

**Bruno Carneiro Leão Guedes**

**Análise do Desempenho de Redes  
Ópticas de Topologia Manhattan Street  
com Roteamento por Deflexão de Pacotes**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Marbey Manhães Mosso

Rio de Janeiro

Abril de 2005



**Bruno Carneiro Leão Guedes**

**Análise do Desempenho de Redes  
Ópticas de Topologia Manhattan Street  
com Roteamento por Deflexão de Pacotes**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marbey Manhães Mosso**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

**Prof. Abelardo Podcameni**

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

**Prof. Ricardo Guerra Pereira**

UERJ

**Prof. Manoel Alberto Rodrigues Neto**

PROLAN

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 06 de abril de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Bruno Carneiro Leão Guedes**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na PUC-RJ em 2002 na área de Telecomunicações e Sistemas de Apoio à Decisão.

Realizou trabalhos nas áreas de medidas e simulações de redes ópticas. Interesses de Pesquisa: Sistemas de Comunicações Ópticas, Dispositivos de Microondas, Técnicas de Programação, Eletrônica Digital e Otimização.

#### Ficha Catalográfica

Guedes, Bruno Carneiro Leão

Análise do desempenho de redes ópticas de topologia Manhattan Street com roteamento por deflexão de pacotes / Bruno Carneiro Leão Guedes ; orientador: Marbey Manhães Mosso. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

92 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Rede Manhattan Street. 3. Roteamento por deflexão. 4. Chaveamento óptico. 5. Redes ópticas. I. Mosso, Marbey Manhães. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha família.

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, agradeço a minha família. Ao meu pai, minha mãe, irmão, avós, além de todos os demais, pelo amor e apoio dado a mim durante toda a minha vida.

À minha namorada Vívian Porto, pelo amor e carinho, que tornam minha vida muito melhor.

Ao orientador Marbey Mosso, pelas muitas oportunidades que foram concedidas à mim, e pela excelente e presente orientação em todas as etapas deste trabalho.

Aos amigos Henrique Portela e Rodolfo Lima, pela grande ajuda na realização deste trabalho.

Aos meus amigos, pelo apoio em todos os momentos.

À FAPERJ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pelo ótimo ambiente de estudo.

## Resumo

Guedes, Bruno. **Análise do Desempenho de Redes Ópticas de Topologia Manhattan Street com Roteamento por Deflexão de Pacotes**. Rio de Janeiro, 2005. 92p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Redes Manhattan Street (MS) têm sido descritas como um arranjo linear bidimensional de nós, semelhante à configuração de ruas e avenidas de Manhattan. O roteamento por deflexão é implementado encaminhando os pacotes que atingem um determinado nó a uma de suas saídas de forma síncrona ou assíncrona. O principal objetivo deste trabalho consiste na simulação e análise de redes totalmente ópticas configuradas segundo a topologia MS. O roteamento por deflexão e o assincronismo são considerados, para evitar complexidade eletrônica e armazenamento de pacotes no domínio óptico. Serão apresentadas as características das redes MS, suas propriedades estruturais e os parâmetros utilizados para analisar seu desempenho. Uma metodologia analítica dedicada a obtenção teórica destes parâmetros será introduzida. Serão apresentados alguns conceitos básicos sobre simulação de redes; diversas simulações da rede proposta utilizando os protocolos UDP e TCP; uma descrição do software que foi utilizado para realizar as simulações; uma comparação entre os resultados obtidos através da simulação e os obtidos através da metodologia analítica; e uma análise do efeito da latência na vazão do protocolo TCP.

## Palavras-chave

Rede Manhattan Street; Roteamento por Deflexão; Chaveamento Óptico; Redes Ópticas

## **Abstract**

Guedes, Bruno. **Análise do Desempenho de Redes Ópticas de Topologia Manhattan Street com Roteamento por Deflexão de Pacotes**. Rio de Janeiro, 2005. 92p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Manhattan Street (MS) Networks are bidimensional linear node sets arranged as the avenues and streets of Manhattan. The simulation and analysis of all-optical MS networks is the central target of this paper. In order to avoid using complex electronics and/or optical domain buffers, the deflection routing and the asynchronism are taken into account in the analysis. Deflection routing is performed by conveying incoming packets towards one of the two outputs. The characteristics of MS Networks are presented, along with their structural properties and the parameters used for performance analysis. An analytical methodology for the theoretical obtaining of these parameters is described. Some basic concepts on network simulation are discussed. Several simulations of the proposed network are presented, using both UDP and TCP protocols, and the software used for simulations is also described. The obtained results are compared and discussed with respect to the previously described analytic methodologies. Finally, the effect of network latency on the TCP-protocol throughput is assessed.

## **Key-words**

Manhattan Street Network; Deflection Routing; Optical Packet Switching; Optical Network

## Sumário

1	Introdução	13
1.1.	Histórico da Topologia <i>Manhattan Street</i>	14
1.2.	Redes <i>Manhattan Street</i> e Roteamento por Deflexão de Pacotes	16
1.3.	Motivação	16
1.4.	Objetivos	17
2	Descrição e Análise de Redes <i>Manhattan Street</i> com Roteamento por Deflexão de Pacotes	18
2.1.	Características Básicas das Redes <i>Manhattan Street</i>	18
2.2.	<i>Optical Buffering</i>	20
2.3.	Propriedades Estruturais do Roteamento por Deflexão	20
2.4.	Parâmetros Utilizados para Avaliar o Desempenho das Redes	23
2.5.	Metodologia Analítica	25
2.6.	Metodologia Analítica e Resultados Simulados	32
2.7.	Resumo	34
3	Simulação de Redes <i>Manhattan Street</i> com Roteamento por Deflexão de Pacotes	35
3.1.	Introdução	35
3.1.1.	Objetivos de Simulação de Redes	36
3.1.2.	Desenvolvendo Modelos de Simulação Válidos e Confiáveis	36
3.1.3.	<i>Softwares</i> para Simulação de Redes	38
3.2.	Simulações	39
3.2.1.	Validação do Modelo	41
3.3.	UDP e TCP	45
3.4.	Resultados	47
3.4.1.	Simulação MS com Nove Nós sem <i>Buffer</i> Óptico Utilizando UDP e Sinalização na Camada Física	48
3.4.2.	Simulação MS com Nove Nós com <i>Buffer</i> Óptico Utilizando UDP e Sinalização na Camada Física	54



3.4.3. Simulação MS com Nove Nós sem <i>Buffer</i> Óptico Utilizando TCP e Sinalização na Camada Física	61
3.4.4. Simulação MS com Nove Nós com <i>Buffer</i> Óptico Utilizando TCP e Sinalização na Camada Física	68
3.4.5. Análise do Efeito da Latência na Vazão do TCP	75
3.5. Resumo	76
4 Comentários Finais e Conclusões	78
4.1. Modelo Analítico	78
4.2. Resultados das Simulações	78
4.2.1. Comparação do UDP com <i>Buffer</i> Óptico com o UDP sem <i>Buffer</i> Óptico	79
4.2.2. Comparação do TCP com <i>Buffer</i> Óptico com o TCP sem <i>Buffer</i> Óptico	81
4.2.3. Comparação do UDP com o TCP em Redes MS sem <i>Buffer</i> Óptico	84
4.2.4. Comparação do UDP com o TCP em Redes MS com <i>Buffer</i> Óptico	85
4.3. Análise do Efeito da Latência no TCP	86
4.4. Roteamento na Camada Física e Gerência de Recursos	86
4.5. Trabalhos Futuros	87
4.6. Resumo	87
5 Referências	88
6 Anexo: Lista de Acrônimos	91

## Lista de figuras

Figura 1.1: Evolução da pilha de protocolos das redes de dados.	14
Figura 2.1: Rede Manhattan Street de 36 nós.	19
Figura 2.2: Porcentagem de nós do tipo “tanto faz” em uma rede MS em relação ao número total de nós $N$ [20].	22
Figura 2.3: Distribuição de nós do tipo “tanto faz” em uma rede MS de 16 x 16 nós, considerando que o nó (8,7) é o nó de destino [8].	23
Figura 2.4: Rede MS com 9 nós.	25
Figura 2.5: Probabilidades do pacote de teste ir para a porta preferencial ou ser defletido para uma rede MS com 9 nós.	29
Figura 2.6: Número médio de <i>hops</i> vs. carga no enlace para uma rede MS com 9 nós.	32
Figura 2.7: Carga no enlace vs. carga oferecida para uma rede MS com 9 nós.	33
Figura 2.8: Carga no enlace vs. carga oferecida para uma rede MS com 9 nós.	34
Figura 3.1: Detalhes dos nós da rede.	40
Figura 3.2: Exemplo da rede simulada.	41
Figura 3.3: Comparação entre a vazão da simulação e da metodologia analítica vs. a carga oferecida, para uma rede MS com 9 nós.	42
Figura 3.4: Comparação entre o número médio de hops da simulação e da metodologia analítica vs. a carga oferecida, para uma rede MS com 9 nós.	43
Figura 3.5: Comparação entre a vazão da simulação e da metodologia analítica com restrição vs. a carga oferecida, para uma rede MS com 9 nós.	44
Figura 3.6: Comparação entre o número médio de hops da simulação e da metodologia analítica com restrição vs. a carga oferecida, para uma rede MS com 9 nós.	44
Figura 3.7: Vazão da rede em Gbps em função da carga oferecida.	48
Figura 3.8: Média do número de deflexões sofridas por cada pacote em função da carga oferecida.	49
Figura 3.9: Variância do número de deflexões sofridas por cada pacote em função da carga oferecida.	50
Figura 3.10: Média do número de hops percorridos por cada pacote em função da	

carga oferecida.	50
Figura 3.11: Variância do número de hops percorridos por cada pacote em função da carga oferecida.	51
Figura 3.12: Tempo médio de propagação em função da carga oferecida.	51
Figura 3.13: Variância do tempo de propagação em função da carga oferecida.	52
Figura 3.14: Tempo de acesso médio em função da carga oferecida.	52
Figura 3.15: Variância do tempo de acesso em função da carga oferecida.	53
Figura 3.16: Taxa de pacotes perdidos em função da carga oferecida	54
Figura 3.17: Detalhes dos nós da rede.	55
Figura 3.18: Vazão da rede em Gbps em função da carga oferecida.	56
Figura 3.19: Média do número de deflexões sofridas por cada pacote em função da carga oferecida.	56
Figura 3.20: Variância do número de deflexões sofridas por cada pacote em função da carga oferecida.	57
Figura 3.21: Média do número de <i>hops</i> percorridos por cada pacote em função da carga oferecida.	58
Figura 3.22: Variância do número de <i>hops</i> percorridos por cada pacote em função da carga oferecida.	58
Figura 3.23: Tempo médio de propagação em função da carga oferecida.	59
Figura 3.24: Variância do tempo de propagação em função da carga oferecida.	59
Figura 3.25: Tempo de acesso médio em função da carga oferecida.	60
Figura 3.26: Variância do tempo de acesso em função da carga oferecida.	60
Figura 3.27: Taxa de pacotes perdidos em função da carga oferecida.	61
Figura 3.28: Vazão da rede em Gbps em função da carga oferecida.	62
Figura 3.29: Média do número de deflexões sofridas por cada pacote em função da carga oferecida.	63
Figura 3.30: Variância do número de deflexões sofridas por cada pacote em função da carga oferecida.	63
Figura 3.31: Média do número de <i>hops</i> percorridos por cada pacote em função da carga oferecida.	64
Figura 3.32: Variância do número de <i>hops</i> percorridos por cada pacote em função da carga oferecida.	65
Figura 3.33: Tempo médio de propagação em função da carga oferecida.	65

Figura 3.34: Variância do tempo de propagação em função da carga oferecida.	66
Figura 3.35: Tempo de acesso médio em função da carga oferecida.	66
Figura 3.36: Variância do tempo de acesso em função da carga oferecida.	67
Figura 3.37: Taxa de pacotes perdidos em função da carga oferecida	68
Figura 3.38: Vazão da rede em Gbps em função da carga oferecida.	69
Figura 3.39: Média do número de deflexões sofridas por cada pacote em função da carga oferecida.	70
Figura 3.40: Variância do número de deflexões sofridas por cada pacote em função da carga oferecida.	71
Figura 3.41: Média do número de <i>hops</i> percorridos por cada pacote em função da carga oferecida.	72
Figura 3.42: Variância do número de <i>hops</i> percorridos por cada pacote em função da carga oferecida.	72
Figura 3.43: Tempo médio de propagação em função da carga oferecida.	73
Figura 3.44: Variância do tempo de propagação em função da carga oferecida.	73
Figura 3.45: Tempo de acesso médio em função da carga oferecida.	74
Figura 3.46: Variância do tempo de acesso em função da carga oferecida.	74
Figura 3.47: Taxa de pacotes perdidos em função da carga oferecida	75
Figura 3.48: Vazão máxima do TCP em função da distância e do tamanho da janela	76
Figura 4.1: Ganho na vazão da rede em função da carga oferecida quando <i>buffers</i> ópticos são utilizados com o protocolo UDP	79
Figura 4.2: Razão do número médio de <i>hops</i> com e sem <i>buffers</i> ópticos com o protocolo UDP em função da carga oferecida	80
Figura 4.3: Razão do tempo médio de propagação com e sem <i>buffers</i> ópticos com o protocolo UDP em função da carga oferecida	81
Figura 4.4: Ganho na vazão da rede em função da carga oferecida quando <i>buffers</i> ópticos são utilizados com o protocolo TCP	82
Figura 4.5: Razão do número médio de <i>hops</i> com e sem <i>buffers</i> ópticos com o protocolo TCP em função da carga oferecida	83
Figura 4.6: Razão do tempo médio de propagação com e sem <i>buffers</i> ópticos com o protocolo UDP em função da carga oferecida	84
Figura 4.7: Ganho na vazão da rede em função da carga oferecida quando o	

protocolo UDP é utilizado ao invés do TCP

85

Figura 4.8: Ganho na vazão da rede em função da carga oferecida quando o protocolo UDP é utilizado ao invés do TCP

86