

**Modelos de tráfego para fluxos gerados pelo
protocolo UDP**

Larissa Oliveira Ostrowsky

Dissertação de Mestrado

Modelos de tráfego para fluxos gerados pelo protocolo UDP

Larissa Oliveira Ostrowsky

Dezembro de 2005

Banca Examinadora:

- Nelson Luis Saldanha da Fonseca (Orientador)
- Lee Luan Ling
FEEC- UNICAMP
- Edmundo R. M. Madeira
IC-UNICAMP
- Rosa Maria Meri Leão (Suplente)
LAND- UFRJ

IDADE BC
CHAMADA _____
EX _____
VBO BC/ 68495
DC 16-P.00123-06
IV _____
CÓD 11.00
A 24/05/06
CPD _____

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IMECC DA UNICAMP**
Bibliotecário: Maria Júlia Milani Rodrigues - CRB8a / 2116

Ostrowsky, Larissa Oliveira

Os7m Modelos de tráfego para fluxos gerados pelo protocolo UDP /
Larissa Oliveira Ostrowsky -- Campinas, [S.P. :s.n.], 2005.

Orientador : Nelson Luis Saldanha da Fonseca

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Computação.

1. Modelagem de tráfego. 2. Tráfego UDP. 3. Multifractais. 4.
Wavelets (Matemática). 5. Scaling. I. Fonseca, Nelson Luis Saldanha
da. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Computação.
III. Título.

Título em inglês: Traffic models for UDP streams

Palavras-chave em inglês (Keywords): 1. Traffic modeling. 2. UDP traffic. 3. Multifractals.
4. Wavelets (Mathematics). 5. Scaling.

Área de concentração: Redes e Multimídia

Titulação: Mestre em Ciência da Computação

Banca examinadora: Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca (IC-UNICAMP)
Prof. Dr. Lee Luan Ling (FEEC-UNICAMP)
Prof. Dr. Edmundo R. M. Madeira (IC-UNICAMP)

Data da defesa: 12/12/2005

Modelos de tráfego para fluxos gerados pelo protocolo UDP

Este exemplar corresponde à redação final da
Dissertação devidamente corrigida e defendida
por Larissa Oliveira Ostrowsky e aprovada pela
Banca Examinadora.

Campinas, 12 de Dezembro de 2005.

Nelson Luis Saldanha da Fonseca
(Orientador)

Dissertação apresentada ao Instituto de Com-
putação, UNICAMP, como requisito parcial para
a obtenção do título de Mestre em Ciência da
Computação.

TERMO DE APROVAÇÃO

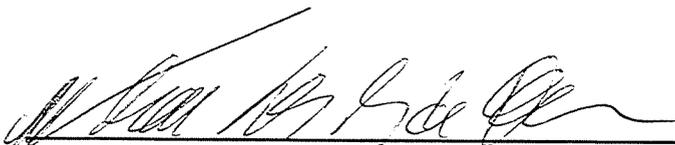
Tese defendida e aprovada em 12 de dezembro de 2005, pela Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:



Prof. Dr. Lee Luan Ling
FEEC / UNICAMP



Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira
IC / UNICAMP



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

Resumo

Uma característica importante do tráfego gerado pelo protocolo *Internet Protocol* (IP) é a existência de padrões *scaling*, que impactam significativamente o desempenho dos mecanismos de controle de tráfego e que, por isto vem sendo foco de atenção de diversas pesquisas. A natureza *scaling* do tráfego IP tem sido alvo de bastante polêmica. Em pequenas escalas de tempo o tráfego IP é altamente variável e a variabilidade difere da natureza fractal encontrada em grandes escalas de tempo, não existindo ainda um consenso em relação a natureza do tráfego IP nestas pequenas escalas de tempo. No presente estudo, foram revisadas as evidências da multifractalidade nas pequenas escalas de tempo, através da análise experimental de diversos traços de tráfego real. Constatou-se que não se pode generalizar a natureza dos fluxos do protocolo IP e do protocolo *Transmission Control Protocol* (TCP) como monofractal ou como multifractal, enquanto que a natureza do fluxo do protocolo *User Datagram Protocol* (UDP) é sempre multifractal.

O crescente uso do protocolo UDP pelas emergentes aplicações que necessitam requisitos de tempo real altera consideravelmente a natureza *scaling* do tráfego IP, dado que este tipo de tráfego não reage a situações de congestionamento. Apesar de existirem diversos modelos para tráfego TCP, pouca atenção tem sido dada a modelagem de tráfego UDP. Outra contribuição desta dissertação é a proposta de um modelo de tráfego para fluxos UDP, desenvolvido a partir da caracterização das distribuições estatísticas de traços reais. Este modelo consegue reproduzir com precisão várias características do tráfego UDP real, inclusive a natureza *scaling*. O modelo foi validado via simulação e a precisão dos resultados do modelo para avaliar um sistema de filas foi comparada às precisões do Modelo Wavelet Multifractal (MWM) e do Modelo MAP Multifractal. Resultados indicam que o modelo proposto reproduz melhor a ocupação em uma fila para diferentes capacidades de armazenamento e taxas de serviço do que os outros modelos avaliados. A geração de traços sintéticos a partir do modelo adotado pode ser realizada em pequenos intervalos de tempo. Assim, o modelo proposto é adequado para o dimensionamento de recursos da rede e provisionamento de Qualidade de serviço.

Abstract

An important characteristic of the traffic generated by IP protocol is the existence of scaling, since it has great impact on the performance of traffic control mechanism. Therefore, it has been the focus of attention in many researches. The scaling nature of IP traffic has generated lots of controversy. At small time scales the traffic is very irregular and the variability is different from that found in fractal nature at large scales. There is no general agreement in relation to the nature of the traffic at these small time scales. In the present study, the evidences of multifractality at small time scales were revised via experimental analyses of several real traffic traces. It was concluded that it is not possible to generalize that the nature of IP and TCP flows is either monofractal or multifractal, while the nature of the UDP flows is always multifractal.

The increasing use of the UDP protocol by real time applications is changing substantially the scaling nature of IP traffic, since this type of traffic does not react to congestion situations. Although there are models for TCP traffic, not much attention has been given to the modeling of UDP flows. Another contribution of this dissertation is a proposition of UDP traffic model, developed from the characterization of the statistics distributions of real traces. This model can reproduce with precision several characteristics of UDP real traffic, including the scaling nature. The model was validated via simulation and the precision of results of the model was compared with the precisions of the MWM and MAP models. Results indicate that the proposed model better reproduces the queue occupation for different storage capacities and service rates than the others evaluated models. The generation of synthetic traces using the adopted model can be realized with low execution times. Thus, the proposed model is acceptable to the dimension of network resources measurement and to provide Quality of Service.

Agradecimentos

Aos meus pais, Roseli e Meyer, por fornecerem todas as condições para que eu me dedicasse aos estudos com tranqüilidade.

Ao meu orientador Prof. Nelson Luis S. da Fonseca, pelo incentivo, dedicação e amizade.

Aos professores que aceitaram participar da banca examinadora, pelas correções e sugestões.

Ao colegas César Augusto V. Melo e Carlos Bellora, pela ajuda e apoio no desenvolvimento desta dissertação.

Às meninas da república, que certamente foram responsáveis por muitos momentos divertidos durante este ano.

Às amigas que fiz durante o período do meu mestrado e que desejo manter por toda a vida.

À FAPESP, pelo suporte financeiro, fundamental para o desenvolvimento deste projeto.

Sumário

Resumo	vii
Abstract	viii
Agradecimentos	ix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos da Dissertação	2
1.2 Estrutura da Tese	3
2 Características <i>scaling</i> do tráfego de Redes	4
2.1 Fenômeno <i>scaling</i>	5
2.1.1 Auto-similaridade	5
2.1.2 LRD e processos $1/f$	6
2.1.3 Multifractalidade	7
2.2 Detecção da natureza <i>scaling</i> do tráfego	8
2.2.1 Diagrama <i>Logscale</i>	8
2.2.2 Diagrama <i>Multiscale</i>	10
2.2.3 Estimativa da função de <i>Hölder</i>	11
2.3 Considerações parciais	12
3 Análise do comportamento <i>scaling</i> do tráfego IP	13
3.1 Pesquisas relacionadas	13
3.2 Descrição dos traços analisados	15
3.3 A natureza <i>scaling</i> do tráfego IP	16
3.4 Impacto dos protocolos de transporte TCP e UDP no tráfego IP	21
3.5 Impacto da multifractalidade em sistemas de filas	23
3.6 Pesquisa sobre as causas da multifractalidade	25
3.7 Considerações parciais	30

4	Modelagem de tráfego multifractal	32
4.1	Modelo wavelet multifractal	32
4.2	Modelo MAP multifractal	37
4.3	Considerações parciais	39
5	Modelos de tráfego para fluxos UDP	41
5.1	Descrição dos traços utilizados nos experimentos	42
5.2	Metodologia utilizada	43
5.3	Identificação das distribuições dos traços reais	44
5.4	Derivação do modelo hierárquico com quatro estados	53
5.5	Derivação do modelo com dois estados	55
5.6	Derivação do modelo hierárquico com oito estados	57
5.7	Gerador de tráfego	63
5.8	Validação dos modelos	65
5.9	Considerações parciais	78
6	Conclusões	80
A	Ajuste das Distribuições	82
B	Distribuições Estatísticas	90
B.1	Distribuição Weibull	90
B.2	Distribuição Beta	90
B.3	Distribuição Exponencial	90
B.4	Distribuição Uniforme	91
	Bibliografia	92

Lista de Tabelas

3.1	Descrição dos traços analisados.	16
3.2	Valores de Δ^* dos fluxos IP, TCP e UDP dos traços estudados.	16
3.3	Conclusões do <i>scaling</i> em pequenas escalas de tempo.	21
3.4	Composição das diferenças entre chegadas dos pacotes.	26
3.5	Composição dos tamanhos dos pacotes pequenos e grandes.	28
3.6	Composição dos pacotes do tipo ACK e <i>dados</i>	30
5.1	Tabela com informações dos traços estudados	43
5.2	Valores de corte das distribuições das durações das rajadas de pacotes dos traços estudados.	50
5.3	Tabela com parâmetros da distribuição do tamanho dos pacotes.	50
5.4	Tabela com parâmetros da distribuição do tempo entre chegadas.	51
5.5	Tabela com parâmetros das distribuições das durações das rajadas.	51
5.6	Valores de corte das distribuições das durações das rajadas e dos tempos entre as chegadas dos pacotes dos traços estudados.	59
5.7	Tabela com tempos de geração para diferentes tamanhos de traços	78
5.8	Características dos modelos analisados	79

Lista de Figuras

2.1	Quantidade de pacotes que chegam em escalas de tempo de 0,1ms, 1ms, 10ms e 100ms respectivamente (traço TXS-1111527905).	6
2.2	Diagramas <i>Logscale</i> de q-ésima ordem do fluxo IP do traço MEM-1111247410.	9
2.3	Diagrama Multiscale e Diagrama Multiscale Linear do fluxo IP do traço MEM-1111247410.	11
3.1	Log-log plot dos momentos estatísticos do processo incremento agregado dos fluxos IP, TCP e UDP dos traços ANL-1111548257 e MEM-1111247410.	18
3.2	Diagramas <i>Logscale</i> de q-ésima ordem do fluxo IP do traço ANL-1111548257.	19
3.3	Diagramas <i>Logscale</i> de q-ésima ordem do fluxo TCP do traço ANL-1111548257.	20
3.4	Diagramas <i>Logscale</i> de q-ésima ordem do fluxo UDP do traço ANL-1111548257.	20
3.5	Diagrama Multiscale e Diagrama Multiscale Linear do fluxo IP (a), TCP (b) e UDP (c) do traço ANL-1111548257.	22
3.6	Diagrama Multiscale e Diagrama Multiscale Linear do fluxo IP (a), TCP (b) e UDP (c) do traço TXS-1111527905.	23
3.7	Plot da função de Hölder do traço TXS-1113503155.	24
3.8	Plot da função de Hölder do traço MEM-1111247410.	25
3.9	Diagrama <i>Multiscale</i> e Diagrama <i>Multiscale</i> Linear do traço composto pelos pacotes pertencentes às rajadas densas (a) e do traço composto pelos pacotes pertencentes às rajadas esparsas (b) do traço TXS-1111527905.	27
3.10	Diagrama <i>Multiscale</i> e Diagrama <i>Multiscale</i> Linear do traço composto pelos pacotes com tamanho pequeno e médio (a) e do traço composto pelos pacotes com tamanho médio e grande (b) do traço TXS-1111527905.	29
3.11	Diagrama Multiscale e Diagrama Multiscale Linear do traço composto pelos pacotes do tipo ACK (a) e do traço composto pelos pacotes do tipo <i>dados</i> (b) do traço TXS-1111527905.	31
4.1	Relacionamento entre os descendentes da esquerda e da direita.	35
5.1	Distribuição dos tamanhos dos pacotes UDP dos traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (b) e UFL-1095079334 (c).	45

5.2	Ajuste da distribuição Beta para a distribuição dos tamanhos dos pacotes do estado <i>um</i> - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e do estado <i>dois</i> - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).	47
5.3	Ajuste das distribuições Exponencial e <i>Weibull</i> para a distribuição das diferenças de tempo entre as chegadas dos pacotes do estado <i>um</i> - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e do estado <i>dois</i> - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).	48
5.4	Distribuição das durações das rajadas dos pacotes do estado <i>um</i> - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e do estado <i>dois</i> - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).	49
5.5	Ajuste das distribuições Exponencial e <i>Weibull</i> para a distribuição das durações das rajadas maiores que x segundos dos pacotes do estado <i>um</i> - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e para a distribuição das durações das rajadas maiores que y segundos dos pacotes do estado <i>dois</i> - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).	52
5.6	Diagrama do modelo com quatro estados.	53
5.7	Ajuste das distribuições Exponencial e <i>Weibull</i> para a distribuição das durações das rajadas de pacotes do estado <i>um</i> - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e do estado <i>dois</i> - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).	56
5.8	Diagrama do modelo com dois estados.	57
5.9	Distribuição dos tempos entre as chegadas dos pacotes com tamanhos menores que 750 bytes - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e maiores que 750 bytes - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).	58
5.10	Ajuste das distribuições Exponencial e <i>Weibull</i> para a distribuição dos tempos entre chegadas dos pacotes menores que 750 bytes que são maiores que w segundos - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e para a distribuição dos tempos entre chegadas dos pacotes maiores que 750 bytes que são maiores que z segundos - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).	60
5.11	Diagrama do modelo com oito estados.	61
5.12	Algoritmo de geração dos traços sintéticos do modelo com quatro estados.	64

5.13	Tamanhos médios da fila de espera das simulações do traço real e dos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados, pelo modelo MWM e pelo modelo MAP de 16 e 32 estados do traço BWY-1069762448, variando o valor de utilização.	67
5.14	Tamanhos médios da fila de espera das simulações do traço real e dos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados, pelo modelo MWM e pelo modelo MAP de 16 e 32 estados do traço BWY-1069224416, variando o valor de utilização.	68
5.15	Tamanhos médios da fila de espera das simulações do traço real e dos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados, pelo modelo MWM e pelo modelo MAP de 16 e 32 estados do traço UFL-1095079334, variando o valor de utilização.	69
5.16	Gráficos das perdas das simulações do traço BWY-1069762448 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,7.	70
5.17	Gráficos das perdas das simulações do traço BWY-1069762448 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,9.	71
5.18	Gráficos das perdas das simulações do traço BWY-1069224416 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,7.	71
5.19	Gráficos das perdas das simulações do traço BWY-1069224416 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,9.	72
5.20	Gráficos das perdas das simulações do traço UFL-1095079334 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,7.	72
5.21	Gráficos das perdas das simulações do traço UFL-1095079334 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,9.	73
5.22	Gráfico da perda das simulações feitas no NS para o traço real BWY-1069762448 e os respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados.	73
5.23	Gráfico da perda das simulações feitas no NS para o traço real BWY-1069224416 e os respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados.	74

5.24	Gráfico da perda das simulações feitas no NS para o traço real UFL-1095079334 e os respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados.	74
5.25	DM e DML dos traços reais BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e), e dos traços sintéticos BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f) gerados pelo modelo com quatro estados.	77
A.1	Distribuição dos tamanhos dos pacotes UDP dos traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (b).	82
A.2	Ajuste da distribuição Beta para a distribuição dos tamanhos dos pacotes do estado <i>um</i> - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c) - e do estado <i>dois</i> - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).	83
A.3	Ajuste das distribuições Exponencial e <i>Weibull</i> para a distribuição das diferenças de tempo entre as chegadas dos pacotes do estado <i>um</i> - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c) - e do estado <i>dois</i> - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).	84
A.4	Distribuição das durações das rajadas dos pacotes do estado <i>um</i> - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c) - e do estado <i>dois</i> - COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).	85
A.5	Ajuste das distribuições Exponencial e <i>Weibull</i> para a distribuição das durações das rajadas maiores que x segundos dos pacotes do estado <i>um</i> - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c) - e para a distribuição das durações das rajadas maiores que y segundos dos pacotes do estado <i>dois</i> - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).	86
A.6	Ajuste das distribuições Exponencial e <i>Weibull</i> para a distribuição das durações das rajadas de pacotes do estado <i>um</i> - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c) - e do estado <i>dois</i> - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).	87
A.7	Distribuição dos tempos entre as chegadas dos pacotes com tamanhos menores que 750 bytes - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c)- e maiores que 750 bytes - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766.	88
A.8	Ajuste das distribuições Exponencial e <i>Weibull</i> para a distribuição dos tempos entre chegadas dos pacotes menores que 750 bytes que são maiores que w segundos - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c)- e para a distribuição dos tempos entre chegadas dos pacotes maiores que 750 bytes que são maiores que z segundos - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).	89

Capítulo 1

Introdução

Caracterizar e explicar a variabilidade do tráfego Internet tem sido alvo de pesquisas recentes. A descoberta de auto-similaridade (SS) e dependência de longa duração (LRD) em tráfegos LAN e WAN estabeleceu que o tráfego Internet exhibe uma forte estrutura de correlação que se estende por mais de diversas horas (assinatura da LRD), e que o processo do tráfego mantém a mesma distribuição em um grande intervalo de escalas de tempo (assinatura da SS). O significado destas propriedades estatísticas para o desempenho de filas e predição do tráfego tem sido debatido. Alguns autores argumentam a existência de um grande impacto [3], enquanto outros argumentam que tal fenômeno é inexpressivo dado que *buffers* finitos limitam a maior escala de correlação que pode afetar o sistema de filas [23].

Mais recentemente, a questão sobre o impacto do TCP, o protocolo de transporte dominante, na estrutura de correlação do tráfego Internet foi levantada. Contrário às reivindicações anteriores que afirmavam que o TCP pode gerar auto-similaridade, foi postulado recentemente que as correlações introduzidas pelo TCP, através da retransmissão por *timeout* e do algoritmo de controle de congestionamento, estendem-se em um certo intervalo de escalas de tempo, a partir de alguns *round trip times* (RTTs) até dezenas de centenas de segundos. Estas escalas são de grande interesse na predição do tráfego e capacidade de provisionamento.

A maior questão em aberto na investigação para se entender o tráfego Internet, no entanto, é a “explosividade” (*burstiness*) do tráfego Internet em pequenas escalas de tempo. Pequenas, aqui, refere-se tipicamente a escalas de tempo até 100 milissegundos a 1 segundo, nos quais os fatores que causam as correlações em grandes escalas não são ainda fortes ou não estão presentes. Trabalhos anteriores forneceram resultados contraditórios na caracterização da variabilidade do tráfego Internet através de modelos estatísticos e na identificação dos mecanismos que geram a variabilidade. Os modelos de tráfego propostos cobrem desde simples processos *Poisson* até complexos processos multifrac-

tais não-Gaussianos. Enfatiza-se que, mesmo que estes modelos sejam bem diferentes, é possível que diferentes modelos capturem a variabilidade do tráfego Internet com vários graus de precisão, ou que, diferentes *links* de redes carreguem tráfego com características amplamente diversas.

Atualmente existe uma corrente na literatura que aceita a existência de tráfego multifractal em pequenas escalas de tempo [5], explorando modelos multifractais [41], geradores de tráfego [34] e estudos de desempenho relacionados [1]. De algum modo, tornou-se aceito que o tráfego apresenta características multifractais, apesar do fato de que mecanismos físicos e entendimentos da rede nunca foram estabelecidos da maneira que foram para LRD. Contraditoriamente, em [51] e [36] concluiu-se que os traços de rede analisados em seus estudos eram monofractais.

Com a evolução da tecnologia e das aplicações, cada vez mais a Internet é utilizada para transportar tráfego com características bem distintas. Desta forma, a medição, a caracterização e a modelagem do tráfego são tarefas essenciais para o planejamento e dimensionamento da rede, fazendo com que novos modelos sempre surjam. Apesar de inúmeros modelos existirem na literatura, com comportamentos e finalidades diversas, atualmente não há nenhum modelo concreto e definitivo que descreva o tráfego na rede, não existindo um consenso quanto ao modelo ideal.

O uso de aplicações multimídia também tem aumentado bastante, e este aumento pode alterar consideravelmente a natureza *scaling* do tráfego IP, visto que estes tipos de aplicações utilizam o protocolo de transporte UDP que não está sujeito a mecanismos de controle de congestionamento. Modelos precisos para tráfego UDP são necessários para garantir a Qualidade de Serviço nas redes, porém, apesar de existirem diversos modelos para tráfego TCP, pouca atenção tem sido dada a modelagem de tráfego UDP.

1.1 Objetivos da Dissertação

Entre os objetivos desta dissertação, cita-se: revisar a presença da multifractalidade no tráfego IP, verificar o impacto do tráfego gerado pelos protocolos de transporte TCP e UDP nas características *scaling* do tráfego IP e verificar o impacto da multifractalidade em sistemas de filas.

As causas e os fatores que influenciam as características *scaling* do tráfego IP são investigados, através da caracterização do tráfego pela decomposição dos traços em diferentes modos, identificando componentes com características *scaling* distintas.

Um segundo objetivo desta dissertação é apresentar um modelo que caracterize com precisão o tráfego de fluxo UDP. Este modelo gera traços sintéticos a partir da caracterização das distribuições das seqüências dos tamanhos de pacotes e das seqüências dos tempos entre chegadas dos pacotes de traços reais. Mostra-se que o modelo proposto é

adequado ao dimensionamento de recursos da rede e provisionamento de Qualidade de Serviço.

1.2 Estrutura da Tese

Esta tese está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2, são apresentados os fenômenos *scaling* mais relevantes encontrados no tráfego Internet atual, especificamente a auto-similaridade, a dependência de longa duração e a multifractalidade. Ao final do capítulo, as ferramentas utilizadas para a detecção e identificação de comportamentos *scaling* são descritas.

No Capítulo 3, são referenciadas algumas pesquisas relacionadas ao estudo das características *scaling* do tráfego IP que são encontradas na literatura. São selecionados alguns traços reais de fluxo IP de domínio público e feita a análise da multifractalidade destes traços. É verificado o impacto dos protocolos de transporte TCP e UDP nas características *scaling* do tráfego IP e o impacto da multifractalidade em sistemas de filas. Finalizando o capítulo, descreve-se a investigação das causas da multifractalidade.

No Capítulo 4, dois modelos de tráfego que aproximam o comportamento dos processos multifractais para uma determinada escala de tempo são descritos. O Modelo *wavelet* multifractal (MWM) desenvolvido por Riedi *et. al.* [41] pode ser usado para reproduzir o comportamento multifractal do tráfego IP, modelando dados positivos, estacionários e com dependência de longa duração. O outro modelo descrito é o modelo proposto por [24], que utiliza um Processo de chegada Markoviano (MAP - *Markovian Arrival Processes*) com uma estrutura baseada no mecanismo de geração de transformada wavelet de Haar para aproximar o efeito multifractal.

O Capítulo 5 apresenta os modelos de fluxos UDP que foram propostos como contribuições originais e descreve a metodologia utilizada para a derivação dos mesmos. A modelagem consistiu essencialmente em identificar as distribuições que melhor descrevem o comportamento do tráfego UDP e estimar seus parâmetros através da análise estatística dos dados. A validação dos modelos, através da comparação dos desempenhos e precisão em determinar o comportamento real do tráfego, é exibida no final do capítulo.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões e possíveis extensões deste trabalho.

Capítulo 2

Características *scaling* do tráfego de Redes

Uma característica importante do tráfego gerado pelo protocolo *Internet Protocol* (IP) é a existência de padrões *scaling*, que impacta significativamente o desempenho dos mecanismos de controle de tráfego e que, por isto vem sendo foco de atenção de diversas pesquisas [32]. Evidências da existência da natureza fractal em longas escalas de tempo do tráfego IP, bem como a presença de padrões divergentes em pequenas escalas de tempo foram identificadas há quase uma década [2][5][6][14][48]. Em escalas de tempo da ordem de centenas de milissegundos e maiores, o comportamento do tráfego é bem apresentado por modelos auto-similares. Em pequenas escalas de tempo, na ordem de centenas de milissegundos e menores, o tráfego IP é altamente variável e a variabilidade difere das existentes em longas escalas de tempo. Tal constatação motivou a busca por modelos de tráfego mais precisos, que possibilitassem uma descrição mais completa do tráfego de redes.

Investigações envolvendo tráfego IP constataram que as diferentes propriedades do tráfego observadas em pequenas escalas de tempo são convenientemente descritas utilizando-se modelos multifractais [5][6][20].

Ao se variar a escala de tempo de observação de processos auto-similares, o comportamento observado é único e invariante no tempo, ou seja, tais processos apresentam um comportamento monofractal e normalmente dependem apenas de um único parâmetro, o parâmetro de *Hurst*. Já processos multifractais possibilitam comportamentos variantes em diferentes escalas de tempo, proporcionando maior flexibilidade em descrever fenômenos irregulares que são localizados no tempo. A análise multifractal generaliza de forma natural o comportamento auto-similar observado no tráfego de redes.

2.1 Fenômeno *scaling*

Esta seção descreve brevemente diversos fenômenos *scaling* e a terminologia relacionada relevante a esta tese. O termo “*scaling*” provém da análise do tráfego em diversas escalas de tempo.

Para descrição das propriedades *scaling*, considera-se o sinal $Z(t)$, $t \in \mathbb{R}$ e o seu processo incremental Y definido como

$$Y(k) := Z((k+1)\Delta) - Z(k\Delta), \quad k \in \mathbb{Z}, \quad (2.1)$$

onde Δ é uma constante, e sua derivada $X(t)$ definida como

$$Z(t) = \int_{\tau=0}^t dX(\tau). \quad (2.2)$$

No contexto de tráfego em redes, $Z(t)$ representa o total de bytes que chega no intervalo de tempo $[0, t]$, $Y(k)$ é o processo bytes-por-tempo obtido agregando o tráfego em intervalos de tempo de tamanho Δ e $X(t)$ é a taxa de tráfego instantânea no tempo t .

2.1.1 Auto-similaridade

O processo $Z(t)$, $t \in \mathbb{R}$, é auto-similar com parâmetro de *Hurst* $H > 0$, se

$$Z(at) \stackrel{fd}{=} a^H Z(t), \quad t \in \mathbb{R}, \quad \forall a > 0, \quad (2.3)$$

onde $\stackrel{fd}{=}$ denota igualdade em distribuições de dimensões finitas. Essencialmente, nas diversas escalas de tempo, processos auto-similares mantêm suas propriedades estatísticas exceto por um fator constante escalar. Um exemplo importante de processo auto-similar é o movimento Browniano fracional (fBm - fractional Brownian motion).

Em séries temporais que representam o tráfego medido em pacotes, bytes ou bits, a auto-similaridade é uma propriedade referente à invariância da distribuição para qualquer incremento do processo, ou quando a série temporal apresenta a mesma estrutura de autocorrelação para diferentes níveis de agregação. Visualmente, a auto-similaridade do tráfego manifesta-se como uma invariância em relação à escala de tempo. Se forem construídos gráficos “Pacotes/Unidade de Tempo” x “Unidade de Tempo”, para diversas escalas de tempo, pode-se verificar que o tráfego parece o “mesmo” nas diferentes escalas, ou seja, a agregação não resulta em suavidade.

Plotando-se o número de pacotes que chegam a cada 0,1 milissegundos, de um dos traços de nosso estudo, observou-se um processo altamente variável (primeiro gráfico da Figura 2.1). Por outro lado, plotando-se o número de pacotes que chegam em níveis de agregação maiores, a cada 1ms, 10ms, e 100ms (segundo, terceiro e quarto gráfico da

Figura 2.1 respectivamente), ao invés de se obter um processo mais nivelado, o processo permaneceu tão variável quanto os de escalas de tempo menores. Este comportamento revela a natureza auto-similar do tráfego.

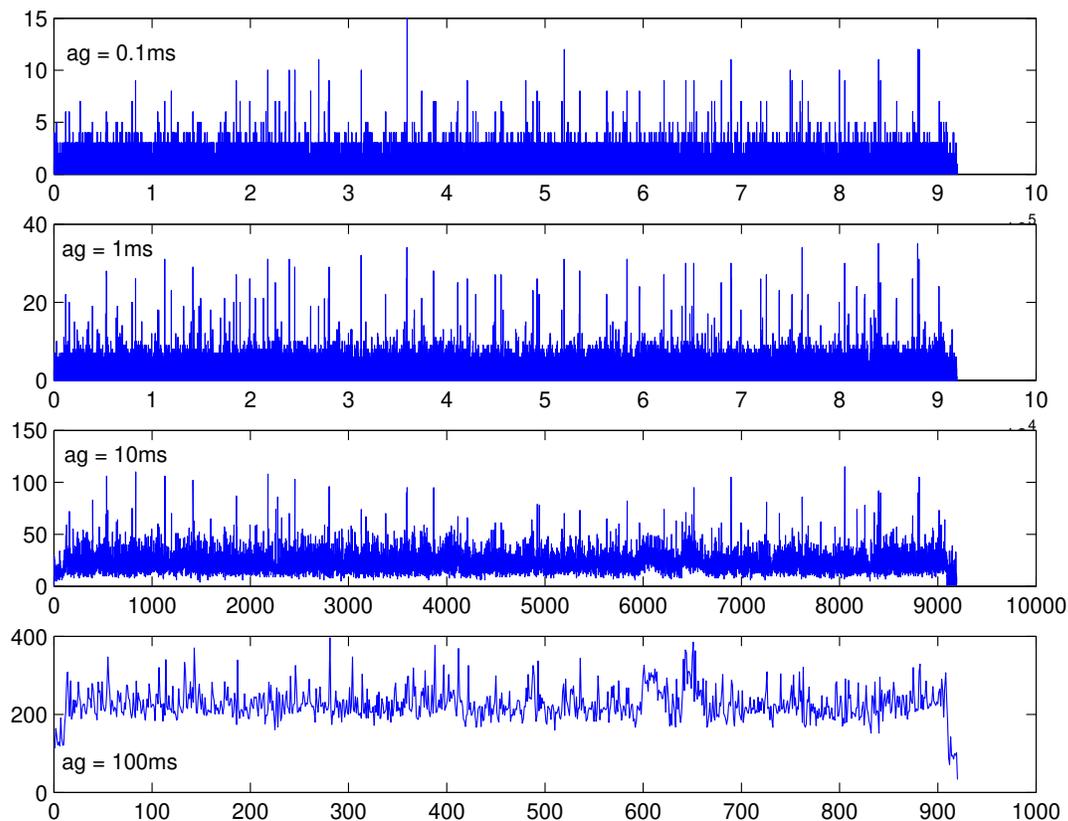


Figura 2.1: Quantidade de pacotes que chegam em escalas de tempo de 0,1ms, 1ms, 10ms e 100ms respectivamente (traço TXS-1111527905).

A importância do comportamento auto-similar está no fato de ser difícil determinar uma escala de tempo para o dimensionamento, pois o tráfego não se torna suavizado em torno de um valor médio para escalas maiores. Esta característica tem influência direta na distribuição da ocupação e do tempo de espera dos pacotes em uma fila.

2.1.2 LRD e processos $1/f$

Um processo estacionário $Y(k)$, $k \in \mathbb{Z}$, com função de autocovariância $r_Y(k)$ e função densidade espectral (SDF) $\Gamma_Y(f)$ é de dependência de longa duração (LRD - Long-Range Dependence) [11], se

$$\sum_k r_Y(k) = \infty \quad \text{ou} \quad \Gamma_Y(0) = \infty. \quad (2.4)$$

As correlações não desprezíveis quando ocorre grandes atrasos de tempo ou, equivalentemente, os componentes de frequências baixas intensas, fazem a estimativa estatística dos processos LRD não trivial [8].

Exemplos clássicos de processos LRD são processos $1/f$ - *noise* cujas funções densidade espectral se comportam como

$$\Gamma(f) \sim c|f|^{1-2h}, \quad f \rightarrow 0, \quad (2.5)$$

onde c é uma constante não nula e o expoente *scaling* $h \in (0, 5, 1)$. Aqui, $f(x) \sim l(x)$ denota $\lim_{x \rightarrow 0} f(x)/l(x) = 1$ quando $x \rightarrow 0$. O valor de h igual a 0,5 corresponde a ruído branco (*white noise*) ou ausência de correlação, enquanto que h próximo de 1 indica um processo com intensa correlação.

Várias séries temporais do mundo real possuem regiões *scaling* de múltiplas frequências, que possuem:

$$\Gamma(f) \approx c_i |f|^{1-2h_i}, \quad f_1^{(i)} < f < f_2^{(i)}, \quad i = 1, \dots, k, \quad (2.6)$$

onde c_i e h são constantes como em (2.5). Estas séries temporais são melhores modeladas por generalizações do fBm tais como o movimento Browniano fracional *multiscale* recentemente proposto [29][27]. No presente estudo, técnicas *wavelet* foram utilizadas para estimar os diferentes expoentes *scaling* h_i observados nos traços de tráfego da rede.

2.1.3 Multifractalidade

Em contraste com a Dependência de Longa Duração, que é uma propriedade de segunda ordem e aparece em grandes escalas de tempo (baixas frequências), multifractalidade é uma propriedade que aparece em pequenas escalas de tempo e é caracterizada por momentos de ordem maior.

Informalmente, o processo $Z(t)$ possui expoente de Hölder (ou singularidade) $\beta(t)$ no tempo t , se

$$|Z(t + \epsilon) - Z(t)|^{\epsilon \rightarrow 0} \approx \epsilon^{\beta(t)}. \quad (2.7)$$

Um processo monofractal possui o mesmo $\beta(t)$ em todos os instantes de tempo t , enquanto que um processo multifractal possui $\beta(t)$ variando em t . O fBm é um exemplo de processo monofractal com $\beta(t) = H$, para todo t . Ainda neste capítulo, será descrita a técnica que usa a transformada *wavelet* da derivada $X(t)$ de $Z(t)$ utilizada para determinar se $Z(t)$ é multifractal.

Enquanto que LRD é definida para escalas de tempo assintoticamente grandes, a multifractalidade é definida para escalas de tempo infinitesimalmente pequenas, na prática deve-se analisar os dados dentro de um intervalo finito de escalas de tempo. Logo, foi utilizado um intervalo limitado de escalas de tempo na análise dos traços deste estudo.

2.2 Detecção da natureza *scaling* do tráfego

Ferramentas estatísticas baseadas em transformadas *wavelet* de séries temporais são utilizadas para o estudo das propriedades do comportamento *scaling* local e global [17]. Estas ferramentas são apropriadas para a detecção e identificação de comportamentos *scaling* e para a estimativa estatística subsequente dos parâmetros relevantes, como por exemplo, o expoente *scaling* α [26].

2.2.1 Diagrama *Logscale*

A ferramenta proposta em [26] utiliza transformadas *wavelet* e define o Diagrama *Logscale* para analisar as estatísticas de segunda-ordem.

Os coeficientes da transformada *wavelet* discreta são definidos como:

$$d_X(j, k) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)\psi_{j,k}(t)dt, \quad (2.8)$$

onde $X(t)$ é um processo estacionário de tempo contínuo e o membro $\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}t - k)$ é gerado pela *wavelet* mãe $\psi(t)$ através da dilatação de uma escala $x = 2^j$ e translação de $2^j k$. Em um octavo fixo j , a seqüência $d_X(j, \cdot)$ corresponde à análise de $X(t)$ na escala 2^j . Octavo j é o logaritmo da escala a na base 2, ou seja, a escala $a = 2^j$.

Foram inicialmente estudadas as propriedades globais, que são as estatísticas das séries de tempo vistas em cada nível de resolução ou escala definidas como uma função escalar. Examinou-se a energia média contida em cada escala do traço e mediu-se como estas quantidades mudam na medida que se vai de escalas mais grossas (escalas maiores) para escalas mais finas (escalas menores). A energia média na escala j é a média da soma dos coeficientes *wavelet* elevado ao quadrado,

$$S_2(j) = \frac{1}{n_j} \sum_k |d_X(j, k)|^2, \quad (2.9)$$

onde n_j é o número de coeficientes *wavelet* $d_X(j, k)$ disponíveis no octavo j . O gráfico do logaritmo destas estimativas versus j é o chamado Diagrama *Logscale* (LD):

$$\text{LD: } \log_2 S_2(j) \text{ vs } \log_2 a = j .$$

Para determinar a propriedade global do traço, determina-se qualitativamente sob qual intervalo existe uma relação linear entre $\log_2 S_2(j)$ e a escala j , ou seja, sob qual intervalo de escalas de tempo existe *scaling*.

Neste estudo, foi utilizado o conjunto de rotinas desenvolvido por Abry e Veitch [44] e implementado no Software Matlab. Estas rotinas generalizam o Diagrama *Logscale*, que faz a análise do *scaling* de estatísticas de segunda-ordem, nos Diagramas *Logscale* de q -ésimas-ordens, para $q \in \mathbb{R}$, usando as estimativas da função partição:

$$S_q(j) = \frac{1}{n_j} \sum_k |d_X(j, k)|^q. \quad (2.10)$$

O gráfico de $S_q(j)$ versus j representa o Diagrama *Logscale* de q -ésima-ordem (q -LD) e permite a análise do *scaling* local (Figura 2.2).

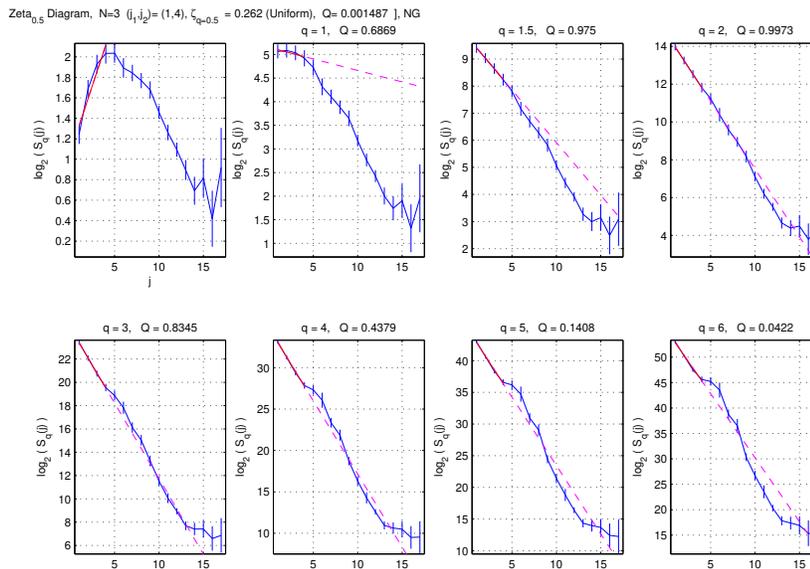


Figura 2.2: Diagramas *Logscale* de q -ésima ordem do fluxo IP do traço MEM-1111247410.

Esta generalização é fundamental para o estudo da multifractalidade, pois um processo multifractal não pode ser descrito por um único expoente como o parâmetro de *Hurst* H , e momentos de maiores ordens também precisam ser analisados, fazendo-se necessário obter um conjunto de expoentes α_q .

Detecção de *scaling*

O objetivo da análise do *scaling* local é coletar informações características sobre os picos e a localização dos vários expoentes α_q . Para um q fixo, um padrão é visto como uma linha reta no Diagrama *Logscale* de q -ésima ordem, com pelo menos quatro octavos de comprimento, e a medida de sua inclinação (*slope*) é a estimativa do expoente *scaling* α_q correspondente (Figura 2.2). Se para cada q , uma linha reta é encontrada no q -LD sob uma mesma faixa de escalas, então há presença de *scaling*. O intervalo de valores usado foi $q \in [0, 6]$. Este intervalo foi escolhido através de uma escolha conservadora baseada no estudo feito em [37].

A princípio não se sabe em quais escalas, se houver alguma, existe *scaling*. Na prática, esta decisão é feita com os valores octavos de corte menor e maior, j_1 e j_2 respectivamente, de cada intervalo suspeito de haver *scaling*. A heurística usada consiste na existência de uma linha de regressão que corte cada intervalo de confiança do intervalo $[j_1, j_2]$ escolhido, isto é, o intervalo $[j_1, j_2]$ deve apresentar uma linearidade nos q -LD. Para a regressão ser bem definida ao menos quatro escalas de tempo são necessárias e, sendo Q o valor retornado no teste *Chi-square goodness of fit*, Q deve ser maior que 0,05. Quanto maior for o valor de Q , maior será a linearidade do intervalo.

2.2.2 Diagrama *Multiscale*

Para testar se um processo possui multifractalidade em um intervalo $[j_1, j_2]$ que possui *scaling*, dois parâmetros foram introduzidos: $\zeta_q = \alpha_q - q/2$ e $h_q = \zeta_q/q$. O Diagrama *Multiscale* (MD) mostra no eixo vertical os expoentes ζ_q e no eixo horizontal os valores de q . O Diagrama *Multiscale* Linear (LMD) mostra no eixo vertical os expoentes h_q e no eixo horizontal os valores de q .

O MD e o LMD do fluxo IP (Figura 2.3) do traço ANL-1111548257 apresentaram respectivamente não-linearidade e não-horizontalidade, indicando evidências de multifractalidade.

Interpretação do *scaling*

A existência de linearidade no Diagrama *Multiscale* e horizontalidade no Diagrama *Multiscale* Linear descrevem processos monofractais, enquanto que a não-linearidade no Diagrama *Multiscale* e a não-horizontalidade no Diagrama *Multiscale* Linear descrevem processos multifractais. Um ponto essencial no uso da ferramenta é que o conceito de alinhamento é relativo aos intervalos de confiança, e não ao alinhamento próximo dos expoentes ζ_q em si. Os intervalos de confiança dos expoentes aumentam monotonicamente com o aumento do valor de j para escalas cada vez maiores.

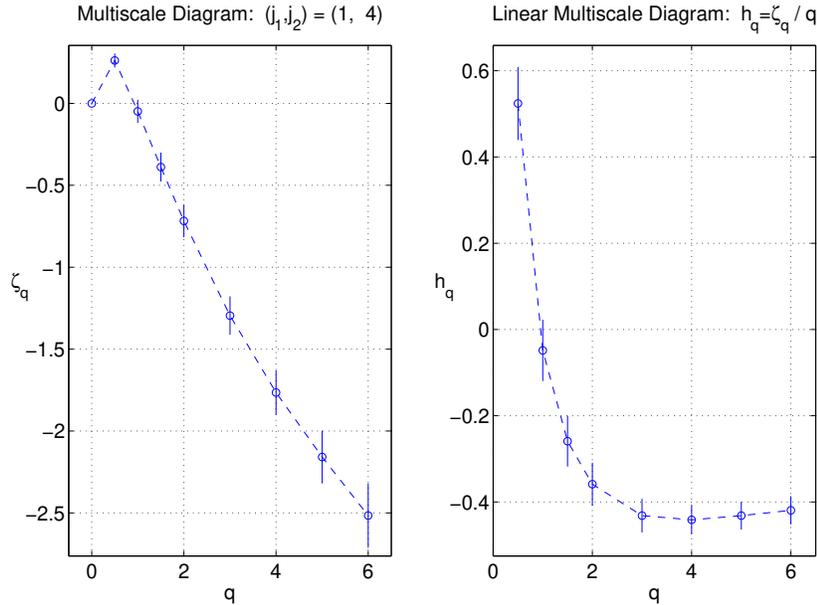


Figura 2.3: Diagrama Multiscale e Diagrama Multiscale Linear do fluxo IP do traço MEM-1111247410.

As conclusões sobre a natureza *scaling* dos traços selecionados para este estudo são descritas e detalhadas no próximo capítulo.

2.2.3 Estimativa da função de *Hölder*

Processos multifractais são usualmente caracterizados por amostras que apresentam alta variabilidade. Este comportamento irregular pode ser analisado usando-se o expoente local de *Hölder*, que é uma generalização do parâmetro de *Hurst* [39]. Para os processos multifractais o expoente de *Hölder* não é constante, pelo contrário, é bastante variável e irregular entre um tempo e outro. O cálculo do valor do expoente de *Hölder* é crucial para a caracterização do tráfego multifractal [33].

Em [25], uma expressão para o tamanho de uma fila alimentada por um processo multifractal foi apresentada, bem como uma expressão para o cálculo do tempo t^* em que uma fila atinge seu tamanho máximo. O valor de t^* é computado usando a média, a variância e os valores específicos da função de *Hölder* da amostra, podendo ser usado para calcular a probabilidade de perda, bem como, para determinar a banda passante equivalente de um fluxo multifractal. Através da simulação de uma fila com tamanho infinito, calcula-se o instante de tempo t^* em que a fila atinge seu tamanho máximo.

Através de diversos experimentos, concluiu-se que o processo de enfileiramento é influenciado pelos valores do expoente de *Hölder*. A medida mais relevante identificada no estudo é γ , a integral dos valores da função de Hölder até o instante máximo de interesse t^* :

$$\gamma = \frac{\int_0^{t^*} H(x) dx}{t^*}. \quad (2.11)$$

γ não é a única métrica que influencia o processo de enfileiramento. Para traços com um valor de γ maior e com uma variância maior obteve-se um maior valor de multifractalidade.

O valor de γ pode ser usado como uma medida de grau da multifractalidade de um fluxo em um sistema de filas. Note que, como o expoente de *Hölder* é variável no tempo, deve-se procurar medidas do “grau de multifractalidade” de um fluxo. Tal dificuldade não existe quando se lida com processos monofractais, descritos por um valor constante (parâmetro de *Hurst*).

2.3 Considerações parciais

Neste capítulo foi apresentada uma breve descrição de diversos fenômenos *scaling* existentes no tráfego das redes. No tráfego IP, há evidências da existência da natureza fractal em longas escalas de tempo, bem como a presença de padrões divergentes em pequenas escalas de tempo. Ferramentas utilizadas para a detecção e identificação de comportamentos *scaling* foram descritas neste capítulo. No capítulo 3, para tentar clarificar se o tráfego IP é monofractal ou multifractal, é revisada e verificada a existência de padrões multifractais no tráfego IP.

Capítulo 3

Análise do comportamento *scaling* do tráfego IP

A discussão sobre a característica *scaling* do tráfego IP em pequenas escalas de tempo tem sido polêmica. Alguns estudos defendem que modelos multifractalais são os que melhor representam o real comportamento do tráfego IP em pequenas escalas de tempo [6][5][41][34], enquanto que outros estudos defendem o uso de modelos monofractalais [31][17][51].

Neste capítulo, tenta-se responder se o tráfego IP é monofractal ou multifractal através do uso das ferramentas descritas no capítulo anterior. Investiga-se, também, o impacto dos tráfegos TCP e UDP na dinâmica do tráfego IP e o impacto da multifractalidade em sistemas de filas.

3.1 Pesquisas relacionadas

O objetivo desta seção é descrever brevemente trabalhos existentes na literatura, servindo de base para a análise que seguirá depois. Os artigos aqui comentados são aqueles que, com o melhor do conhecimento dos autores, examinam com detalhes as evidências empíricas do tráfego *scaling*.

Estudos anteriores examinaram se os traços da rede LAN *Bellcore Ethernet* eram multifractalais ou não [31]. Usando diagramas *multiscale* no domínio do tempo, concluiu-se que cada um dos traços era LRD e monofractal em grandes escalas de tempo. Abaixo destas grandes escalas de tempo, em aproximadamente 100 ms, um comportamento *scaling* diferente foi encontrado, porém este novo regime não foi estudado.

Um comportamento auto-similar em grandes escalas de tempo (acima de 1s) foi observado em uma variedade de tráfegos de rede [48][30][14].

Em [20], foi publicado o primeiro relatório a respeito da descoberta de comportamento multifractal em tráfego TCP/IP. Os traços foram coletados em *gateways* de redes LANs.

A multifractalidade foi encontrada nas seqüências de tempo entre chegadas e tamanhos de pacotes, em todas as escalas de tempo. Em [28], os mesmos autores discutiram parte destes resultados, enfatizando o fato que modelos multifractais captam essencialmente as ‘altas frequências’ dos componentes de dados, enquanto LRD está relacionado às ‘baixas frequências’.

Em [6], foi apontado que evidência de comportamento *scaling* em tráfego TCP/IP pode ser encontrado em dois regimes separados, um em pequenas ‘escalas de tempo’ e outro em ‘grandes escalas’ de tempo. A conclusão da análise baseada em *wavelet* foi comportamento multifractal em pequenas escalas de tempo e LRD em escalas maiores de tempo. Os autores mostraram que o *scaling* em pequenas escalas de tempo é relacionado ao controle de fluxo *closed-loop* do TCP, e que o ponto de mudança entre “pequenas” e “grandes” escalas de tempo é aproximadamente o RTT (*round trip time*) das transferências TCP. Adicionalmente, [4] forneceu evidências empíricas que o tráfego WAN pode ser modelado usando um modelo multifractal, similar ao desenvolvido em [41]. A introdução de um modelo de cascatas multiplicativas foi a principal contribuição em [4] e a observação da existência de um duplo regime foi também confirmada para diferentes traços.

Em [5], novos conjuntos de traços provenientes de ISPs foram examinados e uma análise similar a [4] foi realizada. As mesmas conclusões foram alcançadas, porém, foi dito também que o comportamento do tráfego em pequenas escalas de tempo é complexo e pode afetar vários fatores, incluindo características da rede tais como gargalos.

Em [12], o termo *biscaling* foi sugerido para referenciar a presença do duplo padrão de escalas, novamente usando o ponto de mudança de comportamento no espectro *wavelet* para separá-los em dois. Resultados similares a [6] foram encontrados em traços TCP/IP recentemente coletados de pontos de acesso da Internet da Universidade de Auckland.

Os resultados em [42] foram consistentes com LRD em grandes escalas e multifractalidade em pequenas escalas. No entanto, foi observado que a qualidade das medidas e intervalos de confiança era tal que a conclusão de monofractalidade quase podia ser aceita em pequenas escalas de tempo.

Em [19], é apresentado um modelo monofractal e não auto-similar, que promete ser flexível o bastante para capturar comportamento *scaling* quando comparado com modelos auto-similares. O estudo ainda afirma que modelos multifractais são complexos e desnecessários.

Um dos artigos mais recentes [51], concluiu que o tráfego agregado de um *backbone* com *links* de altas taxas na rede *Sprint* é melhor modelado como monofractal, ao invés de multifractal, em pequenas escalas de tempo. A discrepância com a literatura anterior foi explicada pela observação que em *backbones* os níveis de agregação são muito maiores, resultando em processos Gaussianos.

Em [35], investigou-se a origem das características do tráfego em pequenas escalas de

tempo de fluxos TCP de uma variedade de traços. Mostrou-se que a característica *scaling* da camada IP não depende do processo de chegada do fluxo TCP. Foi levantada a questão de que o uso indevido das ferramentas de estimativa podem levar a conclusões incorretas, tal como multifractalidade em tráfegos que são na realidade monofractais. Dando continuação ao trabalho, [36] mostrou que a estrutura de correlação do tráfego agregado em pequenas escalas de tempo pode ser capturada por processos *Poisson* cujos tempos entre chegadas dos pacotes em blocos individuais seguem uma distribuição Gama muito dispersa.

Em [51], introduziu-se o conceito de “fluxos densos” (fluxos com explosividade de pacotes densamente distribuídos), e mostrou-se que este tipo de fluxo determina o padrão *scaling* em pequenas escalas de tempo.

Em [1], mostrou-se que a característica *scaling* em pequenas escalas de tempo pode ter um impacto significativo no desempenho de sistemas de filas, especialmente em utilizações moderadas, enquanto que a característica *scaling* em escalas de tempo maiores é mais importante em altas utilizações.

Como pôde ser observado na breve descrição dos estudos citados acima, a discussão sobre a multifractalidade do tráfego IP tem sido polêmica. Para tentar clarificar se o tráfego IP é monofractal ou multifractal, revisou-se e verificou-se a existência de padrões multifractais no tráfego IP. A próxima seção descreve as ferramentas utilizadas em tal estudo.

3.2 Descrição dos traços analisados

Foram analisados traços de pacotes coletados da Internet com diferentes perfis obtidos do projeto de pesquisa PMA (The NLANR Passive Measurement and Analysis Project), que disponibiliza em seu WEB *site* dezenas de traços por dia, provenientes de pontos de coleta de diversas partes do mundo [45].

Para garantir a generalidade do estudo, foram escolhidos aleatoriamente oito traços recentes de quatro pontos de coleta diversos. A Tabela 3.1 resume as informações dos traços. Os traços estudados são provenientes de links OC3c. Os traços brutos foram processados com a Ferramenta CAIDA Coralreef [43] e com programas em C++ desenvolvidos pelos autores, permitindo a extração do horário de chegada (com precisão em microsegundos), protocolo IP e tamanho (em bytes) de cada pacote do traço. O fluxo UDP e o fluxo TCP de cada traço IP selecionado para este estudo foram isolados e constituíram dois novos traços.

Deve-se observar que a média da percentagem típica do volume de tráfego UDP nos traços analisados é de 10%. O tráfego TCP corresponde em média a 90% dos pacotes, sendo que a maioria dos pacotes pertencem a aplicações que utilizam portas altas (*not*

well known), acima de 1024. A duração de cada traço é de aproximadamente 90s.

Tabela 3.1: Descrição dos traços analisados.

Traço	Data e Horário	Tamanho	Quant. pacotes IP	% TCP	% UDP	Taxa (Kbps)	Local
ANL-1111548257	22/03/2005 20:11	561 Kb	42420	91,0	6,36	6,2	Argonne National Lab.
COS-1069211539	18/11/2003 19:50	31,1 Mb	1733491	81,6	8,65	353,8	Colorado State Univ.
COS-1094074322	01/09/2004 15:33	65,8 Mb	3404049	93,9	5,45	748,6	Colorado State Univ.
COS-1094580942	07/09/2004 12:14	55,9 Mb	2852756	92,7	6,42	636,0	Colorado State Univ.
MEM-1111247410	19/03/2005 07:56	1,1 Mb	75122	83,5	14,21	12,5	University of Memphis
MEM-1112013766	28/03/2005 04:49	980 Kb	70259	64,4	31,86	10,8	University of Memphis
TXS-1111527905	22/03/2005 14:10	1,8 Mb	156327	99,2	0,67	20,5	Texas universities
TXS-1113503155	14/04/2005 11:31	226 Kb	16895	75,0	18,94	2,5	Texas universities

3.3 A natureza *scaling* do tráfego IP

Conforme relatado na literatura, evidências de comportamento do tráfego IP podem ser encontrados em dois regimes separados: um em pequenas escalas de tempo e outro em grandes escalas de tempo. Estes dois regimes podem ser definidos empiricamente no ponto de mudança Δ^* do comportamento visual do gráfico log-log dos momentos do processo incremento agregado, $\sum_i X_\Delta(i)^q$, em função do tamanho do intervalo de agregação Δ [2]. X_Δ é medido como fração do total de bytes do traço inteiro. Há uma mudança visível nas inclinações das curvas que representam todos os momentos estatísticos em Δ^* . Para analisar se o tráfego IP é monofractal ou multifractal em pequenas escalas de tempo, é necessário calcular o valor de Δ^* , ou seja, definir o limite superior das pequenas escalas de tempo. A Tabela 3.2 contém os valores de Δ^* dos traços estudados.

Tabela 3.2: Valores de Δ^* dos fluxos IP, TCP e UDP dos traços estudados.

Traço	Δ^* - Fluxo IP	Δ^* - Fluxo TCP	Δ^* - Fluxo UDP
ANL-1111548257	3,0ms	3,0ms	6,6ms
COS-1069211539	3,0ms	3,0ms	3,0ms
COS-1094074322	3,0ms	3,0ms	1,6ms
COS-1094580942	3,0ms	3,0ms	6,6ms
MEM-1111247410	6,6ms	6,6ms	6,6ms
MEM-1112013766	3,0ms	3,0ms	1,6ms
TXS-1111527905	6,6ms	6,6ms	24,5ms
TXS-1113503155	1,6ms	1,6ms	12,1ms

A Figura 3.1 apresenta os gráficos log-log dos momentos estatísticos q 's do processo incremento agregado do tráfego IP, TCP e UDP dos traços ANL-1111548257 e MEM-1111247410. Cada curva de cada gráfico representa um momento estatístico q , $q =$

[1, 2, 3, 4, 5, 6]. O valor de Δ^* é definido pela escala de tempo na qual ocorre a mudança de comportamento das curvas dos momentos. Como observado nas Figuras 3.1(a) e 3.1(c), há uma mudança no comportamento das curvas dos fluxos IP e TCP do traço ANL-1111548257 quando $\ln(\Delta)$ é aproximadamente 1,1, valor destacado pela reta vertical do gráfico. Como $\ln(\Delta^*) \sim 1,1$ então, $\Delta^* \sim 3ms$. Por outro lado, o restante dos gráficos da Figura 3.1 possuem $\ln(\Delta^*) \sim 1,9$, e logo, $\Delta^* \sim 6,6ms$.

Escolheu-se os traços ANL-1111548257 e MEM-1111247410 para ilustrar como exemplo das relações encontradas, sendo estes traços representativos dos demais.

Tipicamente todas as escalas abaixo de Δ^* estão no regime de pequenas escalas e fazem parte das escalas de interesse deste estudo. Os traços foram agregados a cada $0,1ms$, ou seja, em uma escala de tempo bem menor que Δ^* pois quando são multiplicados pelas escalas de agregação da análise *scaling* devem permanecer no conjunto de pequenas escalas de tempo.

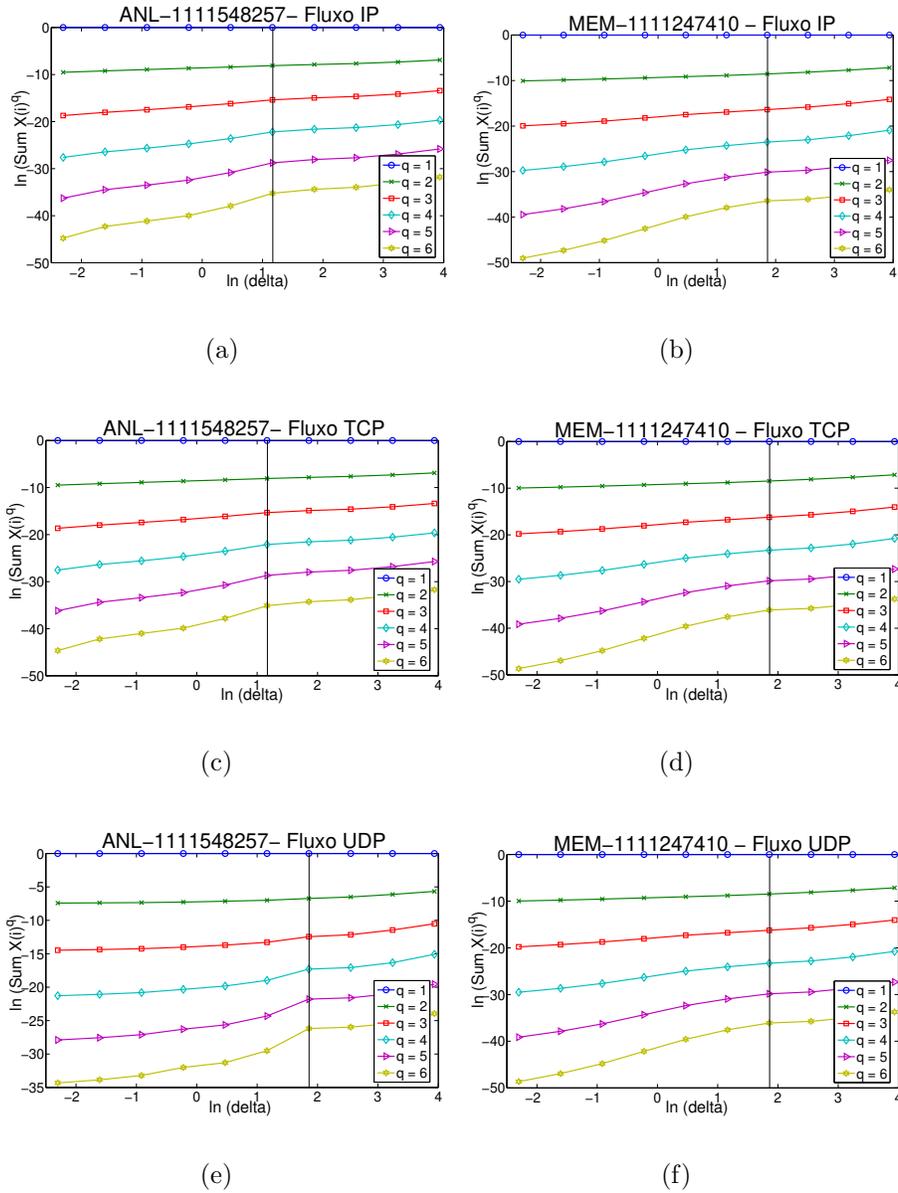


Figura 3.1: Log-log plot dos momentos estatísticos do processo incremento agregado dos fluxos IP, TCP e UDP dos traços ANL-1111548257 e MEM-1111247410.

Para identificar as propriedades *scaling* do tráfego, foram utilizadas as ferramentas descritas no capítulo anterior. As análises estatísticas de segunda ordem e de ordens superiores foram feitas usando os Diagramas *Logscale* de q-ésima ordem, o Diagrama *Multiscale* e o Diagrama *Multiscale* Linear.

Através do Diagrama *Logscale* de q-ésima ordem, para todos os traços estudados foi encontrado um intervalo contendo *scaling*, cujas escalas de tempo são menores que o respectivo Δ^* .

Os Diagramas *Logscale* de q-ésima ordem resultantes da análise dos fluxos IP, TCP e UDP do traço ANL-1111548257 são mostrados nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente. O valor de Q , exibido no canto superior direito de cada diagrama, corresponde ao valor de linearidade retornado no teste de regressão para a reta contida no intervalo $[j_1, j_2]$. Os altos valores de Q encontrados indicam linearidade e portanto revelam a presença de *scaling* no intervalo testado $[j_1, j_2] = [1, 4]$.

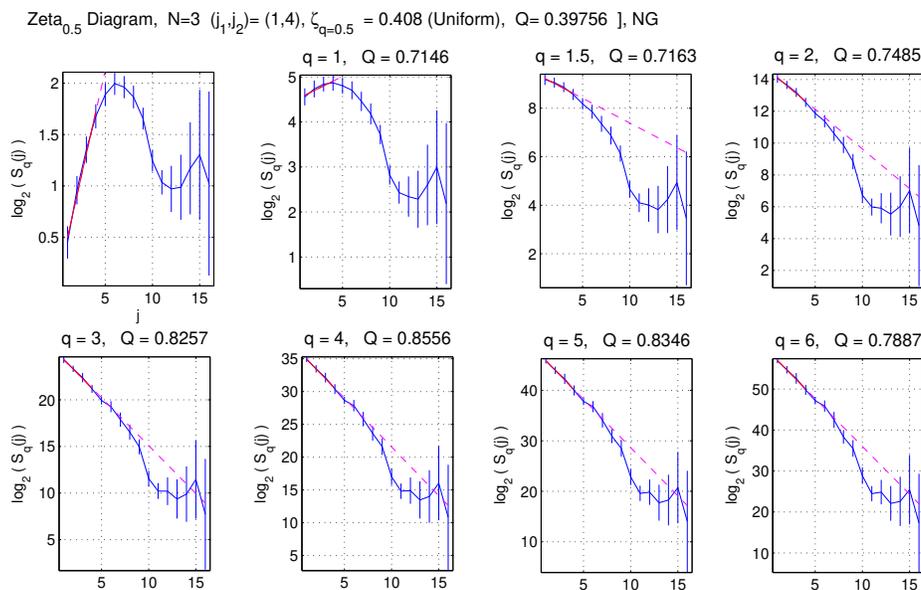


Figura 3.2: Diagramas *Logscale* de q-ésima ordem do fluxo IP do traço ANL-1111548257.

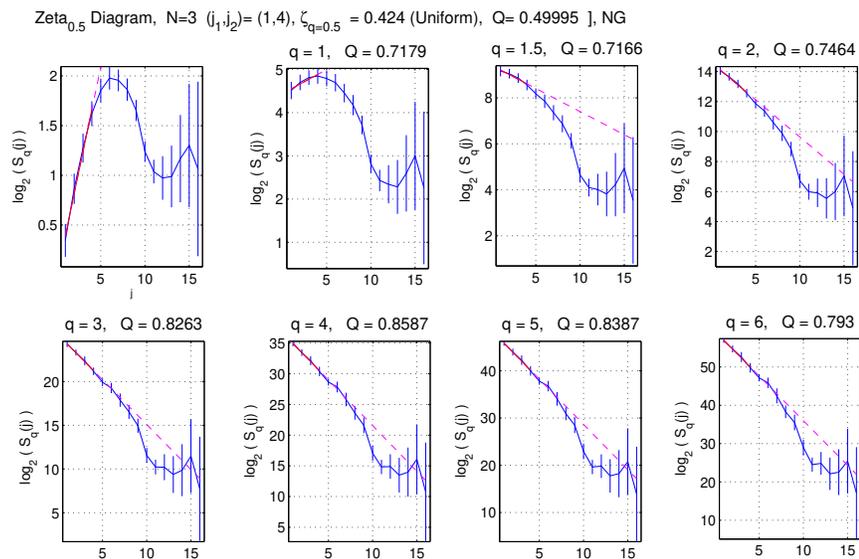


Figura 3.3: Diagramas *Logscale* de q-ésima ordem do fluxo TCP do traço ANL-1111548257.

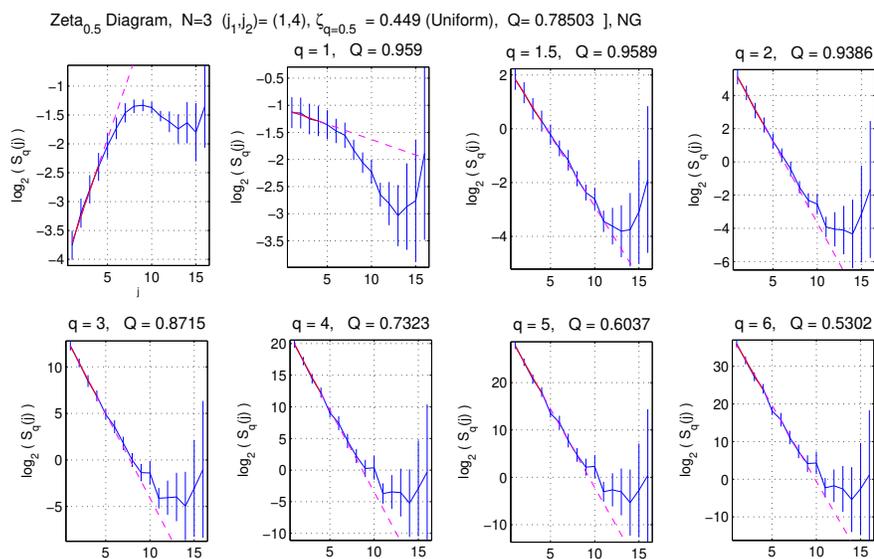


Figura 3.4: Diagramas *Logscale* de q-ésima ordem do fluxo UDP do traço ANL-1111548257.

Para testar se um processo é multifractal, estimou-se para cada Diagrama *Logscale* de q -ésima ordem a inclinação da reta encontrada nas pequenas escalas de tempo.

A partir das inclinações estimadas, finalmente, obteve-se os Diagramas *Multiscale* e os Diagramas *Multiscale* Lineares para os fluxos IP, TCP e UDP de cada traço. Verificando-se cuidadosamente os intervalos de confiança, sob o regime de pequenas escalas de tempo, observa-se que a hipótese de monofractalidade não pode ser rejeitada para alguns traços, enquanto que para outros traços a hipótese de multifractalidade é que não pode ser rejeitada.

As conclusões sobre a natureza *scaling* dos traços podem ser observadas na segunda coluna da Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Conclusões do *scaling* em pequenas escalas de tempo.

Traço	Tipo	H_{IP}	H_{TCP}	γ_{IP}	γ_{TCP}	γ_{UDP}
TXS-1111527905	MONO	0,961	0,961			*
COS-1069211539	MONO	0,750	0,745			*
COS-1094074322	MONO	0,921	0,912			*
COS-1094580942	MONO	0,790	0,785			*
ANL-1111548257	MULTI			0,5720	0,5729	0,4454
MEM-1111247410	MULTI			0,5543	0,5586	0,5452
MEM-1112013766	MULTI			0,5674	0,5688	0,5565
TXS-1113503155	MULTI			0,4459	0,4461	0,3311

Exemplificando, os MD e LMD dos fluxos IP (Figura 3.5(a)), TCP (Figura 3.5(b)) e UDP (Figura 3.5(c)) do traço ANL-1111548257 apresentaram respectivamente não-linearidade e não-horizontalidade, indicando evidências de multifractalidade, enquanto que os MD e LMD dos fluxos IP (Figura 3.6(a)) e TCP (Figura 3.6(b)) do traço TXS-1111527905 apresentaram respectivamente linearidade e horizontalidade, indicando evidências de monofractalidade. Nos MD e LMD do fluxo UDP (Figura 3.6(c)) do traço TXS-1111527905, ζ_q é não-linear em q e h_q não é constante, típico de processos multifractais, diferindo da monofractalidade encontrada nos fluxos TCP e IP.

3.4 Impacto dos protocolos de transporte TCP e UDP no tráfego IP

Essa é uma constatação ainda não revelada na literatura: o tráfego UDP é multifractal enquanto a natureza monofractal ou multifractal do tráfego IP é ditada pela natureza do tráfego TCP. Este fato pode ser atribuído ao maior volume de bytes gerado pelo TCP, ou seja, aproximadamente 90% do tráfego é oriundo do protocolo TCP. Em outras palavras, ao se agregar o volume do tráfego em intervalos não sobrepostos, o volume em

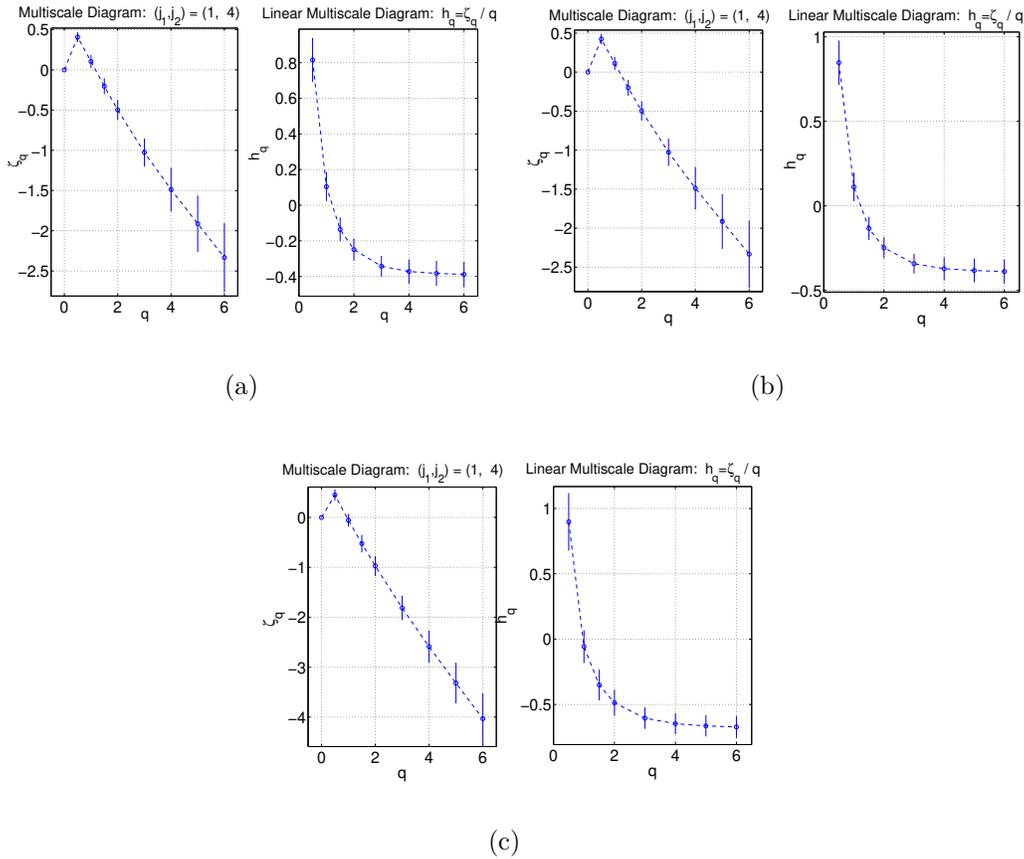


Figura 3.5: Diagrama Multiscale e Diagrama Multiscale Linear do fluxo IP (a), TCP (b) e UDP (c) do traço ANL-1111548257.

cada intervalo é majoritariamente oriundo do TCP. Assim, o valor do expoente $\alpha(t)$ vai ser influenciado fortemente pelo maior volume de bytes oriundos do TCP nos intervalos. Note na Tabela 3.3 que todos os tráfegos UDP são multifractalais, indicado pela ausência da coluna H_{UDP} para traços IP monofractalais. O fato dos traços TCP possuírem natureza ora monofractal ora multifractal derruba a hipótese existente na literatura de que é o mecanismo de reconhecimento do TCP que determina a multifractalidade do mesmo. No entanto, nada se pode afirmar se é este o mecanismo que determina a natureza *scaling* do tráfego TCP.

A Tabela 3.3 apresenta o valor de *Hurst* H para os traços monofractalais e o valor de γ para os traços multifractalais. Não se listou os valores do parâmetro H para o tráfego UDP pois estes são todos multifractalais.

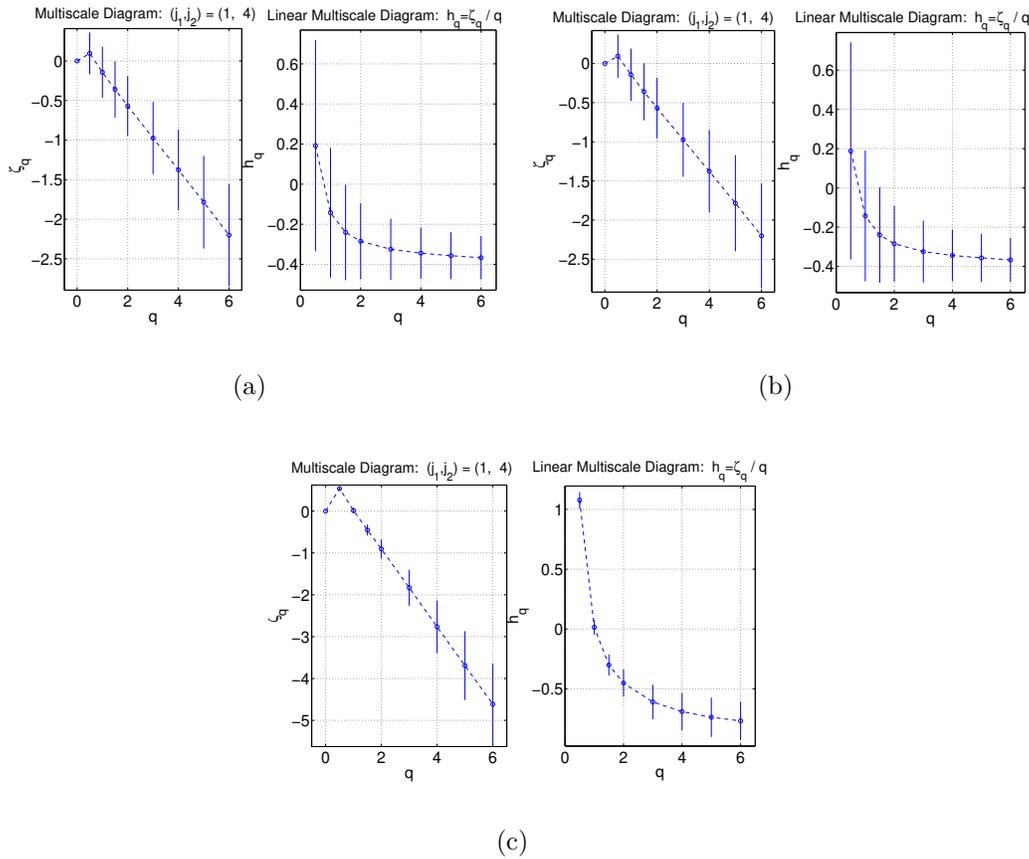


Figura 3.6: Diagrama Multiscale e Diagrama Multiscale Linear do fluxo IP (a), TCP (b) e UDP (c) do traço TXS-111527905.

Nota-se que os valores de H_{TCP} são tipicamente menores que os valores de H_{IP} , em no máximo 0,01, o que evidencia a influência do fluxo TCP no agregado IP. Os maiores valores de H_{IP} podem ser atribuídos a contribuição do volume dada pelo tráfego UDP.

3.5 Impacto da multifractalidade em sistemas de filas

As Figuras 3.7 e 3.8 mostram o comportamento da função de *Hölder* descrita em função do tempo, em milissegundos, para os fluxos multifractais IP, TCP e UDP dos traços TXS-1113503155 e MEM-1111247410. As funções de *Hölder* dos fluxos IP e TCP possuem comportamentos muito semelhantes, enquanto que a função de *Hölder* para o fluxo UDP possui um comportamento ligeiramente diferente. Observe que, coerentemente, os valores

de γ_{IP} e γ_{TCP} , observados na Tabela 3.3, também são muito parecidos e os valores de γ_{UDP} são um pouco menores. Nas simulações das filas com *buffer* infinito foram testados valores de utilização iguais a 1,0 e 0,8, com γ se comportando de maneira semelhante em todos os casos. Pode-se notar pelos valores de γ_{UDP} que o tráfego UDP tem um grande impacto na dinâmica das filas quando o tráfego IP é multifractal. Apesar de ser em proporção menor, o tráfego UDP possui impacto semelhante ao tráfego TCP. Este padrão foi observado para diferentes valores de utilização do sistema de filas.

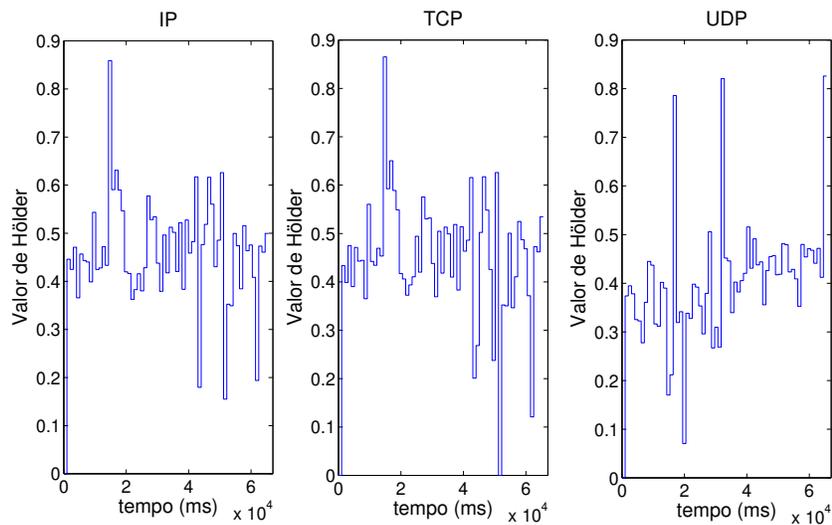


Figura 3.7: Plot da função de Hölder do traço TXS-1113503155.

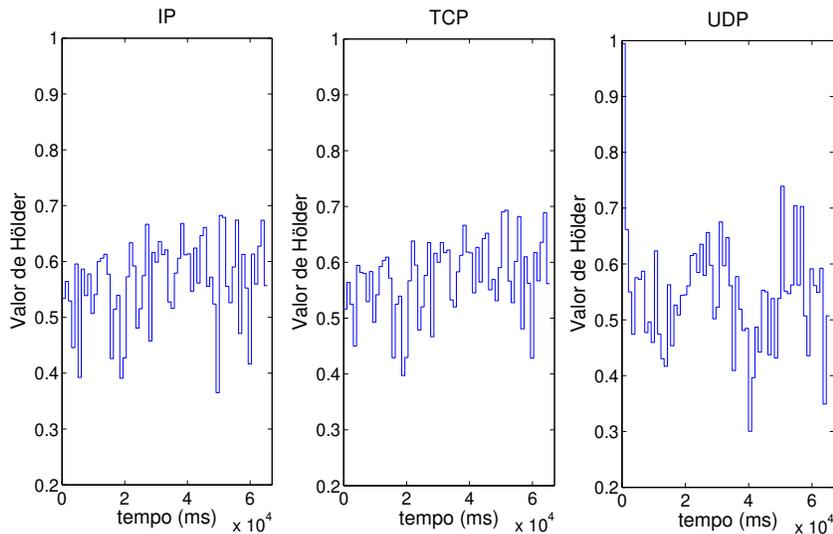


Figura 3.8: Plot da função de Hölder do traço MEM-1111247410.

3.6 Pesquisa sobre as causas da multifractalidade

O objetivo desta seção é descrever as possíveis causas e fatores que influenciam no comportamento *scaling* das pequenas escalas de tempo. A estratégia usada foi decompor o tráfego dos traços em diferentes modos para identificar os componentes que influenciam no comportamento do tráfego.

Os traços de tráfego foram caracterizados em dois modos: pelos intervalos de tempo entre as chegadas dos pacotes e pelos tamanhos dos pacotes. Usando estes dois tipos de classificação, analisou-se a composição dos pacotes dos traços, identificando componentes com características *scaling* diferentes.

A primeira classificação foi baseada na distribuição dos tempos entre as chegadas dos pacotes, sendo cada pacote definido como ‘denso’ ou ‘esparço’. Um pacote pertence à uma rajada densa se o intervalo de tempo entre a sua chegada e a chegada do pacote anterior é menor que T , e um pacote pertence à uma rajada esparsa se o intervalo de tempo entre a sua chegada e a chegada do pacote anterior é maior que T . O valor de T varia para cada traço e foi escolhido apropriadamente através da observação do histograma das diferenças de tempo entre as chegadas dos pacotes. O valor de T foi escolhido através da divisão da curva do histograma em duas regiões, buscando-se um número parecido de pacotes em ambas regiões e respeitando a característica da distribuição. A Tabela 3.4 contém o valor de T e as porcentagens das quantidades e dos bytes dos pacotes que pertencem às rajadas densas e esparsas. Em todos os traços, com exceção do fluxo UDP dos traços TXS-

1111527905, MEM-1112013766 e TXS-1113503155, a maior parte dos pacotes pertencem à rajadas densas e correspondem a maior quantidade de bytes do traço.

Tabela 3.4: Composição das diferenças entre chegadas dos pacotes.

Traço	Pkts rajadas	IP			TCP			UDP		
		T	%quant.	%bytes	T	%quant.	%bytes	T	%quant.	%bytes
TXS-1111527905	densas	0.002	94.97	96.30	0.002	95.20	96.24	0.05	18.41	28.01
	esparsas		5.02	3.69		4.79	3.75		81.41	71.98
COS-1069211539	densas	0.00005	61.06	58.15	0.00005	52.95	50.01	0.0005	58.93	63.35
	esparsas		38.93	41.84		47.04	49.99		41.06	36.64
COS-1094074322	densas	0.00003	68.45	64.25	0.00003	66.43	62.25	0.0005	66.74	66.38
	esparsas		31.54	35.74		33.56	37.74		33.25	33.61
COS-1094580942	densas	0.00003	61.28	58.22	0.00003	58.49	55.52	0.0005	65.79	70.66
	esparsas		38.71	41.77		41.50	44.47		34.20	29.33
ANL-1111548257	densas	0.002	72.67	89.46	0.002	72.54	89.39	0.02	60.17	67.29
	esparsas		27.32	10.53		27.45	10.60		39.82	32.70
MEM-1111247410	densas	0.001	60.22	61.19	0.001	56.97	57.53	0.01	78.27	76.35
	esparsas		39.77	38.80		43.02	42.46		21.72	23.64
MEM-1112013766	densas	0.001	58.16	67.52	0.001	51.90	61.82	0.002	40.03	46.27
	esparsas		41.83	32.47		48.09	38.17		59.96	53.72
TXS-1113503155	densas	0.01	54.53	71.33	0.02	66.74	80.55	0.03	14.15	17.93
	esparsas		45.46	28.66		33.25	19.44		85.84	82.06

Foi feito o estudo de como as diferenças de tempo entre as chegadas dos pacotes afetam o comportamento *scaling* em pequenas escalas de tempo. Cada traço foi decomposto em dois novos traços, um contendo os pacotes pertencentes às rajadas densas e outro contendo os pacotes pertencentes às rajadas esparsas. Foi feita a análise da multifractalidade nos novos traços, utilizando as mesmas ferramentas descritas no capítulo anterior. Os resultados mostraram que para os traços multifractais da Tabela 3.3, tanto na análise dos traços contendo os pacotes pertencentes às rajadas densas quanto na análise dos traços contendo os pacotes pertencentes às rajadas esparsas, o resultado permaneceu o mesmo, ou seja, a distribuição dos tempos entre as chegadas dos pacotes não tiveram influência na multifractalidade. Por outro lado, na análise dos traços monofractais da Tabela 3.3, o resultado permaneceu o mesmo (monofractal) somente para os traços com pacotes pertencentes às rajadas densas, enquanto que os traços com pacotes pertencentes às rajadas esparsas o resultado foi ora multifractal e ora monofractal.

Para exemplificação, a Figura 3.9 contém os Diagramas *Multiscale* e os Diagramas *Multiscale* Linear do traço composto pelos pacotes pertencentes às rajadas densas e do traço composto pelos pacotes pertencentes às rajadas esparsas do fluxo IP do traço TXS-1111527905. Observe que o traço composto pelos pacotes pertencentes às rajadas densas é monofractal (Figura 3.9(a)), enquanto que o traço composto pelos pacotes pertencentes às rajadas esparsas (Figura 3.9(b)) é multifractal.

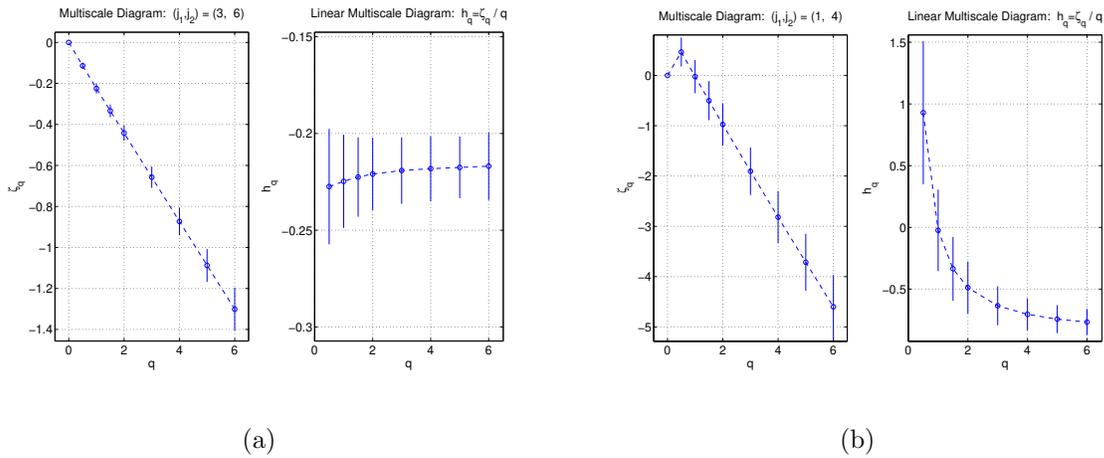


Figura 3.9: Diagrama *Multiscale* e Diagrama *Multiscale* Linear do traço composto pelos pacotes pertencentes às rajadas densas (a) e do traço composto pelos pacotes pertencentes às rajadas esparsas (b) do traço TXS-1111527905.

A segunda classificação foi feita considerando os tamanhos dos pacotes, cujos histogramas também foram plotados para cada traço. Para possibilitar a classificação de ‘pequenos’ versus ‘grandes’ foram introduzidos dois parâmetros: T_P e T_G , sendo $T_P < T_G$. Sendo t o tamanho de um pacote, um pacote pode ser classificado como:

- pequeno: se $t < T_P$
- grande: se $t > T_G$
- médio: se $T_P < t < T_G$

Tipicamente, através da análise dos histogramas, foi escolhido $T_P = 200$ bytes e $T_G = 800$ bytes.

A Tabela 3.5 contém as porcentagens das quantidades e dos bytes dos pacotes com tamanhos pequenos e grandes dos traços estudados. Em todos os traços, com exceção do fluxo IP e TCP do traço TXS-1111527905, a maior parte dos pacotes são pequenos. Por outro lado, a pequena porcentagem dos pacotes grandes contribuem com uma porção significativa no total de bytes do tráfego agregado.

Foi feito o estudo de como a distribuição dos tamanhos dos pacotes afeta o comportamento *scaling* em pequenas escalas de tempo. Separou-se os pacotes de cada traço de acordo com os seus tamanhos. Analisou-se a presença ou não de multifractalidade nos novos traços compostos pelos pacotes de tamanho pequeno e médio, e nos novos traços

Tabela 3.5: Composição dos tamanhos dos pacotes pequenos e grandes.

Traço	Pacotes	IP		TCP		UDP	
		%quantidade	%bytes	%quantidade	%bytes	%quantidade	%bytes
TXS-1111527905	$< T_P$	4.02	0.16	3.28	0.11	95.61	69.94
	$> T_G$	94.4	99.36	95.14	99.41	2.19	25.38
COS-1069211539	$< T_P$	53.22	5.74	54.18	4.82	73.63	26.73
	$> T_G$	26.57	75.02	32.04	82.57	4.73	26.45
COS-1094074322	$< T_P$	63.68	7.49	62.49	6.83	81.41	32.38
	$> T_G$	25.26	80.47	26.44	81.39	7.40	44.77
COS-1094580942	$< T_P$	57.31	6.03	55.64	5.38	78.80	28.84
	$> T_G$	28.65	80.17	30.32	81.22	6.87	42.19
ANL-1111548257	$< T_P$	53.72	4.68	51.77	3.78	79.99	52.99
	$> T_G$	40.14	91.68	44.02	93.43	6.48	19.93
MEM-1111247410	$< T_P$	68.51	10.92	64.72	8.45	68.51	10.92
	$> T_G$	22.18	77.79	26.48	82.53	23.25	79.86
MEM-1112013766	$< T_P$	75.67	16.80	66.17	8.74	92.09	64.09
	$> T_G$	14.35	66.08	22.08	76.52	3.53	23.00
TXS-1113503155	$< T_P$	81.13	21.18	75.86	13.91	96.68	73.06
	$> T_G$	9.81	60.12	12.36	65.03	2.12	24.10

compostos pelos pacotes de tamanho médio e grande. Os resultados mostraram que para os traços multifractais da Tabela 3.3, tanto na análise dos traços com apenas os pacotes pequenos e médios, quanto na análise dos traços com apenas pacotes médios e grandes, o resultado permaneceu o mesmo, ou seja, os tamanhos dos pacotes não tiveram influência na multifractalidade. Por outro lado, na análise dos traços monofractais da Tabela 3.3, o resultado permaneceu o mesmo (monofractal) somente para os traços com pacotes médios e grandes, enquanto que os traços com pacotes pequenos e médios o resultado ora foi multifractal e ora não foi encontrado intervalo *scaling*.

A análise do fluxo IP do traço TXS-1111527905 está contida na Figura 3.10, que contém o MD e o LMD do traço composto pelos pacotes pequenos e médios (Figura 3.10(a)), e o MD e o LMD do traço composto pelos pacotes médios e grandes (Figura 3.10(b)). Observe que o traço composto pelos pacotes pequenos e médios é multifractal, enquanto que o traço composto pelos pacotes médios e grandes é monofractal.

Como não foi possível concluir com muita clareza a causa da multifractalidade através dos resultados obtidos com a divisão dos tamanhos dos pacotes descrita acima, um novo procedimento foi realizado. Observando a distribuição global dos tamanhos dos pacotes, os pacotes contendo segmentos de dados possuem mais de 100 bytes e os pacotes contendo segmentos ACK possuem tamanhos menores que 60 bytes [18]. Assim sendo, o valor de 80 bytes discrimina bem estes dois tipos de pacotes. Genericamente, um pacote pode ser classificado como do tipo ‘ACK’ se seu tamanho for menor que 80 bytes, e pode ser classificado como do tipo ‘dados’ caso contrário.

A Tabela 3.6 contém as porcentagens das quantidades e dos bytes dos pacotes do tipo ACK e do tipo *dados* dos traços estudados. A grande maioria dos traços possui menos de

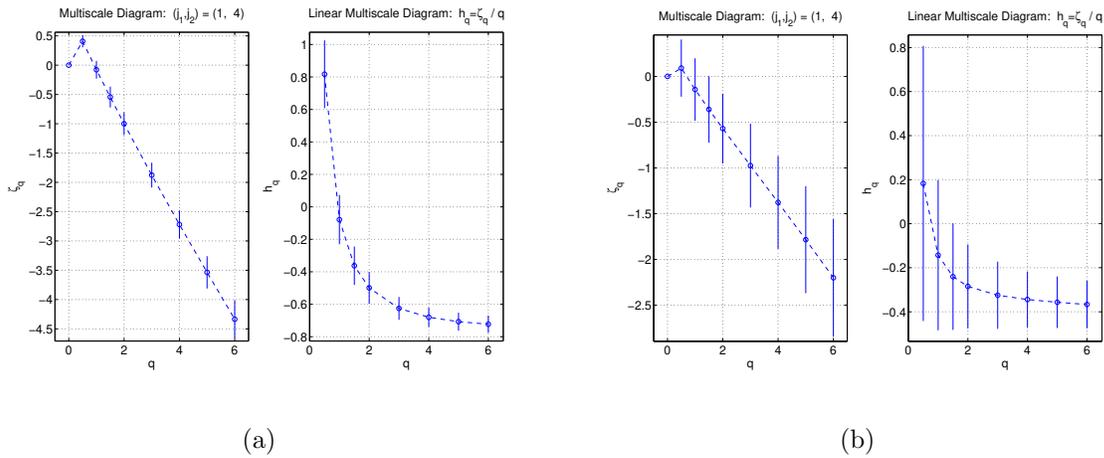


Figura 3.10: Diagrama *Multiscale* e Diagrama *Multiscale* Linear do traço composto pelos pacotes com tamanho pequeno e médio (a) e do traço composto pelos pacotes com tamanho médio e grande (b) do traço TXS-1111527905.

20% de diferença entre as quantidades de pacotes do tipo ACK e *dados*. Por outro lado, a quantidade de bytes dos pacotes do tipo *dados* contribui sempre com o maior volume do total de bytes do tráfego agregado.

Foi feito o estudo de como os tamanhos dos pacotes afetam o comportamento *scaling* em pequenas escalas de tempo dos novos traços compostos pelos pacotes do tipo ACK e *dados*. Os resultados mostraram que para os traços multifractais da Tabela 3.3, tanto na análise dos traços com pacotes do tipo ACK, quanto na análise dos traços com pacotes do tipo *dados*, os traços permaneceram multifractais. Por outro lado, na análise dos traços monofractais da Tabela 3.3, somente os traços com pacotes do tipo *dados* continuaram monofractais, enquanto que os traços com pacotes do tipo ACK se tornaram multifractais.

A partir destes resultados, pode-se concluir que: tráfegos de pacotes do tipo ACK são multifractais, enquanto que tráfegos de pacotes do tipo *dados* são ora monofractais ora multifractais. Portanto, também se pode concluir que a natureza *scaling* do tráfego é determinada pelo comportamento dos pacotes do tipo *dados*, ou seja, pacotes com tamanhos maiores que 80 bytes.

Para exemplificação, a nova análise do traço TXS-1111527905 está contida na Figura 3.11 que contém o MD e o LMD dos traços compostos pelos pacotes do tipo ACK e *dados*. Observe que o traço composto pelos pacotes do tipo ACK (Figura 3.11(a)) é multifractal, enquanto que o traço composto pelos pacotes do tipo *dados* (Figura 3.11(b)) é monofractal.

Tabela 3.6: Composição dos pacotes do tipo ACK e *dados*.

Traço	Pacotes	IP		TCP		UDP	
		%quantidade	%bytes	%quantidade	%bytes	%quantidade	%bytes
TXS-1111527905	$< T$	3.16	0.10	3.05	0.09	2.48	1.35
	$> T$	96.84	99.90	96.95	99.91	97.52	98.65
COS-1069211539	$< T$	45.32	3.99	50.05	3.90	47.49	12.42
	$> T$	54.68	96.01	49.95	96.10	52.51	87.58
COS-1094074322	$< T$	58.35	5.95	58.40	5.67	56.72	16.52
	$> T$	41.65	94.05	41.60	94.33	43.28	83.48
COS-1094580942	$< T$	51.19	4.51	50.89	4.24	55.74	14.32
	$> T$	48.81	95.49	49.11	95.76	44.26	85.68
ANL-1111548257	$< T$	49.36	3.83	48.75	3.34	64.94	38.02
	$> T$	50.64	96.17	51.25	96.66	35.06	61.98
MEM-1111247410	$< T$	48.35	5.58	52.77	5.28	14.77	5.86
	$> T$	51.65	94.42	47.23	94.72	85.23	94.14
MEM-1112013766	$< T$	48.12	7.66	60.22	6.82	17.93	8.42
	$> T$	51.88	92.34	39.78	93.18	82.07	91.58
TXS-1113503155	$< T$	60.50	12.36	71.61	11.99	6.96	4.08
	$> T$	39.50	87.64	28.39	88.01	93.04	95.92

3.7 Considerações parciais

A natureza do tráfego IP tem sido discutida intensamente na literatura nos últimos anos. O motivo por este interesse deve-se ao fato do dimensionamento de enlaces ser influenciado fortemente pela natureza monofractal ou multifractal deste tráfego. Ainda, tem-se investigado quais protocolos e quais mecanismos destes protocolos determinam mais preponderantemente a natureza do tráfego IP.

Este capítulo procurou responder se o tráfego IP é monofractal ou multifractal e contribuiu para elucidar a polêmica sobre a natureza do tráfego IP, apontando que não se pode generalizar que traços IP são de um tipo ou de outro. Além disso, mostrou-se também que não é possível afirmar que é o mecanismo de reconhecimento do TCP que gera multifractalidade.

Constatou-se que todos os traços UDP apresentam características multifractais e que a natureza do agregado IP é determinada pelo tráfego gerado pelo protocolo TCP dado que este é responsável por aproximadamente 90% do tráfego agregado.

Verificou-se que em um sistema de filas, apesar de em proporção menor, o tráfego UDP possui impacto semelhante ao tráfego TCP quando este é multifractal.

Neste capítulo, procurou-se mostrar também as possíveis causas e fatores que influenciam no comportamento *scaling* das pequenas escalas de tempo. O tráfego foi caracterizado pelos tempos entre as chegadas dos pacotes e pelos tamanhos dos pacotes. Usando estes dois tipos de classificação, analisou-se a composição dos pacotes dos traços, identificando componentes com características *scaling* diferentes. As principais conclusões foram: o tráfego de pacotes do tipo ACK, ou seja, o tráfego de pacotes com tamanhos menores

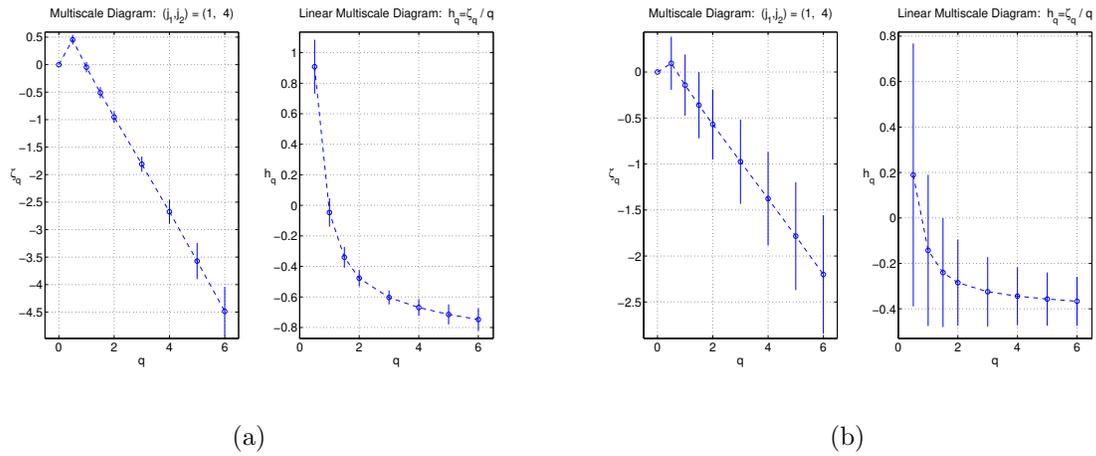


Figura 3.11: Diagrama Multiscale e Diagrama Multiscale Linear do traço composto pelos pacotes do tipo ACK (a) e do traço composto pelos pacotes do tipo *dados* (b) do traço TXS-1111527905.

que 80 bytes, é multifractal, enquanto que a natureza *scaling* do tráfego IP é determinada pelo comportamento dos pacotes do tipo *dados*, ou seja, pacotes com tamanhos maiores que 80 bytes.

Capítulo 4

Modelagem de tráfego multifractal

Modelos de tráfego precisos capturam importantes características do tráfego, melhorando sua compreensão e permitindo o estudo dos efeitos dos parâmetros do modelo no desempenho das redes.

O correto dimensionamento de recursos e um controle de admissão eficaz das redes de alta velocidade com garantia da qualidade de serviço (QoS) e, em particular, das redes ATM, dependem em grande parte da habilidade dos modelos de tráfego em representar fidedignamente as características do tráfego real. É através dos modelos de tráfego que é possível prever os recursos da rede de forma a assegurar que os requisitos da qualidade de serviço (QoS) serão garantidos.

Levando em consideração as mudanças rápidas no tráfego, novos modelos sempre surgem e são alvos constantes de pesquisas. Inúmeros modelos são apresentados na literatura, com comportamentos e finalidades diversas, porém, atualmente não há nenhum modelo concreto e definitivo que descreva o tráfego na rede, não existindo um consenso quanto ao modelo ideal.

Este capítulo apresenta dois modelos de tráfego multifractal conhecidos na literatura: o modelo wavelet multifractal (MWM) e o modelo MAP multifractal. Enquanto o MWM é um modelo baseado em transformadas *wavelet* e que modela dados positivos, estacionários e com dependência de longa duração, o MAP adota um modelo Markoviano para aproximar o efeito multifractal. No próximo capítulo, será analisada a eficácia destes modelos em reproduzir corretamente a ocupação em uma fila para diferentes capacidades de armazenamento e taxas de serviço.

4.1 Modelo wavelet multifractal

Descreve-se, nesta seção, um modelo wavelet multifractal (MWM) usado para modelar o tráfego da rede e que foi proposto por [41]. O modelo wavelet multifractal (MWM)

é baseado em uma cascata multiplicativa no domínio wavelet de Haar. A transformada wavelet discreta provê uma representação multi-escalar de um processo randômico de uma dimensão ou sinal em termos de versões escaladas e deslocadas de um protótipo de função wavelet $\psi(t)$ e versões deslocadas de uma função escalar $\phi(t)$ [13]. A família das funções definidas por

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2}\psi(2^j t - k), \quad \phi_{j,k}(t) = 2^{j/2}\phi(2^j t - k) \quad (4.1)$$

forma uma base ortonormal e o sinal/processo pode ser representado por

$$f(t) = \sum_k U_{J_0,k} \phi_{J_0,k}(t) + \sum_{j=J_0}^{\infty} \sum_k W_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (4.2)$$

Os coeficientes wavelet $W_{j,k}$ e os coeficientes escalares $U_{j,k}$ são dados por

$$W_{j,k} = \int f(t) \psi_{j,k}(t) dt, \quad U_{j,k} = \int f(t) \phi_{j,k}(t) dt \quad (4.3)$$

Na representação acima, j representa a escala e k , a localização de espaço do sinal. É utilizada a família wavelet Haar neste trabalho. O sistema Haar é definido pelo sistema de funções

$$\phi(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } 0 \leq t \leq 0.5 \\ -1 & \text{se } 0.5 < t < 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.5)$$

Os coeficientes de Haar escalar e wavelet podem ser calculados recursivamente como segue

$$\begin{aligned} U_{j-1,k} &= 2^{-1/2} \{U_{j,2k} + U_{j,2k+1}\} \\ W_{j-1,k} &= 2^{-1/2} \{U_{j,2k} - U_{j,2k+1}\} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Cada amostra do processo MWM é obtida como produto de variáveis randômicas independentes. Para modelar sinais não-negativos usando wavelets, condições suficientes são desenvolvidas nos coeficientes escalar e wavelet. Para o sistema wavelet Haar, estas condições podem ser obtidas facilmente. Os coeficientes escalar $U_{j,k}$ representam a média local do sinal em diferentes escalas e trocas de tempo. Eles são não-negativos se o sinal é maior ou igual a zero.

$$f(t) \geq 0 \Leftrightarrow U_{j,k} \geq 0 \quad \forall j, k \quad (4.7)$$

A partir da equação (4.6), pode-se escrever

$$\begin{aligned} U_{j,2k} &= 2^{-1/2}\{U_{j-1,k} + W_{j-1,k}\} \\ U_{j,2k+1} &= 2^{-1/2}\{U_{j-1,k} - W_{j-1,k}\} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Dado que o sinal deve ser sempre positivo, pode-se observar que os coeficientes wavelet satisfazem

$$|W_{j,k}| \leq U_{j,k} \quad \forall j, k \quad (4.9)$$

Um modelo multiplicativo multi-escalar simples pode ser obtido mantendo-se estas limitações. Os coeficientes wavelet são gerados usando a fórmula

$$W_{j,k} = U_{j,k} A_{j,k} \quad (4.10)$$

onde $A_{j,k}$ é uma variável randômica no intervalo $(-1, 1)$. A equação (4.8) pode ser modificada e escrita como

$$\begin{aligned} U_{j,2k} &= 2^{-1/2}\{1 + A_{j-1,k}\}U_{j-1,k} \\ U_{j,2k+1} &= 2^{-1/2}\{1 - A_{j-1,k}\}U_{j-1,k} \end{aligned} \quad (4.11)$$

A síntese do algoritmo pode ser resumida como segue:

- Estabeleça $j = 0$ (resolução mais grossa). Fixe ou compute (se dado de teste disponível) o coeficiente escalar $U_{0,0}$ com “raíz” mais grossa, estabelecendo assim a média global do sinal,
- Na escala j , gere os multiplicadores randômicos $A_{j,k}$ e calcule os coeficientes wavelet como $W_{j,k} = A_{j,k} U_{j,k}$,
- Na escala j , use $U_{j,k}$ e $W_{j,k}$ para calcular $U_{j+1,2k}$ e $U_{j+1,2k+1}$ de acordo com as definições anteriores do conjunto de equações,
- Itere os passos anteriores substituindo j por $j + 1$ até a escala mais fina $j = n$ ser alcançada.

Os coeficientes $C^{(n)}[k]$ obtidos na escala mais fina constituem o processo MWM. Uma expressão de forma fechada pode ser obtida. Um esquema de indexação para relacionar o coeficiente de escala mais grossa $U_{0,0}$ com seu descendente em escalas mais finas é necessário. Seja k_j a variável indexando o deslocamento dos descendentes de $U_{0,0}$ nas

escalas mais finas j . O deslocamento k_j dos coeficientes escalar é relacionado com o deslocamento de um dos seus descendentes diretos como segue:

$$k_{j+1} = 2k_j + k'_j \quad (4.12)$$

com $k'_j = 0$ correspondendo ao descendente esquerdo e $k'_j = 1$ correspondendo ao descendente direito. A Figura 4.1 fornece uma representação ilustrativa.

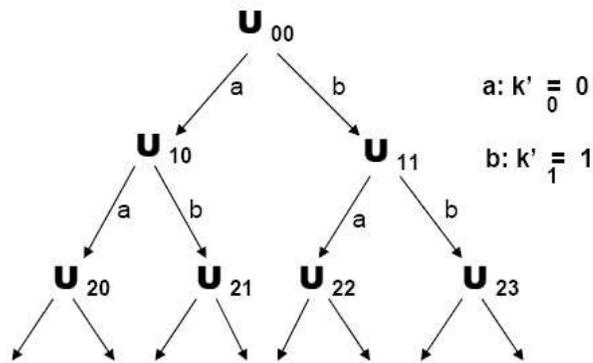


Figura 4.1: Relacionamento entre os descendentes da esquerda e da direita.

A relação geral para os coeficientes pode agora ser escrita como,

$$U_{j,k_j} = 2^{-j/2} U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} \left[1 + (-1)^{k'_i} A_{i,k_i} \right] \quad (4.13)$$

$$W_{j,k_j} = 2^{-j/2} U_{0,0} \prod_{i=0}^{j-1} \left[1 + (-1)^{k'_i} A_{i,k_i} \right] A_{j,k_j} \quad (4.14)$$

As condições seguintes são assumidas para os multiplicadores $A_{j,k}$:

- Os multiplicadores $A_{j,k}$, $k = 0, \dots, 2^{j-1}$ são identicamente distribuídos.
- $A_{j,k}$ são distribuídos simetricamente com respeito ao zero.
- $A_{j,k}$ são independentes de $U_{0,0}$ e $A_{l,k}$ para $l > k$

Com as suposições acima, pode-se escrever,

$$C^{(n)}[k] = 2^{-n} U_{0,0} \prod_{i=0}^{n-1} \left[1 + (-1)^{k'_i} A_{i,k_i} \right] \quad (4.15)$$

e com a suposição independência como dada antes, pode-se escrever

$$E [C^{(n)}[k]^q] = E [U_{0,0}^q] \prod_{j=1}^{n-1} E \left[\frac{1 + A_j}{2} \right] \quad (4.16)$$

Como $n \rightarrow \infty$, por exemplo, como o número de etapas na cascata aumenta, uma versão escalar aproximada de $C^{(n)}[k]$ irá convergir para uma variável randômica log normal. Para aproximar o comportamento de correlação do sinal destino, a energia dos coeficientes wavelet é variada através das escalas. Os multiplicadores A_j são escolhidos para controlar a energia do coeficiente wavelet. Foi provado por Wornell que wavelets são uma aproximação do KLT para processos $1/f$ [50]. Os coeficientes wavelet correlacionam aproximadamente os processos $1/f$. A forma mais simples de controlar a variação de energia com escalas é fixar a energia com a escala mais grossa ($j = 0$) e fixar as taxas de energia para as outras escalas como

$$\eta_j = \frac{Var [W_{j-1,k}]}{Var [W_{j,k}]} \quad 0 \leq j \leq n \quad (4.17)$$

Substituindo as expressões para $W_{j,k}$ na relação acima

$$\begin{aligned} \eta_j &= \frac{E [W_{j-1,k}^2]}{E [W_{j,k}^2]} \\ &\sim \frac{2 E [A_{j-1}^2]}{E [A_j^2] [1 + E(A_{j-1}^2)]} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Para emparelhar o decaimento da variância, a expressão acima pode ser resolvida recursivamente para $E [A_j^2]$ em termos de η_j e $E [A_{j-1}^2]$ para $j = 1, \dots, n-1$. A inicialização na escala $j = 0$ pode ser feita por

$$E [A_0^2] = \frac{E [W_{0,0}^2]}{E [U_{0,0}^2]} \quad (4.19)$$

A distribuição simétrica β é usada para a distribuição dos multiplicadores. É compacta e tratável analiticamente. Uma variável randômica $\beta(p, p)$ simetricamente distribuída entre $(-1,1)$ possui a função densidade de probabilidade dada por

$$f_X(x) = \frac{(1+x)^{p-1} (1-x)^{p-1}}{B(p, p) 2^{2p-1}} \quad (4.20)$$

onde $B(p, p)$ é a função beta, $p > 0$. A variância da variável randômica distribuída da maneira acima é dada por [38]:

$$E [X^2] = \frac{1}{2p + 1} \quad (4.21)$$

Susbtituindo estes nas equações anteriores, tem-se,

$$\begin{aligned} \eta_j &= \frac{2 E [A_{j-1}^2]}{E [A_j^2] E [1 + A_{j-1}^2]} \\ &= \frac{2 \frac{1}{2p_j+1}}{\frac{1}{2p_j+1} \left[1 + \frac{1}{2p_j+1} \right]} \end{aligned} \quad (4.22)$$

o qual simplificando fornece

$$p_j = \frac{\eta_j}{2} [1 + p_{j-1}] - \frac{1}{2} \quad (4.23)$$

O modelo MWM exhibe comportamento multifractal consistente com o tráfego atual provendo um algoritmo de ordem $O(n)$ para geração de um traço contendo n pontos.

4.2 Modelo MAP multifractal

Em [24] foi proposto um modelo Markoviano que exhibe comportamento multifractal. Foi utilizado um processo de chegada markoviano (MAP - *Markovian Arrival Processes*) com uma estrutura baseada no mecanismo de geração da transformada wavelet de Haar.

Para exibir o comportamento multifractal foi usado um processo de chegada markoviano do tipo Processo de Poisson modulado por Markov (MMPP - *Markov Modulated Poisson Process*) com uma estrutura simétrica de cubo de n dimensões. As taxas de chegadas geradas são determinadas de acordo com a variação do processo de chegada em diferentes escalas de tempo. Similarmente à transformada wavelet de Haar, que capta as variações do conjunto de dados para os diferentes níveis de agregação ou escalas de tempo, a estrutura MAP proposta fornece diferentes variações da taxa de chegada em diferentes escalas de tempo.

Como o segundo momento dos coeficientes de Haar pode capturar o comportamento multifractal do conjunto de dados, o método utilizado para parametrizar o modelo procura aproximar o segundo momento dos coeficientes de Haar, com as variações de taxas produzidas pela cadeia MMPP nas diferentes escalas de tempo.

A composição da estrutura MAP proposta segue um padrão similar à geração da transformada wavelet de Haar. Assume-se que a unidade de tempo é tal que a intensidade da taxa de chegada é um. O MAP de um estado com taxa de chegada 1 representa o processo de chegada na maior escala de tempo.

Na próxima escala de tempo, $1/\lambda$, uma cadeia MMPP de dois estados com gerador

$$\begin{array}{|c|c|} \hline -\lambda & \lambda \\ \hline \lambda & -\lambda \\ \hline \end{array}$$

e com taxas de chegada iguais a $1 - a_1$ e $1 + a_1$ ($-1 \leq a_1 \leq 1$) representam a variação do processo de chegada. Esta composição mantém a taxa média de chegada inalterada.

Os mesmos passos são seguidos no restante da composição. É introduzida uma nova dimensão e gerado o cubo de n dimensões, de modo que o comportamento das escalas anteriores fique inalterado. É considerada a escala de tempo $1/\gamma\lambda$, com $\gamma > 1$, uma cadeia MMPP de quatro estados com gerador

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline \bullet & \lambda & \gamma\lambda \\ \hline \lambda & \bullet & \gamma\lambda \\ \hline \gamma\lambda & & \bullet & \lambda \\ \hline & \gamma\lambda & \lambda & \bullet \\ \hline \end{array}$$

e taxas de chegadas iguais a $(1 - a_1)(1 - a_2)$, $(1 + a_1)(1 - a_2)$, $(1 - a_1)(1 + a_2)$. A variação do processo de chegada é representada por $(1 + a_1)(1 + a_2)$, com $(-1 \leq a_1, a_2 \leq 1)$. Com este MMPP, o parâmetro a_1 (a_2) determina a variância do processo de chegada na escala de tempo $1/\lambda$ ($1/\gamma\lambda$).

Seguindo as mesmas regras de construção, é possível compor qualquer estrutura MAP deste tipo de nível mais alto.

Uma cadeia MAP de n níveis é composta de 2^n estados e possui $n + 2$ parâmetros. Os parâmetros γ e λ definem as escalas de tempo que serão consideradas, e os parâmetros a_1, a_2, \dots, a_n determinam a variância do processo de chegada.

Os valores dos parâmetros γ e λ são obtidos baseado na inspeção do conjunto de dados. A maior escala de tempo, T_M , e a menor escala de tempo, T_m , são definidas e calcula-se γ e λ a partir de:

$$T_M = \frac{1}{\lambda}; \quad T_m = \frac{1}{\gamma^n \lambda}, \quad (4.24)$$

onde $\gamma > 1$.

No presente estudo, foram utilizados $n = 4$ e $n = 5$, resultando em uma cadeia de 16 e 32 estados, respectivamente. Estes valores foram utilizados como sugestão do autor baseado na precisão, complexidade e custo operacional do modelo. Para o cálculo de T_M adotou-se um procedimento baseado no tempo em que a função de autocorrelação atinge zero.

Para a obtenção dos parâmetros do modelo foi utilizado o seguinte procedimento:

1. Para cada traço real, foi produzida uma seqüência com os tempos entre chegadas dos pacotes e uma seqüência com a contagem dos pacotes em intervalos de 1s.

2. Determinou-se a média do tempo entre chegadas dos pacotes $E[iat]$.
3. Mediu-se o tempo T_0 em que a função de autocorrelação da seqüência com a quantidade de pacotes em intervalos de 1s atinge o valor zero (ou próximo disto).
4. Calculou-se a maior escala de tempo em função do tempo médio entre chegadas, $T_M = E[iat] T_0$. Para coerência com os níveis de agregação calculados pela transformada wavelet de Haar, T_M foi aproximado para uma potência de 2.
5. Calculou-se a menor escala de tempo T_m em função de T_M e γ . Fixou-se γ igual a 8 (sugestão do autor) e o número de níveis n igual a 4 ou 5.
6. Utilizando a seqüência do tempo entre chegada dos pacotes, determinou-se os coeficientes wavelet de Haar para uma escala de tempo T_M . Por exemplo, $T_M = 2^{15}$ significa que os coeficientes serão calculados para 15 escalas de tempo.
7. Calculou-se os melhores valores para os parâmetros de variabilidade a_1, a_2, \dots, a_n através de um algoritmo de otimização (*downhill simplex method*) que otimiza a soma dos erros relativos ao segundo momento dos coeficientes wavelet de Haar.

O algoritmo implementado pelo autor calcula o segundo momento dos coeficientes wavelet de Haar gerado pela cadeia MMPP e os compara com os coeficientes da seqüência real. Iterativamente, os valores de a_1, a_2, \dots, a_n são otimizados pelo algoritmo *downhill simplex method* de forma a minimizar a distância dos erros para os coeficientes wavelet de Haar da seqüência real.

4.3 Considerações parciais

Modelos de tráfego que captam estatísticas multifractais têm sido propostos na literatura [41][40][21]. A inserção de um novo modelo requer a realização de estudos comparativos que mostrem as suas vantagens e desvantagens em relação aos modelos existentes. Assim, realizou-se um estudo objetivando compreender alguns modelos existentes e conseqüentemente, obter medidas que permitam a realização de estudos comparativos.

O Modelo *wavelet* multifractal (MWM) desenvolvido por Riedi *et. al.* [41] é baseado em *wavelets* e reproduz o comportamento multifractal do tráfego IP, modelando dados positivos, estacionários e com dependência de longa duração. O modelo MWM foi selecionado para comparação com modelo proposto nesta dissertação por ser amplamente referenciado na literatura e obter bons resultados em vários testes estatísticos.

Outro modelo utilizado nesta dissertação é o modelo proposto por [24], que utiliza um Processo de chegada Markoviano (MAP - *Markovian Arrival Processes*) com uma estrutura baseada no mecanismo de geração de transformada wavelet de Haar para aproximar

o efeito multifractal. As medidas geradas analiticamente pelo modelo MAP foram comparadas com os tamanhos médios da fila obtidos das simulações dos outros modelos.

Capítulo 5

Modelos de tráfego para fluxos UDP

O protocolo Transmission Control Protocol (TCP), dominante na Internet, é apropriado para aplicações que necessitam entrega confiável dos dados, porém, impróprio para aplicações com requisitos de tempo real devido à introdução de retardos e limitantes na taxa de transmissão.

O crescente uso do protocolo UDP pelas emergentes aplicações que necessitam requisitos de tempo real demanda a necessidade de se entender melhor o impacto do tráfego UDP no dimensionamento e no controle de tráfego da rede, dado que este tipo de tráfego não reage à situações de congestionamento.

Evidências experimentais recentes apontam que o crescente uso do protocolo UDP altera consideravelmente a natureza *scaling* do tráfego IP [9] e apesar de existirem diversos modelos para tráfego TCP [15][7][16], pouca atenção tem sido dada a modelagem de tráfego UDP. Em [10], foi apontada a necessidade premente de modelos precisos para tráfego UDP para que mecanismos de controle de tráfego, tais como Gerenciamento Ativo de Filas (Active Queue Management) possam ser melhor avaliados.

Modelos de tráfego que utilizam estruturas repetitivas ou hierárquicas para gerar tráfego pseudo-fractal estão disponíveis na literatura [49][22]. Estes modelos exploram uma estrutura bem definida para gerar explosividade em diferentes escalas de tempo. No entanto, estes modelos não são facilmente generalizáveis para o caso de tráfego multifractal, dado que em pequenas escalas de tempo a explosividade do tráfego difere significativamente da explosividade em escalas de tempo maiores, o que não ocorre em fluxos monofractais.

Neste capítulo, é proposto um modelo de tráfego para fluxos UDP com quatro estados, desenvolvido a partir da caracterização das distribuições de traços reais coletados na Internet. Outros modelos com dois e oito estados também foram derivados para comparação com o modelo com quatro estados. A abordagem utilizada para se derivar os modelos foi essencialmente experimental, ou seja, ao invés de se construir os modelos a

partir das regras de funcionamento do protocolo, os modelos foram derivados a partir da caracterização das diversas distribuições estatísticas identificadas em traços de tráfego real. Optou-se pela derivação dos modelos a partir da caracterização de traços reais, pois estes levam a conclusões mais realistas em estudos de controle de tráfego em redes. Não é de conhecimento dos autores a existência de modelos de tráfego UDP baseados em traços reais.

A validação do modelo com quatro estados proposto foi realizada através da comparação dos resultados obtidos em simulações da dinâmica de uma fila alimentada por traços reais de fluxo UDP e de uma fila alimentada por seus respectivos traços sintéticos gerados pelo modelo. O modelo proposto foi comparado com os modelos com dois e oito estados, bem como com os modelos MWM e MAP descritos no capítulo anterior. Mostra-se que um número de estados igual a quatro leva a uma avaliação satisfatoriamente precisa do tamanho da fila e da probabilidade de perda, que é uma das principais métricas de interesse em diferentes estudos de mecanismos de controle de tráfego. Além da comparação mencionada, mostra-se que o tráfego gerado pelo modelo com quatro estados reproduz com relativa precisão as correlações do tráfego UDP através da análise do diagrama A-V. Os resultados obtidos nos experimentos realizados indicam que o modelo proposto pode ser utilizado em estudos que englobam tráfego UDP, produzindo resultados precisos com uma pequena margem de erros.

5.1 Descrição dos traços utilizados nos experimentos

Para propor um modelo realista de tráfego para fontes UDP, analisou-se o tráfego coletado em redes operacionais. Para tanto, foram utilizados traços de pacotes coletados na Internet que estão publicamente disponíveis em [45]. Para garantir a generalidade do estudo foram escolhidos cinco traços aleatoriamente. A Tabela 5.1 possui algumas informações resumidas destes traços. A duração de cada um dos traços é de aproximadamente 90 segundos. Os traços brutos foram processados com a Ferramenta CAIDA Coralreef [43] e com programas em C++ desenvolvidos pelos autores, permitindo a extração do horário de chegada (com precisão em microsegundos), protocolo IP e tamanho (em bytes) de cada pacote do traço. O fluxo TCP e UDP de cada traço IP foram isolados e constituíram dois novos traços.

Deve-se observar que a percentagem típica do volume de tráfego UDP nos traços analisados é de 20%. Apenas 10% do tráfego total corresponde ao protocolo HTTP. Os 70% restantes correspondem a aplicações que utilizam TCP e utiliza portas altas (not well known). Tal constatação evidencia a constante mudança do tráfego da Internet que no passado era majoritariamente HTTP. O tráfego UDP dos traços estudados é composto basicamente por aplicações que não são “well know” (conhecidas), ou seja, é composto

por aplicações que utilizam portas altas para trafegar na rede e que por isso não são facilmente identificáveis. As aplicações são bastante variadas e por isso não há alguma aplicação (porta) que se destaque.

Todos os traços da Tabela 5.1 foram analisados, mas optou-se por mostrar apenas os resultados obtidos com os traços BWY-1069762448, BWY-1069224416 e UFL-1095079334, dado que são representativos dos resultados dos demais traços. Reproduzir os resultados obtidos com os demais traços seria repetitivo e levaria a um texto desnecessariamente desgastante, não alterando as conclusões e resultados descritos ao longo da tese. Os gráficos dos ajustes das distribuições dos traços COS-1069211539 e MEM-1112013766 estão contidos no Apêndice A.

Tabela 5.1: Tabela com informações dos traços estudados

Traço	Horário da coleta	Quant. pacotes IP	Quant. pacotes UDP	Local
BWY-1069762448	25-Nov-2003 04:49	1186822	208076	Columbia University
BWY-1069224416	18-Nov-2003 23:43	2025369	346129	Columbia University
COS-1069211539	18-Nov-2003 19:50	1733491	149996	Colorado State Univ.
UFL-1095079334	13-Sep-2004 06:11	4606889	258808	University of Florida
MEM-1112013766	28-Mar-2005 04:49	70259	22384	University of Memphis

5.2 Metodologia utilizada

O estudo para derivar um modelo de tráfego UDP consistiu em isolar o fluxo UDP do fluxo TCP nos traços IP e a partir destes novos traços caracterizar a distribuição do tempo entre chegadas e a distribuição do tamanho de pacotes, através da análise estatística dos dados.

A metodologia utilizada para derivar o modelo de tráfego UDP englobou os seguintes passos:

1. Separação dos pacotes UDP dos traços IP selecionados;
2. Avaliação da distribuição mais adequada para os tempos entre as chegadas dos pacotes;
3. Avaliação da distribuição mais adequada para os tamanhos dos pacotes;
4. Derivação do modelo a partir das distribuições e respectivos valores das estatísticas identificadas nos traços reais;
5. Geração dos traços sintéticos a partir do modelo proposto;

6. Verificação da validade dos tráfegos gerados sinteticamente a partir da simulação de um sistema de filas. A simulação consiste em reproduzir dois sistemas de filas: um cuja entrada é o traço real e outro cuja entrada é o traço gerado sinteticamente. As demais características dos dois sistemas de filas são idênticas. A validação do modelo é realizada através da comparação da semelhança da dinâmica dos dois sistemas de filas.

As próximas seções descrevem com mais detalhes como foi realizada cada etapa da modelagem.

5.3 Identificação das distribuições dos traços reais

Observando o protocolo de transporte utilizado por cada pacote, o fluxo UDP foi isolado do fluxo TCP nos traços IP.

Para a verificação das distribuições que melhor representam os tamanhos dos pacotes e os tempos entre as chegadas dos mesmos, utilizou-se o software estatístico SAS e o software matemático Matlab. A precisão das distribuições foi avaliada por índices de confiança cujo cálculo está embutido nos softwares SAS e Matlab. Foram realizados testes de hipótese de Kolmogorov-Smirnov com nível de significância igual a 0,01 para diversas distribuições, dentre elas: Beta, Exponencial, Gama, Lognormal, Normal, *Weibull* e Pareto. O Apêndice B contém as definições das principais distribuições utilizadas ao longo desta tese.

A distribuição que representa os tamanhos dos pacotes apresentou uma característica bimodal, como pode ser observado nos gráficos da Figura 5.1. A característica bimodal deve-se ao fato dos pacotes do tráfego UDP pertencerem à diferentes aplicações. Algumas destas aplicações geram pacotes pequenos e outras pacotes grandes. Apesar dos resultados dos testes de hipótese apontarem que a curva de melhor ajuste para a distribuição dos tamanhos dos pacotes é a distribuição Beta, esta ainda não obteve aceitação da hipótese nos testes de hipótese. Como pode ser percebido nos gráficos da Figura 5.1, os dois picos da distribuição bimodal encontram-se ao redor dos tamanhos de pacotes iguais a 120 bytes e a 1350 bytes. Nos gráficos, o eixo vertical representa a quantidade de pacotes cujos tamanhos estão representados no eixo horizontal.

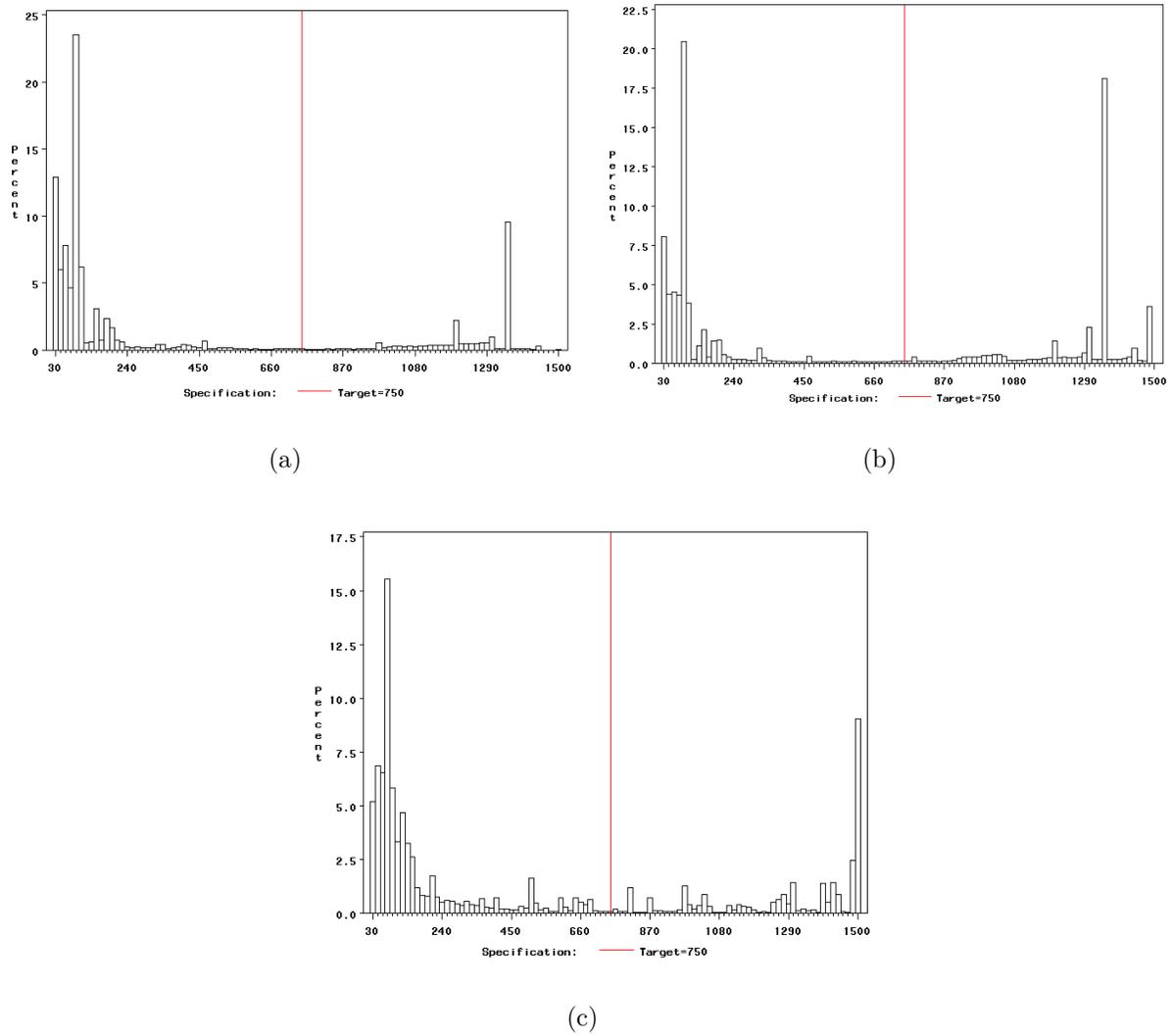


Figura 5.1: Distribuição dos tamanhos dos pacotes UDP dos traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (b) e UFL-1095079334 (c).

Dada a característica bimodal da distribuição dos tamanhos dos pacotes e considerando que tais distribuições são de difícil caracterização e uso, propôs-se inicialmente um modelo de tráfego com dois estados, onde cada estado representa uma das duas regiões da distribuição dos tamanhos dos pacotes.

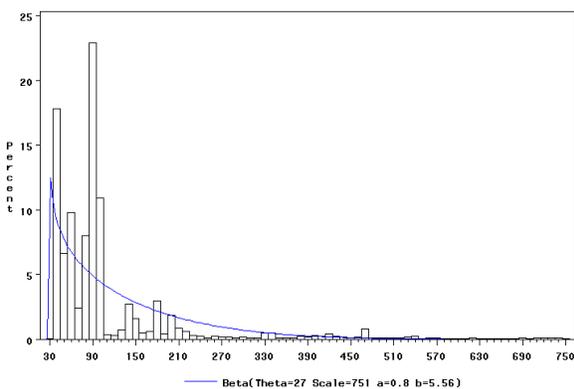
Nestes dois estados, considerou-se o estado *um* para os pacotes com tamanhos menores que 750 bytes, e o estado *dois* para os pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes. A divisão foi feita em 750 bytes por ser aproximadamente a média dos tamanhos dos pacotes e por permitir que cada estado pudesse ser caracterizado por uma distribuição unimodal distinta. A reta vertical em cada gráfico da Figura 5.1 mostra esta divisão.

Realizando novamente os testes de hipótese das distribuições para os traços obtidos a partir da separação do traço original em traços contendo os pacotes com tamanhos menores e maiores que 750 bytes, obteve-se que a distribuição que mais se adequa aos tamanhos dos pacotes é a distribuição Beta, tanto para o estado *um* (Figuras 5.2(a), 5.2(c) e 5.2(e)) quanto para o estado *dois* (Figuras 5.2(b), 5.2(d) e 5.2(f)), porém com diferentes valores dos parâmetros estatísticos.

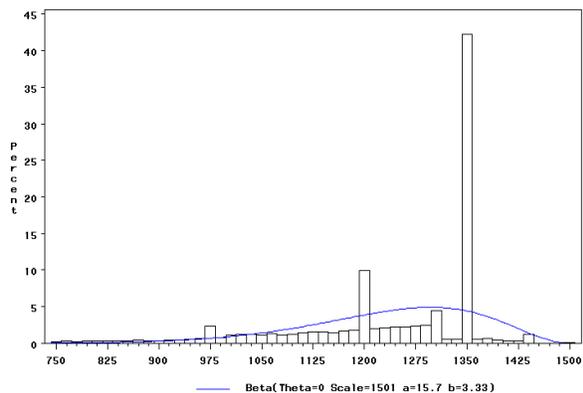
Após, foram calculados os tempos entre as chegadas dos pacotes em cada um destes dois estados separadamente. Através dos testes de hipótese, verificou-se que as distribuições que melhor descrevem os tempos entre as chegadas sucessivas dos pacotes do estado *um* (Figuras 5.3(a), 5.3(c) e 5.3(e)) e os tempos entre as chegadas sucessivas dos pacotes do estado *dois* (Figuras 5.3(b), 5.3(d) e 5.3(f)) são as distribuições Exponencial e *Weibull*.

Com a adoção destes dois estados, tornou-se necessário caracterizar também as distribuições dos tempos de permanência em cada estado, ou seja, os tempos de permanência em um estado antes de alternar para o outro. Para tal, foram calculadas as durações das rajadas em que chegam continuamente apenas pacotes com tamanhos até 750 bytes, e as durações das rajadas em que chegam continuamente apenas pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes.

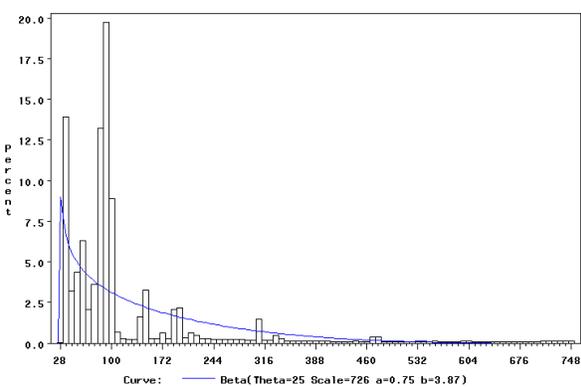
Na análise dos gráficos da Figura 5.4, que apresenta as distribuições das durações das rajadas de pacotes do estado *um* e do estado *dois* dos traços BWY-1069762448, BWY-1069224416 e UFL-1095079334, foi verificada a existência de duas regiões distintas. A reta vertical em cada gráfico delimita estas regiões, definindo um valor de corte. Considere x e y os valores de corte encontrados nas distribuições das durações das rajadas de pacotes do estado *um* e do estado *dois* respectivamente. A Tabela 5.2 contém os valores de x e y dos traços estudados.



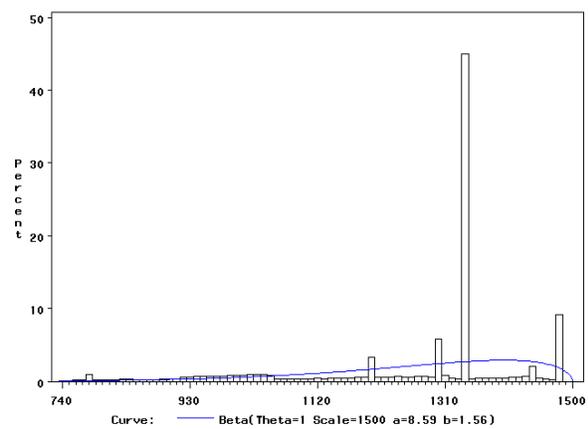
(a)



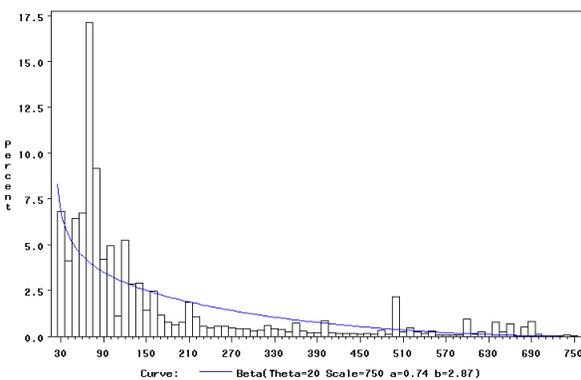
(b)



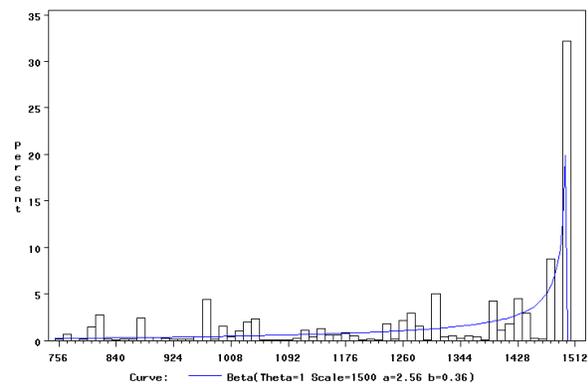
(c)



(d)

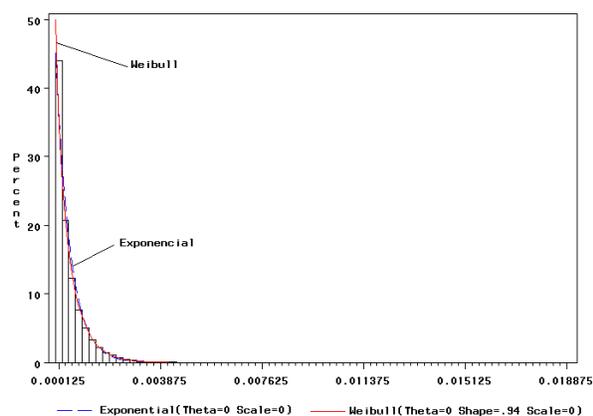


(e)

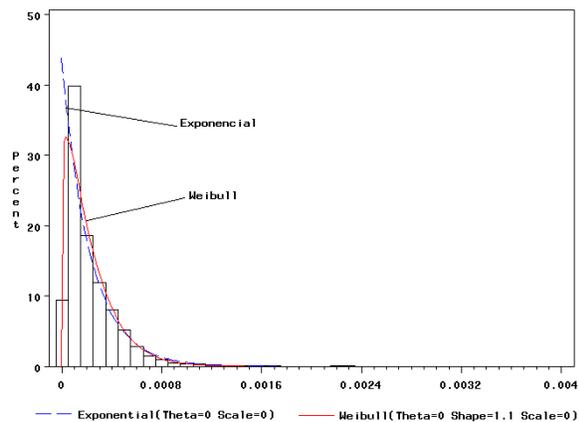


(f)

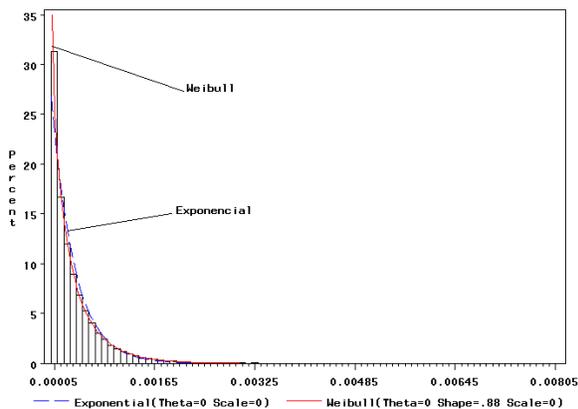
Figura 5.2: Ajuste da distribuição Beta para a distribuição dos tamanhos dos pacotes do estado *um* - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e do estado *dois* - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).



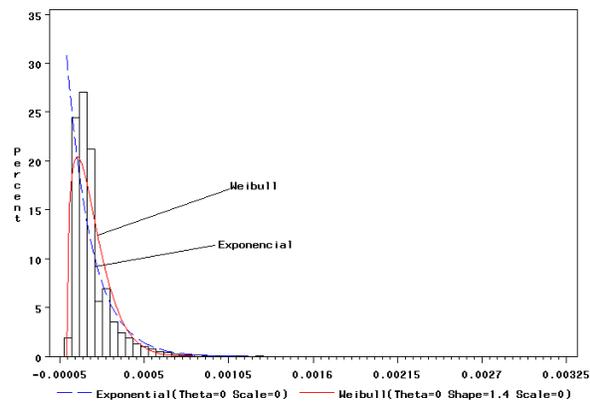
(a)



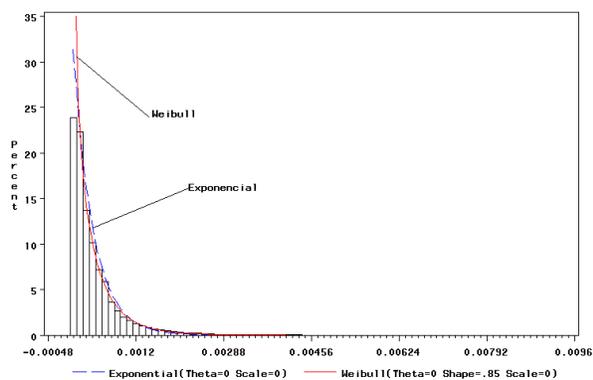
(b)



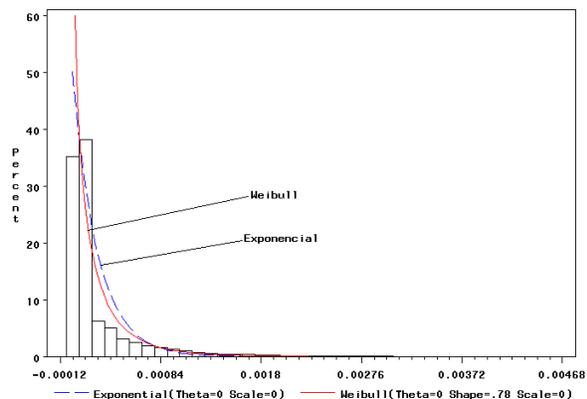
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.3: Ajuste das distribuições Exponencial e *Weibull* para a distribuição das diferenças de tempo entre as chegadas dos pacotes do estado *um* - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e do estado *dois* - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).

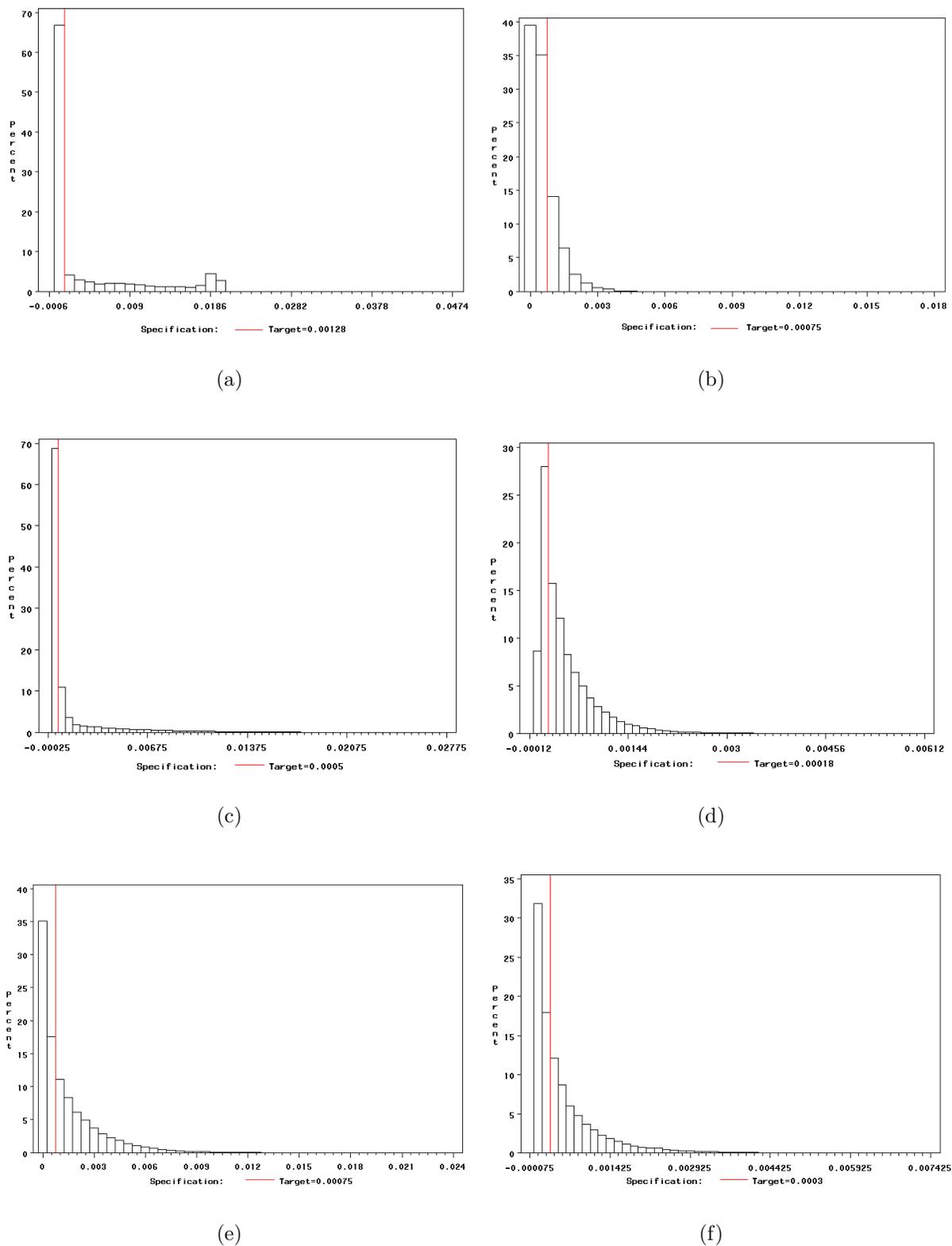


Figura 5.4: Distribuição das durações das rajadas dos pacotes do estado *um* - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e do estado *dois* - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).

Tabela 5.2: Valores de corte das distribuições das durações das rajadas de pacotes dos traços estudados.

Traço	x	y
BWY-1069762448	0,00128	0,00075
BWY-1069224416	0,00050	0,00018
COS-1069211539	0,00410	0,00037
UFL-1095079334	0,00075	0,00030
MEM-1112013766	0,04000	0,00250

Testes de hipótese indicam que as rajadas de pacotes do estado *um* e do estado *dois* com durações menores que x e y segundos respectivamente, podem ser representadas pela distribuição Uniforme. Enquanto que, as rajadas de pacotes do estados *um* e do estado *dois* com durações maiores que x e y segundos respectivamente, podem ser caracterizadas tanto pela distribuição Exponencial quanto pela distribuição *Weibull*, como pode ser observado na Figura 5.5.

Deve-se observar que a quebra da distribuição das durações das rajadas de pacotes dos estados em duas regiões foi motivada pela constatação de que a adoção de uma única distribuição leva a resultados imprecisos. Em outras palavras, em uma etapa anterior a quebra da distribuição das durações das rajadas em duas regiões, adotou-se uma única distribuição (Exponencial/*Weibull*) e o modelo resultante não foi capaz de gerar resultados precisos.

As Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 contêm, respectivamente, os valores dos parâmetros das distribuições mais adequadas para os tamanhos dos pacotes, tempos entre chegadas e durações das rajadas dos pacotes menores e maiores que 750 bytes. A caracterização da distribuição Beta é feita pelos parâmetros α e β , a caracterização da distribuição Exponencial é feita pelo parâmetro μ e a caracterização da distribuição Uniforme e *Weibull* é feita pelos parâmetros a e b .

Dois estados adicionais foram inseridos no modelo, resultando no modelo com quatro estados, descrito na seção seguinte.

Distribuição Beta do Tamanho dos pacotes				
Traço	Tam. pacote < 750 bytes		Tam. pacote > 750 bytes	
BWY-1069762448	$\alpha = 1,97$	$\beta = 172,94$	$\alpha = 63,39$	$\beta = 447,58$
BWY-1069224416	$\alpha = 1,81$	$\beta = 143,49$	$\alpha = 43,93$	$\beta = 301,72$
COS-1069211539	$\alpha = 1,41$	$\beta = 94,36$	$\alpha = 15,65$	$\beta = 133,98$
UFL-1095079334	$\alpha = 1,44$	$\beta = 90,98$	$\alpha = 25,96$	$\beta = 168,96$
MEM-1112013766	$\alpha = 4,88$	$\beta = 487,72$	$\alpha = 120,07$	$\beta = 1366,68$

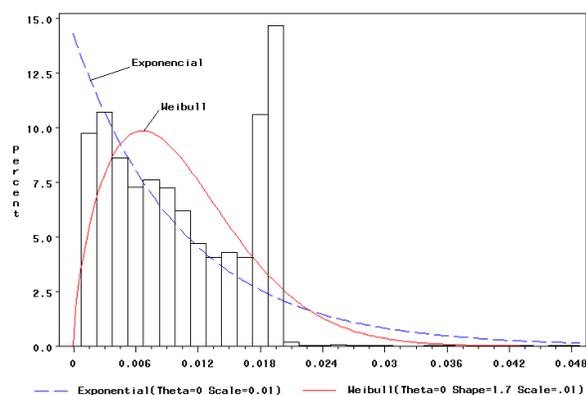
Tabela 5.3: Tabela com parâmetros da distribuição do tamanho dos pacotes.

Distribuição do tempo entre chegadas					
Traço	Distribuição	Tam. pacote < 750 bytes		Tam. pacote > 750 bytes	
BWY-1069762448	Exponencial	$\mu = 0,00051$		$\mu = 0,00022$	
	Weibull	$a = 0,0005$	$b = 0,8313$	$a = 0,0002$	$b = 1,0941$
BWY-1069224416	Exponencial	$\mu = 0,00035$		$\mu = 0,00015$	
	Weibull	$a = 0,00027$	$b = 0,7758$	$a = 0,00018$	$b = 1,1286$
COS-1069211539	Exponencial	$\mu = 0,00061$		$\mu = 0,00020$	
	Weibull	$a = 0,00056$	$b = 0,8573$	$a = 0,0002$	$b = 1,0132$
UFL-1095079334	Exponencial	$\mu = 0,00037$		$\mu = 0,00023$	
	Weibull	$a = 0,00032$	$b = 0,7705$	$a = 0,00018$	$b = 0,7514$
MEM-1112013766	Exponencial	$\mu = 0,000411$		$\mu = 0,00018$	
	Weibull	$a = 0,0040$	$b = 0,9166$	$a = 0,0020$	$b = 1,9407$

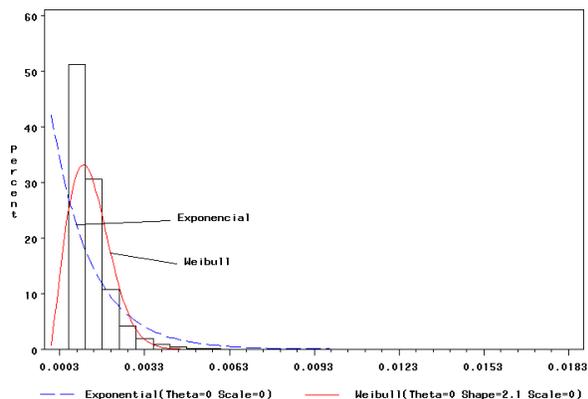
Tabela 5.4: Tabela com parâmetros da distribuição do tempo entre chegadas.

Distribuição das durações das rajadas					
Traço	Distribuição	Tam. pacote < 750 bytes		Tam. pacote > 750 bytes	
BWY-1069762448	Uniforme	$a = 0$	$b = 0,00128$	$a = 0$	$b = 0,00075$
	Exponencial	$\mu = 0,016$		$\mu = 0,0010$	
	Weibull	$a = 0,0117$	$b = 1,6389$	$a = 0,0016$	$b = 2,0478$
BWY-1069224416	Uniforme	$a = 0$	$b = 0,00050$	$a = 0$	$b = 0,00018$
	Exponencial	$\mu = 0,0050$		$\mu = 0,0020$	
	Weibull	$a = 0,0035$	$b = 0,9875$	$a = 0,0007$	$b = 1,4995$
COS-1069211539	Uniforme	$a = 0$	$b = 0,00410$	$a = 0$	$b = 0,00037$
	Exponencial	$\mu = 0,045$		$\mu = 0,00090$	
	Weibull	$a = 0,0186$	$b = 1,3569$	$a = 0,0012$	$b = 1,6467$
UFL-1095079334	Uniforme	$a = 0$	$b = 0,00075$	$a = 0$	$b = 0,00030$
	Exponencial	$\mu = 0,0048$		$\mu = 0,0014$	
	Weibull	$a = 0,0022$	$b = 1,1830$	$a = 0,0012$	$b = 1,6009$
MEM-1112013766	Uniforme	$a = 0$	$b = 0,00400$	$a = 0$	$b = 0,00025$
	Exponencial	$\mu = 0,022$		$\mu = 0,00050$	
	Weibull	$a = 0,3323$	$b = 2,4785$	$a = 0,0079$	$b = 1,8539$

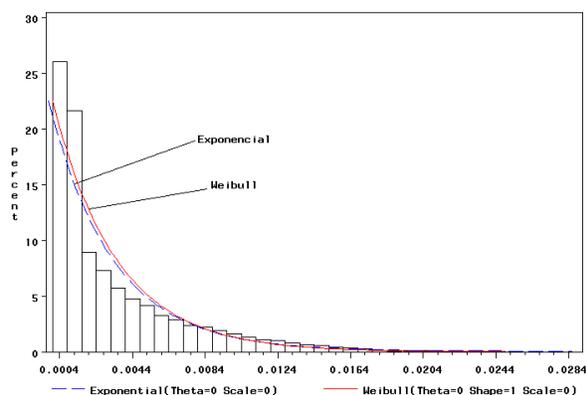
Tabela 5.5: Tabela com parâmetros das distribuições das durações das rajadas.



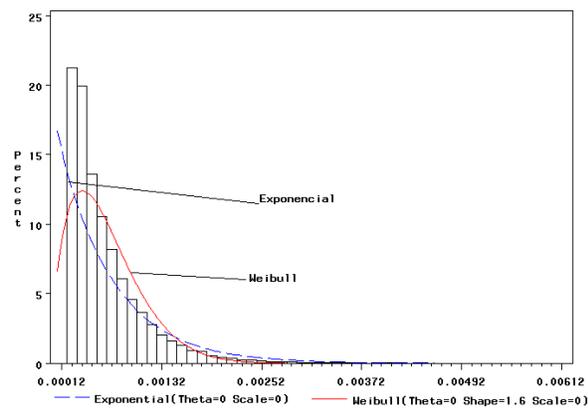
(a)



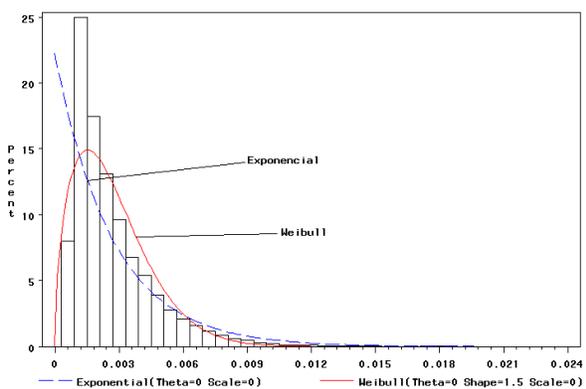
(b)



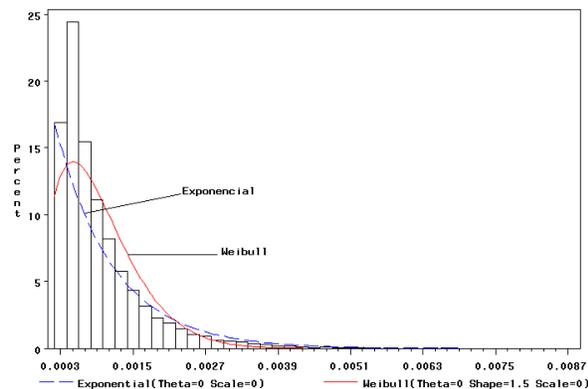
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.5: Ajuste das distribuições Exponencial e *Weibull* para a distribuição das durações das rajadas maiores que x segundos dos pacotes do estado *um* - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e para a distribuição das durações das rajadas maiores que y segundos dos pacotes do estado *dois* - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).

5.4 Derivação do modelo hierárquico com quatro estados

O modelo com quatro estados proposto possui os seguintes estados:

1. Estado *um*: rajadas com durações menores que x segundos e pacotes com tamanhos menores que 750 bytes.
2. Estado *dois*: rajadas com durações maiores que x segundos e pacotes com tamanhos menores que 750 bytes.
3. Estado *três*: rajadas com durações menores que y segundos e pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes.
4. Estado *quatro*: rajadas com durações maiores que y segundos e pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes.

Os valores de x e y são calculados para cada traço analisando-se os valores de corte das distribuições das durações das rajadas de pacotes menores e maiores que 750 bytes respectivamente.

Intercala-se rajadas de pacotes com tamanhos menores que 750 bytes e rajadas de pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes, de modo que só há transições dos estados *um* e *dois* para os estados *três* e *quatro*, e vice-versa. A Figura 5.6 ilustra o modelo com quatro estados e as transições entre os estados.

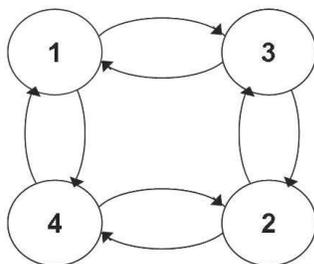


Figura 5.6: Diagrama do modelo com quatro estados.

Dado que existe uma transição do estado i para o estado j , seja $P_{i,j}$ a probabilidade de transição do estado i para o estado j no momento da transição e seja $\lambda_{i,j}$ a taxa de transição do estado i para o estado j , então, tem-se que:

$$\lambda_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{\text{tempo de permanência no estado } i}$$

onde,

$$\begin{aligned}
 P_{i,1} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (duração } < x \text{ segundos e tam. pkt } < 750 \text{ bytes)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt } < 750 \text{ bytes)}} \\
 P_{i,2} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (duração } > x \text{ segundos e tam. pkt } < 750 \text{ bytes)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt } < 750 \text{ bytes)}} \\
 P_{i,3} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (duração } < y \text{ segundos e tam. pkt } > 750 \text{ bytes)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt } > 750 \text{ bytes)}} \\
 P_{i,4} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (duração } > y \text{ segundos e tam. pkt } > 750 \text{ bytes)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt } > 750 \text{ bytes)}}
 \end{aligned}$$

Nos quatro estados, a distribuição dos tamanhos dos pacotes é descrita pela distribuição Beta e a distribuição dos tempos entre chegadas dos pacotes é descrita pela distribuição Exponencial/*Weibull*. A distribuição das durações das rajadas dos pacotes é descrita pela distribuição Uniforme nos estados *um* e *três* e pela distribuição Exponencial/*Weibull* nos estados *dois* e *quatro*.

O modelo possui 12 parâmetros a serem estimados. Sejam eles:

- Valores de corte x e y das distribuições das durações das rajadas dos pacotes menores e maiores que 750 bytes, respectivamente.
- Parâmetros α e β da distribuição Beta dos tamanhos de pacotes menores que 750 bytes.
- Parâmetros α e β da distribuição Beta dos tamanhos de pacotes maiores que 750 bytes.
- Parâmetro μ da distribuição Exponencial do tempo entre chegadas dos pacotes menores que 750 bytes.
- Parâmetro μ da distribuição Exponencial do tempo entre chegadas dos pacotes maiores que 750 bytes.
- Parâmetro μ da distribuição Exponencial da duração das rajadas dos pacotes menores que 750 bytes.
- Parâmetro μ da distribuição Exponencial da duração das rajadas dos pacotes maiores que 750 bytes.
- Valores p_1 e p_2 das proporções das durações das rajadas dos pacotes menores e maiores que 750 bytes, respectivamente.

Ao longo do estudo que culminou na adoção de um modelo com quatro estados, outros modelos foram testados. Modelos estes que diferem pelo número de estados adotados. Obviamente, busca-se o modelo mais preciso que tenha o menor número de estados possíveis. A seguir são descritos outros dois modelos estudados, um com dois estados e outro com oito estados.

5.5 Derivação do modelo com dois estados

O modelo com dois estados proposto possui:

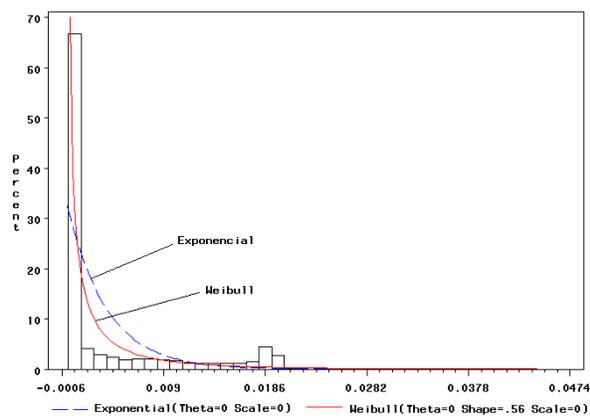
1. Estado *um*: rajadas de pacotes com tamanhos menores que 750 bytes.
2. Estado *dois*: rajadas de pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes.

No modelo com dois estados, a distribuição das durações das rajadas de pacotes do estado *um* e do estado *dois* não é mais dividida em duas regiões e, segundo os testes de hipótese, é melhor descrita pelas distribuições Exponencial e *Weibull*. A Figura 5.7 mostra o ajuste das distribuições Exponencial e *Weibull* para a distribuição das durações das rajadas de pacotes do estado *um* e do estado *dois* dos traços BWY-1069762448, BWY-1069224416 e UFL-1095079334. Nos estados *um* e *dois*, a distribuição que descreve os tempos entre chegadas dos pacotes permanece a Exponencial/*Weibull* e a distribuição que descreve os tamanhos dos pacotes também permanece a Beta.

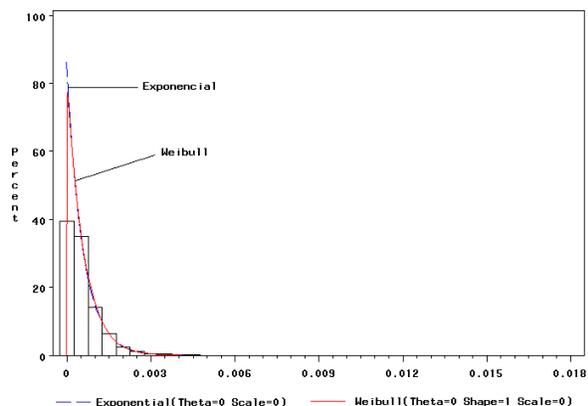
Intercala-se rajadas de pacotes com tamanhos menores que 750 bytes e rajadas de pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes, de modo que só há transição do estado *um* para o estado *dois*, e vice-versa. A Figura 5.8 ilustra o modelo com dois estados e as transições entre os estados.

Seja $\lambda_{i,j}$ a taxa de transição do estado i para o estado j , então, tem-se que:

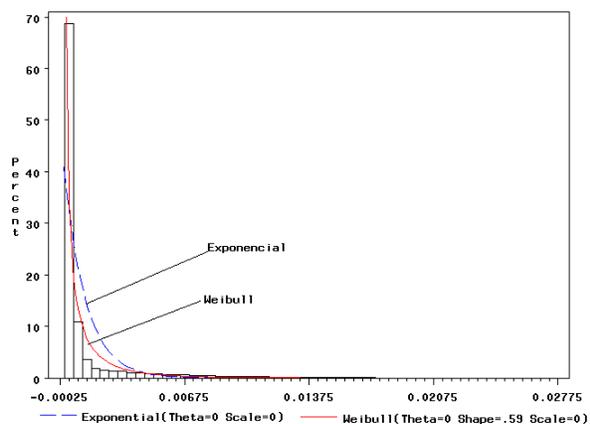
$$\lambda_{i,j} = \frac{1}{\text{tempo de permanência no estado } i}$$



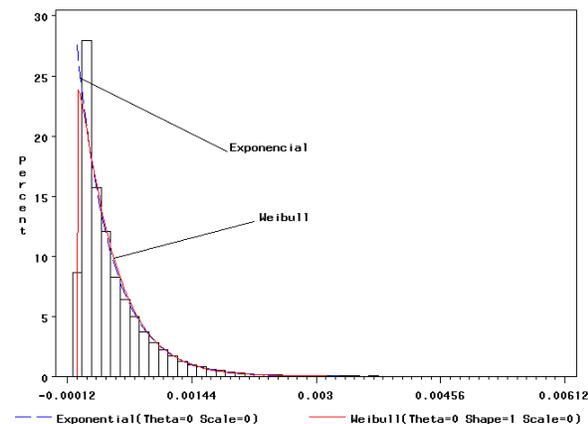
(a)



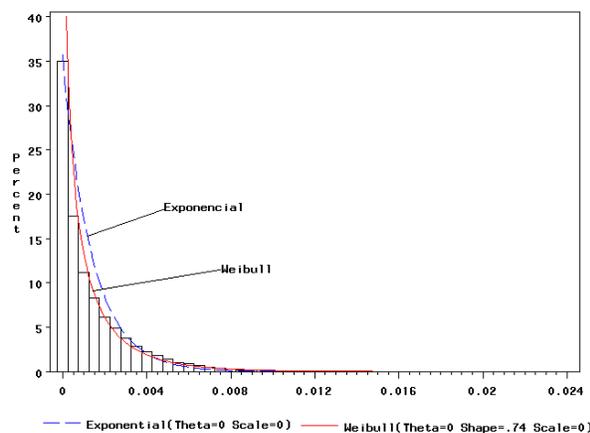
(b)



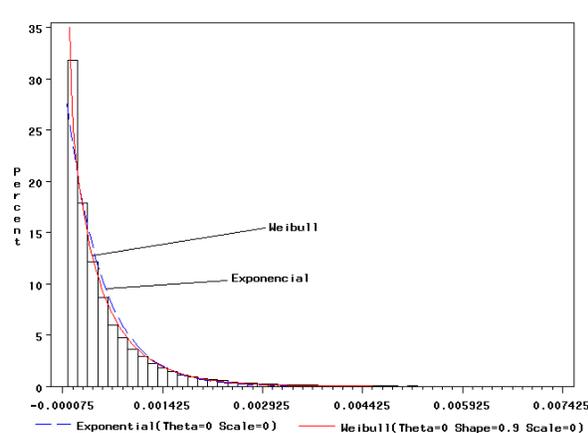
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.7: Ajuste das distribuições Exponencial e *Weibull* para a distribuição das durações das rajadas de pacotes do estado *um* - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e do estado *dois* - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).

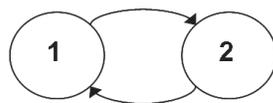


Figura 5.8: Diagrama do modelo com dois estados.

5.6 Derivação do modelo hierárquico com oito estados

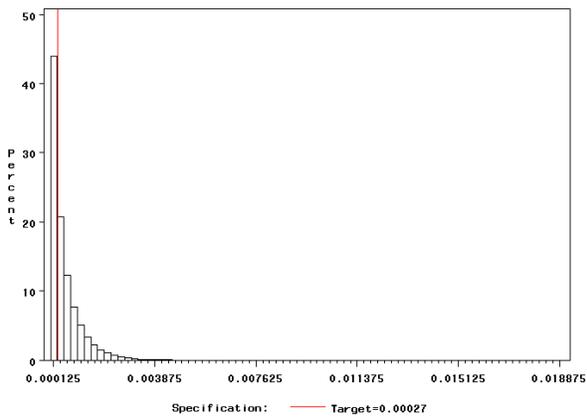
Um modelo com oito estados foi também desenvolvido. Nele, caracteriza-se de modo diferente a distribuição dos tempos entre as chegadas dos pacotes.

Observando a Figura 5.9, que possui novamente as distribuições dos tempos entre as chegadas dos pacotes com tamanhos menores e maiores que 750 bytes dos traços BWY-1069762448, BWY-1069224416 e UFL-1095079334, nota-se que foram definidas duas regiões distintas em cada gráfico, analisando o comportamento da distribuição. O valor de corte que discrimina as regiões está ilustrado em cada gráfico pela linha vertical. Seja w e z , respectivamente, os valores de corte encontrados para cada traço analisando a distribuição do tempo entre as chegadas dos pacotes menores e maiores que 750 bytes.

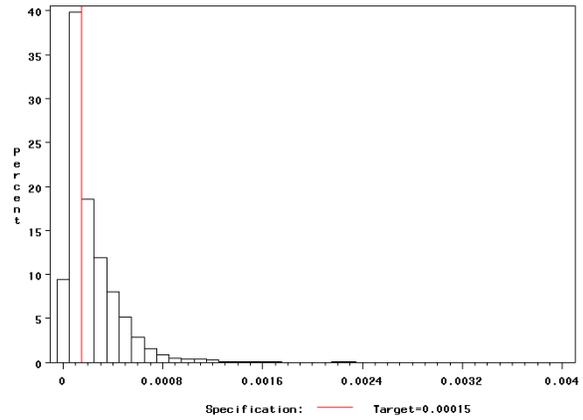
Testes de hipótese indicam que os tempos entre as chegadas dos pacotes menores e maiores que 750 bytes que são inferiores à, respectivamente, w e z segundos, podem ser representados pela distribuição Uniforme. Enquanto que, os tempos entre as chegadas dos pacotes menores e maiores que 750 bytes que são superiores à, respectivamente, w e z segundos, podem ser caracterizados tanto pela distribuição Exponencial quanto pela distribuição *Weibull*, como pode ser observado na Figura 5.10.

A distribuição das durações das rajadas dos pacotes foi definida do mesmo modo que no modelo com quatro estados, ou seja, também há a divisão da distribuição em duas regiões: durações menores e maiores que x e y , respectivamente, para as rajadas de pacotes com tamanhos menores e maiores que 750 bytes.

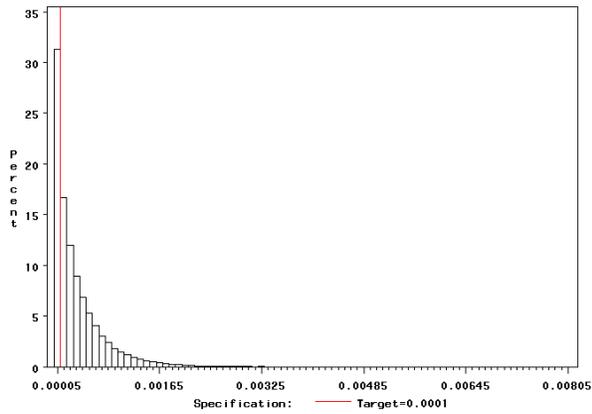
Os valores de x , y , z e w calculados para cada traço estudado estão contidos na Tabela 5.6.



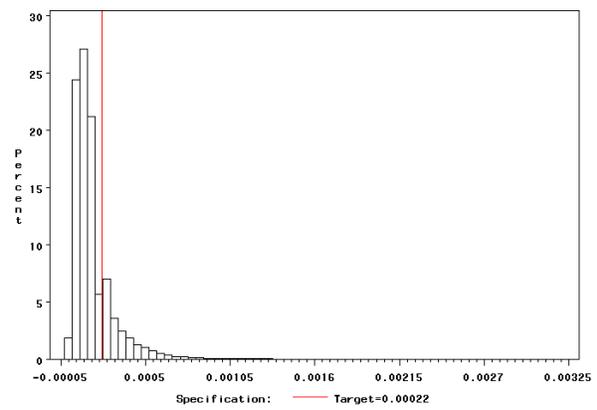
(a)



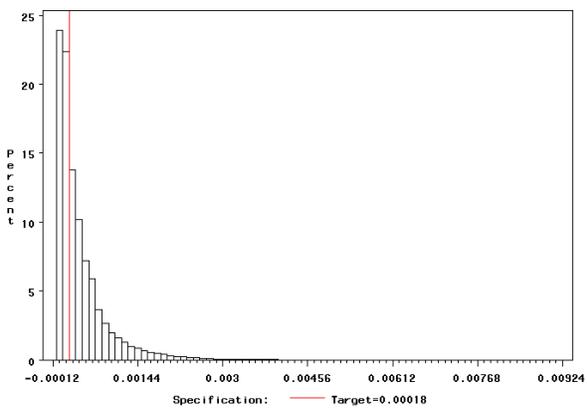
(b)



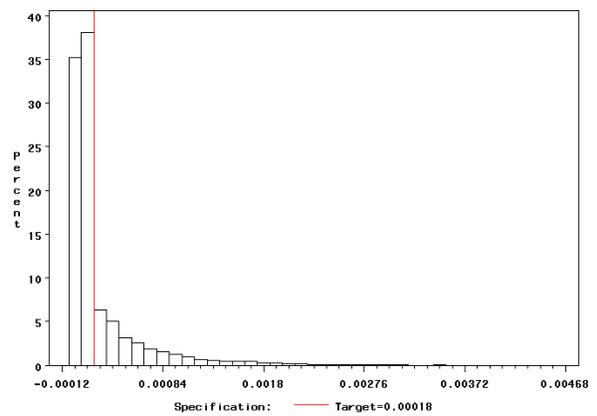
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.9: Distribuição dos tempos entre as chegadas dos pacotes com tamanhos menores que 750 bytes - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e maiores que 750 bytes - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f).

Tabela 5.6: Valores de corte das distribuições das durações das rajadas e dos tempos entre as chegadas dos pacotes dos traços estudados.

Traço	x	y	w	z
BWY-1069762448	0,00128	0,00075	0,00027	0,00015
BWY-1069224416	0,00050	0,00018	0,00010	0,00022
COS-1069211539	0,00410	0,00037	0,00018	0,00038
UFL-1095079334	0,00075	0,00030	0,00018	0,00018
MEM-1112013766	0,04000	0,00250	0,00370	0,00220

Os oito estados são definidos como:

1. Estado *um*: rajadas com durações menores que x segundos, pacotes com tamanhos menores que 750 bytes e tempos entre chegadas dos pacotes menores que w segundos.
2. Estado *dois*: rajadas com durações menores que x segundos, pacotes com tamanhos menores que 750 bytes e tempos entre chegadas dos pacotes maiores que w segundos.
3. Estado *três*: rajadas com durações maiores que x segundos, pacotes com tamanhos menores que 750 bytes e tempos entre chegadas dos pacotes menores que w segundos.
4. Estado *quatro*: rajadas com durações maiores que x segundos, pacotes com tamanhos menores que 750 bytes e tempos entre chegadas dos pacotes maiores que w segundos.
5. Estado *cinco*: rajadas com durações menores que y segundos, pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes e tempos entre chegadas dos pacotes menores que z segundos.
6. Estado *seis*: rajadas com durações menores que y segundos, pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes e tempos entre chegadas dos pacotes maiores que z segundos.
7. Estado *sete*: rajadas com durações maiores que y segundos, pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes e tempos entre chegadas dos pacotes menores que z segundos.
8. Estado *oito*: rajadas com durações maiores que y segundos, pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes e tempos entre chegadas dos pacotes maiores que z segundos.

Nos oito estados, a distribuição dos tamanhos dos pacotes é descrita pela distribuição Beta. A distribuição das durações das rajadas dos pacotes é descrita pela distribuição Uniforme nos estados *um*, *dois*, *cinco* e *seis*, e pela distribuição Exponencial/*Weibull* nos estados *três*, *quatro*, *sete* e *oito*. E finalmente, a distribuição dos tempos entre chegadas dos pacotes é descrita pela distribuição Uniforme nos estados *um*, *três*, *cinco* e *sete*, e pela distribuição Exponencial/*Weibull* nos estados *dois*, *quatro*, *seis* e *oito*.

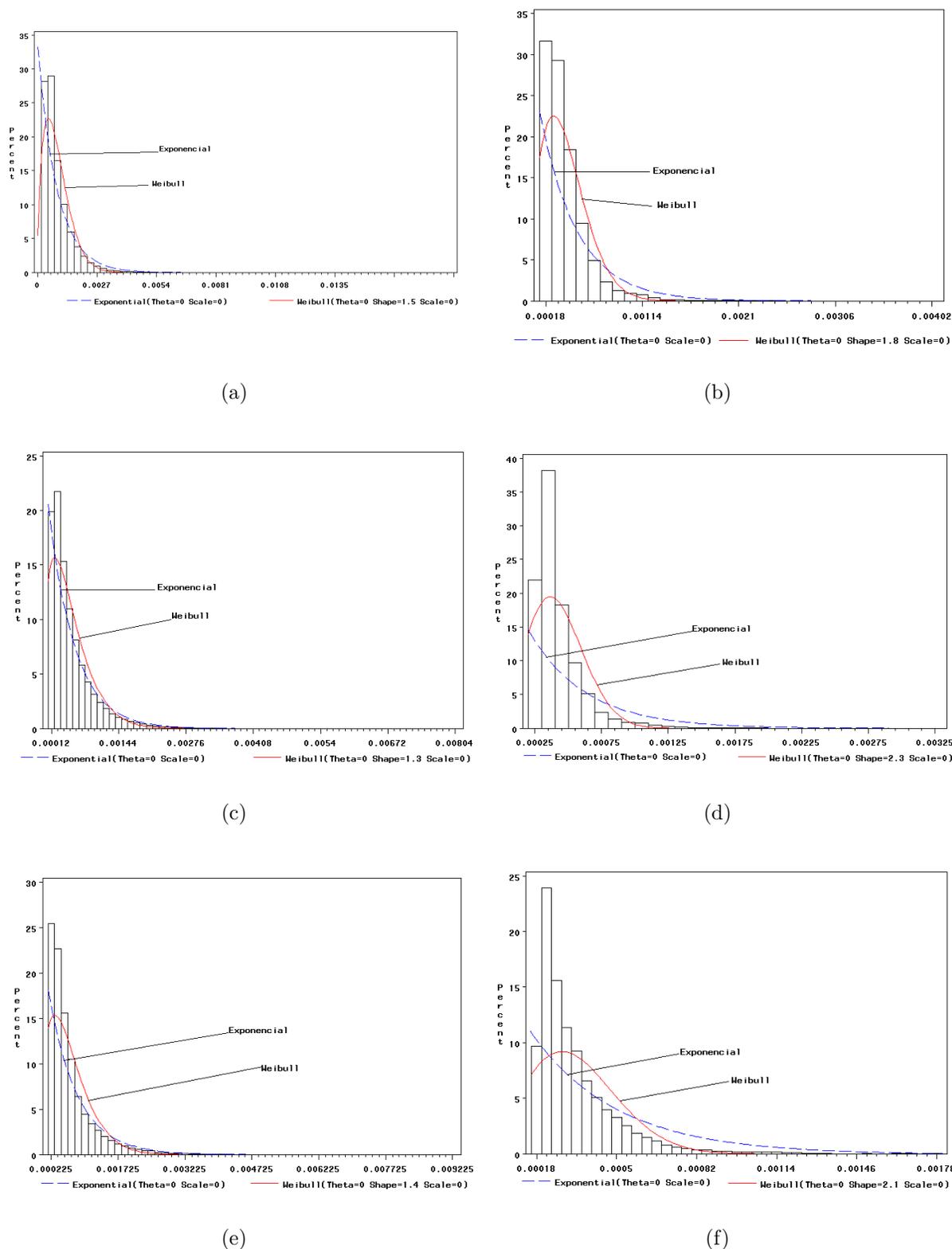


Figura 5.10: Ajuste das distribuições Exponencial e *Weibull* para a distribuição dos tempos entre chegadas dos pacotes menores que 750 bytes que são maiores que w segundos - traços BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e) - e para a distribuição dos tempos entre chegadas dos pacotes maiores que 750 bytes que são maiores que z segundos - traços BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f)

Rajadas de pacotes com tamanhos menores que 750 bytes e rajadas de pacotes com tamanhos maiores que 750 bytes são intercaladas, de modo que não há transições dos estados *um* e *dois* para os estados *três* e *quatro*, nem transições dos estados *cinco* e *seis* para os estados *sete* e *oito*. A Figura 5.11 ilustra o modelo com oito estados e as transições entre os estados. Há também transições partindo dos estados *dois*, *três* e *quatro* e chegando nos estados *cinco*, *seis*, *sete* e *oito*, e há transições partindo dos estados *seis*, *sete* e *oito* e chegando nos estados *um*, *dois*, *três* e *quatro*, porém estas transições não estão contidas na figura para não sobrecarregar o diagrama.

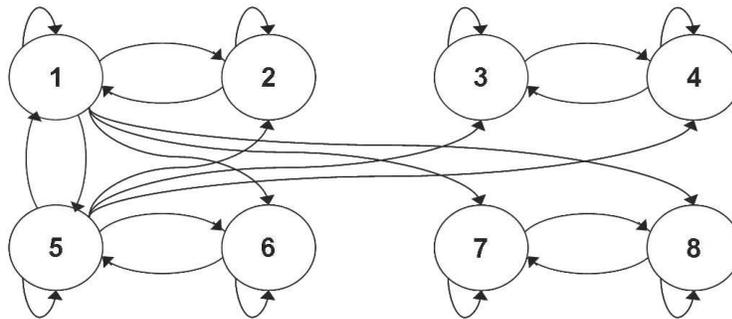


Figura 5.11: Diagrama do modelo com oito estados.

Dado que existe uma transição do estado i para o estado j , seja $P_{i,j}$ a probabilidade de transição do estado i para o estado j no momento da transição, seja $i\text{at}$ o tempo entre chegadas de dois pacotes consecutivos e seja $\lambda_{i,j}$ a taxa de transição do estado i para o estado j , então, tem-se que:

$$\lambda_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{\text{tempo de permanência no estado } i} \quad (5.1)$$

onde,

$$\begin{aligned}
P_{1,1} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ de } iat \text{ (dur. } < w \text{ seg. e tam. pkt} < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de } iat \text{ (tam. pkt} < 750 \text{ b)}} \\
P_{1,2} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ de } iat \text{ (dur. } > w \text{ seg. e tam. pkt} < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de } iat \text{ (tam. pkt} < 750 \text{ b)}} \\
P_{1,5} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times P_5 \\
P_{1,6} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times P_6 \\
P_{1,7} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times P_7 \\
P_{1,8} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times P_8 \\
P_{2,j} &= P_{1,j} \\
P_{3,3} &= P_{1,1} \\
P_{3,4} &= P_{1,2} \\
P_{3,5} &= P_{1,5} \\
P_{3,6} &= P_{1,6} \\
P_{3,7} &= P_{1,7} \\
P_{3,8} &= P_{1,8} \\
P_{4,j} &= P_{3,j} \\
P_{5,1} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times P_1 \\
P_{5,2} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times P_2 \\
P_{5,3} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times P_3 \\
P_{5,4} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times P_4 \\
P_{5,5} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ de } iat \text{ (dur. } < z \text{ seg. e tam. pkt} > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de } iat \text{ (tam. pkt} > 750 \text{ b)}} \\
P_{5,6} &= \frac{\text{n}^\circ \text{ de rajadas (tam. pkt} > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de rajadas}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ de } iat \text{ (dur. } > z \text{ seg. e tam. pkt} > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ de } iat \text{ (tam. pkt} > 750 \text{ b)}} \\
P_{6,j} &= P_{5,j} \\
P_{7,1} &= P_{5,1} \\
P_{7,2} &= P_{5,2} \\
P_{7,3} &= P_{5,5} \\
P_{7,4} &= P_{5,6} \\
P_{7,7} &= P_{5,5} \\
P_{7,8} &= P_{5,6} \\
P_{8,j} &= P_{7,j}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_1 &= \frac{\text{n}^\circ \text{ rajadas (dur. } < x \text{ seg. e tam. pkt } < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ rajadas (tam. pkt } < 750 \text{ b)}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ iat (dur. } < z \text{ seg. e tam. pkt } < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ iat (tam. pkt } < 750 \text{ b)}} \\
P_2 &= \frac{\text{n}^\circ \text{ rajadas (dur. } < x \text{ seg. e tam. pkt } < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ rajadas (tam. pkt } < 750 \text{ b)}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ iat (dur. } > z \text{ seg. e tam. pkt } < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ iat (tam. pkt } < 750 \text{ b)}} \\
P_3 &= \frac{\text{n}^\circ \text{ rajadas (dur. } > x \text{ seg. e tam. pkt } < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ rajadas (tam. pkt } < 750 \text{ b)}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ iat (dur. } < z \text{ seg. e tam. pkt } < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ iat (tam. pkt } < 750 \text{ b)}} \\
P_4 &= \frac{\text{n}^\circ \text{ rajadas (dur. } > x \text{ seg. e tam. pkt } < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ rajadas (tam. pkt } < 750 \text{ b)}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ iat (dur. } > z \text{ seg. e tam. pkt } < 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ iat (tam. pkt } < 750 \text{ b)}} \\
P_5 &= \frac{\text{n}^\circ \text{ rajadas (dur. } < y \text{ seg. e tam. pkt } > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ rajadas (tam. pkt } > 750 \text{ b)}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ iat (dur. } < w \text{ seg. e tam. pkt } > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ iat (tam. pkt } > 750 \text{ b)}} \\
P_6 &= \frac{\text{n}^\circ \text{ rajadas (dur. } < y \text{ seg. e tam. pkt } > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ rajadas (tam. pkt } > 750 \text{ b)}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ iat (dur. } > w \text{ seg. e tam. pkt } > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ iat (tam. pkt } > 750 \text{ b)}} \\
P_7 &= \frac{\text{n}^\circ \text{ rajadas (dur. } > y \text{ seg. e tam. pkt } > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ rajadas (tam. pkt } > 750 \text{ b)}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ iat (dur. } < w \text{ seg. e tam. pkt } > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ iat (tam. pkt } > 750 \text{ b)}} \\
P_8 &= \frac{\text{n}^\circ \text{ rajadas (dur. } > y \text{ seg. e tam. pkt } > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ rajadas (tam. pkt } > 750 \text{ b)}} \times \frac{\text{n}^\circ \text{ iat (dur. } > w \text{ seg. e tam. pkt } > 750 \text{ b)}}{\text{n}^\circ \text{ iat (tam. pkt } > 750 \text{ b)}}
\end{aligned}$$

5.7 Gerador de tráfego

Tendo sido caracterizadas as distribuições dos tamanhos dos pacotes, dos tempos entre chegadas e das durações das rajadas, desenvolveu-se um gerador de traços sintéticos para o tráfego UDP. Para tanto, os parâmetros estatísticos de cada distribuição e de cada traço foram obtidos a partir dos traços reais. Os procedimentos *Exprnd*, *Weibrnd* e *Betarnd*, embutidos no Matlab, foram utilizados na geração de amostras aleatórias de acordo com as funções de distribuição escolhidas e com os parâmetros estimados.

Foi implementado no Matlab um algoritmo com o objetivo de gerar traços sintéticos semelhantes aos traços reais coletados. Como as distribuições *Weibull* e Exponencial se ajustaram satisfatoriamente nos testes de hipótese para as diferenças de tempo entre as chegadas e para as durações das rajadas de pacotes, foram gerados traços com ambas distribuições para comparação de qual distribuição leva a modelos mais precisos.

O algoritmo implementado para gerar os traços sintéticos usando o modelo com quatro estados está detalhado na Figura 5.12.

```

function result = geracao_4est (QuantPkt, TeMe, TeMa, TamMeA, TamMeB, TamMaA, TamMaB, DifMe, DifMa, x, y)
/*
QuantPkt -> quantidade de pacotes do trace real
TeMe -> parâmetro da dist. Exponencial das durações das rajadas maiores que x dos pacotes < 750b
TeMa -> parâmetro da dist. Exponencial das durações das rajadas maiores que y dos pacotes > 750b
TamMeA -> parâmetro A da dist. Beta dos tamanhos dos pacotes < 750b
TamMeB -> parâmetro B da dist. Beta dos tamanhos dos pacotes < 750b
TamMaA -> parâmetro A da dist. Beta dos tamanhos dos pacotes > 750b
TamMaB -> parâmetro B da dist. Beta dos tamanhos dos pacotes > 750b
DifMe -> parâmetro da dist. Exponencial dos tempos entre chegadas dos pacotes < 750b
DifMa -> parâmetro da dist. Exponencial dos tempos entre chegadas dos pacotes > 750b
X -> valor de corte das durações das rajadas dos pacotes < 750b
Y -> valor de corte das durações das rajadas dos pacotes > 750b */

cont_pkt = 1; // Contador
taxa_transm = 300; // Quantidade de bytes servidos a cada 0.001s
tempo_transm = 0.001; // Intervalos de 0.001s
duracao_transm = 0; // Inicialmente a duração da transmissão é 0
estado = 1; // Estado inicial -> rajada de pacotes < 750b
comeco_estado = 0; // Horário inicial

while cont_pkt < QuantPkt // Laço que conta o número de pacotes
p = rand; // Calcula a probabilidade
if estado == 1 // Estado pacotes < 750b
if p <= 0.42
dur_raj = unifrnd (0, x); // Duração rajada dist. Uniforme
end if p > 0.42
dur_raj = exprnd (TeMe); // Duração rajada dist. Exponencial
end
if estado == -1 // Estado pacotes > 750b
if p <= 0.39
dur_raj = unifrnd (0, y); // Duração rajada dist. Uniforme
end if p > 0.39
dur_raj = exprnd (TeMa); // Duração rajada dist. Exponencial
end
end
fim_estado = comeco_estado + dur_raj; // Horário do término da rajada
chegada_ant = comeco_estado; // Primeira chegada = começo da rajada
if estado == 1 // Calcula tamanho do pacote < 750b
tam_pkt = betarnd (TamMeA, TamMeB);
while tam_pkt > 0.075
tam_pkt = betarnd (TamMeA, TamMeB);
end
end if estado == -1 // Calcula tamanho do pacote > 750b
tam_pkt = betarnd (TamMaA, TamMaB);
while tam_pkt < 0.075
tam_pkt = betarnd (TamMaA, TamMaB);
end
end
result (cont_pkt, 1) = chegada_ant; // Guarda horário do pacote
result (cont_pkt, 2) = tam_pkt; // Guarda tamanho do pacote
cont_pkt = cont_pkt + 1; // Avança com contador de pacotes
// Calcula tempo entre chegadas dos pacotes
p = rand; // Calcula a probabilidade
if estado == 1 // Tempo entre chegadas pkt < 750b
dif_tempo = exprnd (DifMe);
end if estado == -1 // Tempo entre chegadas pkt > 750b
dif_tempo = exprnd (DifMa);
end
tempo_cheg = chegada_ant + dif_tempo; // Chegada do próximo pacote

while tempo_cheg < fim_estado // Enquanto chegada < duração rajada
// Calcula tempo de transmissão do pacote anterior
num_transm = tam_pkt / taxa_transm;
duracao_transm = num_transm * tempo_transm;
// Chegada do próximo pacote é posterior a transmissão do pacote anterior?
if tempo_cheg > (chegada_ant + duracao_transm) // Valeu!!
if estado == 1 // Calcula tamanho do pacote < 750b
tam_pkt = betarnd (TamMeA, TamMeB);
while tam_pkt > 0.075
tam_pkt = betarnd (TamMeA, TamMeB);
end
end if estado == -1 // Calcula tamanho do pacote > 750b
tam_pkt = betarnd (TamMaA, TamMaB);
while tam_pkt < 0.075
tam_pkt = betarnd (TamMaA, TamMaB);
end
end
result (cont_pkt, 1) = tempo_cheg; // Guarda horário do pacote
result (cont_pkt, 2) = tam_pkt; // Guarda tamanho do pacote
cont_pkt = cont_pkt + 1; // Avança com contador de pacotes
chegada_anterior = tempo_cheg; // Pacote atual vira anterior
end
// Calcula tempo entre chegadas dos pacotes
p = rand; // Calcula a probabilidade
if estado == 1 // Tempo entre chegadas pkt < 750b
dif_tempo = exprnd (DifMe);
end
if estado == -1 // Tempo entre chegadas pkt > 750b
dif_tempo = exprnd (DifMa);
end
tempo_cheg = chegada_ant + dif_tempo; // Chegada do próximo pacote
end // Ainda na rajada?
// Candidato a próximo pacote excedeu duração rajada
estado = estado * (-1); // Altera os estados
comeco_estado = fim_estado; // Começo nova rajada = fim rajada anterior
end // Ainda faltam pacotes?

```

Figura 5.12: Algoritmo de geração dos traços sintéticos do modelo com quatro estados.

O laço principal deste algoritmo é executado enquanto o número de pacotes do traço sintético for menor que o número de pacotes do traço real (condição de parada). O primeiro pacote do traço sintético é criado com um horário de chegada igual a um instante inicial desejado. São gerados pacotes com tamanhos menores que 750 bytes enquanto seus horários de chegada não ultrapassam o tempo de duração da rajada, que é calculado pela distribuição Uniforme ou pela distribuição Exponencial/*Weibull*. Os tamanhos dos pacotes são calculados pela distribuição Beta. O horário de chegada do próximo pacote é gerado a partir do horário de chegada do pacote anterior mais o tempo entre chegadas que é calculado pela distribuição Exponencial/*Weibull*. As condições deste novo pacote gerado ser aceito e armazenado no arquivo do traço sintético são: 1) ter o horário de chegada maior que o horário de término da transmissão do pacote anterior; 2) estar no intervalo de duração da rajada corrente. Se estas condições não são aceitas, este pacote é ignorado e gera-se um novo “candidato” a pacote. O tempo de transmissão de um pacote é calculado baseado em seu tamanho e na taxa de serviço média que é calculada para o traço real. A não satisfação da segunda condição significa que a duração da rajada corrente acabou e deve-se começar outra rajada, começando então todo o processo anterior; e assim sucessivamente até a condição de parada. Alterna-se rajadas de pacotes com tamanhos menores e maiores que 750 bytes. O primeiro pacote da próxima rajada possui o horário de chegada igual ao do pacote que ultrapassou a duração da rajada anterior.

Os algoritmos implementados para gerar os traços sintéticos usando os modelos com dois estados e oito estados, diferem do algoritmo acima somente no cálculo do valor das durações das rajadas e dos tempos entre chegadas dos pacotes, que podem ser descritos por outras distribuições.

5.8 Validação dos modelos

Esta seção analisa o uso de modelos de tráfego para o dimensionamento de capacidade. As divergências exibidas na análise dos traços reais e dos traços sintetizados são usadas para indicar a adequabilidade dos modelos. Foram estudados os modelos com dois, quatro e oito estados, o modelo MWM e o modelo MAP de 16 e 32 estados, com o objetivo de analisar as vantagens, desvantagens e seus desempenhos em reproduzir corretamente a ocupação em uma fila para diferentes taxas de serviço. Para os modelos com dois, quatro e oito estados e para o modelo MWM, também foi realizada a análise da probabilidade de perda para diferentes capacidades de armazenamento e utilização da fila. O modelo com quatro estados foi validado com a comparação destes resultados, bem como com a comparação das médias e variâncias das quantidades de pacotes em intervalos de 1s, tempo de geração de traços de diversos tamanhos e análise da multifractalidade.

Para o presente estudo, foi utilizado o software disponível em [46] que implementa

o modelo MWM. Este software produz traços sintéticos positivos multifractais e com dependência de longa duração que coincidem com a variância em todas as escalas de um traço de entrada dado. A medida escolhida para a modelagem foi a quantidade de bytes por tempo, logo, para cada traço real foi gerada uma seqüência com a quantidade de bytes que chegam em intervalos de 1 milissegundo. Para cada traço real, os parâmetros do modelo MWM foram calculados através da função `train_beta_mwm`, e a partir dos parâmetros estimados, os traços foram sintetizados através da função `gen_beta_mwm`. A saída do programa é a quantidade de bytes que chegam no traço gerado sinteticamente em intervalos de 1 milissegundo.

Para análise do desempenho do modelo MAP em uma fila foram utilizadas cadeias MMPP de 16 e 32 estados. Estas cadeias foram parametrizadas de acordo com o procedimento descrito na segunda seção do Capítulo 4. Utilizando o software TANGRAM II [47], foi gerado o modelo matemático e empregado o método exato de solução analítica em estado estacionário GTH *no block*. Solucionado o modelo, os tamanhos médios da fila foram calculados para diferentes taxas de serviço.

Para a obtenção dos tamanhos médios da fila e das probabilidades de perda, utilizou-se um programa implementado em C++ que simula o funcionamento de uma fila alimentada por um fluxo de dados. A cada intervalo de tamanho fixo:

Se o buffer é infinito: quantidade de bytes que chegam – quantidade de bytes servidos = incremento do tamanho fila de espera no intervalo;

Se o buffer é finito: quantidade de bytes que chegam + quantidade de bytes da fila – (tamanho do buffer + quantidade de bytes servidos) = perda no intervalo.

A saída do simulador é o tamanho médio da fila de espera para um sistema com buffer infinito e a probabilidade de perda para filas com tamanhos finitos. Alimentou-se o simulador ora com traço real ora com traço sintético, porém o número de pacotes foi sempre o mesmo, sendo o traço sintético ou real. Os pacotes do processo de chegada foram agregados em intervalos fixos de 0,001 segundo.

Os resultados obtidos nas simulações foram semelhantes tanto para os traços sintéticos que usaram a distribuição Exponencial para a geração das diferenças de tempo entre as chegadas e para as durações das rajadas de pacotes menores e maiores que 750 bytes, quanto para os traços sintéticos que usaram a distribuição *Weibull* para a geração das mesmas distribuições. Dada a característica *memoryless* da distribuição Exponencial, preferiu-se adotar um modelo com esta distribuição.

As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 contêm, respectivamente, as curvas correspondentes aos tamanhos médios da fila de espera, em bytes, das simulações quando o sistema de filas é alimentado pelos traços reais BWY-1069762448, BWY-1069224416 e UFL-1095079334,

e pelos seus respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM. As curvas dos tamanhos médios da fila obtidas usando o modelo MAP de 16 e 32 estados também estão presentes nas figuras, porém a ocupação da fila foi calculada através da resolução analítica do modelo MAP ao invés de simulação.

Como o modelo MAP não gera os tamanhos dos pacotes, os tamanhos médios da fila em bytes foram calculados a partir das quantidades médias de pacotes na fila multiplicadas pelo tamanho médio dos pacotes do traço real. Variou-se os valores de utilização entre 0,02 e 0,8. A taxa de serviço foi a obtida através da divisão da taxa média de chegada pelo valor de utilização desejado.

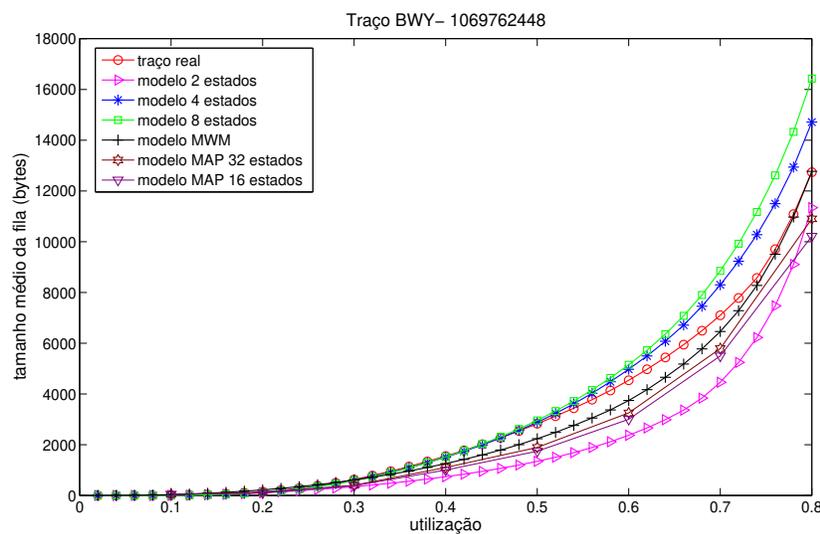


Figura 5.13: Tamanhos médios da fila de espera das simulações do traço real e dos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados, pelo modelo MWM e pelo modelo MAP de 16 e 32 estados do traço BWY-1069762448, variando o valor de utilização.

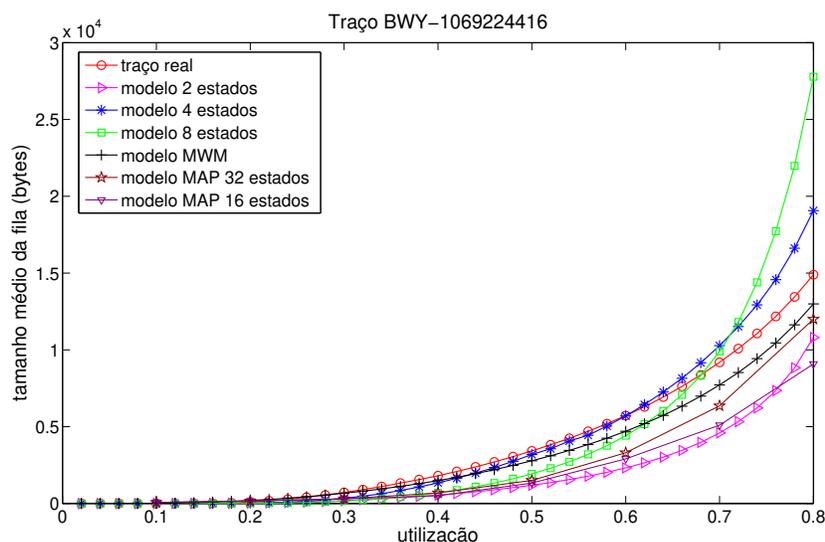


Figura 5.14: Tamanhos médios da fila de espera das simulações do traço real e dos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados, pelo modelo MWM e pelo modelo MAP de 16 e 32 estados do traço BWY-1069224416, variando o valor de utilização.

Os tamanhos médios da fila de espera das simulações dos traços sintéticos gerados pelo modelo com dois estados são bem menores que os tamanhos médios da fila das simulações dos traços reais. Isto acontece porque o modelo com dois estados não reproduz com precisão a distribuição dos tempos de permanência nos estados *um* e *dois*, e as rajadas de pacotes são menores nos tráfegos sintéticos do que nos tráfegos reais. As filas produzidas pelos traços gerados pelos modelos com quatro e oito estados são maiores que as produzidas pelos traços reais. Isto se deve ao fato dos modelos hierárquicos com quatro e oito estados reproduzirem mais fielmente os momentos de ordem superior dos traços reais, o que não é possível com o modelo de dois estados. Em situações de carga intensa, quando são simulados os traços sintéticos gerados pelos modelos com quatro e oito estados, a frequência de rajadas é maior do que quando são simulados os traços reais, fazendo com que os tamanhos das filas sejam maiores, dado que estes modelos reproduzem melhor as dependências de longa duração. As curvas dos tamanhos médios da fila de espera dos traços sintéticos gerados pelo modelo com quatro estados são mais próximas das curvas dos traços reais, mostrando que o modelo com quatro estados além de ser menos complexo que o modelo com oito estados é também mais preciso. As curvas dos tamanhos médios da fila geradas pelo modelo MWM e pelo modelo MAP de 16 e 32 estados possuem valores menores que as curvas dos traços reais, o que mostra que

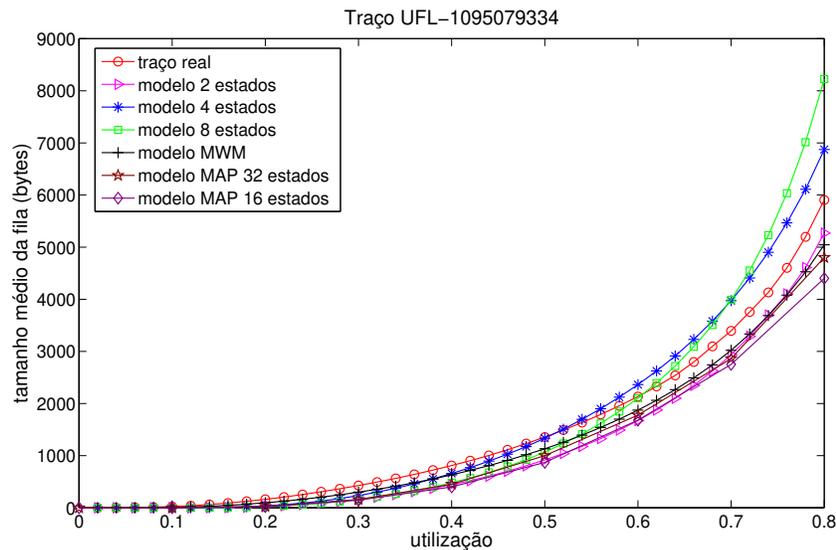


Figura 5.15: Tamanhos médios da fila de espera das simulações do traço real e dos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados, pelo modelo MWM e pelo modelo MAP de 16 e 32 estados do traço UFL-1095079334, variando o valor de utilização.

ambos os modelos não reproduzem tão bem os momentos de ordem superior dos traços reais quanto o modelo com quatro estados.

Para a avaliação da probabilidade de perda, variou-se o tamanho do buffer entre 10^2 e 10^5 bytes. As Figuras 5.16 e 5.17 mostram as perdas nas simulações do traço BWY-1069762448 real e dos traços sintéticos correspondentes, para níveis de utilização iguais 0,7 e 0,9 respectivamente. As Figuras 5.18 e 5.19 mostram as perdas nas simulações do traço BWY-1069224416 variando também os níveis de utilização. E finalmente, as Figuras 5.20 e 5.21 mostram o mesmo para as simulações do traço UFL-1095079334.

Quanto menor o tamanho do buffer, melhor a precisão do modelo com dois estados, isto porque, quando o buffer é pequeno as correlações de ordem superior são filtradas. No entanto, quando se aumenta o tamanho do buffer um maior número de correlações não são filtradas e o modelo com dois estados torna-se bastante impreciso. Considerando o modelo com dois estados, as probabilidades de perda geradas com traços sintéticos são menores do que as do traço real, o que é indesejável para provisão de Qualidade de Serviço. Na realidade, o modelo com dois estados subestima a probabilidade de perda.

As probabilidades de perda geradas pelo modelo MWM também subestimam as probabilidades de perda dos traços reais na grande maioria dos tamanhos de buffer. Já as probabilidades de perda produzida pelos traços sintéticos gerados pelos modelos com

quatro e oito estados superestimam a real, o que é desejado, pois assim, assegura-se que os requisitos de Qualidade de Serviço serão garantidos. Além disto, a discrepância entre as probabilidades de perda é menor que uma ordem de grandeza, o que não leva a um grande desperdício de banda de recursos na alocação de banda passante. Em outras palavras, qualquer modelo aproximado gera imprecisões, o que se deve avaliar é a consequência destas imprecisões. No caso específico do modelo com quatro estados, o erro é menor que uma ordem de grandeza, o que não leva a desperdícios significativos de banda passante. O modelo deve superestimar a probabilidade de perda, pois caso contrário não pode ser utilizado para se garantir Qualidade de Serviço. Além disso, o modelo com quatro estados mostrou-se mais que preciso que o modelo com oito estados para as probabilidades de perda dos pacotes. Fica claro a melhor precisão do modelo com quatro estados quando comparado aos modelos com dois estados, oito estados e MWM.

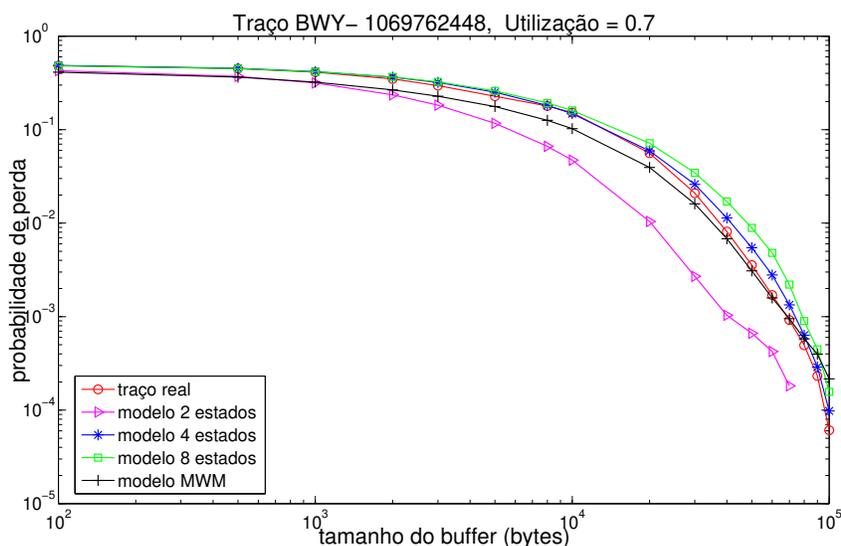


Figura 5.16: Gráficos das perdas das simulações do traço BWY-1069762448 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,7.

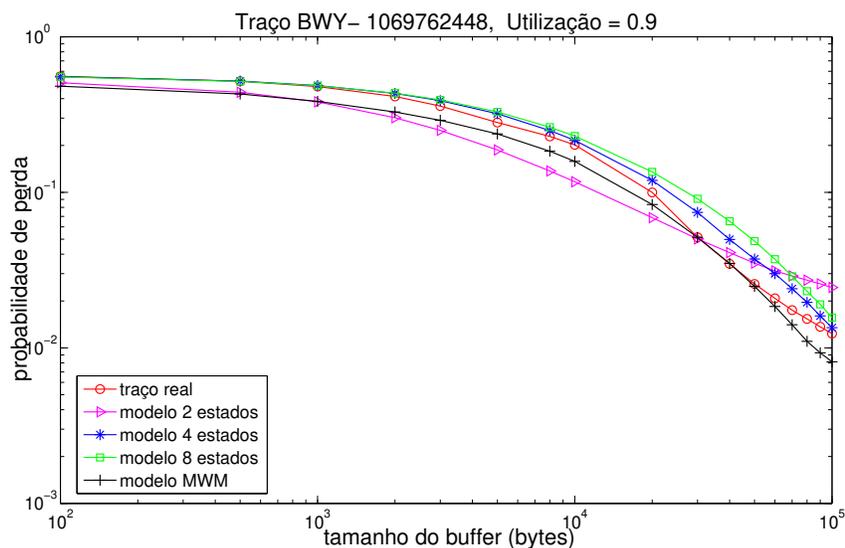


Figura 5.17: Gráficos das perdas das simulações do traço BWY-1069762448 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,9.

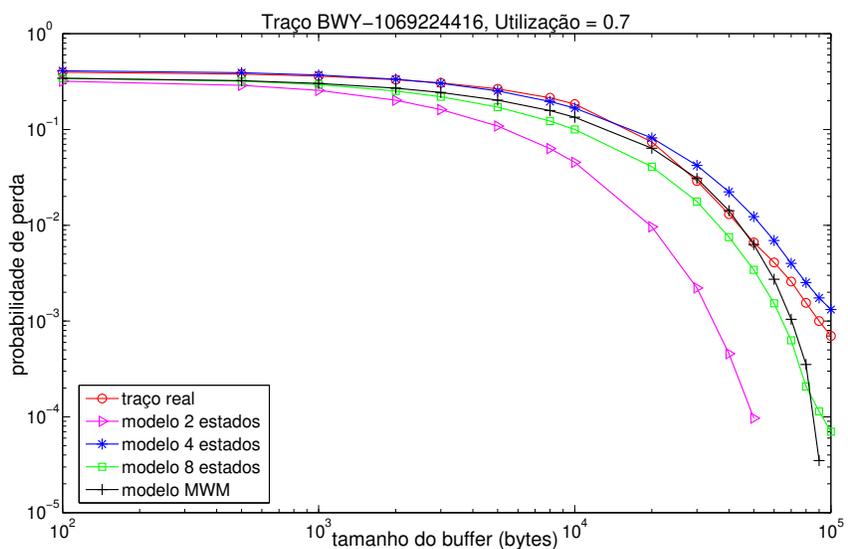


Figura 5.18: Gráficos das perdas das simulações do traço BWY-1069224416 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,7.

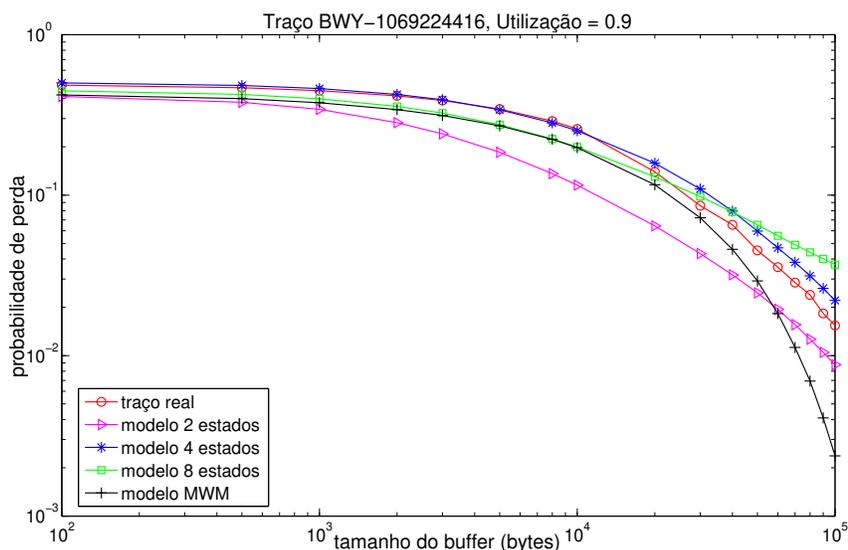


Figura 5.19: Gráficos das perdas das simulações do traço BWY-1069224416 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,9.

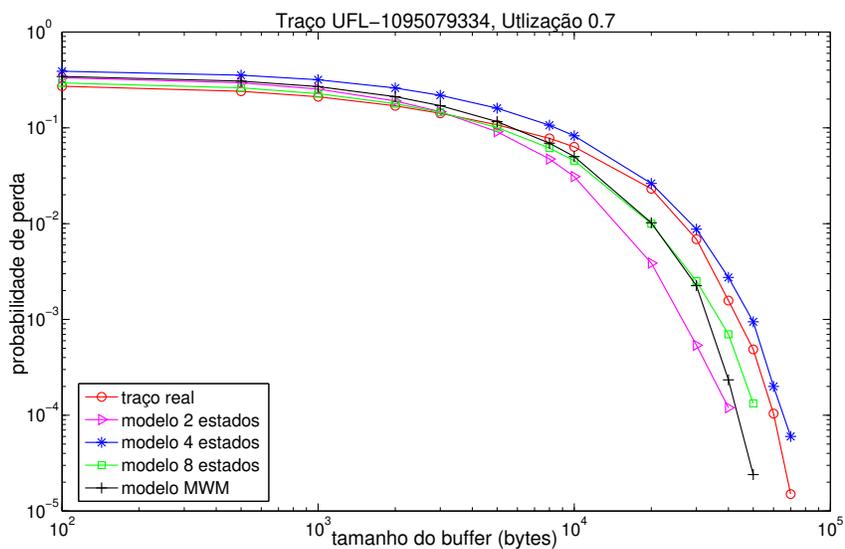


Figura 5.20: Gráficos das perdas das simulações do traço UFL-1095079334 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,7.

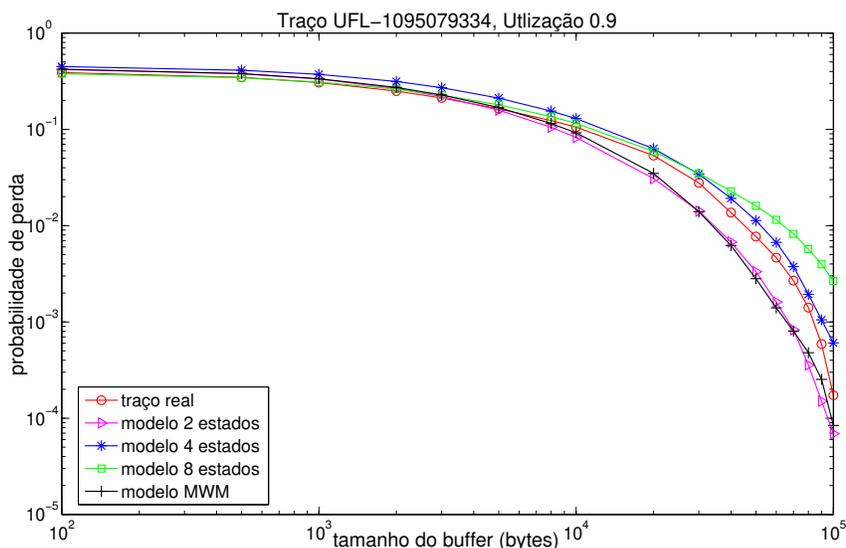


Figura 5.21: Gráficos das perdas das simulações do traço UFL-1095079334 e dos respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados e pelo modelo MWM, com utilização igual a 0,9.

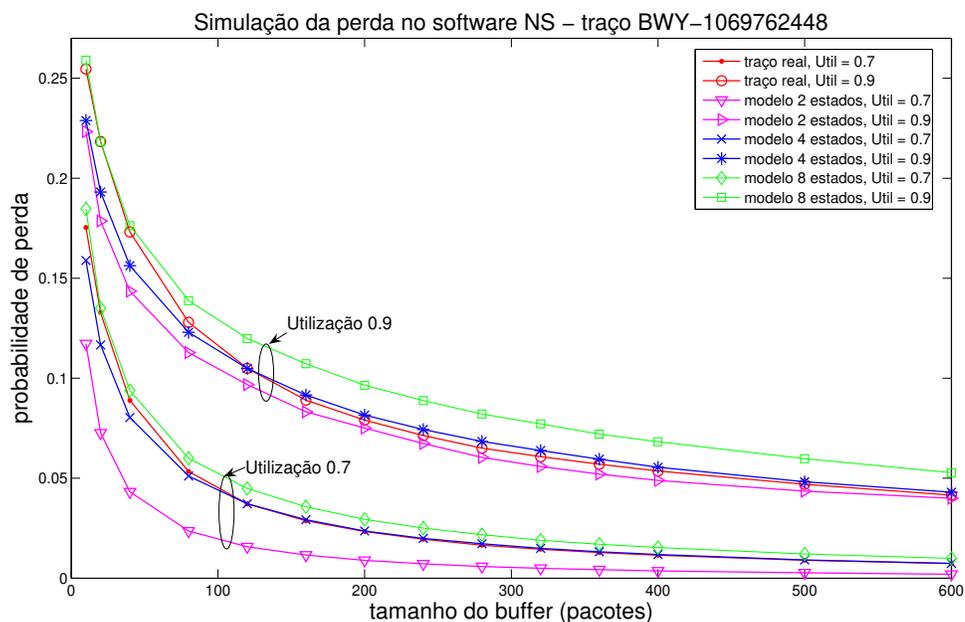


Figura 5.22: Gráfico da perda das simulações feitas no NS para o traço real BWY-1069762448 e os respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados.

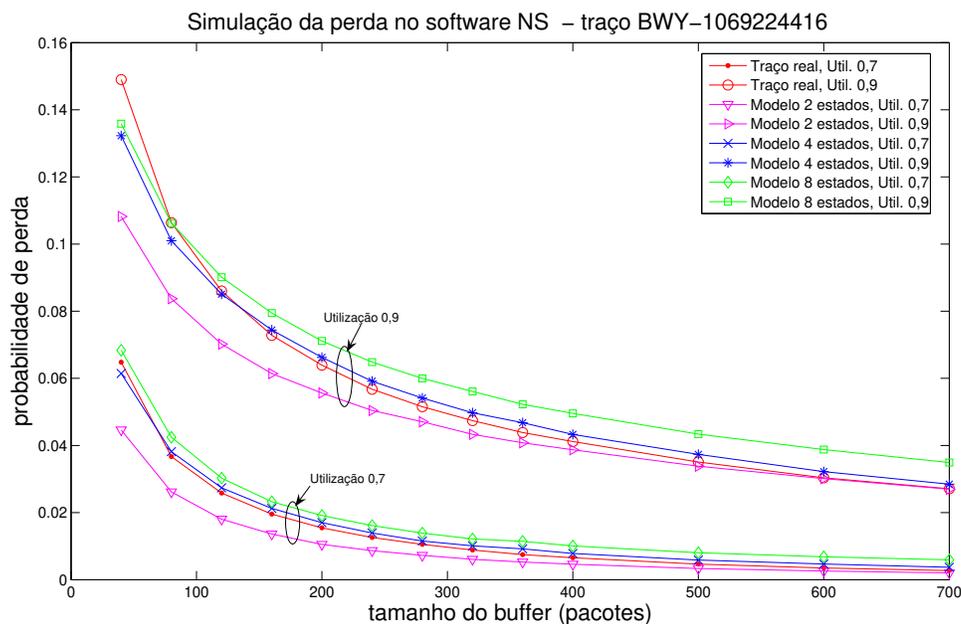


Figura 5.23: Gráfico da perda das simulações feitas no NS para o traço real BWY-1069224416 e os respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados.

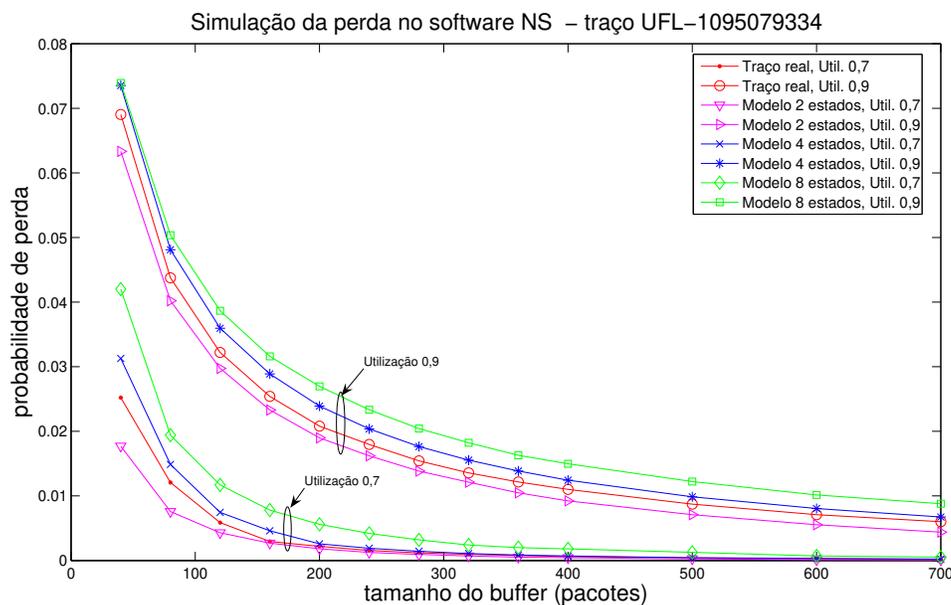


Figura 5.24: Gráfico da perda das simulações feitas no NS para o traço real UFL-1095079334 e os respectivos traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados.

Além das simulações feitas utilizando o programa implementado em C++, foram realizadas simulações utilizando o Network Simulator 2 (NS-2). Foi adotada uma topologia simples: um roteador entre dois nós, onde o primeiro nó é alimentado pelo traço real ou pelo traço sintético. As simulações foram feitas utilizando a fila RED e foram avaliadas sob condições de tráfego variadas, com valores de utilização iguais a 0,7 e 0,9. As filas foram configuradas com tamanho entre 10 e 600 pacotes, sendo os tamanhos médios dos pacotes UDP nos traços BWY-1069762448, BWY-1069224416 e UFL-1095079334 iguais a 366 bytes, 589 bytes e 479 bytes, respectivamente. O motivo de incluir RED na comparação é sua popularidade a adoção como padrão. No entanto, a sua característica de descartar antecipadamente os pacotes de forma indiscriminada produz considerável taxa de perda de pacotes. As Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 apresentam, respectivamente, as perdas obtidas nas simulações que tiveram a fila alimentada com os traços reais BWY-1069762448, BWY-1069224416 e UFL-1095079334, e com os traços sintéticos gerados pelos modelos com dois, quatro e oito estados. Os resultados foram condizentes com as simulações feitas em C++, mostrando novamente que o modelo com quatro estados é o mais preciso dos três modelos e reproduz bem as perdas das simulações do traço real.

Outra análise feita para validar o modelo com quatro estados foi comparar as médias e variâncias das quantidades de bytes que chegam a cada segundo nos traços estudados. As médias do traço BWY-1069762448 gerado pelo modelo com quatro estados não apresentam diferenças estatisticamente significantes com nível de significância de 5% quando comparadas às médias do traço BWY-1069762448 real (teste t-student, estatística do teste 1.84, p-valor 0.067, 171 graus de liberdade). Quando comparadas às médias do traço gerado pelo modelo com oito estados com as médias do traço real, o teste t-student aceita a hipótese também (estatística do teste 1.30, p-valor 0.195, 181 graus de liberdade), ao contrário do teste realizado para o traço gerado pelo modelo com dois estados, onde o teste t-student rejeita a hipótese (estatística do teste -5.97, p-valor 0.000, 162 graus de liberdade).

Para verificar o padrão de multifractalidade nos traços sintéticos, plotou-se os Diagramas Multiscale e Multiscale Linear para os traços reais e para os traços sintéticos. As Figuras 5.25(a), 5.25(c) e 5.25(e) mostram, respectivamente, os diagramas obtidos da função $Mdestimate$ para os traços reais BWY-1069762448, BWY-1069224416 e UFL-1095079334 de fluxo UDP. Já as Figuras 5.25(b), 5.25(d) e 5.25(f) mostram, respectivamente, os diagramas obtidos para os traços sintéticos BWY-1069762448, BWY-1069224416 e UFL-1095079334 gerados pelo modelo com quatro estados. A não-linearidade de ζ_{q} nos Diagramas Multiscale bem como a não-horizontalidade dos Diagramas Multiscale Linear evidenciam a natureza multifractal dos traços sintéticos gerados pelo modelo. Os Diagramas Multiscale dos tráfegos sintéticos possuem forma semelhante aos diagramas dos tráfegos reais.

Para se medir o desempenho do modelo com quatro estados e do modelo MWM, mediu-se o tempo necessário para produzir traços de tamanhos diversos (Tabela 5.7), utilizando um computador com processador AMD Athlon XP 2500, com clock de 1.84 GHz e tamanho de memória 1,00 Gb de RAM. Apesar dos tempos de geração dos traços sintéticos utilizando o modelo MWM serem menores, os tempos para produção dos traços utilizando o modelo com quatro estados são aceitáveis, permitindo o seu uso em experimentos de simulação. O modelo MAP foi resolvido analiticamente e os tamanhos médios da fila foram calculados a partir da solução do modelo, logo, para este modelo, não mediu-se os tempos de geração dos traços sintéticos.

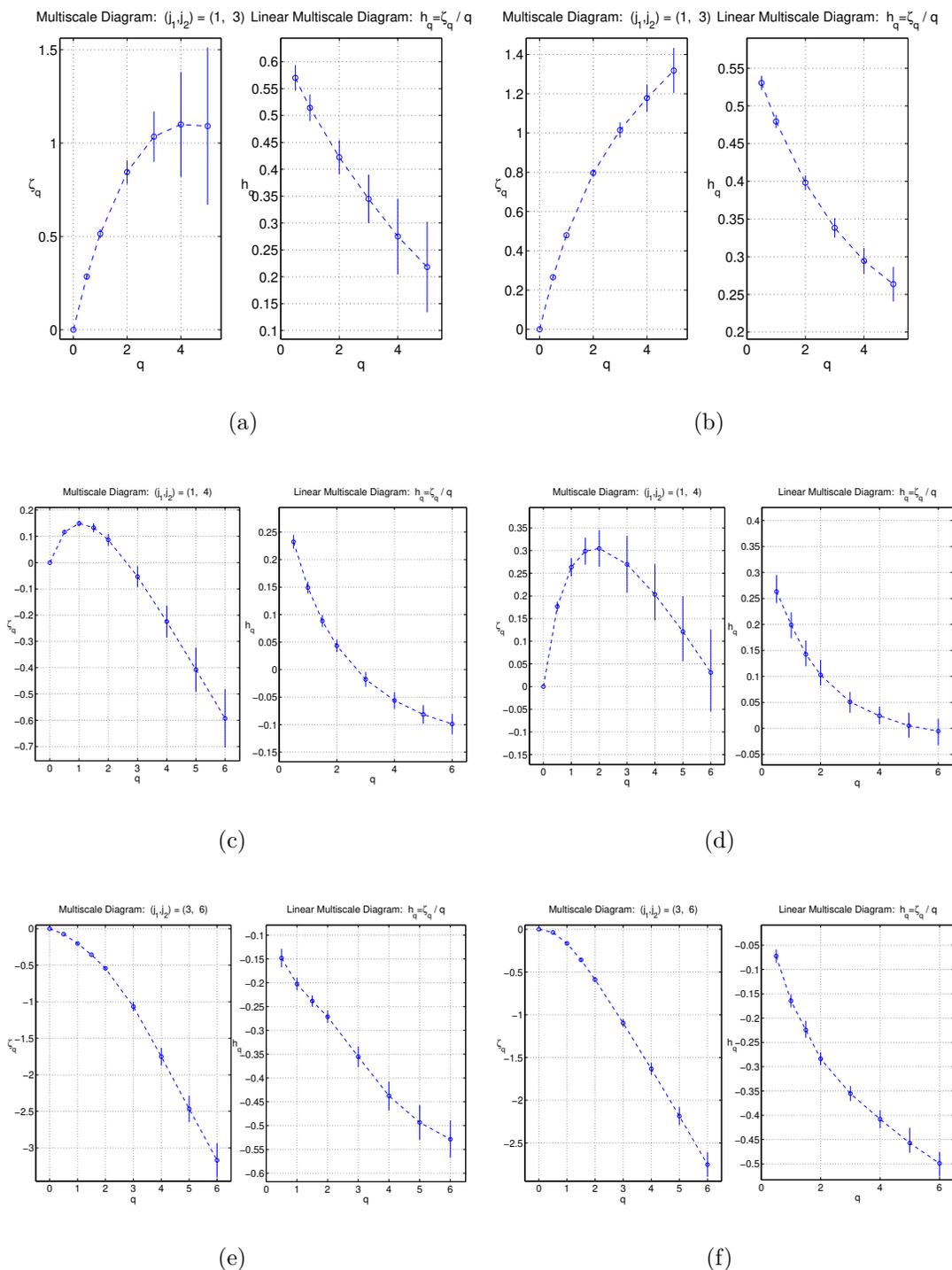


Figura 5.25: DM e DML dos traços reais BWY-1069762448 (a), BWY-1069224416 (c) e UFL-1095079334 (e), e dos traços sintéticos BWY-1069762448 (b), BWY-1069224416 (d) e UFL-1095079334 (f) gerados pelo modelo com quatro estados.

5.9 Considerações parciais

Evidências experimentais recentes apontam que o crescente uso do protocolo UDP altera consideravelmente a natureza “*scaling*” do tráfego IP. O protocolo UDP não reage a situações de congestionamento da rede, podendo provocar a inanição por banda passante dos fluxos gerados pelo protocolo TCP. Assim, a adoção de modelos de tráfego UDP precisos é essencial no dimensionamento dos mecanismos de controle de tráfego. Foram propostos, neste capítulo, novos modelos de tráfego a partir de verificações experimentais das distribuições estatísticas dos fluxos de dados UDP. O modelo hierárquico com quatro estados superestima a probabilidade de perda dentro de limites razoáveis o que indica a sua adequabilidade para o dimensionamento de recursos da rede e provisionamento de Qualidade de Serviço. Além disto, o tempo para a geração de traços sintéticos a partir do modelo hierárquico com quatro estados justifica a sua utilização em experimentos de simulação.

Para a adoção de um modelo de tráfego que reproduza o padrão estatístico de geração de pacotes, deve-se levar em consideração, também, o espaço de estados do modelo e a complexidade de sua parametrização. A Tabela 5.8 sumariza as principais características do modelo com quatro estados, modelo MWM e modelo MAP. A coluna *Número de Estados* indica o número de estados do modelo, caso este tenha sido desenvolvido baseado na metodologia hierárquica de estados. A tabela também mostra o total de parâmetros e o desempenho em determinar a ocupação real da fila.

Um dos fatores importantes na escolha de um modelo de tráfego é a sua flexibilidade em permitir que seus parâmetros sejam ajustados para que novas condições de tráfego sejam analisadas.

Considerando N a quantidade de pacotes do traço, observa-se que quando $N > 4096$, o modelo com quatro estados além de possuir um melhor desempenho na fila, também possui uma quantidade menor de parâmetros a serem estimados do que o modelo MWM. O modelo MAP, embora possua uma menor quantidade de parâmetros que os outros

Tabela 5.7: Tabela com tempos de geração para diferentes tamanhos de traços

Quantidade de pacotes	Tempo de geração modelo com quatro estados	Tempo de geração modelo MWM
10^4	2,5730 s	0,2510 s
10^5	9,9060 s	0,8320 s
10^6	95,0150 s	3,8440 s
10^7	891,0620 s	45,6560 s

Tabela 5.8: Características dos modelos analisados

Modelo	Número de Estados	Total de parâmetros	Desempenho na fila
4 estados	4	12	muito bom
MAP 16	16	6	ruim
MAP 32	32	7	médio
MWM	-	$2 + \log_2 N$	bom

modelos, não teve bom desempenho na ocupação da fila, não justificando o seu uso.

O modelo markoviano MAP pode ser resolvido analiticamente através de métodos bastante conhecidos. Entretanto o número de estados deve ser reduzido para não comprometer o seu custo computacional. Apesar do modelo MAP permitir uma certa flexibilidade no ajuste das escalas de tempo em que o tráfego apresenta maior ou menor variabilidade, para medir o desempenho na fila é necessário calcular a solução analítica do traço para cada valor diferente de utilização da fila, havendo necessidade de repetir todo o processo diversas vezes.

A complexidade da estimativa dos parâmetros do modelo MWM é pequena, baseada no cálculo de um parâmetro global que representa a taxa média no intervalo de tempo considerado e no cálculo dos parâmetros multiplicadores (um para cada escala). Do mesmo modo, a complexidade da parametrização do modelo com quatro estados também é pequena, baseada somente no cálculo de cada parâmetro estatístico das distribuições dos tamanhos dos pacotes, tempos entre chegadas e durações das rajadas.

Capítulo 6

Conclusões

Preditores de tráfego baseados em modelos requerem que estes sejam capazes de representar com precisão as reais características estatísticas do tráfego. Assim sendo, é de grande importância entender o comportamento do tráfego, os fenômenos *scaling* existentes e a variabilidade nas diversas escalas de tempo.

As contribuições desta tese são:

- Introduziu-se a medida γ como uma forma de medir o impacto da multifractalidade de um fluxo em um sistemas de filas, afim de possibilitar comparações quantitativas entre traços multifractais.
- Verificou-se que sob o regime de pequenas escalas de tempo, a hipótese de monofractalidade não pode ser rejeitada para alguns traços, enquanto que para outros traços a hipótese de multifractalidade é que não pode ser rejeitada. Ou seja, concluiu-se que não se pode generalizar que os traços IP e TCP são somente monofractais ou multifractais.
- Foi concluído que o tráfego UDP é multifractal, enquanto que a natureza monofractal ou multifractal do tráfego IP é ditada pela natureza do tráfego TCP, podendo este fato ser atribuído ao maior volume de bytes gerado pelo TCP, aproximadamente 90%.
- Refutou-se a hipótese existente na literatura de que é o mecanismo de reconhecimento do TCP que determina a multifractalidade do mesmo, pelo fato dos traços TCP possuírem natureza ora monofractal ora multifractal.
- As funções de *Hölder* dos fluxos IP e TCP tiveram comportamentos muito semelhantes, enquanto que a função de *Hölder* para o fluxo UDP teve um comportamento ligeiramente menor. Apesar de ser em proporção menor, concluiu-se que o tráfego UDP possui impacto semelhante ao tráfego TCP em um sistema de filas.

- Concluiu-se que tráfegos de pacotes do tipo ACK são multifractais, enquanto que tráfegos de pacotes do tipo *dados* são ora monofractais ora multifractais. Portanto, concluiu-se, também, que a natureza *scaling* do tráfego é determinada pelo comportamento dos pacotes do tipo *dados*, ou seja, pacotes com tamanhos maiores que 80 bytes.
- Foram propostos 3 modelos de tráfego para fluxos UDP, que diferem entre si pelo número de estados e pelas distribuições que caracterizam os tempos entre chegadas dos pacotes e as durações das rajadas de pacotes. O modelo hierárquico com quatro estados foi o que melhor reproduziu as características dos traços reais e superestimou a probabilidade de perda dentro de limites razoáveis, indicando a sua adequabilidade para o dimensionamento de recursos da rede e provisionamento de Qualidade de Serviço. O tempo para a geração de traços sintéticos a partir do modelo hierárquico com quatro estados também justifica a sua utilização em experimentos de simulação.

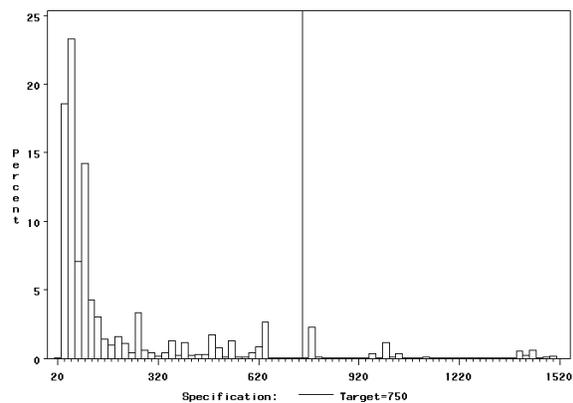
Como trabalho futuro, sugere-se a investigação da característica *scaling* em um número maior de traços, bem como a determinação de um valor limiar no qual o volume gerado pelo TCP influencia o agregado IP. A investigação de se o mecanismo de reconhecimento do TCP é o responsável pela natureza deste tráfego é também uma questão em aberto.

A construção de um procedimento para o cálculo das estimativas dos parâmetros do modelo de quatro estados também é proposta. Bem como, a determinação dos intervalos de confiança dos valores que os parâmetros devem assumir.

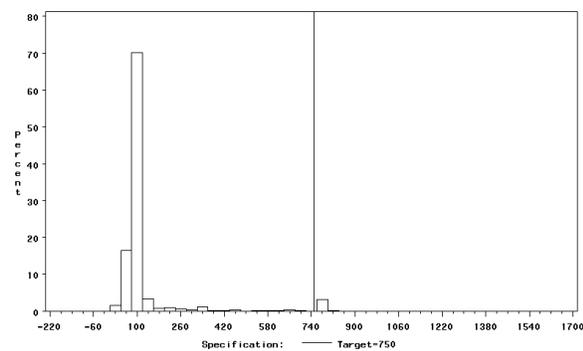
Outra sugestão de trabalho futuro é tentar generalizar o modelo hierárquico com quatro estados proposto para traços monofractais. Em outras palavras, comparar os resultados das simulações de traços sintéticos monofractais gerados pelo modelo com quatro estados e por outros modelos monofractais conhecidos na literatura, a fim de verificar a adequabilidade e precisão do modelo com quatro estados.

Apêndice A

Ajuste das Distribuições

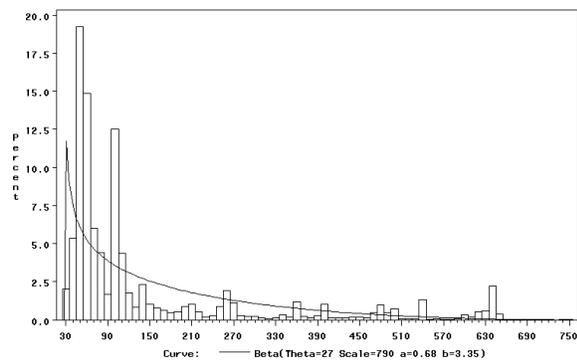


(a)

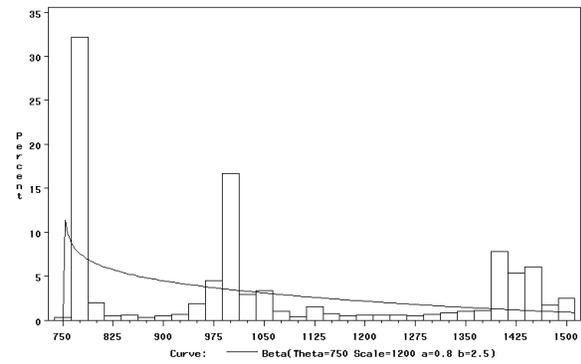


(b)

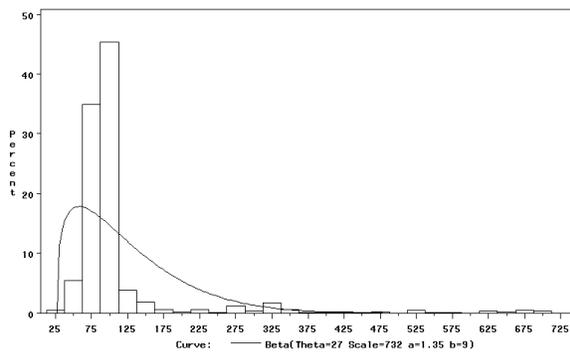
Figura A.1: Distribuição dos tamanhos dos pacotes UDP dos traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (b).



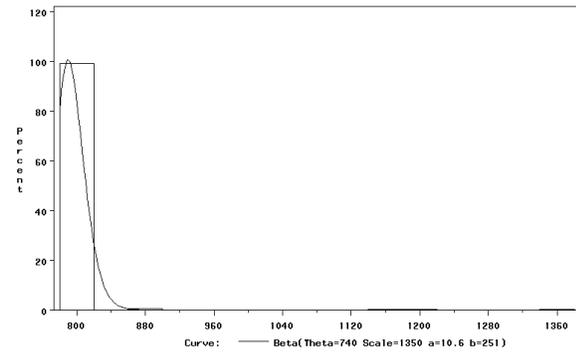
(a)



(b)

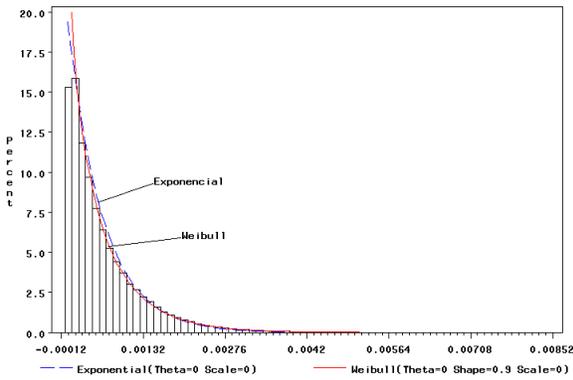


(c)

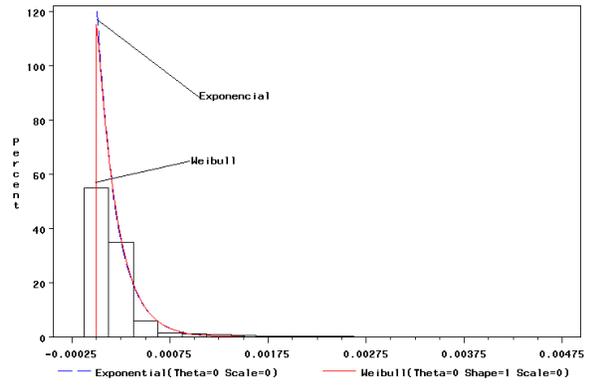


(d)

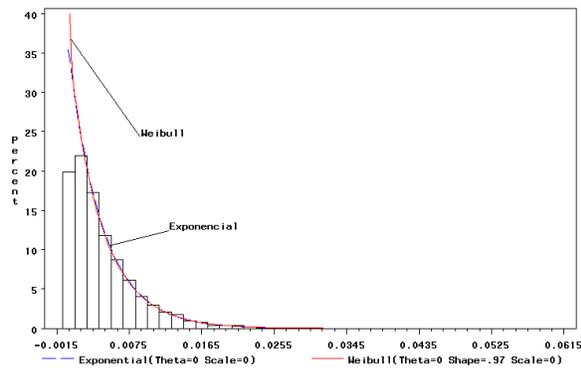
Figura A.2: Ajuste da distribuição Beta para a distribuição dos tamanhos dos pacotes do estado *um* - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c) - e do estado *dois* - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).



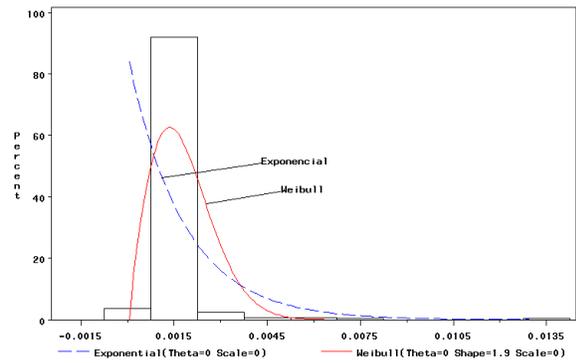
(a)



(b)

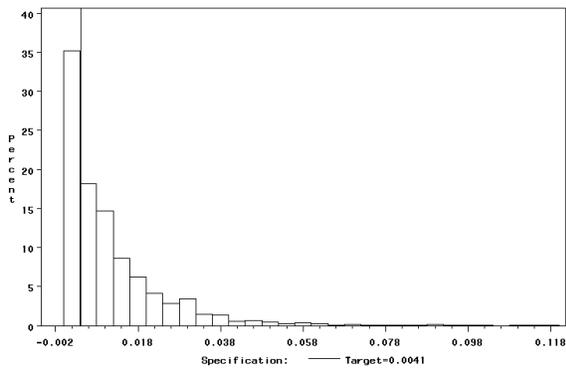


(c)

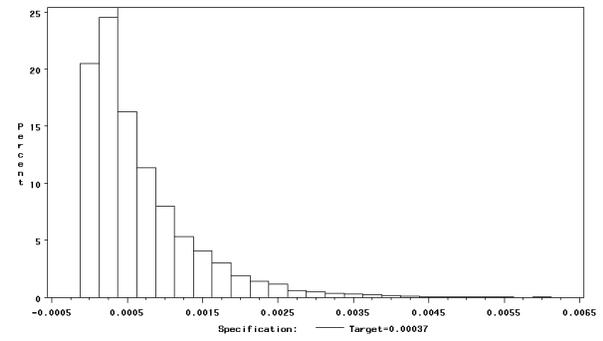


(d)

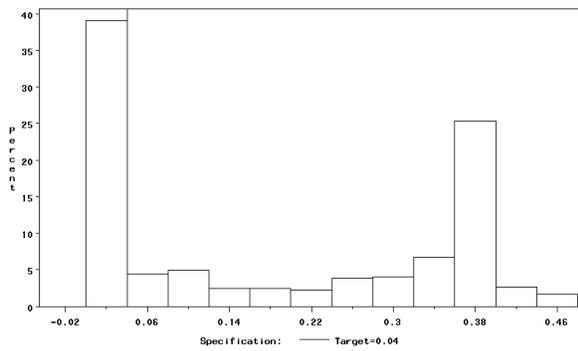
Figura A.3: Ajuste das distribuições Exponencial e *Weibull* para a distribuição das diferenças de tempo entre as chegadas dos pacotes do estado *um* - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c) - e do estado *dois* - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).



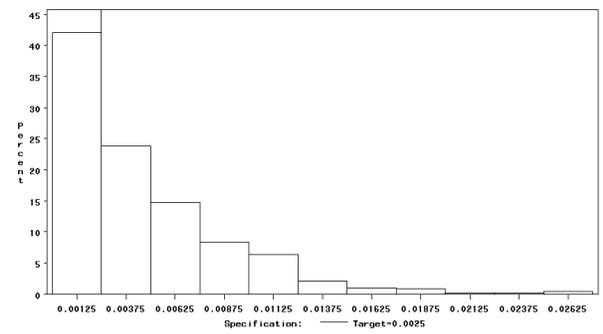
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura A.4: Distribuição das durações das rajadas dos pacotes do estado *um* - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c) - e do estado *dois* - COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).

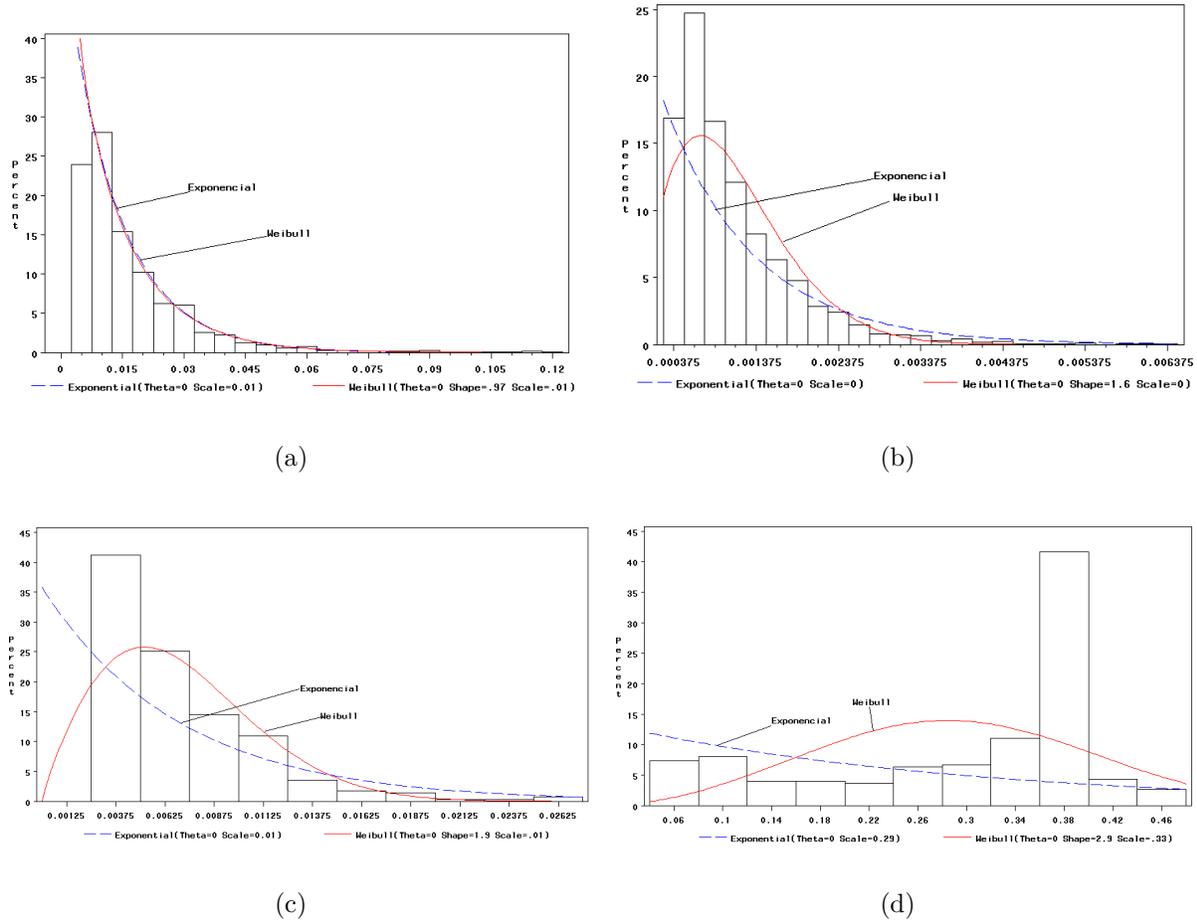
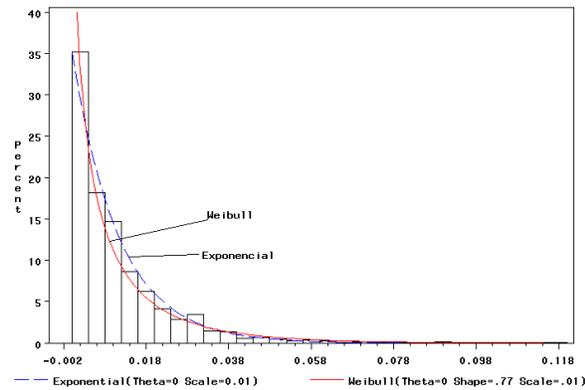
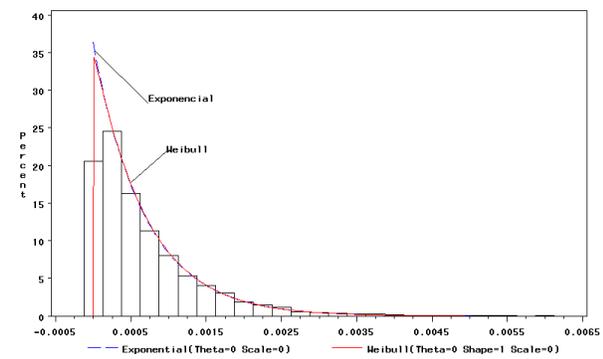


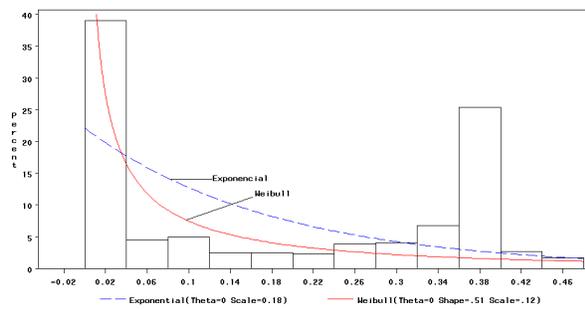
Figura A.5: Ajuste das distribuições Exponencial e *Weibull* para a distribuição das durações das rajadas maiores que x segundos dos pacotes do estado *um* - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c) - e para a distribuição das durações das rajadas maiores que y segundos dos pacotes do estado *dois* - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).



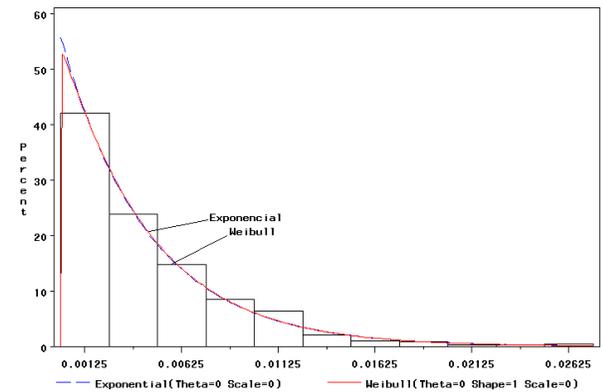
(a)



(b)

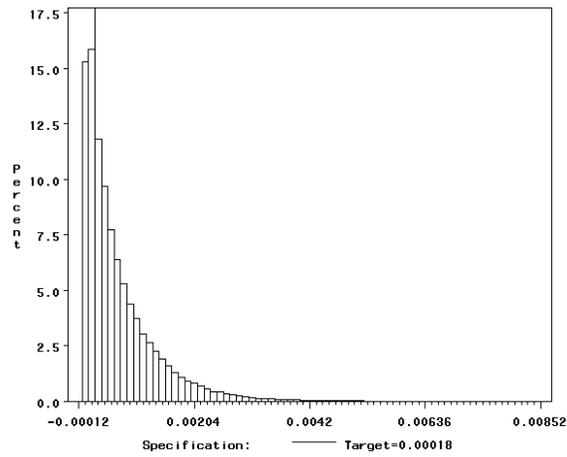


(c)

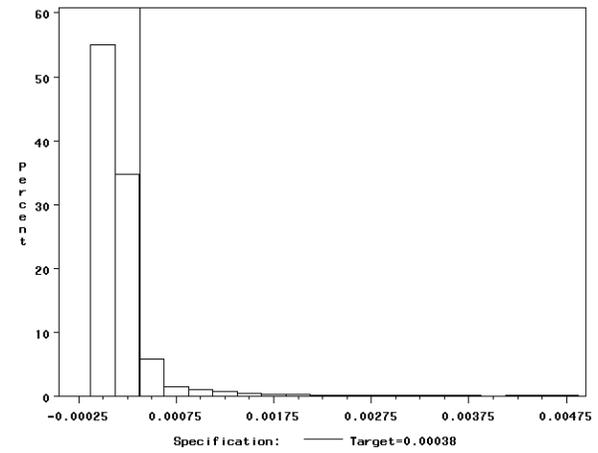


(d)

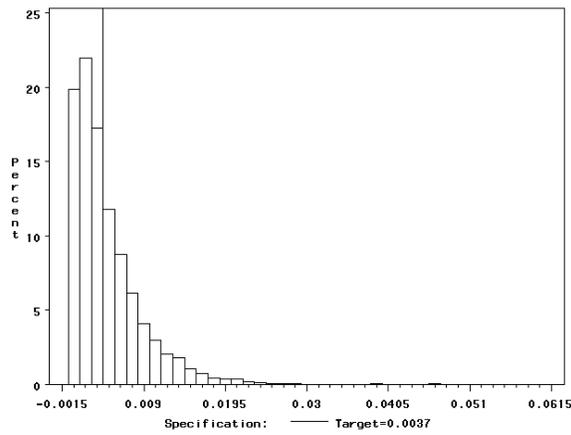
Figura A.6: Ajuste das distribuições Exponencial e *Weibull* para a distribuição das durações das rajadas de pacotes do estado *um* - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c) - e do estado *dois* - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).



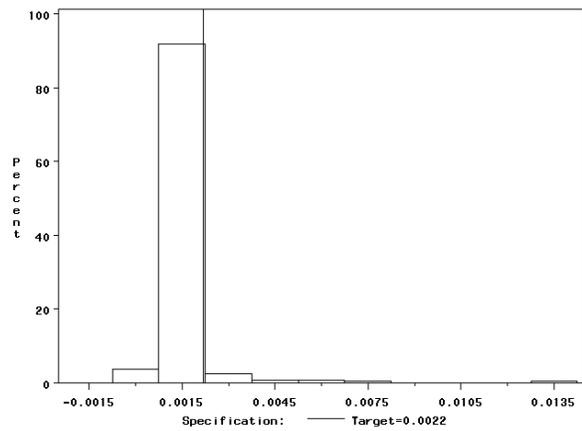
(a)



(b)

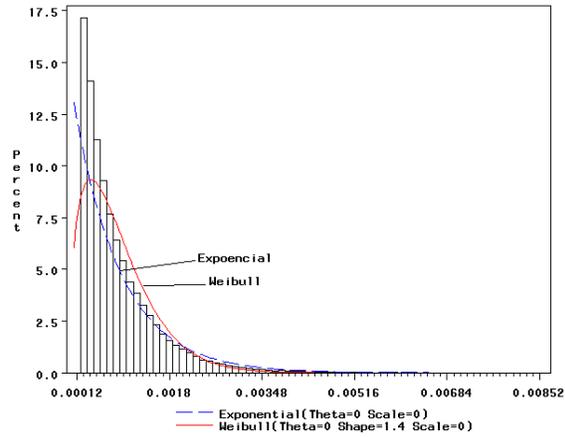


(c)

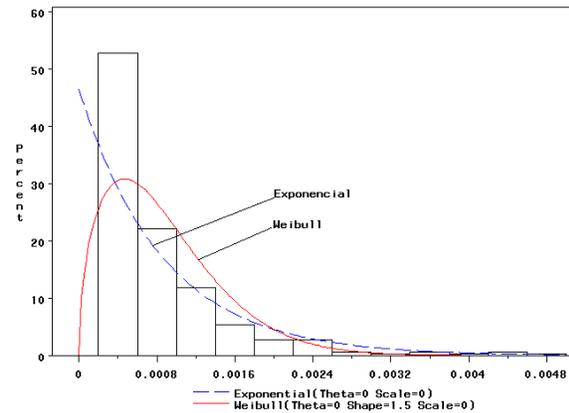


(d)

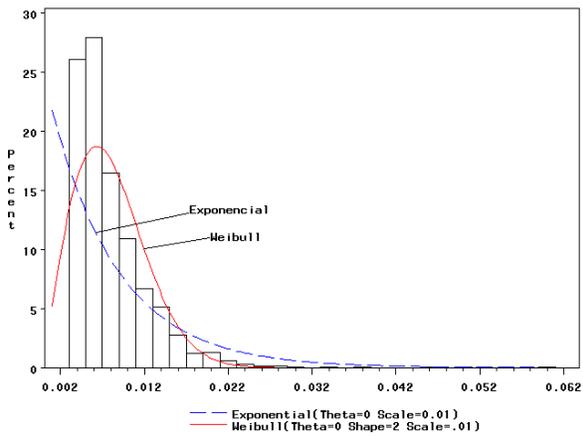
Figura A.7: Distribuição dos tempos entre as chegadas dos pacotes com tamanhos menores que 750 bytes - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c)- e maiores que 750 bytes - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766.



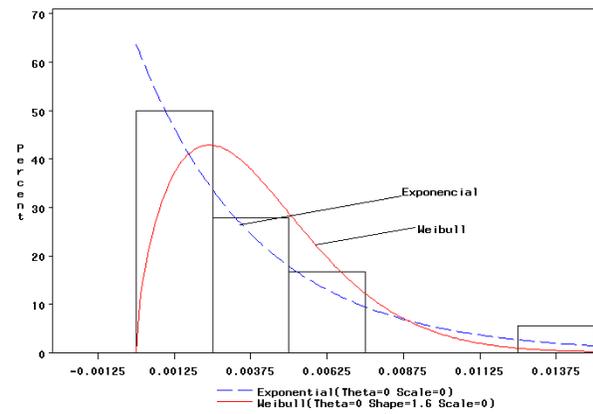
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura A.8: Ajuste das distribuições Exponencial e *Weibull* para a distribuição dos tempos entre chegadas dos pacotes menores que 750 bytes que são maiores que w segundos - traços COS-1069211539 (a) e MEM-1112013766 (c)- e para a distribuição dos tempos entre chegadas dos pacotes maiores que 750 bytes que são maiores que z segundos - traços COS-1069211539 (b) e MEM-1112013766 (d).

Apêndice B

Distribuições Estatísticas

B.1 Distribuição Weibull

A densidade

$$f(x; a, b) = abx^{b-1}e^{-ax^b}I_{(0,\infty)}(x) \quad (\text{B.1})$$

onde $a > 0$ e $b > 0$, é chamada de densidade *Weibull*. Com o nome do inventor, *Waloddi Weibull*, esta distribuição é usada extensivamente em engenharia da confiabilidade, análise de sobrevivência e em outras áreas devido a sua versatilidade e simplicidade. Para $b = 1$, a densidade *Weibull* se reduz a densidade exponencial. Possui média $(1/a)^{1/b}\Gamma(1 + b^{-1})$ e variância $(1/a)^{2/b}[\Gamma(1 + 2b^{-1}) - \Gamma^2(1 + b^{-1})]$.

B.2 Distribuição Beta

A família de densidades de probabilidade de variáveis randômicas contínuas que possuem valores no intervalo $(0, 1)$ é a família de distribuições Beta.

Se um variável X possui uma densidade dada por

$$f_x(x) = f_x(x; a, b) = \frac{1}{B(a, b)}x^{a-1}(1-x)^{b-1}I_{0,1}(x), \quad (\text{B.2})$$

onde $a > 0$ e $b > 0$, então X é definida tendo sendo uma distribuição Beta.

A função $B(a, b) = \int_0^1 x^{a-1}(1-x)^{b-1}dx$ é chamada de função Beta.

B.3 Distribuição Exponencial

Se uma variável randômica X possui uma densidade dada por

$$f_x(x; \lambda) = \lambda e^{-\lambda x} I_{[0, \infty)}(x), \quad (\text{B.3})$$

onde $\lambda > 0$, então X é definida como tendo uma distribuição exponencial (negativa).

B.4 Distribuição Uniforme

Se a função de densidade de probabilidade de uma variável randômica X é dada por

$$f_X(x) = f_x(x; a, b) = \frac{1}{b - a} I_{[a, b]}(x), \quad (\text{B.4})$$

onde os parâmetros a e b satisfazem $-\infty < a < b < \infty$, então a variável randômica X é definida como sendo uniformemente distribuída sob um intervalo $[a, b]$, e a distribuição dada pela equação acima é chamada de distribuição Uniforme.

Referências Bibliográficas

- [1] A. L. Neidhardt e I. Saniee A. Erramilli, O. Narayan. Performance impacts of multi-scaling in wide-area tcp/ip traffic. In *INFOCOM*, pages 352–359, 2000.
- [2] O. Narayan e I. Saniee A. Erramilli. Multi-scaling models of tcp/ip and subframe vbr video traffic. *Journal of Communications and Networks*, pages 383–395, Dezembro 2001.
- [3] O. Narayan e W. Willinger A. Erramilli. Experimental queueing analysis with long-range dependent packet traffic. *IEEE ACM Transactions on Networking*, pages 209–223, Abril 1996.
- [4] A. C. Gilbert e W. Willinger A. Feldmann. Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of internet wan traffic. In *SIGCOMM*, volume 28, pages 42–55, 1998.
- [5] P. Huang e W. Wilinger A. Feldmann, A. Gilbert. Dynamics of ip traffic: A study of the role of variability and the impact of control. *Proceedings of the 1999 ACM SIGCOMM Conference*, pages 301–313, Agosto 1999.
- [6] W. Williamson e T. Kurtz A. Feldmann, A. Gilbert. The changing nature of network traffic: Scaling phenomena. *ACM Computer Communication Review*, 28(2):5–26, Abril 1998.
- [7] C. Barakat. Tcp modeling and validation. *IEEE Network*, 15(3):38–47, 2001.
- [8] J. Beran. *Statistics for Long-Memory Processes*. Chapman and Hall, 1994.
- [9] J.S. Marron D. A. Rolls e F. D. Smith C. Park, F. H. Campos. Long-range-dependence in a changing internet traffic mix. *Computer Networks Journal*, 48(3):401–422, 2005.
- [10] V. Misra e D. Towsley C. V. Hollot, Y. Liu. Unresponsive flows and aqm performance. *Proceedings of INFOCOM 2003*, 1:85–95, Abril 2003.

- [11] D. R. Cox. Long-range dependence: A review. *In Statistics: an Appraisal*, pages 55–74, 1984.
- [12] P. Flandrin e P. Chainais D. Veitch, P. Abry. Infinitely divisible cascade analysis of network traffic data. *Proceedings of ICASSP 2000*, Junho 2000.
- [13] I. Daubechies. *Ten lectures on wavelets*, volume 61. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, 1992.
- [14] M. Crovella e A. Bestavros. Self-similarity in world wide web traffic. evidence and possible causes. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5:835–846, Dezembro 1997.
- [15] K. Avrachenkov e C. Barakat E. Altman. A stochastic model of tcp/ip with stationary random. *ACM SIGCOMM*, pages 231–242, 2000.
- [16] A. T. Andersen e B. F. Nielsen. A markovian approach for modeling packet traffic with long-range dependence. *IEEE journal on selected areas in communications*, 16(5):719–732, 1998.
- [17] P. Abry e D. Veitch. Wavelet analysis of long-range dependent traffic. *IEEE Transactions on Information Theory*, 44(1):2–15, 1998.
- [18] N. Azzouna e F. Guillemin. Experimental analysis of the impact of peer-to-peer application on traffic in commercial ip networks. *European Transactions on Telecommunications*, 15(6), 2004.
- [19] S. Molnar e G. Terdik. A general fractal model of internet traffic. *IEEE Local Computer Networks (LCN)*, Novembro 2001.
- [20] R. H. Riedi e J. L. Vehel. Ip traffic is multifractal: a numerical study. INRIA Rocquencourt, Março 1997. Tech. Rep. 3129.
- [21] R. Peltier e J. L. Véhel. Multifractional brownian motion: definition and preliminary results. *INRIA*, 2645, 1995.
- [22] S. Robert e J. Y. Le Boudec. New models for pseudo self-similar traffic. *Performance Evaluation*, 30:57–68, 1997.
- [23] M. Grossglauser e J.C. Bolot. On the relevance of long-range dependence in network traffic. *IEEE ACM Transactions on Networking*, 7(5):629–640, 1999.
- [24] A. Horváth e M. Telek. A markovian point process exhibiting multifractal behaviour and its application to traffic modeling. *Proceedings of the Fourth International Conference on Matrix-analytic Methods*, pages 183–208, 2002.

- [25] C. A. V. Melo e N. L. S. da Fonseca. Envelope process and computation of the equivalent bandwidth of multifractal flows. *Computer Networks*, 48(3):351–375, Junho 2005.
- [26] D. Veitch e P. Abry. Wavelet tools for the analysis of scaling phenomena in traffic, 1998.
- [27] J.M. Bardet e P. Bertrand. Identification of the multiscale fractional brownian motion with biomechanical applications. *Preprint of L.S.P.*, 2003.
- [28] J. Veהל e R. Riedi. Fractional brownian motion and data traffic modeling: The other end of the spectrum. *Fractals in Engineering*, pages 185–202, Janeiro 1997.
- [29] A. Benassi e S. Deguy. Multi-scale fractional brownian motion: definition and identification. *Technical Report 83, LLAIC1*, 1999.
- [30] V. Paxton e S. Floyd. Wide-area traffic: The failure of poisson modeling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3:226–244, Junho 1995.
- [31] M. Taqqu e V. Teverosky. Is network traffic self-similar or multifractal. *Fractals*, 5(1):63–73, 1997.
- [32] K. Park e W. Willinger. Self-similar network traffic and performance evaluation. *Wiley Interscience*, 2000.
- [33] Y. Wang e J. W. Davis J. E. Cavanaugh. Stochastic processes: Modeling and simulation. In *Handbook of Statistics*, chapter Self-similar processes and their wavelet analysis. Elsevier Science, 2003.
- [34] K. Kant. On aggregate traffic generation with multifractal properties. *Proceedings of GLOBECOM99*, pages 1179–1183, 1999.
- [35] D. Veitch e P. Abry N. Hohn. Does fractal scaling at the ip level depend on tcp flow arrival processes? *ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop*, 2002.
- [36] D. Veitch e P. Abry N. Hohn. Cluster processes, a natural language for network traffic. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(8):2229–2244, Agosto 2003.
- [37] P. Abry N. Hohn, D. Veitch. Multifractality in tcp/ip traffic: the case against. *Computer Networks Journal*, 48(3):293–313, 2005.
- [38] S. Kotz e N. Balakrishnan N. L. Johnson. *Continuous Univariate Distributions*, volume 1. John Wiley, 2 edition, 1994.

- [39] P. Flandrin R. Riedi e D. Veitch P. Abry, R. Baraniuk. The multiscale nature of network traffic: Discovery, analysis and modeling. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002.
- [40] V. M. Gadre e U. B. Desai P. M. Krishna. *Multifractal based network traffic modeling*. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [41] V. J. Ribeiro e R. G. Baraniuk R. H. Riedi, M. S. Crouse. A multifractal wavelet model with application to network traffic. *IEEE Transactions on Information Theory*, 45(3):992–1018, Abril 1999.
- [42] P. Abry L. Huang P. Flandrin e J. Micheel S. Roux, D. Veitch. Statistical scaling analysis of tcp/ip data. *ICASSP - Network Inference ans Traffic Modeling*, 2002.
- [43] Web site da ferramenta Coralreef, Maio 2005. <http://www.caida.org/tools/measurement/coralreef>.
- [44] Web site da ferramenta wavelet, Maio 2005. www.cubinlab.ee.mu.oz.au/~darryl/MS_code.html.
- [45] Web site do projeto PMA do grupo NLANR, Maio 2005. <http://pma.nlanr.net/Traces>.
- [46] Web site do Software do modelo MWM, Maio 2005. <http://www.stat.rice.edu/riedi>.
- [47] Web site do software Tangram II, Agosto 2005. <http://www.land.ufrj.br/tools/tangram2/tangram2.html>.
- [48] W. Willinger e D. V. Wilson W. E. Leland, M. S. Taqqu. On the self-similar nature of ethernet traffic. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2(1):1–15, Fevereiro 1994.
- [49] V. Misra e D. Towsley W. Gong, Y. Liu. Self-similarity and long range dependence on the internet: A second look at the evidence, origins and implications. *Computer Networks*, 48(3):379–399, 2005.
- [50] G. Wornell. A karhunen-loeve-like expansion for $1/f$ processes via wavelets. *IEEE Trans. Information Theory*, 39(1):260–264, Janeiro 1993.
- [51] S. Moon e C. Diot Z. L. Zhang, V. Ribeiro. Small-time scaling behavior of internet backbone traffic. *Computer Networks*, 48(3):315–334, 2005.