo de policiamento foi introduzido. Este mecanismo foi avaliado em sua habilidade de policiar tráfego multifractal. Verificou-se o tempo de reação as violações impostas aos descritores dos fluxos e, também, a sensibilidade do mecanismo à freqüência com que o tráfego é avaliado. Em ambas avaliações, o mecanismo apresentou um comportamento que pode ser comparado ao comportamento de um mecanismo de policiamento ideal, ou seja, reagiu logo que as violações ocorrem e mostrou-se insensível à freqüência com que o tráfego é avaliado.

Mostrou-se, também, neste capítulo os resultados da avaliação realizada com o mecanismo de policiamento Balde Furado (BF) quando este é dimensionado para policiar tráfego multifractal. Os resultados obtidos com essa avaliação mostraram que o reduzido número de parâmetro do BF juntamente com as suposições equivocadas acerca da variação do tráfego tornam o dimensionamento do BF um tarefa difícil. Além disso, os valores com que os seus parâmetros são dimensionados, para compensar as suposições equívocas acerca do tráfego, são não-realistas o que produz

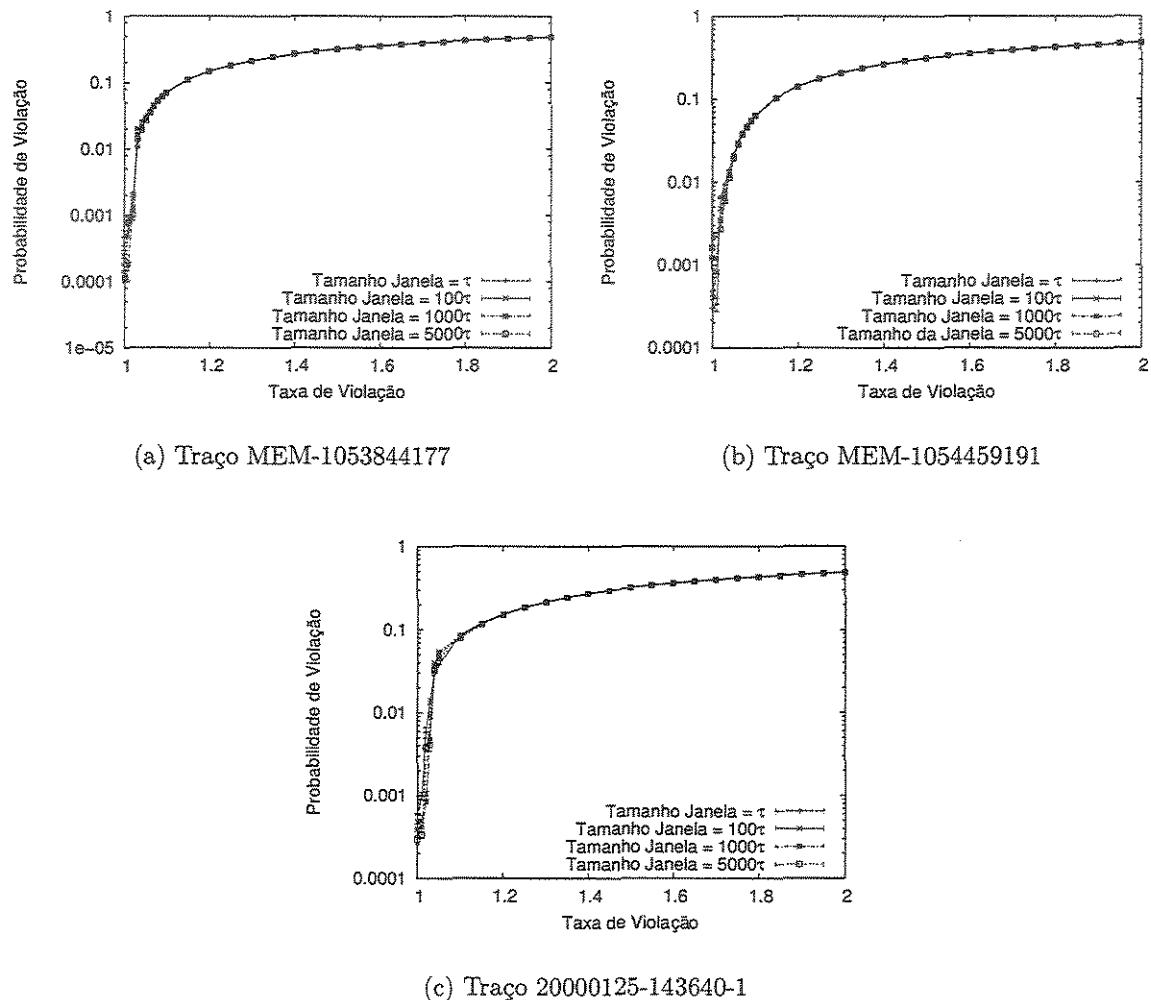


Figura 7.4: Análise de Sensibilidade do BFMF

efeitos colaterais, tais como a não distinção entre tráfego violador e não-violador, identificados em estudos anteriores envolvendo tráfego monofractal.

No próximo capítulo, as conclusões desta tese são apresentadas. Além disso, um conjunto de trabalhos futuros, baseados na caracterização do tráfego multifractal proposta nesta tese, é apresentado.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

8.1 Conclusões

O foco desta tese foi o estudo do tráfego de redes que apresenta estatísticas multifractais. Mais especificamente, definiu-se um modelo de tráfego para fluxos multifractais e resolveu-se um sistema de filas alimentado por este tipo de tráfego. Na resolução da fila, considerou-se que o volume de trabalho que chega ao sistema era limitado pelo processo envelope do movimento Browniano multifractal. Mostrou-se uma heurística para a computação da banda passante equivalente derivada a partir da caracterização do sistema de fila obtida com o modelo de tráfego proposto. Definiu-se, ainda, um mecanismo de policiamento capaz de monitorar tráfego multifractal.

No Capítulo 3, avaliou-se a natureza multifractal dos traços de tráfego usados para alimentar o sistema de filas caracterizado pelo modelo de tráfego proposto. Esses traços possuem o registro do tráfego gerado em diferentes ambientes, acadêmico e industrial, e em diferentes épocas. A avaliação realizada considerou tanto a detecção de multifractalidade desse tráfego quanto as escalas de tempo nas quais as estatísticas multifractais se manifestam. Verificou-se que essas escalas de tempo são dependentes do ambiente em que o tráfego foi gerado, o que corroborou resultados anteriores.

No Capítulo 4, definiu-se o processo envelope do mBm. Em experimentos de simulação, avaliou-se a caracterização de fluxos de tráfego obtida com esse processo envelope, tendo-se caracterizado tanto tráfego multifractal coletado em redes operacionais quanto tráfego multifractal gerado de forma sintética. Os limiares estabelecidos pelo processo envelope do mBm reproduziram de forma qualitativa as variações verificadas no tráfego registrado nos traços. Em algumas caracterizações, especial-

mente as realizadas em traços de tráfego sintético, verificou-se violações do limiar estabelecido pelo processo envelope. Entretanto, estas violações são próprias de uma modelagem baseada em processos envelopes probabilísticos e estavam de acordo com o dimensionamento realizado para o processo envelope.

O processo envelope do mBm foi empregado na derivação da solução de uma fila e de um mecanismo de policiamento, apresentados, respectivamente, nos Capítulos 5 e 7. Na solução da fila, considerou-se que o trabalho que chegava ao sistema era limitado pelo processo envelope do mBm. Este modelo de tráfego foi avaliado tendo-se comparado a probabilidade de violação medida, obtida a partir da simulação de uma fila, e a probabilidade de violação calculada. Os resultados dessa avaliação mostraram que as medidas de desempenho derivadas com o modelo proposto são limiares superiores para as medidas obtidas com a simulação da fila. Verificou-se uma maior precisão nos resultados derivados quando o sistema apresenta altas utilizações. Este comportamento foi atribuído à precisão do processo envelope usado para limitar o volume de trabalho que chega ao sistema.

No Capítulo 6, uma heurística para computação de banda passante equivalente de um fluxo multifractal foi apresentada. A heurística proposta utilizou a caracterização obtida com o modelo de tráfego, apresentado no Capítulo 5, de um sistema de filas que é alimentado por fluxos multifractais. Mostrou-se que o algoritmo que implementa a heurística proposta possui custo computacional $\log(C)$ onde, C é a capacidade da linha que serve o sistema. Experimentos de simulação foram realizados para avaliar a heurística proposta. As medidas de Qualidade de Serviço obtidas do sistema confirmaram que com a heurística proposta obtém-se valores para a banda passante equivalente que são efetivos no atendimento do trabalho que chega ao sistema de filas. No Capítulo 6, mostrou-se também um estudo que avaliou o ganho obtido com a multiplexação estatística de fluxos multifractais. As diferentes características dos fluxos foram avaliadas, tendo-se concluído que o ganho obtido com a multiplexação estatística é influenciado pela variabilidade do tráfego e pelo comportamento da função Holder limitada à escala de tempo de interesse. Mostrou-se ainda o impacto no ganho obtido com a multiplexação estatística de fluxos multifractais, quando estes fluxos são caracterizados por um modelo monofractal. Verificou-se que devido a superestimativa da dinâmica dos fluxos multifractais, gerada pela modelagem monofractal, os recursos do sistema são subutilizados.

No Capítulo 7, um mecanismo de policiamento, chamado Balde Furado Multifractal, capaz de monitorar tráfego multifractal foi apresentado. Avaliou-se o tempo

de reação deste mecanismo às violações dos descritores do tráfego policiado, bem como a sua sensibilidade à freqüência com que esse tráfego era avaliado. Concluiu-se que o mecanismo Balde Furado Multifractal apresenta um comportamento muito próximo daquele apresentado por um mecanismo de policiamento ideal, ou seja, o mecanismo proposto reagiu rapidamente as violações e é insensível à freqüência com que o tráfego é avaliado. Ainda no Capítulo 7, mostrou-se os resultados do estudo realizado para dimensionar o mecanismo Balde Furado para policiar tráfego multifractal. Evidenciou-se as dificuldades de se realizar tal dimensionamento e, ainda, mostrou-se que com o dimensionamento obtido o mecanismo Balde Furado não identifica claramente as violações dos descritores do tráfego policiado.

8.2 Trabalhos Futuros

A modelagem do fenômeno do cascateamento não-uniforme (multifractalidade), verificado em fluxos de tráfego IP, foi discutida nesta tese. Entretanto, acredita-se que alguns dos tópicos abordados e outros que não foram abordados diretamente, mas estão relacionados com o foco principal desta tese, constituem terreno fértil para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

No Capítulo 6, estudou-se uma heurística para a computação da banda passante equivalente de fluxos multifractais. Na definição dessa heurística, considerou-se cenários homogêneos em termos de requisitos de Qualidade de Serviço. Em uma rede multiserviços, os recursos são dimensionados para atender o tráfego que apresenta diferentes requisitos de Qualidade de Serviço. Em [44], investigou-se estimadores de banda passante equivalente para redes multiserviços sob a suposição de que o tráfego caracterizado apresenta o fenômeno do cascateamento uniforme (monofractalidade). Acredita-se que um estudo similar possa ser desenvolvido sob a suposição de que o tráfego apresenta multifractalidade, desde que escalas de tempo menores sejam empregadas na análise do tráfego. A heurística proposta no Capítulo 6 pode ser usada como ponto de partida para a definição de estimadores de banda passante equivalente para os diferentes tipos de tráfego em uma rede multiserviço.

Em [16, 63], atribuiu-se aos mecanismos de controle do TCP/IP as origens da multifractalidade. Entretanto, em momento algum quantificou-se o impacto do tráfego gerado por cada protocolo da pilha TCP/IP na multifractalidade identificada no tráfego. No Capítulo 6, os estudos realizados para medir o ganho obtido com a multiplexação estatística de fluxos multifractais mostraram que este ganho é limitado pelo

comportamento da função Holder restrita a escala de tempo de interesse. Acredita-se que seja pertinente a quantificação da multifractalidade no tráfego produzido pelos diferentes protocolos que formam a pilha TCP/IP. Para essa quantificação, pode-se calcular o valor médio de cada função Holder associada a cada componente do tráfego analisado. O valor médio da função Holder deve ser calculado considerando-se a escala de tempo de interesse de um sistema de filas que é alimentado pelo tráfego analisado. O valor médio da função Holder pode ser usado como uma medida comparativa entre os diferentes componentes do tráfego avaliado, permitindo assim quantificar o impacto do tráfego gerado por cada protocolo da pilha TCP/IP na multifractalidade verificada no tráfego.

Em [64], avaliou-se estratégias para tarifação de fluxos de tráfego sob a suposição de que estes fluxos apresentavam estatísticas monofractais. Considerou-se o volume de tráfego e o tempo de duração da transmissão como as variáveis a serem avaliadas na tarifação efetuada pela rede. O estudo realizado considerou o uso de duas estratégias, uma gulosa e uma ótima, para a escolha dos fluxos com as maiores possibilidades de gerarem a melhor rentabilidade do ponto de vista da tarifação efetuada pela rede. Comparou-se as rentabilidades obtidas com as diferentes estratégias e constatou-se que a estratégia gulosa apresentava rentabilidade similar àquela obtida com a estratégia ótima. Um trabalho futuro que pode ser desenvolvido, a partir da teoria apresentada nesta tese, consiste em estudar tais estratégias de escolhas dos fluxos e das variáveis usadas no esquema de tarifação de fluxos de tráfego que apresentam multifractalidade.

Em [15], fluxos de vídeo foram avaliados em uma escala de tempo menor que a duração de um quadro, tendo-se verificado a ocorrência de multifractalidade. A teoria desenvolvida nesta tese pode ser aplicada na caracterização de fluxos de vídeo que apresentam multifractalidade. Assim, como um trabalho futuro, propõe-se o desenvolvimento de um estudo que avalie a caracterização obtida com o processo envelope do mBm quando o tráfego a ser modelado são fluxos de vídeo. Pode-se ainda realizar um estudo comparativo com outras abordagens desenvolvidas para a caracterização de fluxos de vídeo[65].

Em [66], estudou-se a política de escalonamento GPS (*Generalized Processor Sharing*), sob as seguintes suposições: i) o tráfego que chega um sistema de filas apresenta monofractalidade e ii) este tráfego é policiado pelo mecanismo Balde Furado Fractal[5]. Em [66], derivou-se expressões para se estimar métricas de Qualidade de Serviço, tais como atraso e *backlog*. Supondo-se que o tráfego que chega ao sistema

de filas apresenta estatísticas multifractais, como uma proposta de mais um trabalho futuro, pode-se desenvolver um estudo para se generalizar as expressões obtidas em [66]. O mecanismo de policiamento apresentado no Capítulo 7 pode ser empregado para policiar o tráfego que chega ao sistema de filas, substituindo-se desta forma o mecanismo Balde Furado Fractal como a função de caracterização do tráfego.

Bibliografia

- [1] N.G. Duffield and N. O'Connell. Large deviations and overflow probabilities for the general single server queue, with applications. In *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, number 118, pages 363–374, 1995.
- [2] Anwar I. Elwalid and Debasis Mitra. Effective bandwidth of general markovian traffic sources and admission control of high speed networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1(3):329–343, 1993.
- [3] F. P. Kelly. *Stochastic Networks: Theory and Applications*, chapter Notes on effective bandwidths, pages 141–168. Oxford University Press, 1996.
- [4] Gustavo de Veciana, George Kesisidis, and Jean C. Walrand. Resource management in wide-area ATM networks using effective bandwidths. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13(6):1081–1090, 1995.
- [5] N.L.Fonseca, G.S. Mayor, and C.A.V Neto. On the equivalent bandwidth of self-similar source. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 10(2):104–124, April 2000.
- [6] Ilkka Norros. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks. *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 13(6):953–962, 1995.
- [7] C. Courcoubetis, V. A. Siris, and G. Stamoulis. Application of the many sources asymptotic and effective bandwidths to traffic engineering. *Telecommunication Systems*, 12(2-3):167–191, 1999.
- [8] C. Courcoubetis and V. A. Siris. Procedures and tools for analysis of network traffic measurements. *Performance Evaluation*, 48(1-4):5–23, 2002.

- [9] S. Molnar, T. D. Dang, and I. Maricza. On the queue tail asymptotics for general multifractal traffic. In *the Second International IFIP-TC6 Networking Conference on Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; and Mobile and Wireless Communications*, pages 105–116. Springer-Verlag, 2002.
- [10] K. Park and T. Tuan. Performance evaluation of multiple time scale TCP under self-similar traffic conditions. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 10(2):152–177, 2000.
- [11] Sheng Ma and Chuanyi Ji. Modeling heterogeneous network traffic in wavelet domain. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 9(5):634–649, 2001.
- [12] Gilberto S. Mayor. *Performance Modeling and Network Management for Self-Similar Traffic*. PhD thesis, University of Southern California, 1997.
- [13] Vinay J. Ribeiro, Rudolf H. Riedi, Matthew S. Crouse, and Richard G. Baraniuk. Multiscale queuing analysis of long-range-dependent network traffic. In *IEEE INFOCOM*, pages 1026–1035, 2000.
- [14] W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson. On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version). *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pages 1–15, February 1994.
- [15] A. Erramilli, O. Narayan, A. Neidhart, and I. Saniee. Multi-scaling models of TCP/IP and sub-frame VBR video traffic. *Journal of Communications and Networks*, 3(4):383–395, December 2001.
- [16] Anja Feldmann, Anna C. Gilbert, Polly Huang, and Walter Willinger. Dynamics of ip traffic: a study of the role of variability and the impact of control. In *Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*, pages 301–313. ACM Press, 1999.
- [17] R. Riedi and J. Vehel. Multifractal Properties of TCP Traffic: a Numerical Study. In *IEEE Transactions on Networking*, October 1997. Submitted.
- [18] P. Abry, R. Baraniuk, P. Flandrin, R. Riedi, and D. Veitch. The multiscale nature of network traffic discovery, analysis, and modeling. *IEEE Signal Processing Magazine*, 19(3):28–46, May 2002.

- [19] D. Veitch. <http://www.cubinlab.ee.mu.oz.au/~darryl/>. D. Veitch page, July 2003.
- [20] Cesar A.V. Melo and N.L.S Fonseca. An Envelope Process for Multifractal Traffic Modeling. In *The IEEE International Conference on Communications*, pages 2168–2173, Paris, 2004 2004.
- [21] Cesar A.V. Melo e N.L.S Fonseca. Um Processo Envelope para Modelagem de Tráfego Multifractal. In *XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 87–101, Natal, Maio 2003.
- [22] Cesar A.V. Melo and N.L.S. Fonseca. On the Equivalent Bandwidth of Multi-fractal IP Flows. *submitted to the Computer Networks journal*, 2004.
- [23] Cesar A.V. Melo and N.L.S Fonseca. Statistical Multiplexing of Multifractal Flows. In *The IEEE International Conference on Communications*, pages 1135–1140, Paris, June 2004.
- [24] Cesar A.V. Melo e N.L.S Fonseca. Computação de Banda Passante Equivalente de Fluxos Multifractais. In *XXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, pages 73–86, Gramado, Maio 2004.
- [25] R.Cruz. A Calculus for Network Delay, part i: Network Elements in Isolation. *IEEE Transaction of Information Theory*, 1(37):114–131, January 1991.
- [26] Z.Liu, P.Nain, and D.Towsley. Exponencial Bounds with an Application to Call Admission. Technical report, INRIA, B.P. 93, 06902, Sophia Antipolis Cedex, France, 1994.
- [27] E.W. Knightly. H-BIND: A new approch to providing statistic guarantees to VBR traffic. In *IEEE INFOCOM*, volume 1, pages 1091–1099, San Francisco, CA, March 1996.
- [28] D.E. Wrege, E.W. Knightly, H. Zhang, and J.Liebeherr. Deterministic delay bounds for VBR video in packet-switching networks: Fundamental limits and practical trade-offs. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(3):352–362, 1996.

- [29] M. Reisslein, J. Lassetter, S. Ratnam, O. Lotfallah, F. H. Fitzek, and S. Panchanathan. Video traces for network performance evaluation. Intenet Site: <http://traces.eas.asu.edu>, July 2003.
- [30] R. Cruz. A Calculus for Network Delay, part ii: Network Elements in Isolation. *IEEE Transaction of Information Theory*, 1(37):132–141, January 1991.
- [31] M. Reisslein, K.W. Ross, and S.Rajagopal. A framework for guaranteeing statistical qos. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 10(1):27–42, February 2002.
- [32] D. Ferrari and D. Verma. A scheme for real-time channel establishment in wide-area network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 8(3):368–379, April 1990.
- [33] T. Wu and E.W. Knightly. Enforceable and efficient service provisioning. *Computer communications Journal: Special Issue on Multimedia Communications over the Internet*, 23(14-15):1377–1388, August 2000.
- [34] O. Yaron and M. Sidi. Performance and stability of communication networks via robust exponential bounds. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1(3):372–385, June 1993.
- [35] Misha Schwartz. *Broadband Integrated Networks*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
- [36] D. Starobinski and M. Sidi. Stochastically bounded burstiness for communication networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(1):206–212, January 2000.
- [37] Vern Paxson and Sally Floyd. Wide area traffic: the failure of Poisson modeling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(3):226–244, 1995.
- [38] X.Yu, L. Thng, and Y.Jiang. Generalized processor sharing with long-range dependent traffic input. In *9th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication System*, pages 224–232, 2001.
- [39] I. Norros. A storage model with self-similar input. *Queueing Systems*, 18:387–396, 1994.

- [40] J.Beran. Long-range dependence in variable-bit-rate video traffic. *IEEE Transactions on Communications*, 1995.
- [41] R. H. Riedi, M. S. Crouse, V. J. Ribeiro, and R. G. Baraniuk. A multifractal wavelet model with application to network traffic. *IEEE Transactions on Information Theory*, 45(4):992–1018, 1999.
- [42] G.S. Mayor e C.A.V. Neto N.L.S. Fonseca. Policing and statistical multiplexing of self-similar sources. In *GLOBCOM'99*, pages 1071–1076, 1999.
- [43] Cesar A. V. Neto, Nelson L. S. da Fonseca, and Mike Devetsikiotis. Network Self-Sizing Under Fractal Traffic by Use of Envelope Processes. In *9th IEEE Workshop on Computer-Aided Modeling, Analysis and Design of Communication Links and Networks*, New York-New York, May 2002.
- [44] Andre C. Drummond, Nelson L. S. da Fonseca, and Mike Devetsikiotis. A comparison of measurement-based equivalent bandwidth estimators. In *The 10th IEEE Workshop on Computer-Aided Modeling, Analysis and Design of Communication Links and Networks*, Dallas, Texas, 2004.
- [45] R. Peltier and J.L.Vehel. Multifractional Brownian motion: definition and preliminary results. Technical report, INRIA, 1995.
- [46] Vern Paxson. Fast, approximate synthesis of fractional gaussian noise for generating self-similar network traffic. In *ACM SIGCOMM*, volume 27, pages 5–18, 1997.
- [47] J.E.Cavanaugh, Y.Wang, and J.W.Davis. *Handbook of Statistics 21: Stochastic Processes: Modeling and Simulation*, volume 21, chapter Self-similar processes and their wavelet analysis. Elsevier Science, 2003.
- [48] O. Narayan. Exact asymptotic queue length distribution for fractional Brownian traffic. *Advances in Performance Analysis*, 1(1):39–63, 1998.
- [49] R. Addie, P. Mannersalo, and I. Norros. Most probable paths and performance formulae for buffers with gaussian input traffic. *European Transactions on Telecommunications*, 13(3):183–196, 2002.

- [50] M. Lau, A. Erramilli, J. Wang, and W. Willinger. Self-similar traffic generation:the random midpoint displacement algorithm and its properties. In *The IEEE International Conference on Communications*, pages 466–472, 1995.
- [51] H.J. Jeong, D. McNickle, and K. Pawlikowski. Fast self-similar teletraffic generation based on fgn and wavelets. In *IEEE International Conference on Networks*, pages 75–82, 1999.
- [52] I. Norros, P. Mannersalo, and J.L.Wang. Simulation of fractional Brownian motion with conditionalized random midpoint displacement. *Advances in Performance Analysis*, 2(1):77–101, 1999.
- [53] Sheng Ma and Chuanyi Ji. Modeling of video traffic using wavelets. *IEEE Communications Letters*, 2(4):100–103, April 1998.
- [54] Xusheng Tian, Jie Wu, and Chuanyi Ji. A unified framework for understanding network traffic using independent wavelet models. In *IEEE INFOCOM*, 2002.
- [55] A.Erramilli, O.Narayan, A.Neidhart, and I.Sanee. Performance impacts of multi-scaling in area TCP/IP traffic. In *IEEE INFOCOM*, pages 352–359, April 2000.
- [56] Wand Network Research Group. <http://wand.cs.waikato.ac.nz>. Internet Site, July 2003. The University of Waikato.
- [57] Lawrence Berkeley National Laboratory. <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/dec-pkt.html>. Intenet Site, July 2003.
- [58] D. Veitch, P. Abry, P. Flandrin, and P. Chainais. Infinitely divisible cascade analysis of network traffic data. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Istanbul, June 2000.
- [59] Vaclav E. Benes. *General Stochastic Process in the Theory of Queues*. ADDISON-WESLEY, 1962.
- [60] D. Veitch and P. Abry. A wavelet based joint estimator of the parameters of long-range dependence. *IEEE Transactions on Information Theory*, 45(3):878–897, April 1999.
- [61] J. Nocedal and S.J. Wright. *Numerical Optimization*. Springer, 1999.

- [62] Udi Manber. *Introduction to Algorithms: A Creative Approach*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989.
- [63] A.Feldman, A.C. Gilbert, W.Willinger, and T.G.Krtz. Looking behind and beyond self-similarity: On scaling phenomena in measured wan traffic. In *the 35th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, pages 269–280, 1997.
- [64] Cesar A. V. Melo and Nelson L.S. da Fonseca. Greedy Policy for the Admission Control of Self-Similar Traffic. *Revista Brasileira de Telecomunicações*, 18(2):218–224, 2003.
- [65] M. Krunz and A. Makowski. Modeling video traffic using m/g/infinity input processes: A compromise between markovian and lrd models. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(5):733–748, June 1998.
- [66] F. M. de Pereira, N. L. S. da Fonseca, and D. S. Arantes. On the performance of generalized processor sharing servers under long-range dependent traffic. *Computer Networks*, 40(3):413–431, 2002.