

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

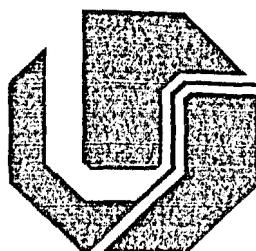
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SISBI/UFU



1000211453



M011
691.2
B739.2
485/ME2

**UM ESTUDO SOBRE OS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO
ECN NO DESEMPENHO DAS REDES DIFFSERV**

ELIANE AURELIANA DE SOUSA BORGES

ABRIL

2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UM ESTUDO SOBRE OS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO
ECN NO DESEMPENHO DAS REDES DIFFSERV

ELIANE AURELIANA DE SOUSA BORGES

ABRIL

2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UM ESTUDO SOBRE OS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO ECN NO
DESEMPENHO DAS REDES DIFFSERV

Dissertação apresentada por Eliane Aureliana de Sousa
Borges à Universidade Federal de Uberlândia para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Elétrica aprovada em
07 / 04 / 2003 pela Banca Examinadora:

Professor Paulo Roberto Guardieiro, Dr. (orientador)

Professor Ivanil Sebastião Bonatti, Dr. (UNICAMP)

Professor Luís Fernando Faina, Dr. (UFU)

**UM ESTUDO SOBRE OS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO ECN NO DESEMPENHO
DAS REDES DIFFSERV**

ELIANE AURELIANA DE SOUSA BORGES

Dissertação apresentada por Eliane Aureliana de Sousa Borges à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Paulo Roberto Guardieiro, Dr.

Orientador

Prof. Alcimar Barbosa Soares, Ph.D.

Coordenador do Curso de Pós Graduação

À Minha Família

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Guardieiro por compartilhar comigo seus valiosos conhecimentos, validando cada passo da elaboração desta dissertação bem como outros artigos.

À Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pelos recursos oferecidos para a execução deste trabalho.

Ao meu grande amigo Alexandre que me incentivou a dar início a este trabalho.

Ao meu amigo e chefe Mário Lúcio, por seu apoio e incentivo durante a execução deste trabalho.

Ao meu marido Eduardo, pelo apoio, pelo amor e por compreender os momentos de ausência.

À minha Mãe Zuleme, meu Pai Mário (*in memoriam*), e meus Irmãos, Vanêssa e Marco Aurélio, juntamente com toda a minha família e todos os meus amigos, por compartilharem comigo esta conquista.

Aos meus colegas e amigos do laboratório de redes de computadores, Clidenor, Daniela, Johann, Leandra, Ruy, e Zattar, que muito contribuíram para o sucesso deste trabalho. Obrigada a todos vocês por terem me apoiado sempre que foi necessário.

E acima de tudo, agradeço a DEUS, que é o princípio de toda vitória.

RESUMO

Um Estudo Sobre os Efeitos da Utilização do ECN no Desempenho das Redes DiffServ

Nesta dissertação é apresentado um estudo que avalia o desempenho de um ambiente de rede IP que integre a arquitetura de Serviços Diferenciados (DiffServ) e o mecanismo de Notificação Explícita de Congestionamento (ECN). Estas tecnologias representam dois elementos chave na obtenção de Qualidade de Serviço (QoS), são eles: a diferenciação de serviços e o gerenciamento de tráfego. Foram realizadas simulações que contemplam tanto o modelo que implementa ECN quanto o modelo atualmente utilizado. A análise dos resultados obtidos permitiu a elaboração de um estudo comparativo de desempenho entre estes dois modelos. Foram avaliados a eficiência do enlace, a justiça no compartilhamento de largura de banda e as taxas de descarte, *timeout* e retransmissão de pacotes. Também foram abordadas questões como: quantidade de fluxos ativos, dimensionamento da rede, interação com fontes não cooperantes, fluxos com RTTs distintos, tamanhos de pacote variados, agregação de fluxos, fontes com diferentes larguras de banda contratadas e interação com algoritmos de controle de congestionamento diversos. Os resultados obtidos indicaram que o uso do ECN otimiza o desempenho do DiffServ nos mais variados cenários. Em especial, quando a rede é corretamente dimensionada, o uso do ECN, além de prover ganhos de desempenho, otimiza o compartilhamento de largura de banda e ameniza os efeitos da maioria dos fatores que influenciam o nível de serviço oferecido à fontes com características distintas. Este comportamento é ainda mais evidenciado quando o total de reserva de largura de banda se aproxima da capacidade total de transmissão, mas se inverte quando a rede está mal dimensionada. Isto demonstra que, para se usufruir dos benefícios do uso combinado da arquitetura DiffServ e do mecanismo ECN, é necessário prevenir que a largura de banda contratada seja maior que a capacidade de transmissão.

Palavras-chave – Internet, DiffServ, ECN, QoS, Gerenciamento de Tráfego.

ABSTRACT

Study of ECN Effects in the Service Level of DiffServ Networks

This dissertation presents a study that evaluates the performance of an architecture that aggregates the Differentiated Service (DiffServ) model and the Explicit Congestion Notification (ECN) mechanism. These technologies represent two key elements for Quality of Service (QoS), which are: service differentiation and traffic management. A series of simulations were implemented, not only for the proposed model, but also for the traditional one, and the obtained results were compared in order to identify the solution that offers better performance and QoS. The parameters analyzed were link efficiency, fairness of bandwidth sharing and packet discard, timeout and retransmission rates. Issues that affect the service level have also been assessed, like: number of active flows, link congestion level, interaction with non responsive sources, flows with distinct RTTs, variation in packet size, number of flows in an aggregate, size of target rate and interaction with varied congestion control algorithms. The simulations results indicate that the use of ECN optimizes DiffServ performance for a great variety of scenarios. In particular, when the network is correctly dimensioned, the use of ECN, not only provides performance benefits, but also optimizes bandwidth sharing and minimizes the effects of most factors that affect the service level provided to sources with distinct characteristics. This behavior is even more evident when the total reserved bandwidth approaches the total link capacity, but it is reversed when the network is underprovisioned. This demonstrates that, to make full usage of the benefits of the DiffServ and ECN combination, it is essential to avoid that the total contracted bandwidth be superior to the link capacity.

Keywords – Internet, DiffServ, ECN, QoS, Traffic Management.

UM ESTUDO SOBRE OS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO ECN NO DESEMPENHO DAS REDES DIFFSERV

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABELAS	XXI
ABREVIATURAS	XXIII
1. INTRODUÇÃO	1
2. QUALIDADE DE SERVIÇO EM REDES IP	6
2.1. Introdução	6
2.2. Parâmetros de QoS	6
2.2.1. Atraso de Transferência	7
2.2.2. Variação do Atraso (<i>Jitter</i>).....	7
2.2.3. Vazão (<i>Throughput</i>).....	7
2.2.4. Perdas.....	7
2.3. Características das Aplicações	8
2.4. Mecanismos de Implementação	8
2.4.1. Controle de Admissão.....	9
2.4.2. Classificação e Marcação de Pacotes.....	9
2.4.3. Protocolos de Sinalização	9
2.4.4. Mecanismos de Controle de Filas.....	10

2.4.5. Mecanismos de Prevenção de Congestionamento.....	10
2.4.6. Condicionamento do Tráfego.....	10
2.5. Tecnologias de Transmissão	11
2.5.1. IEEE 802.1p, 802.1Q e 802.1D.....	11
2.5.2. <i>Frame Relay</i>	11
2.5.3. Modo de Transferência Assíncrono (ATM).....	12
2.6. Abordagens de QoS na Internet	12
2.6.1. IntServ/RSVP	12
2.6.1.1. Componentes do Modelo IntServ.....	13
2.6.1.2. Protocolo de Sinalização RSVP	13
2.6.1.3. Classes de Serviço	15
2.6.1.4. Benefícios e Limitações.....	15
2.6.2. DiffServ.....	16
2.6.3. MPLS	17
2.6.3.1. FECs	17
2.6.3.2. Rótulos de Identificação	18
2.6.3.3. LERs / LSRs.....	18
2.6.3.4. LSPs.....	18
2.6.3.5. LDP.....	19
2.6.3.6. Encaminhamento Baseado em Rótulos	19
2.6.3.7. Benefícios.....	20
2.6.4. Engenharia de Tráfego e Roteamento Baseado em Restrições	21
2.6.4.1. Engenharia de Tráfego.....	21
2.6.4.2. Roteamento Baseado em Restrições.....	22

2.6.4.3. Benefícios e Limitações.....	23
2.6.5. Integração entre as Abordagens.....	23
2.7. Conclusões.....	25
3. O MODELO DIFFSERV	27
3.1. Introdução	27
3.2. O Campo DS.....	27
3.3. Domínio de Serviços Diferenciados (Domínio DS).....	28
3.3.1. Roteadores de Borda.....	29
3.3.2. Roteadores de Núcleo	29
3.4. Categorias de Serviço.....	30
3.4.1. Serviço <i>Best Effort</i> (BE)	30
3.4.2. Serviço <i>Expedited Forwarding</i> (EF).....	30
3.4.3. Serviço <i>Assured Forwarding</i> (AF).....	31
3.5. Contratos de Serviço.....	32
3.5.1. <i>Service Level Agreement</i> (SLA)	32
3.5.2. <i>Traffic Conditioning Agreement</i> (TCA).....	33
3.6. Condicionador de Tráfego	33
3.6.1. Classificador.....	34
3.6.2. Medidor.....	34
3.6.3. Marcador	34
3.6.4. Modelador	35
3.6.5. Descartador.....	35
3.7. Provisionamento de Recursos.....	35

3.8. O Algoritmo RIO	37
3.9. Conclusões	40
4. A ARQUITETURA TCP/IP E O MECANISMO ECN	42
4.1. Introdução	42
4.2. O Protocolo IP	43
4.3. O Protocolo TCP	43
4.3.1. Detecção e Recuperação de Erros	43
4.3.2. Mecanismos de Controle de Congestionamento	44
4.3.2.1. Mecanismos <i>Slow Start</i> e <i>Congestion Avoidance</i>	44
4.3.2.2. Mecanismos <i>Fast Retransmit</i> e <i>Fast Recovery</i>	45
4.3.2.3. Mecanismos <i>Fast Retransmit</i> e <i>Fast Recovery</i> Modificados.....	46
4.3.2.4. Mecanismo <i>Selective Acknowledgement</i>	47
4.4. Notificação Explícita de Congestionamento (ECN)	48
4.4.1. Implementação ECN no protocolo IP	48
4.4.2. Implementação ECN no protocolo TCP	49
4.5. Conclusões	50
5. AVALIAÇÃO DO MECANISMO ECN EM UMA REDE DIFFSERV	52
5.1. Introdução	52
5.2. Topologia da Rede e Parâmetros de Simulação	53
5.3. Métricas	55
5.4. Avaliação de Desempenho e Análise Comparativa	58
5.4.1. Rede Bem Dimensionada	58
5.4.2. Rede Mal Dimensionada	63

5.4.3. Influência do Dimensionamento da Rede	70
5.4.4. Influência do Número de Fluxos Ativos	73
5.5. Conclusões	77
6. INFLUÊNCIA DO ECN NOS EFEITOS DE FATORES QUE AFETAM O NÍVEL DE SERVIÇO EM REDES DIFFSERV	79
6.1. Introdução	79
6.2. Topologia da Rede e Parâmetros de Simulação	80
6.3. Métricas	82
6.4. Interação com Fontes não Cooperantes	82
6.4.1. Rede Bem Dimensionada	83
6.4.2. Rede Mal Dimensionada	86
6.4.3. Influência do Número de Fluxos Ativos	89
6.4.4. Influência do Dimensionamento da Rede	90
6.5. Favorecimento de Fontes submetidas a um menor RTT	91
6.5.1. Rede Bem Dimensionada	92
6.5.2. Rede Mal Dimensionada	94
6.5.3. Variação da Diferença de RTT	96
6.5.4. Influência do Dimensionamento da Rede	99
6.6. Influência do Tamanho do Pacote	100
6.6.1. Rede Bem Dimensionada	101
6.6.2. Rede Mal Dimensionada	103
6.6.3. Variação da Diferença no Tamanho do Pacote	105
6.6.4. Influência do Dimensionamento da Rede	108

6.7. Impacto da Agregação de Fluxos.....	109
6.7.1. Rede Bem Dimensionada.....	110
6.7.2. Rede Mal Dimensionada.....	113
6.7.3. Variação da Diferença no Número de Microfluxos Ativos	115
6.7.4. Influência do Dimensionamento da Rede	118
6.8. Influência da Vazão Contratada.....	119
6.8.1. Rede Bem Dimensionada.....	120
6.8.2. Rede Mal Dimensionada.....	123
6.8.3. Variação da Diferença de Vazão Contratada	125
6.8.4. Influência do Dimensionamento da Rede	127
6.9. Interação com Outros Algoritmos de Controle de Congestionamento.....	129
6.9.1. Rede Bem Dimensionada.....	130
6.9.2. Rede Mal Dimensionada.....	133
6.9.3. Influência do Dimensionamento da Rede	135
6.9.4. Interação entre todos os Algoritmos de Controle de Congestionamento.....	137
6.10. Conclusões	140
7. CONCLUSÕES GERAIS.....	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sinalização RSVP em uma rede IntServ.	14
Figura 2.2 – Modelo de Implementação da Arquitetura de Serviços Diferenciados.	17
Figura 2.3 – Roteamento MPLS.	20
Figura 2.4 – Engenharia de Tráfego.	22
Figura 2.5 – Integração entre as diferentes tecnologias de QoS.	25
Figura 3.1 – O Campo DS e o byte TOS do protocolo IPV4.	28
Figura 3.2 – Arquitetura do modelo de Serviços Diferenciados.	29
Figura 3.3 – Integração entre Domínios DS através de SLAs.	32
Figura 3.4 – Modelo Conceitual do Condicionador de Tráfego.	34
Figura 3.5 – Provisionamento de recursos intermediado por BBs.	36
Figura 3.6 – Representação Gráfica do Algoritmo RIO.	39
Figura 4.1 – O Campo ECN e os bits ECT e CE do protocolo IPV4.	49
Figura 4.2 – <i>Flags</i> ECN do protocolo TCP.	50
Figura 5.1 – Modelo de Simulação.	54
Figura 5.2 – Influência do ECN na Eficiência do Enlace de uma Rede Bem Dimensionada. .	60
Figura 5.3 – Taxas de Descarte de Pacotes.	62
Figura 5.4 – Taxas de <i>Timeout</i>	62
Figura 5.5 – Taxas de Retransmissão das Simulações.	63
Figura 5.6 – Influência do ECN na Eficiência do Enlace de uma Rede Mal Dimensionada. .	66
Figura 5.7 – Taxas de Descarte de Pacotes.	68
Figura 5.8 – Taxas de <i>Timeout</i>	69

Figura 5.9 – Taxas de Retransmissão.....	69
Figura 5.10 – Influência do Percentual de Reserva do Enlace na Eficiência.....	70
Figura 5.11 – Influência do Percentual de Reserva do Enlace na Justiça do Compartilhamento de Largura de Banda.....	71
Figura 5.12 – Influência do Percentual de Reserva do Enlace nas Taxas de Descarte de Pacotes das Simulações.....	72
Figura 5.13 – Influência do Percentual de Reserva do Enlace nas Taxas de Retransmissão e <i>Timeout</i> de Pacotes.....	73
Figura 5.14 – Influência do Número de Fontes Ativas nos ganhos de Eficiência do Enlace obtidos com uso do ECN para dois cenários de condições de dimensionamento.....	74
Figura 5.15 – Influência do Número de Fontes Ativas na Justiça do Compartilhamento de Largura de Banda obtida com e sem o uso do ECN para dois cenários de dimensionamento.....	74
Figura 5.16 – Influência do Número de Fontes Ativas nas Taxas de Descarte de Pacotes em uma Rede Bem Dimensionada.....	75
Figura 5.17 – Influência do Número de Fontes Ativas nas Taxas de Descarte de Pacotes em uma Rede Mal Dimensionada.....	76
Figura 5.18 – Influência do Número de Fontes Ativas nas Taxas de <i>Timeout</i> para dois cenários de condições de dimensionamento.....	76
Figura 5.19 – Influência do Número de Fontes Ativas nas Taxas de Retransmissão de Pacotes para dois cenários de condições de dimensionamento.....	77
Figura 6.1 – Modelo de Simulação.....	82
Figura 6.2 – Vazão Total Alcançada por Fontes TCP & UDP em uma Rede Bem Dimensionada.....	85

Figura 6.3 – Vazão Total Alcançada por Fontes TCP & UDP em uma Rede Mal Dimensionada.....	88
Figura 6.4 – Influência do Número de Fluxos Ativos na Justiça do Compartilhamento de Banda entre as Fontes em uma Rede Bem Dimensionada.....	89
Figura 6.5 – Influência do Número de Fluxos Ativos na Justiça do Compartilhamento de Banda entre as Fontes em uma Rede Mal Dimensionada.....	90
Figura 6.6 – Influência do Percentual de Reserva Total do Enlace na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Fontes TCP & UDP.	91
Figura 6.7 – Comparativo da Vazão Total alcançada por Fontes com RTT distintos em uma Rede Bem Dimensionada.....	94
Figura 6.8 – Impacto da utilização do ECN na Vazão Total alcançada por Fontes com RTT distintos em uma Rede Mal Dimensionada.....	96
Figura 6.9 – Influência da Diferença de RTT na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Bem Dimensionada.....	97
Figura 6.10 – Influência da Diferença de RTT na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Mal Dimensionada.....	98
Figura 6.11 – Influência da Diferença de RTT na Justiça do Compartilhamento de Largura de Banda.	99
Figura 6.12 – Influência do Percentual de Reserva Total do Enlace na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Fontes com RTTs distintos.....	100
Figura 6.13 – Comparativo da Vazão Total alcançada por Fontes com Tamanhos de Pacote Distintos em uma Rede Bem Dimensionada.....	103
Figura 6.14 – Comparativo da Vazão Total alcançada por Fontes com Tamanhos de Pacote Distintos em uma Rede Mal Dimensionada.....	105

Figura 6.15 – Influência da Diferença no Tamanho do Pacote na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Bem Dimensionada.	106
Figura 6.16 – Influência da Diferença no Tamanho do Pacote na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Mal Dimensionada.	107
Figura 6.17 – Influência da Diferença no Tamanho do Pacote na Justiça do Compartilhamento de Largura de Banda.	108
Figura 6.18 – Influência do Percentual de Reserva Total do Enlace na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Fontes com Tamanhos de Pacote Distintos.	109
Figura 6.19 – Comparativo da Vazão Total alcançada por Fontes com Número de Microfluxos Distintos em uma Rede Bem Dimensionada.	112
Figura 6.20 – Comparativo da Vazão Total alcançada por Fontes com Número de Microfluxos Distintos em uma Rede Mal Dimensionada.	115
Figura 6.21 – Influência da Diferença no Número de Microfluxos na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Bem Dimensionada.	116
Figura 6.22 – Influência da Diferença no Número de Microfluxos na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Mal Dimensionada.	117
Figura 6.23 – Influência da Diferença no Número de Microfluxos na Justiça do Compartilhamento de Largura de Banda.	118
Figura 6.24 – Influência do Percentual de Reserva Total do Enlace na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Conexões com diferentes quantidades de Microfluxos Ativos.	119

Figura 6.25 – Diferença da Vazão Alcançada em relação à Parcela de Largura de Banda Contratada por Grupos de Fontes com SLAs Distintos em uma Rede Bem Dimensionada.	122
Figura 6.26 – Diferença da Vazão Alcançada em relação à Parcela de Largura de Banda Contratada por Grupos de Fontes com SLAs Distintos em uma Rede Mal Dimensionada.	125
Figura 6.27 – Influência da Parcela de Largura de Banda Contratada no Nível de Serviço Obtido por Fontes com SLAs distintos.....	126
Figura 6.28 – Influência da Diferença de Vazão Contratada na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Fontes com SLAs distintos.....	127
Figura 6.29 – Influência da Situação de Dimensionamento da Rede no Nível de Serviço Obtido por Fontes com SLAs distintos.....	128
Figura 6.30 – Influência da Situação de Dimensionamento da Rede na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Fontes com SLAs distintos.....	129
Figura 6.31 – Comparativo de desempenho em um ambiente de interação entre Fontes ECN e Fontes que implementam algoritmos de controle de congestionamento Reno, <i>New Reno</i> , Sack e Vegas em uma Rede Bem Dimensionada.....	132
Figura 6.32 – Comparativo de desempenho em um ambiente de interação entre Fontes ECN e Fontes que implementam algoritmos de controle de congestionamento Reno, <i>New Reno</i> , Sack e Vegas em uma Rede Mal Dimensionada.....	134
Figura 6.33 – Influência da Situação de Dimensionamento da Rede no Índice de Justiça no compartilhamento de Largura de Banda entre Fontes ECN e Fontes que implementam os algoritmos de controle Reno, <i>New Reno</i> , Sack e Vegas.....	136

Figura 6.34 – Vazão alcançada pelas fontes Reno, *New Reno*, Sack e Vegas, em um ambiente de interação com Fontes ECN para diferentes situações de Dimensionamento da Rede. 137

Figura 6.35 – Desempenho das Conexões em um cenário de integração simultânea entre fontes ECN, Reno, *New Reno*, Sack e Vegas para duas situações opostas de Dimensionamento da Rede. 139

Figura 6.36 – Vazão alcançada pelas fontes Reno, Reno ECN, *New Reno*, Sack e Vegas, em um ambiente de interação entre todos os algoritmos para diferentes situações de Dimensionamento da Rede. 140

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – REQUISITOS DE QOS TÍPICOS PARA APLICAÇÕES EM REDE.....	8
TABELA 3.1 – CODIFICAÇÃO DO AF PHB.....	31
TABELA 5.1 – NÍVEL DE SERVIÇO EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.....	59
TABELA 5.2 – TAXAS DE PERDAS EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.....	61
TABELA 5.3 – NÍVEL DE SERVIÇO EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.....	65
TABELA 5.4 – TAXAS DE PERDAS EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.....	67
TABELA 6.1 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES TCP & UDP EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.....	84
TABELA 6.2 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES TCP & UDP EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.....	87
TABELA 6.3 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES COM RTTs DISTINTOS EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.....	93
TABELA 6.4 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES COM RTTs DISTINTOS EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.....	95
TABELA 6.5 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES QUE UTILIZAM DIFERENTES TAMANHOS DE PACOTE EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.....	102
TABELA 6.6 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES QUE UTILIZAM DIFERENTES TAMANHOS DE PACOTE EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.....	104
TABELA 6.7 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR CONEXÕES COM DIFERENTES QUANTIDADES DE MICROFLUXOS ATIVOS EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.....	111

TABELA 6.8 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR CONEXÕES COM DIFERENTES QUANTIDADES DE MICROFLUXOS ATIVOS EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.	114
TABELA 6.9 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR CONEXÕES QUE POSSUEM PARCELAS DE RESERVA DE LARGURA DE BANDA DISTINTAS EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.	121
TABELA 6.10 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR CONEXÕES QUE POSSUEM PARCELAS DE RESERVA DE LARGURA DE BANDA DISTINTAS EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.....	124
TABELA 6.11 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES QUE IMPLEMENTAM DIFERENTES ALGORITMOS DE CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO QUANDO INTERAGINDO COM FONTES ECN EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.....	131
TABELA 6.12 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES QUE IMPLEMENTAM DIFERENTES ALGORITMOS DE CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO QUANDO INTERAGINDO COM FONTES ECN EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.	133
TABELA 6.13 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES QUE IMPLEMENTAM DIFERENTES ALGORITMOS DE CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO QUANDO INTERAGINDO SIMULTANEAMENTE ENTRE SI E COM FONTES ECN.....	138

ABREVIATURAS

ACK	<i>Acknowledge</i>
AF	<i>Assured Forwarding</i>
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BA	<i>Behavior Aggregate</i>
BB	<i>Bandwidth Broker</i>
BE	<i>Best Effort</i>
BGP	<i>Border Gateway Protocol</i>
CIR	<i>Committed Information Rate</i>
CLS	<i>Controlled Load Service</i>
CU	<i>Currently Unused</i>
CWND	<i>Congestion Window</i>
DiffServ	<i>Differentiated Services</i>
DS	<i>Differentiated Services</i>
DSCP	<i>Differentiated Services Codepoint</i>
ECN	<i>Explicit Congestion Notification</i>
EF	<i>Expedited Forwarding</i>
FEC	<i>Forward Equivalence Class</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
GS	<i>Guaranteed Service</i>
IESG	<i>Internet Engineering Steering Group</i>

IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IntServ	<i>Integrated Services</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LBC	<i>Largura de Banda Contratada</i>
LDP	<i>Label Distribution Protocol</i>
LER	<i>Label Edge Routers</i>
LSP	<i>Label Switched Path</i>
LSR	<i>Label Switched Router</i>
MPLS	<i>Multiprotocol Label Switching</i>
NS	<i>Network Simulator</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
OSPF	<i>Open Shortest Path First</i>
PHB	<i>Per Hop Behavior</i>
PQ	<i>Priority Queueing</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RED	<i>Random Early Detection</i>
RIO	<i>RED with IN and OUT</i>
RR	<i>Round Robin</i>
RSVP	<i>Resource Reservation Protocol</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
SACK	<i>Selective Acknowledgement</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SSTHRESH	<i>Slow Start Threshold</i>

TCA	<i>Traffic Conditioning Agreement</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TOS	<i>Type of Service</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VLL	<i>Virtual Leased Line</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WFQ	<i>Weighted Fair Queue</i>
WRED	<i>Weighted RED</i>
WWW	<i>World Wide Web</i>

UM ESTUDO SOBRE OS EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DO ECN NO DESEMPENHO DAS REDES DIFFSERV

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O advento da Internet fez da arquitetura TCP/IP, a mais utilizada no mundo das redes de computadores. Entretanto, até o momento, apenas o serviço do tipo melhor esforço (BE – *Best Effort*), é oferecido por esta arquitetura. Com o crescimento vertiginoso da quantidade de novas aplicações — tais como voz, vídeo, ensino à distância e comércio eletrônico — e o aumento do volume de tráfego, surge a demanda por mecanismos que propiciem Qualidade de Serviço (QoS – *Quality of Service*) em um ambiente TCP/IP, tornando necessária a disponibilização de novas soluções. Dentre as propostas apresentadas, a arquitetura de Serviços Diferenciados (DiffServ – *Differentiated Services*) tem se destacado por sua escalabilidade e simplicidade de implementação.

O mecanismo de QoS denominado DiffServ, suporta diversos tipos de aplicação através da implementação de diferentes garantias de serviço. Um Acordo de Nível de Serviço (SLA – *Service Level Agreement*) deve ser estabelecido entre a fonte de tráfego e a rede ou entre domínios DiffServ adjacentes. Com base neste SLA, os pacotes IP são marcados de forma diferenciada, criando assim classes de serviço que serão tratadas pela rede de forma distinta.

Quando o SLA não é seguido, os pacotes que excedem a taxa estipulada são marcados como não em conformidade e terão maior probabilidade de descarte na ocorrência de congestionamento. O descarte de pacotes dispara o mecanismo de controle de congestionamento do TCP fazendo com que as fontes reduzam a carga de dados. Como os pacotes não em conformidade são descartados em primeiro lugar, as fontes TCP que estiverem excedendo os limites acordados também irão reduzir a carga em primeiro lugar, se adaptando assim ao SLA negociado.

Neste mecanismo, um elemento chave à obtenção de QoS é o gerenciamento de tráfego. Entretanto, os algoritmos de controle de congestionamento que fazem este gerenciamento no TCP são pouco eficientes pois se baseiam na perda de pacotes para identificar a carga de tráfego suportada pela rede. As fontes de dados iniciam a transmissão de forma agressiva, aumentando a taxa de envio exponencialmente até que ocorra descarte em função de sobrecarga das filas. Em resposta a este descarte, as fontes TCP reduzem sua taxa de transmissão e assumem um comportamento menos agressivo que aumenta gradualmente sua taxa de envio até identificar a perda de outro pacote. Embora até o momento, esta estratégia tenha funcionado de forma satisfatória, é sabido que o descarte de pacotes reduz o desempenho da rede, além de aumentar o tráfego e o retardo de transferência, tornando este mecanismo inadequado para aplicações interativas [11]. Além disto, o aumento das distância e da capacidade dos enlaces, torna o descarte de pacotes ineficiente, desperdiçando um grande volume de largura de banda em função do tempo necessário para a detecção e resposta aos descartes.

Uma vez que mecanismos de QoS como o DiffServ tenham sido disseminados, surgirá a demanda por técnicas que otimizem o gerenciamento de tráfego. A técnica de Notificação Explícita de Congestionamento (ECN – *Explicit Congestion Notification*) – aprovada pelo IESG (*Internet Engineering Steering Group*) como *proposed standard* [52] – é uma tecnologia promissora. Este mecanismo tem por objetivo otimizar o gerenciamento de tráfego do TCP desvinculando seu funcionamento do descarte de pacotes. Assim sendo, esta estratégia pode ser utilizada para melhorar a eficiência do DiffServ, proporcionando assim níveis de QoS que melhor atendam aos requisitos das aplicações interativas.

O ECN utiliza informações de realimentação, inseridas no cabeçalho do pacote, para informar às fontes de dados a iminência de congestionamento. Estas informações são inseridas pelos roteadores, através de mecanismos de controle ativo de congestionamento, como por exemplo os algoritmos RED (*Random Early Detection*) [9] e RIO (*RED with IN and OUT*) [53][54], que detectam a sobrecarga do roteador antes que a fila atinja sua capacidade máxima. Quando um pacote marcado é recebido, a fonte de tráfego reduz sua taxa de transmissão, de forma análoga ao comportamento apresentado na ocorrência de descartes.

Neste trabalho é realizado um estudo para avaliar o desempenho final de um ambiente que combine a tecnologia DiffServ e o mecanismo ECN. A análise de resultados obtidos através de simulações permite mensurar a eficiência desta combinação. São avaliadas a eficiência na utilização dos recursos, a justiça no compartilhamento de largura de banda e as taxas de descarte, *timeout* e retransmissão de pacotes. Além disto, também são abordadas questões como: a quantidade de fluxos ativos, o dimensionamento da rede, a interação com fontes não cooperantes, o comportamento de fluxos com RTT distintos, a influência do tamanho do

pacote, o efeito da agregação de fluxos, o impacto de diferentes larguras de banda contratadas e a interação com algoritmos de controle de congestionamento diversos. Tanto situações de subdimensionamento da rede quanto de excesso de disponibilidade de recursos são avaliadas. Desta forma, este trabalho espera estar contribuindo na análise e determinação da eficiência de uma arquitetura que integre dois elementos importantes à obtenção de QoS, a diferenciação de serviços e o gerenciamento do tráfego.

A organização desta dissertação foi realizada conforme descrito a seguir:

O Capítulo 2 define os conceitos fundamentais de QoS em redes IP, e apresenta os aspectos gerais de funcionamento das principais propostas de Qualidade de Serviço na Internet, a saber: Serviços Integrados e Reserva de Recursos (*Integrated Services / Resource Reservation Protocol – IntServ / RSVP*) [15] [16], Serviços Diferenciados [17], Encaminhamento Baseado em Rótulos (MPLS – *Multiprotocol Label Switching*) [18], Engenharia de Tráfego [19] e Roteamento Baseado em Restrições [20].

O modelo de implementação da arquitetura DiffServ, seus componentes e mecanismos de implementação são detalhados no Capítulo 3.

O Capítulo 4 descreve as características principais da arquitetura TCP/IP, os algoritmos de controle de congestionamento do TCP e o mecanismo ECN.

No Capítulo 5 é apresentado um estudo comparativo, baseado em simulações, entre o modelo que implementa ECN e o modelo atualmente utilizado. São avaliados a eficiência do enlace, a

justiça no compartilhamento da largura de banda e as taxas de descarte, *timeout* e retransmissão de pacotes. Os cenários de simulação retratam situações distintas de dimensionamento da rede, possibilitando a avaliação de situações tanto de excesso de disponibilidade de recursos quanto de subdimensionamento da rede.

O objetivo do Capítulo 6 é investigar os efeitos da utilização do ECN, no comportamento da rede DiffServ, mediante fatores que influenciam o nível de serviço oferecido. Os fatores investigados são: a interação com fontes não cooperantes, o comportamento de fluxos com RTT distintos, a influência do tamanho do pacote, o efeito da agregação de fluxos, o impacto de diferentes larguras de banda contratadas e a interação com algoritmos de controle de congestionamento diversos.

Finalmente, no Capítulo 7 apresenta-se as conclusões gerais e algumas sugestões para a continuidade deste trabalho.

CAPÍTULO 2

QUALIDADE DE SERVIÇO EM REDES IP

2.1. Introdução

Em redes de computadores, a QoS se refere à habilidade da rede em prover o serviço adequado a cada tipo de tráfego [1]. Para que este objetivo seja alcançado é necessária a cooperação entre as diversas camadas de rede, bem como de todos os seus elementos fim a fim [2]. A QoS pode ser obtida através de técnicas que permitam o tratamento diferenciado dos diversos fluxos de dados e gerenciem os efeitos dos congestionamentos no desempenho das aplicações. Estas técnicas otimizam o uso dos recursos, sem que seja necessária a ampliação da capacidade de tráfego da rede [3].

2.2. Parâmetros de QoS

As diversas aplicações existentes possuem características distintas, o que torna o conceito de QoS subjetivo e dependente destas características. Os parâmetros de QoS definem os requisitos de cada aplicação e quantificam o desempenho da rede. Por serem dependentes das características da rede, estes parâmetros podem ser afetados por variações da performance da mesma. São fontes de degradação da QoS: o atraso de transferência, as características de erro do meio físico, a capacidade dos *buffers*, a carga de dados à qual a rede é submetida, a quantidade de nós na rota, os recursos alocados para a conexão e as possíveis falhas de

equipamentos e/ou linhas de comunicação. A seguir apresentaremos os principais parâmetros de QoS geralmente utilizados [4].

2.2.1. Atraso de Transferência

O atraso de transferência é o intervalo necessário para que um pacote seja repassado de um transmissor até seu receptor. Ele é composto pela soma dos atrasos de acesso e de transmissão. Quanto maior o atraso, maiores serão os problemas causados ao bom funcionamento dos protocolos da camada de transporte, como por exemplo o TCP. Aplicações em tempo real como áudio e vídeo são extremamente sensíveis ao atraso apresentado pela rede e podem ter seu desempenho prejudicado em ambientes de alto atraso.

2.2.2. Variação do Atraso (*Jitter*)

O *Jitter* é a variação no atraso de transferência fim a fim em um mesmo fluxo de transmissão de dados. Esta variação causa ineficiência do protocolo TCP e degrada o desempenho de aplicações em tempo real.

2.2.3. Vazão (*Throughput*)

A vazão designa a taxa de transmissão alcançada pela aplicação. Esta taxa é limitada pelas características físicas dos enlaces e pela quantidade de fluxos que compartilham a rede.

2.2.4. Perdas

As perdas ocorrem devido aos descartes de pacotes, que podem ocorrer em função de congestionamentos da rede ou devido a erros do meio físico que corrompem os pacotes.

2.3. Características das Aplicações

Diferentes aplicações possuem características distintas, por exemplo, uma aplicação em tempo real demanda vazão mínima e o atraso de transferência também é um fator crucial. Já em uma aplicação de transferência de arquivos a demanda por confiabilidade é fundamental, não havendo tanta preocupação com o fator atraso. A Tabela 2.1 apresenta os requisitos necessários ao bom desempenho de algumas aplicações [5].

TABELA 2.1 – REQUISITOS DE QoS TÍPICOS PARA APLICAÇÕES EM REDE.

Aplicação	Vazão	Atraso	<i>Jitter</i>	Taxa de Erro
Áudio	192 a 1411 kbps	< 24 ms	< 100 ms	10^{-4}
Voz	4 a 64 kbps	100 a 500 ms	< 400 ms	10^{-2}
Vídeo MPEG	1 a 6 Mbps	100 a 500 ms	< 100 ms	10^{-5}
Videoconferência	112 kbps	100 a 500 ms	< 400ms	10^{-4}
WWW, FTP, Telnet	-	-	-	10^{-4}

Convém observar que, apesar de não apresentarem requisitos quanto à vazão, atraso e *jitter*, as aplicações do tipo WWW (*World Wide Web*), FTP (*File Transfer Protocol*) e Telnet, em geral, são utilizadas de forma interativa e, portanto, possuem requisitos de QoS subjetivos à demanda de tempo de resposta requerido pelo usuário.

2.4. Mecanismos de Implementação

Uma vez definido o conceito e identificados os parâmetros relacionados à QoS, serão apresentados alguns dos mecanismos utilizados em sua implementação. Estes mecanismos são responsáveis pelo controle, condicionamento e policiamento do tráfego que entra na rede,

garantindo assim a otimização do compartilhamento dos recursos da rede conforme os requisitos de QoS de cada conexão.

2.4.1. Controle de Admissão

O Controle de Admissão é o mecanismo responsável por aceitar ou não uma nova conexão. Para avaliar se uma dada conexão deve ou não ser aceita, este mecanismo avalia: a carga atual da rede, o padrão de comportamento do tráfego que estará sendo gerado pela aplicação e a QoS solicitada. Em redes IP com suporte a QoS, o controle de admissão poderia ser utilizado, por exemplo, na configuração de fluxos IntServ/RSVP [15] [16], caminhos MPLS [18] e configuração dinâmica de contratos de nível de serviço em redes DiffServ [17].

2.4.2. Classificação e Marcação de Pacotes

Para que possam obter diferenciação de tratamento pela rede os pacotes devem ser classificados e marcados de acordo com a classe de tráfego a qual pertencem. A classificação e marcação de pacotes permite que a rede identifique o tratamento específico de QoS que deve ser dado a cada pacote de acordo com a classe a qual ele pertence e os parâmetros definidos para esta classe. A classificação e marcação de pacotes é um mecanismo chave para a implementação de arquiteturas de diferenciação de serviços, como por exemplo o DiffServ [17].

2.4.3. Protocolos de Sinalização

Para obtenção de QoS, é necessário que as aplicações informem à rede as características de QoS requeridas e o padrão de comportamento do tráfego a ser gerado. Esta troca de

informações é executada através da utilização de protocolos de sinalização tais como o RSVP [16] e o LDP [8].

2.4.4. Mecanismos de Controle de Filas

Os algoritmos de controle de filas são mecanismos que permitem o gerenciamento do tráfego em instantes de sobrecarga da rede. Quando ocorre congestionamento, estes mecanismos classificam e armazenam os pacotes para, em seguida, encaminhá-los de acordo com regras de prioridade específicas. Os principais algoritmos existentes são [1] [2]: FIFO (*First In First Out*), RR (*Round Robin*), PQ (*Priority Queueing*) e WFQ (*Weighted Fair Queueing*).

2.4.5. Mecanismos de Prevenção de Congestionamento

As técnicas de prevenção de congestionamento monitoram a carga de tráfego na rede e procuram antecipar o congestionamento para implementar ações que evitem sua ocorrência. Quando a rede já se encontra congestionada, estes mecanismos são utilizados com o objetivo de restabelecer a rede à sua condição normal de operação. Algumas das principais técnicas utilizadas são: *Tail Drop* [1] [2], RED (*Random Early Detection*) [9], RIO (*RED with IN and OUT*) [53] [54], WRED (*Weighted Random Early Detection*) [1] [2] e ECN (*Explicit Congestion Notification*) [51] [52].

2.4.6. Condicionamento do Tráfego

O condicionamento do Tráfego altera as características de um fluxo de dados, moldando o tráfego de acordo com um comportamento pré-determinado, obtendo assim uma melhor eficiência da rede e ao mesmo tempo mantendo a QoS desejada. Os principais algoritmos utilizados são o *Leaky Bucket* e o *Token Bucket* ambos descritos em [12].

2.5. Tecnologias de Transmissão

Algumas das tecnologias de transmissão de dados utilizadas oferecem QoS de forma nativa, como por exemplo o ATM. Outras tecnologias, como por exemplo o Ethernet, não foram originariamente desenvolvidas para suportar recursos de QoS, mas foram adaptadas de forma a oferecer algum tipo de diferenciação [7]. A seguir faz-se uma breve apresentação destas tecnologias e dos recursos de QoS nelas implementados.

2.5.1. IEEE 802.1p, 802.1Q e 802.1D

Os padrões IEEE 802.1p e 802.1Q pertencentes ao padrão 802.1D definem como as redes locais podem classificar o tráfego de forma a oferecer tratamento diferenciado para aplicações críticas. O elemento chave desta arquitetura para o fornecimento de QoS é o padrão 802.1p que define a utilização de bits de prioridade para classificação do tráfego em até oito níveis distintos.

2.5.2. *Frame Relay*

O mecanismo de QoS oferecido pela tecnologia *Frame Relay* baseia-se no oferecimento de diferenciação na prioridade de descarte dos quadros. Esta diferenciação é obtida através da utilização do bit DE (*Discard Eligible*) do seu cabeçalho. A marcação deste bit é feita pelos comutadores *Frame Relay* de acordo com a informação contida no CIR (*Committed Information Rate*) de cada circuito virtual configurado. O CIR determina a taxa de dados que pode ser enviada. Caso o tráfego enviado ultrapasse o valor estipulado pelo CIR, os quadros excedentes são encaminhados com o bit DE ativado. Em situações de congestionamento os quadros marcados são descartados em primeiro lugar.

2.5.3. Modo de Transferência Assíncrono (ATM)

O Modo de Transferência Assíncrono ou ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) possui a QoS como uma característica nativa e portanto, é a tecnologia que oferece o maior leque de opções de implementação de diferenciação [13]. Apesar de oferecer recursos para QoS fim a fim, a complexidade e os custos de implementação têm limitado sua utilização principalmente a oferecer transporte de alta velocidade em redes *backbone*.

2.6. Abordagens de QoS na Internet

Até o momento, apenas o serviço do tipo BE, era oferecido na Internet. Com o crescimento do número de usuários e o surgimento de novas aplicações surge também a demanda por qualidade de serviço. O serviço BE não atende à esta demanda sendo portanto necessária a implementação de novos mecanismos. Várias propostas vêm sendo desenvolvidas pelo IETF (*Internet Engineering Task Force*) com este objetivo, dentre as quais podemos citar[14]: IntServ/RSVP [15] [16], DiffServ [17], MPLS [18], Engenharia de Tráfego [19] e Roteamento Baseado em Restrições [20]. A seguir serão apresentados os aspectos gerais de funcionamento das tecnologias citadas acima.

2.6.1. IntServ/RSVP

O modelo de Serviços Integrados, ou IntServ (*Integrated Services*), se propõe a oferecer garantias de qualidade de serviço através da implementação de mecanismos de controle de admissão e reserva de recursos. Sua premissa básica é estender as funcionalidades da arquitetura atual sem que para isto sejam necessárias grandes modificações. O RSVP é um protocolo de sinalização que permite que os sistemas finais realizem reserva de recursos na rede. Apesar de complementares, as tecnologias IntServ e RSVP são independentes [3].

2.6.1.1. Componentes do Modelo IntServ

A arquitetura IntServ é composta por quatro mecanismos [14]: um protocolo de sinalização (por exemplo o RSVP), o mecanismo de controle de admissão, um classificador e um mecanismo de controle de filas. O protocolo de sinalização é responsável por estabelecer o caminho a ser utilizado na comunicação e efetuar a reserva dos recursos necessários para a transmissão. O mecanismo de controle de admissão avalia a capacidade do roteador e os requisitos solicitados pela aplicação determinando assim se o roteador irá ou não aceitar um novo fluxo de dados. O classificador associa o tráfego gerado a uma das classes disponíveis para que este seja tratado de acordo com a QoS requerida. E o mecanismo de controle de filas proporciona diferenciação no encaminhamento dos pacotes pertencentes a classes distintas.

2.6.1.2. Protocolo de Sinalização RSVP

Na arquitetura IntServ as aplicações reservam os recursos antes de iniciar a transmissão dos dados. Em princípio, a reserva de recursos pode ser executada por qualquer protocolo que seja compatível com o modelo IntServ, mas na prática, o protocolo RSVP é o padrão utilizado, daí a referência à arquitetura como IntServ/RSVP [6]. Este protocolo é utilizado por sistemas finais para informar à rede o nível de QoS desejado pela aplicação e pelos roteadores para estabelecimento e manutenção de informações de estado que possibilitam manter o serviço requisitado [6]. O RSVP é o mais complexo dentre as tecnologias de implementação e, como consequência, proporciona o mais alto nível de qualidade [7].

O protocolo de sinalização RSVP é apresentado na Figura 2.1. Ele é iniciado pelo transmissor que envia ao receptor uma mensagem PATH especificando as características do tráfego a ser gerado. A mensagem PATH é encaminhada ao destino através dos roteadores de acordo com

a rota estabelecida pelo protocolo de roteamento (por exemplo BGP, OSPF ou RIP) utilizado. Quando o receptor recebe esta mensagem ele retorna uma mensagem RESV que irá percorrer o mesmo caminho traçado pela mensagem PATH fazendo a reserva de recursos para a transmissão. Cada roteador intermediário pode aceitar ou rejeitar a requisição de reserva feita pela mensagem RESV. Quando a requisição de reserva de recursos é rejeitada por um roteador, ele envia uma mensagem de erro ao receptor finalizando o processo de sinalização. Se a solicitação de reserva for aceita, o roteador efetua a reserva dos recursos necessários para atender os requisitos de QoS solicitados pela aplicação.

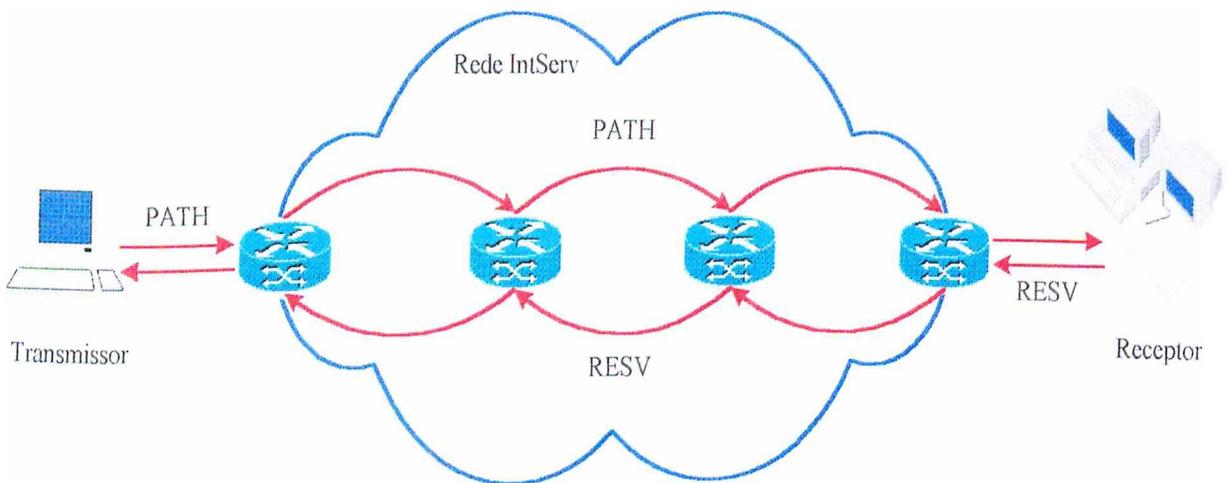


Figura 2.1 – Sinalização RSVP em uma rede IntServ.

No IntServ, as informações de estado de cada fluxo devem ser mantidas em todos os roteadores, em contraproposta ao modelo atual que se fundamenta no princípio de que informações de estados devem ser mantidas apenas nos sistemas finais [15] [16].

2.6.1.3. Classes de Serviço

Além do serviço BE, a arquitetura IntServ propõe a criação de dois novos serviços, são eles: o Serviço Garantido (GS – *Guaranteed Service*) [21] e o Serviço de Carga Controlada (CLS – *Controlled Load Service*) [22].

A classe de Serviços Garantidos foi desenvolvida para atender aos requisitos de aplicações em tempo real. Esta classe de serviço proporciona garantias quanto à perda de pacotes, largura de banda disponível, atraso e *jitter*. Já a classe de Serviços de Carga Controlada é adequada para aplicações críticas, que necessitem de garantias de transmissão mas que não possuam requisitos rígidos quanto ao atraso ou sua variação. Este serviço oferece desempenho semelhante ao observado quando utiliza-se o BE para a rede não congestionada.

2.6.1.4. Benefícios e Limitações

A arquitetura IntServ/RSVP é a que proporciona o mais alto nível de qualidade [7], mas sua principal limitação é a escalabilidade. A quantidade de informações de estado cresce proporcionalmente ao número de fluxos inviabilizando sua utilização em redes maiores que tratam simultaneamente um grande número de fluxos.

Além da grande quantidade de mensagens geradas para efetuar reserva de recursos, a sinalização RSVP utiliza um mecanismo denominado *soft state* que requer confirmação das informações de estado em intervalos determinados de tempo aumentando a complexidade do modelo.

A implementação desta arquitetura exige que mecanismos de controle de admissão, classificação e controle de filas sejam implementados em todos os roteadores. Estes

mecanismos demandam uma grande quantidade de memória e processamento dos roteadores o que acarreta aumento de custo destes equipamentos.

2.6.2. DiffServ

O modelo de Serviços Diferenciados ou DiffServ (*Differentiated Services*) se baseia em priorização do tráfego. Esta arquitetura não requer reserva de recursos, sinalização ou manutenção de informações de estado evitando assim os problemas de escalabilidade inerentes ao IntServ. Suas características básicas de funcionamento são: a diferenciação de tratamento do tráfego em função da classe de serviço à qual ele pertence; e a definição de níveis de prioridade de descarte entre pacotes pertencentes a uma mesma classe.

Um aspecto importante da arquitetura DiffServ é a necessidade de se definir um contrato de nível de serviço entre a fonte de tráfego e a rede. Neste contrato são definidas as classes de serviço suportadas e os respectivos volumes de tráfego permitidos. As regras estabelecidas por este contrato serão utilizadas pelos roteadores de borda na classificação, monitoramento e moldagem do tráfego gerado.

O funcionamento do modelo DiffServ é apresentado na Figura 2.2 [23]. Os roteadores de borda, localizados na fronteira de entrada da rede associam o tráfego que entra na rede a uma das classes de serviço existentes. Esta classificação simplifica a tarefa dos roteadores do núcleo pois permite que os pacotes pertencentes a diversos fluxos sejam tratados de forma agregada reduzindo o processamento e agilizando o encaminhamento. Maiores detalhes desta arquitetura serão apresentados no Capítulo 3.

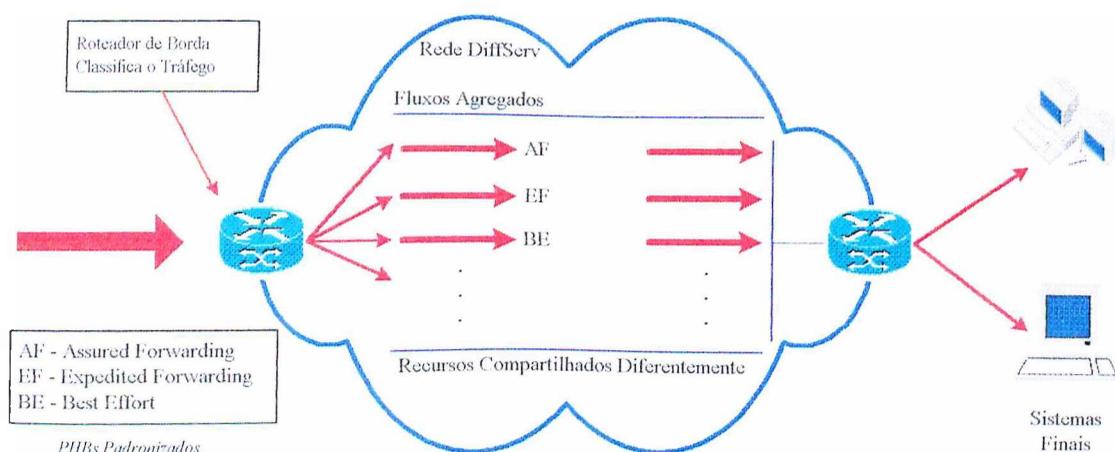


Figura 2.2 – Modelo de Implementação da Arquitetura de Serviços Diferenciados.

2.6.3. MPLS

O MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) [24] é um esquema de encaminhamento desenvolvido pelo IETF que utiliza um rótulo de tamanho fixo para encaminhar os fluxos de dados através da rede. Este mecanismo opera entre as camadas 2 e 3 do modelo OSI e tem como principal objetivo simplificar a função de roteamento através da otimização do processo de definição de rotas. A seguir apresentaremos os componentes principais da arquitetura MPLS e um breve descritivo das funções executadas por eles.

2.6.3.1. FECs

Uma Classe de Equivalência de Encaminhamento ou FEC (*Forward Equivalence Class*), representa um conjunto de pacotes que deverão ser tratados pela rede de forma idêntica. Uma FEC pode representar apenas a rota de encaminhamento a ser seguida mas pode também representar informações mais abrangentes como o nível de serviço a ser oferecido aos pacotes.

2.6.3.2. Rótulos de Identificação

Na arquitetura MPLS um rótulo (*label*) é um identificador de tamanho fixo, encapsulado entre os cabeçalhos das camadas de enlace e rede, que é utilizado para identificar a FEC à qual o pacote pertence. Após o pacote ser rotulado, todos os encaminhamentos serão feitos com base neste rótulo não sendo mais necessário que os roteadores façam a análise do cabeçalho da camada de rede deste pacote [25].

2.6.3.3. LERs / LSRs

Uma rede MPLS é composta por roteadores *Label Edge Routers* – LERs e *Label Switched Routers* – LSRs. Os LERs são roteadores localizados nas extremidades de entrada e saída da rede MPLS. Os LERs de entrada classificam, inserem os rótulos e fazem o encaminhamento de pacotes pertencentes a redes de arquiteturas distintas tais como ATM, *Frame Relay* e Ethernet para dentro da rede MPLS. Os LERs de saída fazem o procedimento inverso removendo os rótulos e encaminhando os pacotes vindos da rede MPLS de volta a uma das arquiteturas citadas. Os LSRs são os roteadores do núcleo da rede que fazem o encaminhamento rápido dos pacotes em função dos rótulos definidos.

2.6.3.4. LSPs

Os *Label Switched Paths* – LSPs são seqüências de rótulos definidos nos roteadores utilizados para determinar o caminho entre a fonte e o destino dos dados. Os LSPs estabelecem uma espécie de circuito virtual que pode ser comparado aos existentes nas tecnologias ATM e *Frame Relay*. Os LSPs podem ser definidos antes do início da transmissão (orientado ao controle ou *control driven*) pelo mecanismo de controle de tráfego ou mediante a identificação de fluxo de dados (orientado ao fluxo de dados ou *data driven*) [25].

2.6.3.5. LDP

Para configurar os LSPs o MPLS faz a distribuição de rótulos. Nesta distribuição, cada par de roteadores de encaminhamento de rótulos LSRs deve concordar quanto ao significado dos rótulos utilizados para encaminhar o tráfego entre e através deles. A definição deste acordo é feita através da utilização de um conjunto de procedimentos, chamados de Protocolo de Distribuição de Rótulos [8]. Esta distribuição pode utilizar o *Label Distribution Protocol* – LDP, que é uma extensão do RSVP ou um mecanismo de *piggybacking* no protocolo de roteamento. O LDP foi desenvolvido especificamente para a arquitetura MPLS, mas tanto LDP quanto RSVP implicam em aumento da complexidade devido ao acréscimo de mais um protocolo que deverá trabalhar em sincronia com o protocolo de roteamento. Já a utilização de *piggybacking* é dificultada pelo fato de que nem todos os protocolos de roteamento são capazes de manipular rótulos.

2.6.3.6. Encaminhamento Baseado em Rótulos

Quando pacotes de uma rede não orientada a conexões são enviados de um roteador para outro, cada roteador toma uma decisão de encaminhamento em função da análise do cabeçalho dos pacotes e das informações da tabela de roteamento. O encaminhamento baseado em rótulos utilizado no MPLS simplifica este processo eliminando a necessidade de análise do cabeçalho em cada nó e agilizando as buscas nas tabelas de roteamento. Esta agilização das buscas permite que o encaminhamento seja feito mais rapidamente.

Nos roteadores MPLS os valores contidos nas tabelas de roteamento são associados a rótulos que identificam um determinado LSP. Quando o pacote entra em uma rede MPLS o LER de entrada analisa seu cabeçalho e as informações na tabela de roteamento, definindo o rótulo a

ser utilizado. Este rótulo é inserido no pacote e será utilizado pelos LSRs do núcleo como uma espécie de índice para agilização das buscas na tabela de roteamento. A análise do cabeçalho é feita apenas pelos LERs o que simplifica a tarefa dos LSRs agilizando o seu desempenho. Os rótulos são locais a um enlace e portanto não possuem significado global. Em cada LSR intermediário o rótulo de entrada é substituído por um rótulo de saída que especifica o mesmo LSP e indica o próximo LSR para o qual o pacote deve ser encaminhado. Quando os pacotes deixam o domínio MPLS os rótulos de identificação são removidos pelos LERs de saída [26][27][28]. O processo de encaminhamento aqui descrito é apresentado na Figura 2.3.

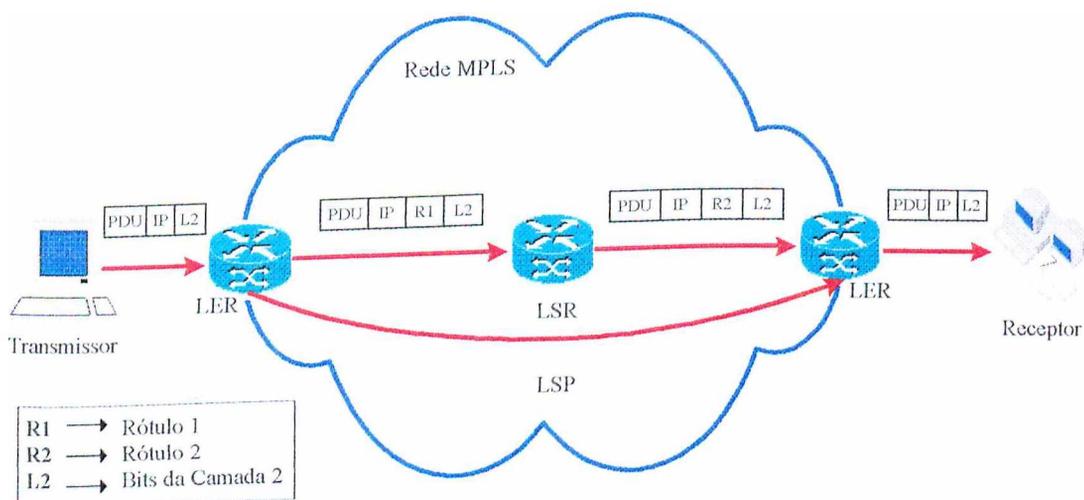


Figura 2.3 – Roteamento MPLS.

2.6.3.7. Benefícios

O principal benefício da utilização da arquitetura MPLS é o estabelecimento de rotas explícitas que, além de prover funcionalidades necessárias à implementação de engenharia de tráfego e VPNs (*Virtual Private Networks*), são mais eficientes que a técnica de encaminhamento atualmente utilizada pelo protocolo IP [29].

Outra vantagem do MPLS é sua independência dos protocolos da camada de rede e da camada de enlace. Esta independência permite ao MPLS operar com os diversos protocolos existentes para estas duas camadas.

O MPLS se destaca como o método mais eficiente para integrar o IP ao ATM, eliminando a necessidade de utilização de procedimentos complexos e protocolos para tratar questões como mapeamento de endereços e reserva de recursos. Este mecanismo combina a flexibilidade do roteamento IP à eficiência das técnicas de comutação de células do ATM [29].

2.6.4. Engenharia de Tráfego e Roteamento Baseado em Restrições

O congestionamento da rede pode ser causado por escassez de recursos ou falta de balanceamento na distribuição do tráfego. No primeiro caso a única solução é aumentar a capacidade da rede. Já a segunda situação pode ser solucionada através da utilização de Engenharia de Tráfego. A função do Roteamento Baseado em Restrições neste processo é a de agente facilitador à automatização dos mecanismos de Engenharia de Tráfego [14].

2.6.4.1. Engenharia de Tráfego

A engenharia de tráfego é um processo que procura melhorar o desempenho através da distribuição uniforme do tráfego que flui através da rede. Seu principal objetivo é a otimização do uso dos recursos disponíveis. Na engenharia de tráfego os pacotes não são necessariamente encaminhados através do menor caminho. É possível que fluxos de dados que possuam os mesmos nós fonte e destino sejam encaminhados através de rotas totalmente distintas, o que permite a implementação de diferenciação de serviços. Como resultado deste processo obtém-se utilização de enlaces ociosos e a prevenção de congestionamento. A

Figura 2.4 apresenta um comparativo do encaminhamento de pacotes com e sem a utilização de Engenharia de Tráfego [6] [28] [30].

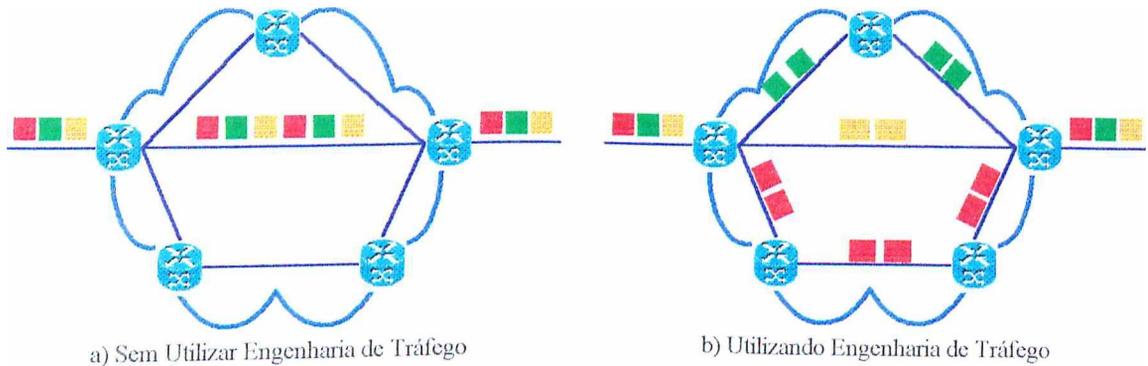


Figura 2.4 – Engenharia de Tráfego.

2.6.4.2. Roteamento Baseado em Restrições

Os protocolos de roteamento atualmente disponíveis utilizam algoritmos que procuram encaminhar os pacotes através do menor caminho encontrado. O processo de tomada de decisão destes algoritmos não considera métricas de qualidade de serviço tais como, retardo, variação do atraso e largura de banda, o que pode acarretar má utilização dos recursos da rede e conseqüente queda do desempenho [31] [32].

O mecanismo de tomada de decisão utilizado pelo Roteamento Baseado em Restrições define a rota a ser utilizada a partir dos requisitos de QoS de um determinado fluxo ou combinação de fluxos. Desta forma, a rota informada por este mecanismo é a que mais provavelmente irá atender aos requisitos de QoS dos fluxos e não simplesmente a menor rota.

Para determinar a rota, o Roteamento Baseado em Restrições leva em consideração, além da topologia da rede, requisitos dos fluxos, disponibilidade dos enlaces e outras políticas

definidas pelos administradores de rede. Assim sendo, é necessário que informações de estado dos enlaces sejam distribuídas e mantidas atualizadas pelos roteadores.

2.6.4.3. Benefícios e Limitações

Os principais benefícios alcançados com a utilização destes mecanismos são a otimização do uso dos recursos de rede e o fornecimento de rotas que atendam aos requisitos de QoS dos fluxos [14].

As principais limitações encontradas são:

- Necessidade de distribuição e manutenção de informações de estado dos enlaces que acarreta aumento do número de mensagens trafegadas na rede e crescimento das tabelas de roteamento;
- Os algoritmos de roteamento mais complexos que consomem mais recursos de processamento;
- O fato de que a utilização de rotas mais longas pode consumir uma maior quantidade de recursos;
- Possível instabilidade do roteamento já que as tabelas de roteamento devem ser recalculadas com maior frequência;

2.6.5. Integração entre as Abordagens

Até o momento foram apresentadas as diferentes tecnologias de QoS de forma independente. Entretanto, em um ambiente diversificado como a Internet, estas tecnologias tornam-se complementares não existindo uma solução única que consiga mapear todas as particularidades existentes. Assim sendo, torna-se pouco provável que quaisquer destas

arquiteturas venha a ser utilizada separadamente. Para se obter QoS fim a fim de forma irrestrita é essencial a integração entre as diferentes abordagens aqui citadas.

Estudos e padronizações têm sido desenvolvidos neste sentido: em [33] é apresentado um padrão de integração entre redes IntServ e DiffServ, [34] propõe mecanismos que permitam ao MPLS suportar a arquitetura DiffServ, [35] define um padrão de interoperabilidade entre MPLS e ATM, em [19] o padrão de integração entre MPLS e Engenharia de Tráfego é apresentado. Finalmente, em [36] e [37] é possível visualizar modelos ainda mais abrangentes de integração que englobam várias das tecnologias citadas.

Um panorama abrangente de integração das tecnologias de QoS pode ser visualizado na Figura 2.5. Nesta arquitetura mista, a utilização do modelo IntServ/RSVP nas redes de acesso permite que os sistemas finais efetuem sinalização fim a fim de seus requisitos de QoS. No núcleo da rede utiliza-se o modelo DiffServ integrado às arquiteturas MPLS e ATM. A utilização do modelo DiffServ no núcleo da rede minimiza sua complexidade garantindo escalabilidade e oferecendo ainda diferenciação de serviços. Já a tecnologia MPLS agiliza o encaminhamento dos pacotes e habilita mecanismos de engenharia de tráfego otimizando o uso dos recursos e evitando congestionamentos. Além disto, o MPLS funciona como agente integrador entre as tecnologias de QoS IP e o ATM permitindo assim um melhor aproveitamento de recursos avançados de QoS inerentes à esta tecnologia.

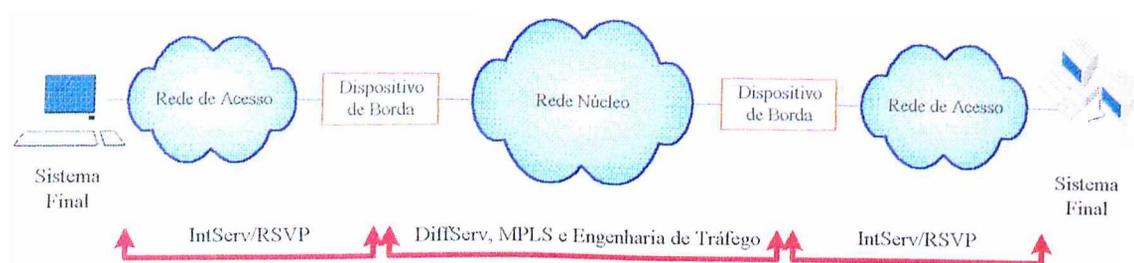


Figura 2.5 – Integração entre as diferentes tecnologias de QoS.

2.7. Conclusões

O objetivo da QoS é prover um serviço de rede de melhor qualidade e mais previsível, disponibilizando largura de banda dedicada, controlando o *jitter* e a latência, e oferecendo maior confiabilidade. Estes objetivos poderão ser alcançados através de ferramentas que controlem a entrada e o transporte de dados na rede, e gerenciem os instantes de sobrecarga amenizando os efeitos negativos dos congestionamentos. O aumento considerável no volume de tráfego transportado e a crescente demanda por aplicações do tipo voz, vídeo, ensino à distância e comércio eletrônico faz aumentar a demanda por QoS.

As redes de comunicação de dados, baseadas na arquitetura TCP/IP, não oferecem garantias quanto aos requisitos de QoS de cada aplicação. O tipo de serviço suportado é baseado no modelo de melhor esforço e os fluxos competem, em nível de igualdade, pelos recursos de rede disponíveis. A complexidade deste modelo se restringe aos sistemas finais, o que mantém a rede relativamente simples. Esta simplicidade foi a causa do grande sucesso e ampla disseminação desta tecnologia, entretanto, a crescente demanda por QoS, torna o modelo tradicional inadequado.

Várias propostas foram desenvolvidas pelo IETF com o objetivo de adequar o modelo atual de forma a oferecer serviços com garantias de QoS. Neste capítulo, foram apresentadas as principais tecnologias propostas, são elas: o modelo IntServ, caracterizado pela reserva de recursos, o RSVP que é um protocolo de sinalização, o DiffServ que tem na diferenciação do tráfego sua principal característica, o MPLS que é um esquema de encaminhamento, a Engenharia de Tráfego que provê balanceamento na distribuição da carga de dados, e o roteamento baseado em restrições que é o agente facilitador à automatização dos mecanismos de Engenharia de Tráfego. Cada uma destas soluções possui benefícios e limitações que as tornam adequadas ou não a uma determinada situação. Em um ambiente diversificado como a Internet, é esperado que estas tecnologias sejam utilizadas de forma complementar na obtenção de QoS fim a fim. Um cenário de integração é apresentado para exemplificar esta situação.

CAPÍTULO 3

O MODELO DIFFSERV

3.1. Introdução

Desenvolvida pelo IETF, RFC 2475 [17], a arquitetura DiffServ tem como objetivo suportar diversos tipos de aplicação através da implementação de diferentes garantias de serviço. Nesta arquitetura os pacotes IP são marcados de forma diferenciada criando assim classes de serviço que serão tratadas pela rede de forma distinta. A criação de classes de serviço permite que o tráfego proveniente de diferentes fluxos, mas que possua características semelhantes, seja agrupado e tratado pelo núcleo da rede de forma simplificada, reduzindo o processamento e garantindo a escalabilidade da arquitetura. Este capítulo apresenta a arquitetura DiffServ, seus componentes e mecanismos de implementação.

3.2. O Campo DS

Na arquitetura DiffServ, a marcação dos pacotes que entram na rede é feita através do Campo DS. Este campo, apresentado na Figura 3.1, corresponde ao byte TOS (*Type of Service*) [38] do cabeçalho IPv4 e ao campo *Traffic Class* [39] do cabeçalho IPv6. Os 6 primeiros bits deste byte definem o campo DSCP (*Differentiated Service Code Point*), que codifica o DS

codepoint, responsável pela identificação da classe de serviço ou PHB (*Per Hop Behavior*) à qual um pacote pertence e sua prioridade de descarte. O restante dos bits não são utilizados atualmente.

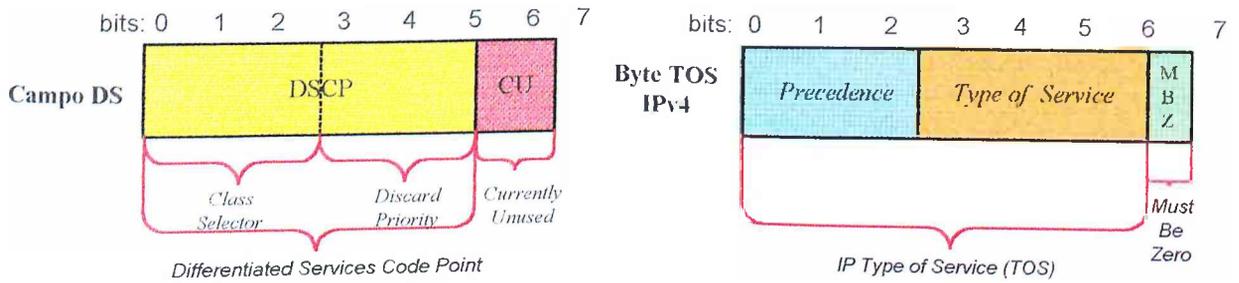


Figura 3.1 – O Campo DS e o byte TOS do protocolo IPv4.

3.3. Domínio de Serviços Diferenciados (Domínio DS)

Um Domínio DS é composto por um conjunto de redes que implementam diferenciação de serviços utilizando em seus nós uma mesma política de provisionamento de recursos e um mesmo conjunto de PHBs.

Os limites de um Domínio DS são definidos pelos roteadores de borda que implementam funções de classificação e condicionamento do tráfego que entra na rede garantindo assim que os pacotes sejam marcados como pertencentes a um dos PHBs suportados pelo domínio. No núcleo da rede os pacotes são tratados de acordo com o PHB indicado no campo DSCP do cabeçalho do pacote. A Figura 3.2 ilustra este modelo.

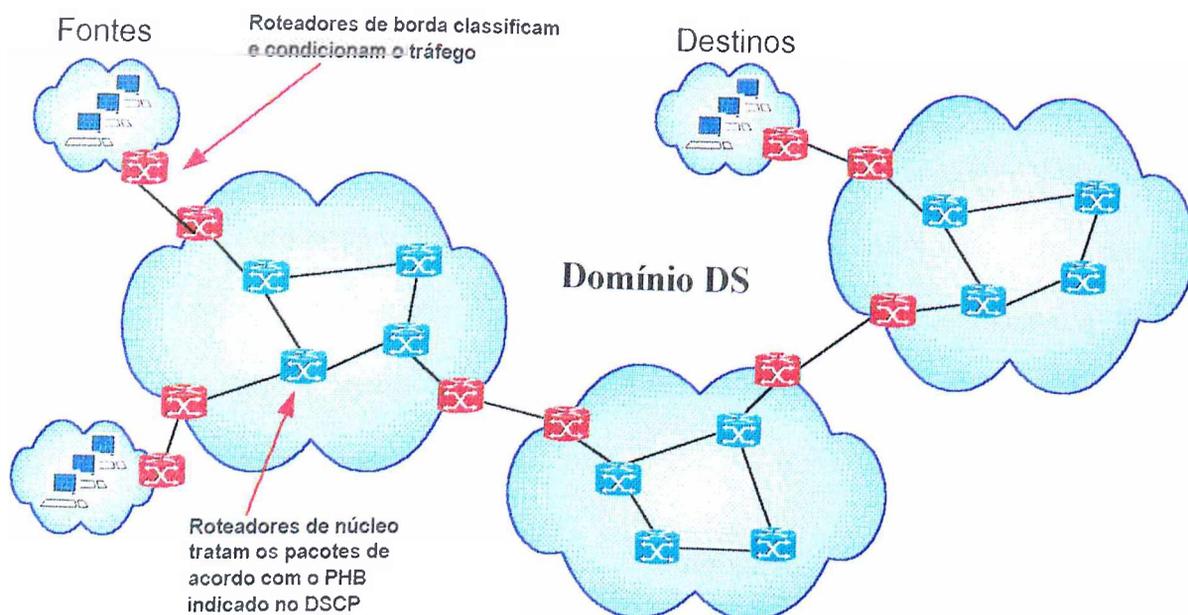


Figura 3.2 – Arquitetura do modelo de Serviços Diferenciados.

3.3.1. Roteadores de Borda

Os roteadores de borda são aqueles que se localizam nas fronteiras de entrada e saída da rede. Estes roteadores fazem a interligação entre diferentes domínios DS. É nestes roteadores que se concentra a maior parte do processamento pois eles são responsáveis por executar as funções de classificação, marcação, monitoramento e condicionamento do tráfego agrupando os pacotes em diferentes PHBs.

3.3.2. Roteadores de Núcleo

Os roteadores de núcleo fazem o encaminhamento do tráfego com base apenas no PHB ao qual os pacotes pertencem. Isto simplifica seu funcionamento disponibilizando recursos para gerenciamento de um alto volume de tráfego. Estes roteadores somente se conectam a outros roteadores de núcleo ou a roteadores de borda que pertençam ao seu próprio domínio DS.

3.4. Categorias de Serviço

Em complemento ao serviço do tipo BE (*Best Effort*), tradicionalmente oferecido pela Internet, foram definidos pelo IETF as classes de serviço de Encaminhamento Assegurado (AF PHB – *Assured Forwarding Per Hop Behavior*) [40] e Encaminhamento Expresso (EF PHB – *Expedited Forwarding Per Hop Behavior*) [41]. A seguir apresentaremos as principais características destes modelos.

3.4.1. Serviço *Best Effort* (BE)

No serviço BE os recursos de rede são compartilhados entre as aplicações da melhor forma possível sem que seja oferecido qualquer tipo de garantia de serviço. Toda a largura de banda disponível é compartilhada entre os diversos fluxos de forma balanceada. Entretanto, no caso de ocorrência de congestionamento alguns pacotes são descartados, ocasionando diminuição da taxa de transmissão. No DiffServ os pacotes pertencentes a este classe de serviço têm o campo DSCP marcados com valor “000000”.

3.4.2. Serviço *Expedited Forwarding* (EF)

O EF PHB oferece alta qualidade, com garantias de taxa constante de transmissão de dados e retardo de transferência mínimo e de baixa variação. Ele é adequado a aplicações em tempo real, tais como telefonia e videoconferência ou para simulação de linha dedicada de transmissão de dados, também chamada de VLL (*Virtual Leased Line*). Para atender a seus requisitos, a taxa de envio de dados fornecida pela rede deve ser igual ou maior que a taxa negociada no contrato de nível de serviço. A implementação do EF PHB é feita através de mecanismos de gerenciamento de filas que priorizem totalmente este tipo de tráfego. Para garantir a integridade da rede, os pacotes pertencentes ao EF PHB que excederem a taxa

negociada no contrato devem ser descartados. A codificação utilizada pelo DiffServ para identificar este PHB é “101110”.

3.4.3. Serviço *Assured Forwarding* (AF)

O AF PHB é adequado para aplicações que necessitem de serviço confiável, ainda que a rede se encontre congestionada, e que possam ainda se beneficiar do excesso de largura de banda existente quando a rede estiver ociosa. Para implementar este PHB foram definidas quatro classes de encaminhamento distintas. A rede irá reservar uma determinada quantidade de recursos para cada uma destas classes. Dentro de cada classe são definidos ainda níveis de classificação quanto à prioridade de descarte. A Tabela 3.1 apresenta a codificação utilizada pelo DiffServ para identificar estas classes de encaminhamento e suas respectivas prioridades de descarte.

TABELA 3.1 – CODIFICAÇÃO DO AF PHB

Prioridade de Descarte	Classes de Encaminhamento			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Baixa	AF11 = 001010	AF21 = 010010	AF31 = 011010	AF41 = 100010
Média	AF12 = 001100	AF22 = 010100	AF32 = 011100	AF42 = 100100
Alta	AF13 = 001110	AF23 = 010110	AF33 = 011110	AF43 = 100110

Em caso de congestionamento, a prioridade de descarte do pacote determina sua importância em relação aos outros pacotes dentro de uma mesma classe AF. Assim sendo, o nível de garantia de entrega de um pacote será dependente: a) da quantidade de recursos reservados para o PHB à qual o pacote pertence, b) da carga atual de dados pertencentes à este PHB e, caso exista congestionamento para este PHB, c) da prioridade de descarte do pacote.

3.5. Contratos de Serviço

Outro aspecto importante da arquitetura DiffServ são os contratos de serviço. Estes contratos definem regras que serão utilizadas pelos roteadores na fiscalização dos pacotes que fluem de um domínio DS para outro. A seguir é apresentada uma visão geral da funcionalidade destes contratos.

3.5.1. *Service Level Agreement (SLA)*

Além da diferenciação de classes, é essencial à arquitetura DiffServ que seja implementado um Acordo de Nível de Serviço ou SLA. O SLA é uma espécie de contrato, definido entre a fonte de tráfego e a rede ou entre domínios DS adjacentes. Neste contrato são definidos o padrão de comportamento do tráfego a ser encaminhado, os PHBs suportados e os respectivos volumes de tráfego permitidos. A Figura 3.3 representa a integração entre diferentes domínios DS através de SLAs.

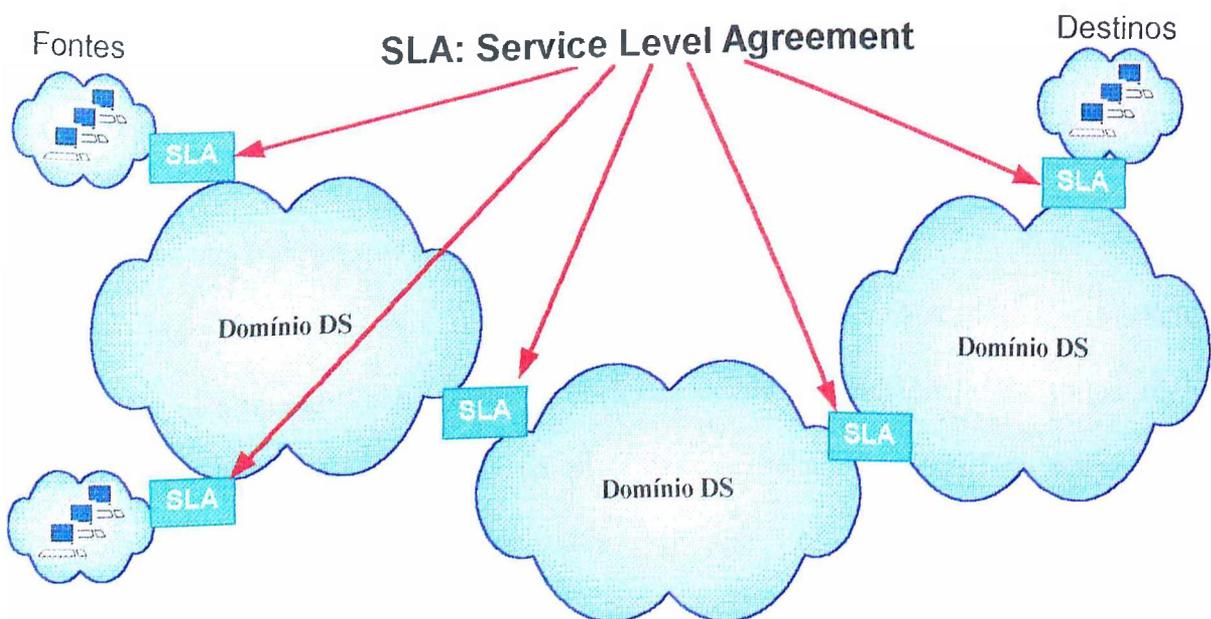


Figura 3.3 – Integração entre Domínios DS através de SLAs.

Quando o acordo de nível de serviço não é seguido os pacotes que excedem a taxa estipulada são identificados como não em conformidade e poderão ser descartados ou marcados para que tenham maior probabilidade de descarte na ocorrência de congestionamento. Os SLAs podem ser estáticos ou dinâmicos. Os SLAs estáticos devem ser renegociados periodicamente, enquanto que os SLAs dinâmicos utilizam mecanismos de sinalização para solicitar serviços sob demanda.

3.5.2. *Traffic Conditioning Agreement (TCA)*

O Acordo de Condicionamento de Tráfego, ou TCA, é definido a partir do SLA. É ele quem define as regras que serão utilizadas para a classificação, medição, marcação, moldagem e policiamento do tráfego. O TCA reforça as regras definidas no SLA e ainda determina regras que atendam às necessidades específicas inerentes a uma política de provisionamento de serviço do domínio DS ou inerentes a determinados requisitos de serviço.

3.6. Condicionador de Tráfego

O condicionador de tráfego é responsável pela classificação, medição, marcação e policiamento do tráfego que entra em um domínio DS. Os elementos componentes de um condicionador de tráfego são: o classificador, o medidor, o marcador, o modelador e o descartador. Entretanto, não existe a obrigatoriedade da existência de todos os quatro componentes. Por exemplo, quando o SLA não estabelece um perfil de tráfego, não são necessários o modelador nem o descartador. A Figura 3.4 apresenta o modelo conceitual de um condicionador de tráfego, seus componentes e a interação entre eles.

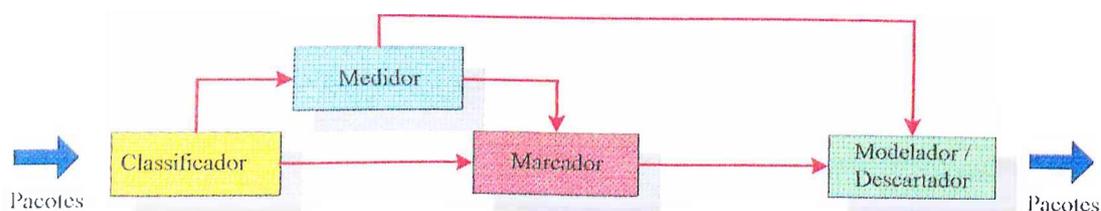


Figura 3.4 – Modelo Conceitual do Condicionador de Tráfego.

3.6.1. Classificador

O classificador seleciona os pacotes pertencentes a um fluxo de dados de acordo com a informação contida em seu cabeçalho. Existem dois tipos de classificadores. O classificador BA (*Behavior Aggregate*) classifica os pacotes com base apenas no campo DSCP. O classificador MF (*Multi-Field*) pode fazer a classificação com base em valores contidos em um ou mais campos do cabeçalho, tais como endereço fonte, endereço de destino, campo DS, porta de entrada, dentre outros.

3.6.2. Medidor

O medidor de tráfego acumula estatísticas referentes à largura de banda consumida por um fluxo de pacotes e compara suas características com o padrão definido pelo TCA. Quando um fluxo excede o padrão determinado no TCA, o medidor interage com outros componentes do condicionador de tráfego para que eles possam remarcar ou descartar estes pacotes.

3.6.3. Marcador

O marcador determina o valor do campo DS dos pacotes associando assim cada pacote a um determinado PHB. O marcador pode ser configurado tanto para marcar todos os pacotes com um mesmo DSCP, quanto para fazer a marcação de acordo com as informações de estado

repassadas pelo medidor. Caso um pacote já esteja marcado com um determinado DSCP o marcador pode remarcar este pacote caso ele não esteja de acordo com o comportamento esperado por parte do fluxo ao qual ele pertence. A implementação deste agente pode ser feita através do mecanismo *Token Bucket*.

3.6.4. Modelador

O modelador de tráfego controla o encaminhamento dos pacotes de um determinado fluxo de forma a adequar o comportamento deste fluxo ao seu perfil de tráfego. O modelador geralmente possui uma fila de tamanho fixo onde os pacotes são armazenados enquanto aguardam permissão de encaminhamento. Caso não exista espaço disponível para armazenar um pacote ele será descartado. O modelador garante a equidade entre os fluxos que pertencem a um mesmo PHB e controla o fluxo dos dados evitando congestionamentos.

3.6.5. Descartador

O descartador elimina alguns ou até mesmo todos os pacotes de um determinado fluxo para adequar o comportamento do fluxo ao qual os pacotes pertencem ao seu perfil de tráfego. O descartador é um tipo de modelador cuja fila de armazenamento de pacotes possui tamanho igual a zero.

3.7. Provisionamento de Recursos

Uma vez definido o SLA, é necessário configurar os roteadores de borda para que eles gerenciem o tráfego adequadamente. Este processo é chamado de provisionamento de recursos [14] e pode ser executado de forma estática ou dinâmica. Na forma estática, os roteadores são configurados manualmente de acordo com as especificações determinadas pelo

SLA. Na configuração dinâmica é necessária a utilização dos chamados BBs (*Bandwidth Brokers*) [44]. Os BBs são agentes intermediadores que irão gerenciar o compartilhamento dos recursos entre sistemas pertencentes a um mesmo domínio DS e controlar o fluxo de dados entre domínios DS adjacentes. Para gerenciar os recursos de um mesmo domínio DS os BBs armazenam informações referentes às políticas de distribuição de recursos que especificam quais usuários podem utilizar quais recursos e em que quantidade. Para controlar o tráfego entre domínios é preciso que os BBs negociem acordos de nível de serviço. O processo de sinalização utilizado na alocação de recursos para uma conexão fim a fim intermediada por BBs é apresentado na Figura 3.5.

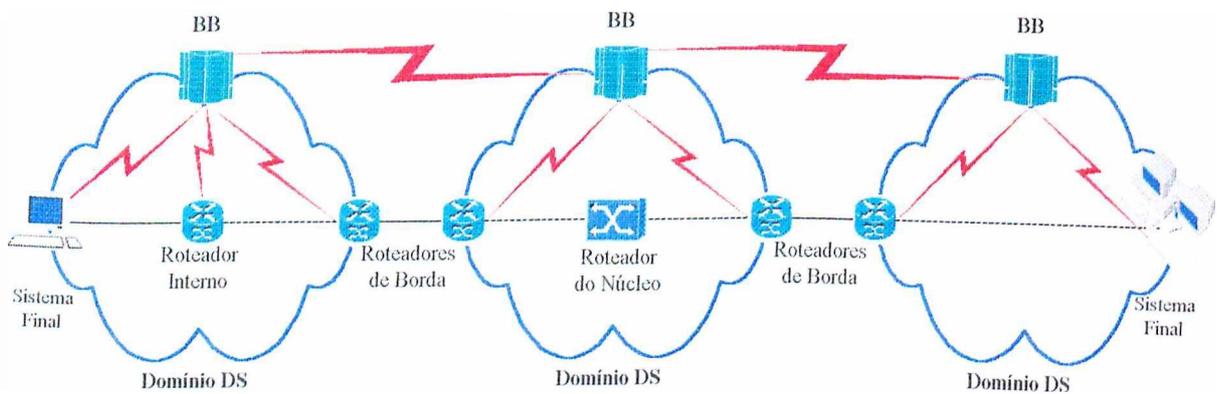


Figura 3.5 – Provisionamento de recursos intermediado por BBs.

Para iniciar o envio de dados, o transmissor consulta primeiramente o BB local para que ele defina o PHB ao qual o fluxo irá pertencer. O BB local executa então um processo de negociação com o BB responsável pelo domínio adjacente solicitando os recursos necessários para atender à demanda dos fluxos agregados. Quando o BB adjacente recebe esta solicitação ele verifica se existem recursos disponíveis suficientes para encaminhar os fluxos ao próximo

domínio. Se existir disponibilidade de recursos as regras de comportamento do tráfego negociadas são definidas nos roteadores de borda e é feita a reserva dos recursos necessários para o encaminhamento dos fluxos agregados entre os domínios.

A utilização de BBs faz com que a troca de mensagens de configuração e negociação, desencadeada pela necessidade de transmissão de um sistema final, seja limitada a domínios adjacentes ainda que esta comunicação se estenda por vários domínios.

3.8. O Algoritmo RIO

O algoritmo RIO (*RED with IN and OUT*) [53] [54] foi proposto como um esquema simples para a implementação de diferenciação de serviços na Internet [42]. Este mecanismo de controle de congestionamento é muito utilizado na implementação do AF PHB da arquitetura DiffServ. Nesta seção serão detalhadas suas características de funcionamento conforme descrito em [43].

A criação do RIO foi fundamentada em um mecanismo de controle ativo de congestionamento denominado RED (*Random Early Drop*) [9]. A sigla RIO simboliza a capacidade deste algoritmo em fazer distinção de tratamento entre pacotes em conformidade (IN) e não em conformidade (OUT) com o padrão de comportamento estabelecido no SLA.

O funcionamento do RIO utiliza dois conjuntos de parâmetros distintos para os pacotes IN e OUT. Estes dois conjuntos de parâmetros são representados como $(min_in, max_in, P_{max_in})$ e $(min_out, max_out, P_{max_out})$. Os parâmetros min_in e max_in representam os limites mínimo e máximo para a fila de pacotes IN, e P_{max_in} é a probabilidade máxima de descarte para os

pacotes IN. Analogamente, os parâmetros min_out e max_out representam os limites mínimo e máximo para a fila de pacotes OUT, enquanto que P_{max_out} é a probabilidade máxima de descarte para pacotes OUT.

Sempre que um pacote é recebido, o RIO estima o tamanho médio da fila de pacotes IN (avg_in_q) e o tamanho médio de toda a fila (avg_q). Se o pacote recebido estiver em conformidade ele irá contribuir para a estimativa tanto do avg_in_q , quanto do avg_q . Se o pacote recebido não estiver em conformidade ele contribuirá apenas para a estimativa de avg_q . A probabilidade de descarte do pacote é então calculada com base nos valores de avg_in_q ou avg_q .

Se o pacote estiver em conformidade, a probabilidade de descarte p é calculada pela equação 3.1. Esta equação intui que pacotes IN representam o tráfego que deve receber prioridade, e portanto, sua probabilidade de descarte deve ser influenciada apenas pela quantidade de pacotes IN enfileirados não sendo afetada nem pelos pacotes OUT armazenados, nem pelo tamanho total da fila (IN e OUT).

$$p = P_{max_in} * \frac{(avg_in_q - min_in)}{(max_in - min_in)} \quad (3.1)$$

Quando o pacote recebido não estiver em conformidade, a probabilidade de descarte p é dada pela equação 3.2. Neste caso, como os pacotes OUT representam o tráfego que deve receber baixa prioridade, sua probabilidade de descarte deve ser influenciada tanto pelos pacotes OUT

enfileirados, quanto pelos pacotes IN. Assim sendo, utiliza-se o tamanho médio de toda a fila avg_q para o cálculo da probabilidade de descarte dos pacotes OUT.

$$p = P_{max_out} * \frac{(avg_q - min_out)}{(max_out - min_out)} \quad (3.2)$$

A Figura 3.6 mostra a representação gráfica do algoritmo RIO. Neste modelo pode-se subdividir o período de congestionamento em quatro fases distintas em função das características de tamanho médio da fila.

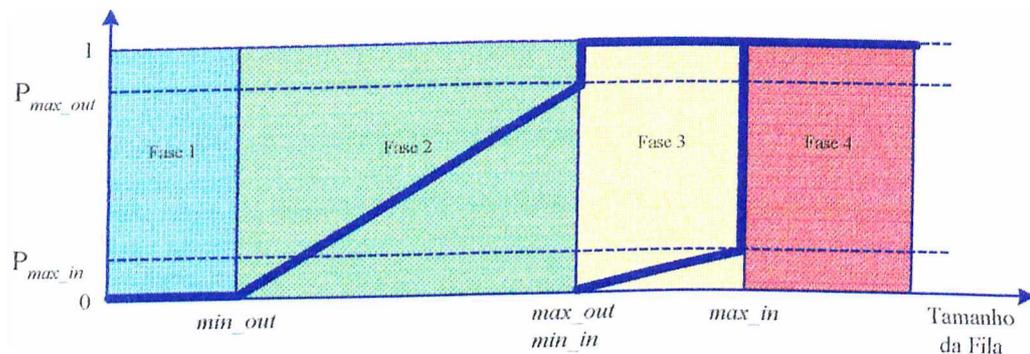


Figura 3.6 – Representação Gráfica do Algoritmo RIO.

A fase 1 é chamada de “Fase Livre de Congestionamento” e corresponde ao período em que não existe congestionamento. A quantidade de pacotes IN e OUT enfileirados está muito abaixo da capacidade suportada. Os valores de tamanho instantâneo e médio das filas são muito pequenos e nenhum pacote é descartado. A capacidade de transmissão não é aproveitada adequadamente nesta fase.

A fase 2 é a “Fase Susceptível ao Congestionamento”. Nesta fase existe a suspeita de que a fila pode vir a crescer e alguns pacotes começam a ser descartados para sinalizar às fontes de tráfego a probabilidade de congestionamento. Apenas pacotes OUT são descartados. Durante esta fase, os pacotes IN enxergam um tamanho instantâneo de fila relativamente grande, mas estes pacotes não são descartados. Esta é a fase ideal de funcionamento porque proporciona alto nível de utilização do enlace e não compromete o SLA.

A fase 3, ou “Fase de Alarme de Congestionamento” descarta todos os pacotes OUT além de descartar também alguns pacotes IN para manter um tamanho médio de fila aceitável. Esta fase é indesejável pois ela compromete o SLA através do descarte de pacotes IN.

A fase 4 é a “Fase de Controle de Congestionamento”. Em função da necessidade de controlar o congestionamento, não é possível implementar diferenciação entre pacotes IN e OUT e, portanto, tanto pacotes IN quanto OUT são descartados. Quando esta fase se estende por períodos muito longos fica caracterizado que, ou sistema está subdimensionado, ou os parâmetros do condicionador de tráfego e/ou RIO não estão configurados adequadamente.

3.9. Conclusões

A arquitetura DiffServ foi proposta com o objetivo de possibilitar a diferenciação de serviço em um ambiente TCP/IP. As redes que implementam DiffServ são chamadas Domínios DS. Os principais componentes desta arquitetura, que foram detalhados neste capítulo são : os roteadores de borda, os roteadores de núcleo, as categorias de serviço, os contratos de serviço e o condicionador de tráfego.

Quando um pacote entra na rede, os roteadores de borda marcam o campo DSCP de seu cabeçalho IP. Este campo é utilizado para determinar o PHB ao qual o pacote pertence. Os PHBs são classes de serviços que receberão da rede tratamento diferenciado. A criação dos PHBs permite que os tráfegos provenientes de diferentes fluxos, mas que possuam características semelhantes, sejam agrupados e tratados pelos roteadores de núcleo de forma simplificada, reduzindo assim o processamento. Esta metodologia restringe a complexidade aos roteadores de borda, que têm um menor fluxo de tráfego, e simplifica a tarefa dos roteadores de núcleo, que gerenciam fluxos maiores, garantindo assim a escalabilidade do modelo. O mecanismo responsável pela classificação, medição, marcação, modelagem e descarte dos pacotes é o condicionador de tráfego. Por ser um mecanismo complexo, que demanda uma alta carga de processamento, em geral é implementado somente pelos roteadores de borda.

No DiffServ as garantias de serviço não são feitas para fluxos individuais, mas sim definidas para agregações de fluxos pertencentes a uma mesma categoria de serviço e, portanto, pode ocorrer de um fluxo individual não atingir seus requisitos específicos de QoS. Desta forma, o correto provisionamento de recursos é essencial ao bom funcionamento desta arquitetura e deve ser feito com base nos contratos de serviços negociados entre os Domínios DS.

CAPÍTULO 4

A ARQUITETURA TCP/IP E O MECANISMO ECN

4.1. Introdução

Atualmente a arquitetura TCP/IP é a mais utilizada no mundo das redes de computadores. Esta arquitetura baseia-se principalmente no serviço de transporte orientado à conexão, fornecido pelo TCP (*Transmission Control Protocol*) [45] e no serviço de rede não orientado à conexão, fornecido pelo IP (*Internet Protocol*) [46]. A popularização desta arquitetura se deve principalmente ao fato de ela permitir a interligação entre redes físicas que empregam tecnologias distintas.

São aspectos importantes do protocolo TCP os mecanismos de controle de congestionamento. Estes mecanismos utilizam o descarte de pacotes para sinalizar a sobrecarga de tráfego na rede e, portanto, estão sujeitos aos efeitos negativos inerentes às perdas. O crescimento na demanda por QoS fez surgir a necessidade de utilização de estratégias que ofereçam melhor desempenho. Uma solução proposta é o mecanismo ECN que tem por objetivo melhorar o gerenciamento do tráfego, minimizando os descartes por meio da utilização de informações de realimentação.

Neste capítulo apresenta-se as características principais da arquitetura TCP/IP, bem como os principais algoritmos de controle de congestionamento utilizados pelo protocolo TCP [47]. Tendo em vista sua importância para este trabalho, destaca-se ainda neste capítulo o funcionamento do mecanismo ECN.

4.2. O Protocolo IP

O IP é um protocolo não orientado à conexão. Sua função é transferir blocos de dados da origem ao destino, os quais são tratados de forma independente sem qualquer relacionamento entre si. O tipo de comunicação oferecido é não confiável não sendo utilizados mecanismo de reconhecimento, controle fluxo ou detecção de erros.

4.3. O Protocolo TCP

O TCP é um protocolo sofisticado que oferece serviço orientado à conexão. Projetado para funcionar sobre um serviço de rede sem conexão e sem confirmação, este protocolo efetua funções de controle de fluxo, controle de congestionamento e detecção e recuperação de dados corrompidos, perdidos, duplicados ou entregues fora de ordem garantindo assim um serviço confiável de transferência de dados fim a fim.

4.3.1. Detecção e Recuperação de Erros

Os mecanismos de controle de erros utilizados pelo TCP são baseados em reconhecimento ou ACK (*Acknowledgement*) e *timeout*. Sempre que um segmento é transmitido, dispara-se um temporizador. Se o ACK deste segmento não for recebido antes do temporizador expirar fica caracterizado *timeout* e o segmento é dado como perdido. O *timeout* é calculado em função do RTT (*Round Trip Time*) que é o tempo total necessário para que um segmento transmitido

chegue ao destino e o reconhecimento retorne ao transmissor. A perda de um segmento também pode ser identificada quando o transmissor recebe três ACKs duplicados. Os ACKs duplicados são enviados pelo receptor quando o mesmo identifica falha na sequência de dados recebida.

4.3.2. Mecanismos de Controle de Congestionamento

Os mecanismos utilizados pelo TCP para controlar o congestionamento utilizam duas variáveis denominadas CWND (*congestion window*) e Ssthresh (*slow start threshold*). No início da conexão, CWND e Ssthresh recebem um mesmo valor inicial. Este valor indica a quantidade de segmentos que o transmissor pode enviar ao receptor sem que tenha recebido ainda nenhum ACK. O valor de CWND pode ser incrementado ou decrementado de acordo com o nível de congestionamento da rede. O algoritmo utilizado para decrementar o valor de CWND é definido de acordo com o valor armazenado em Ssthresh, se CWND for menor que Ssthresh então utiliza-se o algoritmo *Slow Start*, se CWND for maior ou igual ao valor de Ssthresh então o algoritmo utilizado será o *Congestion Avoidance*. Sempre que um congestionamento é detectado, os valores de CWND e Ssthresh são atualizados pelo mecanismo de controle utilizado. A seguir descreve-se os mecanismos de controle de congestionamento implementados pelo TCP e algumas de suas variações que foram propostas com o objetivo de implementar melhorias a estes mecanismos.

4.3.2.1. Mecanismos *Slow Start* e *Congestion Avoidance*

No TCP *Vanilla* são utilizados os mecanismos *Slow Start* e *Congestion Avoidance* [48]. Neste mecanismo a variável CWND é inicializada com valor unitário e a cada ACK recebido a

CWND passa a valer $CWND + 1$ até atingir um valor máximo de 64 kb. Neste processo o valor de CWND dobra a cada RTT.

Quando ocorre *timeout* o valor $CWND/2$ é armazenado na variável Ssthresh, a variável CWND é reinicializada com o valor unitário e o transmissor retransmite o segmento perdido e todos os segmentos subsequentes. O valor de CWND volta a ser incrementado a cada ACK recebido até que o valor de CWND seja igual ao valor armazenado em Ssthresh. Esta fase é chamada de *Slow Start*. A partir deste momento inicia a fase de *Congestion Avoidance* onde CWND só será incrementado uma vez a cada RTT.

4.3.2.2. Mecanismos *Fast Retransmit* e *Fast Recovery*

As implementações tradicionais do TCP utilizam um valor muito alto para o temporizador (em geral 500 ms). Este valor resulta em desperdício de largura de banda em situações de congestionamento quando o transmissor deve aguardar pelo *timeout* para iniciar a retransmissão dos segmentos. Enquanto aguarda pelo *timeout* o transmissor não envia novos segmentos nem retransmite segmentos perdidos. Além disto, a utilização do canal de dados é ineficiente após o *timeout* ser detectado e serem iniciadas as fases de *Slow Start* e *Congestion Avoidance* sendo necessários vários RTTs até que toda a capacidade do canal de dados volte a ser utilizada. Para solucionar este problema o TCP Reno implementa os algoritmos *Fast Retransmit* e *Fast Recovery* [48] que permitem que o transmissor volte rapidamente a utilizar o canal de dados de forma eficiente em situações em que apenas um segmento de dados foi perdido.

Quando um segmento é perdido, o receptor identifica que ocorreu uma falha na seqüência ao receber os segmentos seguintes. A partir deste instante, os ACKs enviados pelo receptor informam ao transmissor o número do segmento perdido e são chamados de ACKs duplicados. Quando o receptor recebe três destes ACKs, ele identifica que o segmento foi perdido e o reenvia imediatamente iniciando a fase de *Fast Retransmit*. A variável *SSTHRESH* passa a valer $CWND/2$ e o valor de *CWND* é reduzido passando a valer $CWND/2 + 3$. A cada novo ACK duplicado recebido pelo transmissor o valor de *CWND* é incrementado e um novo segmento é enviado. Utilizando este algoritmo o transmissor irá aguardar $RTT/2$ antes de iniciar a retransmissão dos pacotes a partir do segmento perdido o que resultará em utilização de metade da capacidade do canal de dados durante a fase de *Fast Retransmit*. Aproximadamente 01 *RTT* após o segmento perdido ser retransmitido seu ACK é recebido. Neste momento, ao invés de reinicializar *CWND* com valor unitário, o TCP Reno inicializa *CWND* com o valor armazenado em *SSTHRESH* e efetua o algoritmo *Congestion Avoidance*. Esta fase é chamada de *Fast Recovery*.

4.3.2.3. Mecanismos *Fast Retransmit* e *Fast Recovery* Modificados

O algoritmo utilizado no TCP Reno é bastante eficiente em casos em que apenas um segmento foi perdido, entretanto, quando ocorre a perda de vários segmentos sucessivos os mecanismos de *Fast Retransmit* e *Fast Recovery* são disparados várias vezes em um mesmo *RTT* resultando em reduções sucessivas do valor de *CWND* e conseqüente ineficiência na utilização do canal de dados.

No TCP *New Reno* [49] o transmissor armazena em uma variável chamada *RECOVER* o número do último segmento transmitido quando o mecanismo de *Fast Retransmit* foi

disparado pela primeira vez. A fase de *Fast Recovery* é então iniciada assim que o primeiro segmento perdido é retransmitido. Quando o transmissor recebe o ACK do segmento retransmitido, ele verifica se este ACK reconhece todos os segmentos, inclusive o RECOVER. Se reconhecer, o ACK é identificado como sendo um novo ACK e o transmissor sai da fase de *Fast Retransmit* e *Fast Recovery*, define CWND como valendo SSTHRSH e inicia a fase de *Congestion Avoidance*. Por outro lado, se o ACK reconhecer apenas o segmento retransmitido e apenas alguns dos segmentos enviados antes de RECOVER, o transmissor envia o próximo segmento esperado de acordo com a informação contida no ACK. Este procedimento tem continuidade até que todos os segmentos esperados, inclusive RECOVER sejam reconhecidos. A utilização deste algoritmo garante a recuperação de N segmentos perdidos em $N * RTT$.

4.3.2.4. Mecanismo *Selective Acknowledgement*

O TCP SACK [50] otimiza ainda mais a recuperação quando ocorre perda de vários segmentos. Neste algoritmo, quando o receptor identifica uma falha na seqüência de segmentos recebidos ele também envia ao transmissor ACKs duplicados. Entretanto, neste algoritmo, os ACKs possuem informações adicionais que permitem que o transmissor identifique todos os segmentos que foram perdidos, este ACK é chamado de SACK (*Selective Acknowledgement*). Quando o transmissor recebe três SACKs duplicados ele procede da mesma forma que no TCP Reno, retransmitindo o primeiro segmento que foi perdido e incrementando a variável CWND a cada novo SACK duplicado recebido; entretanto, quando o transmissor vai enviar um segmento, ele utiliza as informações extras do SACK para retransmitir os outros segmentos perdidos e, somente então, volta a enviar novos segmentos. Este algoritmo permite que N segmentos perdidos sejam recuperados em um único RTT.

4.4. Notificação Explícita de Congestionamento (ECN)

Os algoritmos de controle de congestionamento apresentados até agora se baseiam no descarte de pacotes como sinalização da carga de tráfego excessiva na rede. As fontes de dados iniciam a transmissão de forma agressiva aumentando a taxa de envio exponencialmente até ocorrer descarte de um pacote. Em resposta a este descarte, as fontes TCP reduzem sua taxa de transmissão e assumem um comportamento menos agressivo aumentando gradualmente a taxa de transmissão até a identificação da perda de outro pacote.

O descarte de pacotes reduz o desempenho do TCP, além de aumentar o tráfego e o retardo de transferência na rede [51]. O mecanismo de notificação explícita de congestionamento, ou ECN (*Explicit Congestion Notification*) [51][52] é um método mais eficiente de sinalização de congestionamento. Definido pelo IETF, RFC 2481 [51], este método utiliza informações de realimentação, inseridas no cabeçalho dos pacotes, para informar às fontes de dados a iminência de congestionamento. Esta informação permite que as fontes de dados se adaptem às condições atuais da rede antes que ocorram descartes.

4.4.1. Implementação ECN no protocolo IP

No IP a sinalização ECN é feita através do campo ECN definido no cabeçalho do pacote. Este campo é composto pelos bits ECT (*ECN-Capable Transport*) e CE (*Congestion Experienced*), os quais são utilizados respectivamente para: a) indicar se a fonte de tráfego suporta o mecanismo ECN e, b) sinalizar a situação de congestionamento da rede. O campo ECN e seus bits ECT e CE são apresentados na Figura 4.1. Nesta figura é possível verificar a compatibilidade com o DiffServ, uma vez que os bits utilizados pelo ECN não conflitam com os campo DSCP.

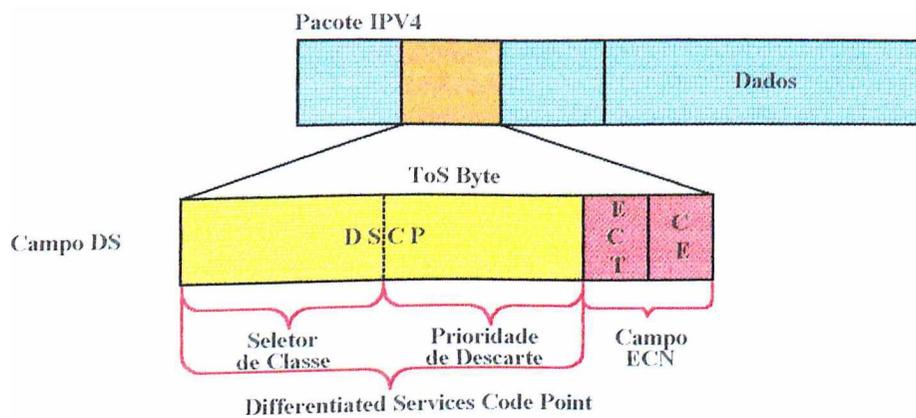


Figura 4.1 – O Campo ECN e os bits ECT e CE do protocolo IPv4.

Os roteadores implementam a técnica ECN através de mecanismos de controle ativo de congestionamento, como por exemplo os algoritmos RED [09] e RIO [53][54]. Estes mecanismos, detectam a sobrecarga do roteador antes que a fila atinja sua capacidade máxima, podendo marcar o campo CE dos pacotes de forma a sinalizar a iminência de congestionamento.

4.4.2. Implementação ECN no protocolo TCP

Para viabilizar o ECN, o protocolo TCP implementa uma fase inicial de negociação onde é determinado se tanto o transmissor quanto o receptor suportam o ECN. Após o estabelecimento da conexão a sinalização ECN é feita através de dois *flags* definidos no campo reservado do cabeçalho TCP, são eles: o ECN-*Echo* e o CWR (*Congestion Window Reduced*). Estes *flags* são apresentados na Figura 4.2.

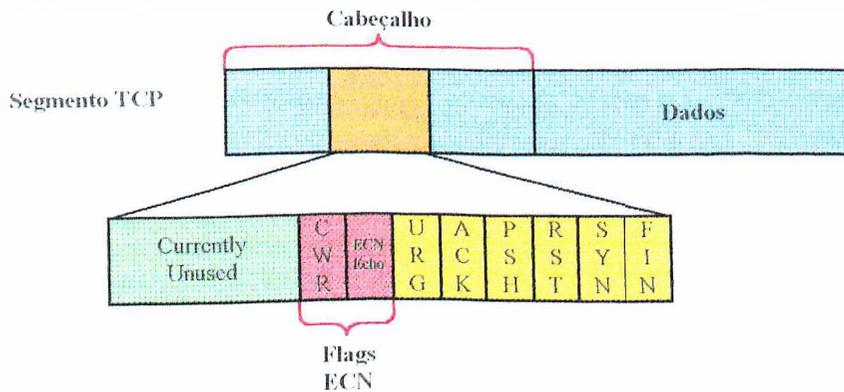


Figura 4.2 – *Flags* ECN do protocolo TCP.

Quando um pacote CE é recebido pelo destino, a informação de congestionamento é enviada à fonte através do *ECN-Echo* do ACK deste pacote. Ao receber um ACK com o *ECN-Echo* marcado, a fonte de tráfego reduz sua taxa de transmissão de segmentos de forma análoga ao comportamento apresentado na estratégia baseada em descartes. O bit CWR é utilizado pelo transmissor para informar que a janela de congestionamento foi reduzida.

4.5. Conclusões

Atualmente existe uma grande demanda por QoS. Um elemento chave à obtenção de QoS é o gerenciamento de tráfego pois permite a otimização do uso dos recursos minimizando os efeitos dos congestionamentos no desempenho das aplicações. Os recursos de gerenciamento de tráfego do protocolo IP são bastante restritos, limitando-se a descartar os pacotes quando as filas excedem sua capacidade máxima de ocupação. O descarte de pacotes é utilizado pelo TCP como sinal de congestionamento e a taxa de transmissão de dados é reduzida.

Existem dois mecanismos utilizados pelo TCP para identificar a perda de pacotes. Estes mecanismos são baseados em reconhecimento e *timeout*. O mecanismo de *timeout* é o menos

eficiente pois nele é necessário aguardar até que um temporizador expire para que o segmento seja dado como perdido. No outro mecanismo utilizado o receptor, ao identificar falha na seqüência de dados recebida, envia ACKs duplicados ao transmissor. A recepção de três ACKs duplicados sinaliza ao transmissor a perda do pacote.

Embora até o momento as estratégias utilizadas tenham funcionado de forma satisfatória, elas se baseiam em descartes de pacotes para sinalizar o congestionamento, o que reduz o desempenho do TCP, além de aumentar o tráfego e o retardo de transferência na rede. Além disto, o aumento das distância e da capacidade dos enlaces, torna o descarte de pacotes ineficiente, desperdiçando um grande volume de largura de banda em função do tempo necessário para a detecção e resposta aos descartes. Com a crescente disseminação de novas aplicações e o aumento de demanda por QoS estes mecanismos se tornam inadequados, fazendo-se necessária a implementação de soluções mais eficazes.

O mecanismo ECN, proposto em [51] e [52], desvincula o controle de congestionamento do TCP dos descartes de pacotes. Este mecanismo permite que os roteadores enviem um sinal de congestionamento diretamente às fontes de dados utilizando a marcação do cabeçalho dos pacotes como sinal de iminência de congestionamento. Esta estratégia de sinalização permite que as fontes se adaptem antes que seja necessário inferir o descarte de pacotes. Este mecanismo de sinalização é mais eficiente pois reduz as perdas amenizando seus efeitos negativos. O ECN e os benefícios que a sua utilização em conjunto com a arquitetura DiffServ oferecem à obtenção de QoS serão o objeto de estudo desta dissertação.

CAPÍTULO 5

AVALIAÇÃO DO MECANISMO ECN EM UMA REDE DIFFSERV

5.1. Introdução

A avaliação de desempenho de uma arquitetura de rede pode ser feita através de medições em um ambiente real, análise matemática, e/ou simulações. Apesar de ser o método mais direto, as medições em ambiente real possuem alto custo e demandam muito tempo. Além disto, tais medições somente podem ser implementadas em uma rede já existente. Já a análise matemática possui alta complexidade, pois requer o desenvolvimento de um modelo matemático que retrate a arquitetura avaliada. O modelo definido deverá ainda ser validado através de simulações. Considerando as observações acima, optou-se pela utilização de simulações na avaliação de desempenho que será apresentada neste capítulo.

As simulações foram implementadas utilizando-se o simulador de rede NS versão 2.1b5 [55], em conjunto com a ferramenta *DiffServ package for ns-2* [56] desenvolvida por Sean Murphy. O núcleo do simulador foi mantido, sendo que algumas adaptações foram desenvolvidas a fim de implementar o suporte ao mecanismo ECN. A confiabilidade do simulador utilizado é comprovada por sua larga utilização em estudos e pesquisas

desenvolvidos pela comunidade científica responsável pela criação e desenvolvimento dos protocolos utilizados na Internet.

No estudo apresentado neste capítulo serão avaliados os efeitos da utilização do mecanismo ECN no nível de serviço oferecido por uma rede DiffServ. O modelo de simulação será definido e as métricas utilizadas serão apresentadas. Os resultados das simulações implementadas serão analisados, permitindo uma avaliação comparativa, contemplando cenários variados quanto à utilização do ECN, dimensionamento da rede e número de fluxos ativos. O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho final e a QoS oferecida por um ambiente que agregue a tecnologia DiffServ e o mecanismo ECN. Isto é feito através de um comparativo entre o modelo que implemente ECN e o modelo atualmente utilizado. Através deste estudo espera-se identificar o ambiente que proporciona melhor desempenho e QoS.

A abordagem utilizada será feita através de duas diferentes perspectivas. De um lado a arquitetura da rede DiffServ com seus mecanismos de garantias de nível de serviço, diferenciação entre classes e níveis de prioridade de descarte. Por outro lado, a arquitetura TCP/IP e a modificação proposta às técnicas de controle de congestionamento do TCP representada pelo mecanismo ECN.

5.2. Topologia da Rede e Parâmetros de Simulação

O modelo de simulação utilizado é apresentado na Figura 5.1. Esta topologia é composta por N fontes de tráfego que enviam dados através de um enlace lógico TCP utilizando uma mesma classe de serviço AF implementada entre os roteadores R1 e R2.

A definição dos parâmetros de simulação seguiram os seguintes critérios:

- 1) Todas as fontes TCP são idênticas, implementam o algoritmo de controle de congestionamento RENO e geram tráfego continuamente, desde que permitido pela janela de congestionamento.
- 2) O tráfego gerado é unidirecional, isto é, somente as fontes enviam dados sendo que apenas ACKs trafegam na direção oposta.
- 3) Cada uma das fontes começa a transmitir em instantes distintos, sendo iniciadas em intervalos de 5 s de simulação.
- 4) O tamanho máximo da janela de congestionamento foi definido de forma a permitir o preenchimento de toda a extensão do enlace lógico TCP, não restringindo a vazão.

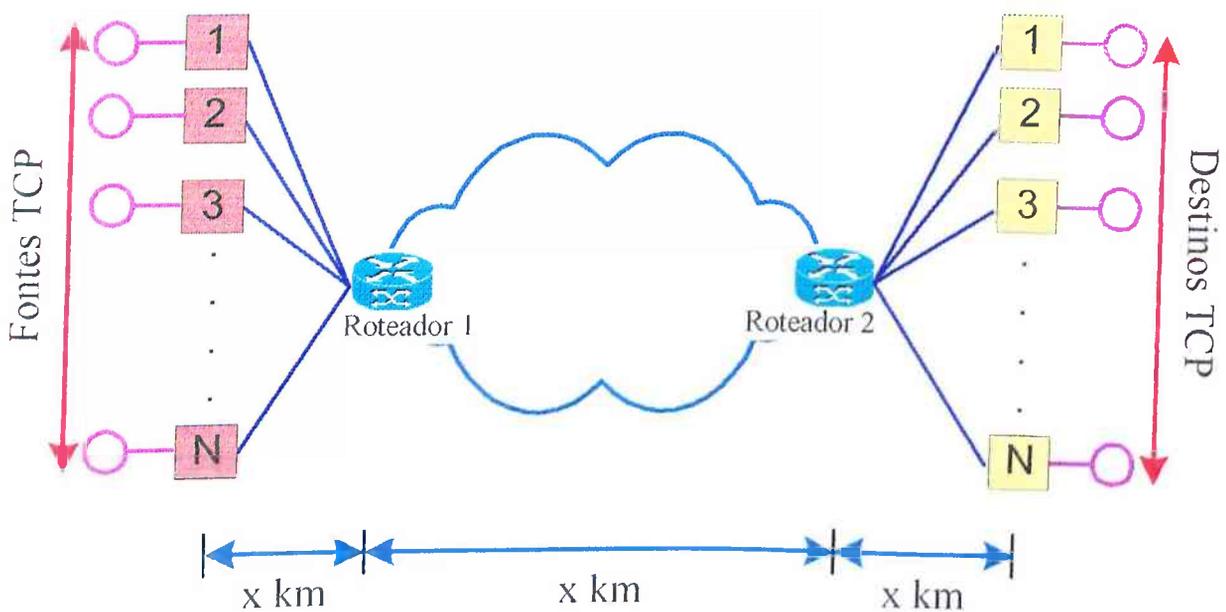


Figura 5.1 – Modelo de Simulação.

- 5) Todas as fontes de tráfego estão submetidas a um RTT de 30 ms.
- 6) Tanto os enlaces de acesso aos roteadores R1 e R2 quanto os enlaces da rede núcleo possuem largura de banda igual a 1 Mbps.
- 7) Foram definidos contratos de nível de serviço idênticos para todas as fontes, sendo que o percentual de largura de banda reservado foi definido de forma a obter-se, um total de reserva que varia de 40% até 120% da capacidade de transmissão. Esta variação permitiu a avaliação de situações tanto de excesso de disponibilidade de recursos quanto de subdimensionamento da rede.
- 8) Os parâmetros de descarte do algoritmo RIO para pacotes em conformidade (IN) foram definidos como: $min_in = 12$, $max_in = 25$, $P_{max_in} = 0,1$, conforme recomendações apresentadas em [10].
- 9) Os parâmetros dos pacotes não em conformidade (OUT) foram definidos como: $min_out = 6$, $max_out = 12$, $P_{max_out} = 0,1$, conforme recomendações apresentadas em [10].
- 10) Parâmetros que não tenham sido citados nesta seção foram mantidos em conformidade com os padrões utilizados pelo simulador de rede NS versão 2.1b5 [55], e pela ferramenta *DiffServ package for ns-2* [56].

5.3. Métricas

Para avaliar o desempenho e a qualidade de serviço do modelo DiffServ mediante a utilização do mecanismo ECN foram analisados: a) o nível de serviço obtido; b) a eficiência do enlace; c) a justiça no compartilhamento da largura de banda disponível; d) as taxas de descarte de pacotes; e) a taxa de *timeout*; e f) a taxa de retransmissão de pacotes.

O nível de serviço SL_i , obtido pela fonte i , é calculado pela razão entre a vazão alcançada pela fonte i e a largura de banda contratada no SLA. Estes parâmetros estão representados respectivamente por x_i e LBC_i na equação 5.1 [57].

$$SL_i = \frac{x_i}{LBC_i} \quad (5.1)$$

A eficiência do enlace E , é definida pela equação 5.2 onde N é o número de fontes de dados ativas, x_i é a vazão alcançada pela fonte i e C é a capacidade de transmissão do enlace lógico [58].

$$E = \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)}{C} \quad (5.2)$$

A justiça no compartilhamento da largura de banda F , pode ser calculada por meio da equação 5.3, sendo que, o valor de x_i irá variar de acordo com o cenário de simulação. Em uma rede bem dimensionada, onde a largura de banda total reservada é inferior à capacidade de transmissão, o valor de x_i irá corresponder à largura de banda excedente obtida pela fonte i . Em uma rede mal dimensionada, onde a largura de banda total contratada excede a capacidade de transmissão, x_i irá corresponder à degradação de desempenho da fonte i , em relação ao previamente estipulado pelo seu SLA. Finalmente, caso a largura de banda total contratada seja equivalente à capacidade de transmissão, o valor de x_i irá corresponder à vazão efetivamente alcançada pela fonte i [58].

$$F = \frac{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2}{N \times \left(\sum_{i=1}^N x_i^2\right)} \quad (5.3)$$

As taxas de descarte de pacotes AF, IN e OUT são definidas respectivamente pela equações 5.4, 5.5 e 5.6, onde $AF_{descartados}$, $IN_{descartados}$ e $OUT_{descartados}$ correspondem à quantidade de pacotes descartados e $AF_{enviados}$, $IN_{enviados}$ e $OUT_{enviados}$ representam o número de pacotes enviados [56].

$$D_{AF} = \frac{AF_{descartados}}{AF_{enviados}} \quad (5.4)$$

$$D_{IN} = \frac{IN_{descartados}}{IN_{enviados}} \quad (5.5)$$

$$D_{OUT} = \frac{OUT_{descartados}}{OUT_{enviados}} \quad (5.6)$$

A taxa de *timeout* (T) é definida pela razão entre a quantidade de pacotes que sofreram *timeout* ($AF_{timeout}$) e o número de pacotes enviados ($AF_{enviados}$) e pode ser representado pela equação 5.7 [56].

$$T = \frac{AF_{timeout}}{AF_{enviados}} \quad (5.7)$$

A taxa de retransmissão de pacotes (R) é calculada pela equação 5.8, onde $AF_{retransmitidos}$ representa o quantidade de pacotes retransmitidos e $AF_{enviados}$ representa o número de pacotes enviados [56].

$$R = \frac{AF_{enviados}}{AF_{retransmitidos}} \quad (5.8)$$

5.4. Avaliação de Desempenho e Análise Comparativa

A seguir serão apresentados e analisados os resultados obtidos nas várias simulações implementadas. Primeiramente serão avaliados os efeitos da utilização do ECN em um ambiente onde a soma das parcelas de largura de banda contratada é inferior à capacidade de transmissão. Em seguida será analisada a situação oposta, onde a soma da largura de banda contratada excede a capacidade de transmissão do enlace lógico. Finalmente, as simulações realizadas serão estendidas de forma a abranger intervalos variados de largura de banda contratada e número de fluxos ativos, o que irá garantir maior abrangência e escalabilidade da avaliação dos resultados.

5.4.1. Rede Bem Dimensionada

O objetivo do estudo apresentado nesta seção é avaliar o impacto da utilização do ECN no desempenho de uma rede DiffServ em um cenário onde a largura de banda contratada é inferior à capacidade de transmissão. Foram utilizadas 10 fontes de tráfego, sendo que cada fonte possui 40 kbps de largura de banda contratada no SLA. Isto representa uma reserva total de 40% da capacidade de transmissão, garantindo a existência de largura de banda excedente para ser compartilhada entre as fontes de tráfego. Os resultados obtidos nos últimos 40 s de simulação são apresentados na Tabela 5.1. Foram calculados o nível de serviço obtido por cada uma das fontes, a eficiência total do enlace e o índice de justiça no compartilhamento da largura de banda excedente. Como o objetivo principal é avaliar a influência do ECN no desempenho da rede DiffServ, são avaliados os resultados referentes à simulações feitas com e sem o uso deste mecanismo.

TABELA 5.1 – NÍVEL DE SERVIÇO EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA

Rede Bem Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		Tipo do Tráfego	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem	Com		Sem	Com
	ECN	ECN		ECN	ECN
40	305%	252%	TCP	122	101
40	232%	252%	TCP	93	101
40	227%	255%	TCP	91	102
40	290%	250%	TCP	116	100
40	197%	247%	TCP	79	99
40	220%	257%	TCP	88	103
40	247%	245%	TCP	99	98
40	225%	242%	TCP	90	97
40	292%	220%	TCP	117	88
40	220%	267%	TCP	88	107
Eficiência	98%	100%		983	996
Justiça	94%	99%		94%	99%

O comportamento das fontes quando não é utilizado o ECN é apresentado pelas colunas 2 e 5 da Tabela 5.1, enquanto que as colunas 3 e 6 correspondem aos resultados obtidos quando o ECN foi utilizado. Pode-se observar que, nas duas situações, todas as fontes alcançaram a largura de banda contratada, além de usufruírem de uma parcela da largura de banda excedente. Este comportamento mostra que os mecanismos utilizados pelo DiffServ foram eficientes nas duas situações simuladas. Também pode ser verificado que, a simulação que utilizou ECN, conseguiu um melhor aproveitamento da capacidade de transmissão, garantindo assim uma melhor vazão para a maioria das fontes. Esta melhoria, apesar de pouco

significativa em termos percentuais, apenas 2%, representa um aumento de 13 kbps na vazão, e torna-se mais expressiva se considerarmos o alto custo mensal cobrado por uma operadora de telecomunicações por um enlace dedicado de comunicação de dados.

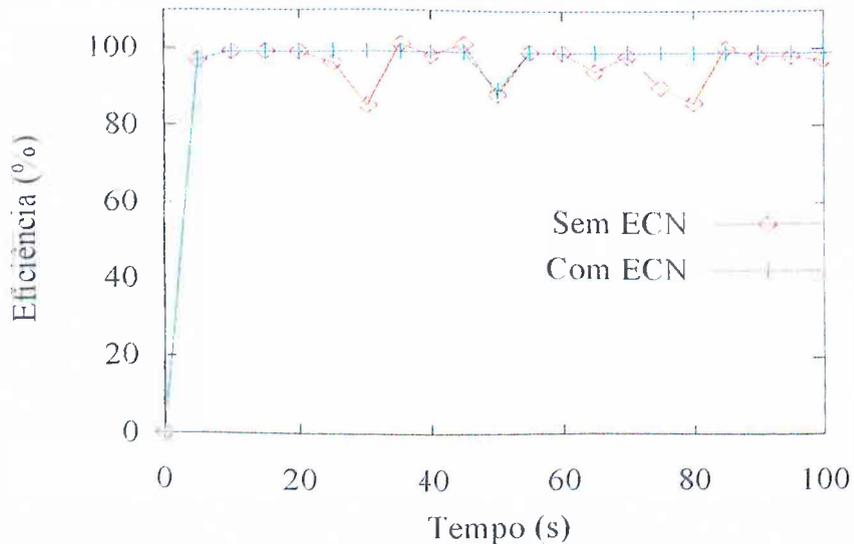


Figura 5.2 – Influência do ECN na Eficiência do Enlace de uma Rede Bem Dimensionada.

O gráfico da Figura 5.2 mostra o comparativo da eficiência do enlace, com e sem o uso do mecanismo ECN, durante 100 s de simulação. Este gráfico reforça as considerações feitas pois, demonstra que o aumento de eficiência obtido com o ECN se estende por todo o período de simulação.

Outro fator importante a ser avaliado é a taxa de perdas de pacotes. A Tabela 5.2 apresenta os principais indicadores de perdas. O resultado da simulação feita sem o uso do ECN é mostrado na coluna 2 enquanto a coluna 3 apresenta o resultado da simulação que utilizou o ECN. A análise desta tabela permite constatar que o mecanismo ECN contribui para a minimização das perdas, reduzindo de forma significativa as taxas de descarte, *timeouts* e

retransmissões. Isto acontece porque, com o uso do ECN, os descartes desnecessários são evitados, e o acionamento dos mecanismos de prevenção de congestionamento são desvinculados do temporizador do protocolo TCP, o que reduz as necessidades de retransmissão e oferece respostas mais rápidas a situações de congestionamento. Este comportamento torna esta arquitetura mais adequada para aplicações de missão crítica, cujo volume de tráfego tem aumentado sensivelmente.

TABELA 5.2 – TAXAS DE PERDAS EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.

	Rede Bem Dimensionada	
	Sem ECN	Com ECN
Taxa de Descarte AF	6,7%	< 0,1%
Taxa de Descarte IN	< 0,1%	< 0,1%
Taxa de Descarte OUT	8,5%	< 0,1%
Taxa de Timeout	1,6%	< 0,1%
Taxa de Retransmissão	8,3%	< 0,1%

A evolução dos resultados apresentados na Tabela 5.2, durante 100 s de simulação são ilustrados pelos gráficos das Figuras 5.3, 5.4 e 5.5. As Figuras 5.3 a), b) e c) retratam as taxas de descartes de pacotes nas simulações. Os gráficos apresentados mostram um comparativo dos resultados obtidos com e sem o uso do ECN. Em a) pode-se observar as taxas de descarte de pacotes AF; em b) apresenta-se as taxas de descarte de pacotes IN e em c) mostra-se as taxas de descarte de pacotes OUT. Pode-se observar que, os ganhos obtidos são provenientes da minimização dos descartes de pacotes OUT. Isto ocorre porque, como a largura de banda total contratada é inferior à capacidade de transmissão, é possível encaminhar praticamente todos os pacotes em conformidade com o SLA independentemente do uso ou não do ECN.

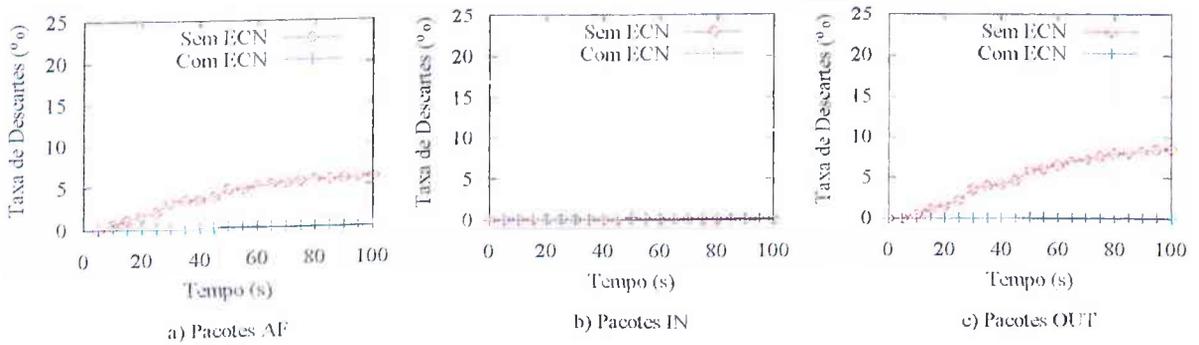


Figura 5.3 – Taxas de Descarte de Pacotes.

O gráfico da Figura 5.4 apresenta o comparativo da evolução da taxa de *timeout* para as simulações com e sem ECN. Pode-se verificar que a taxa de *timeouts* resultantes da simulação que não utilizou ECN é superior durante todo o período observado. Esta maior quantidade de *timeouts* resulta em desperdício de largura de banda e variações no retardo de transferência percebido pelos sistemas finais.

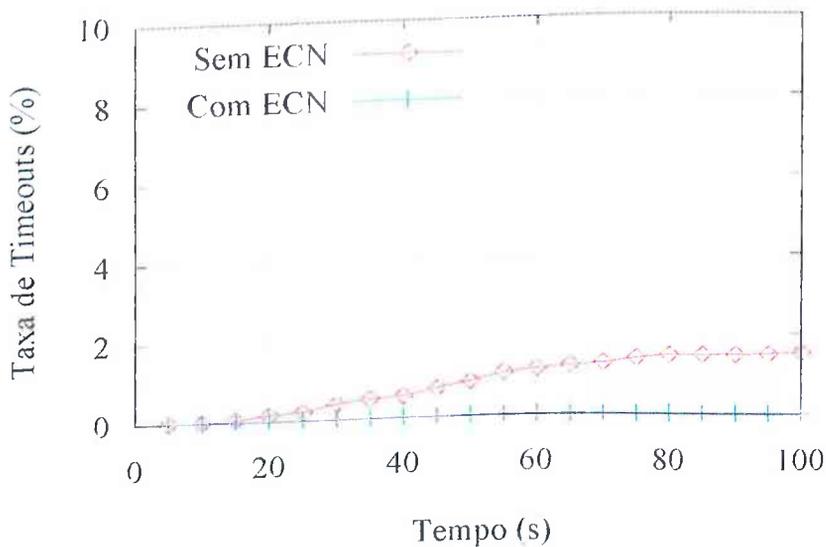


Figura 5.4 – Taxas de *Timeout*.

A Figura 5.5 apresenta o gráfico comparativo da evolução das taxas de retransmissão resultantes das simulações com e sem ECN. Os resultados obtidos são diretamente proporcionais aos resultados apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4, já que os pacotes retransmitidos são exatamente aqueles que foram descartados ou sofreram *timeout*.

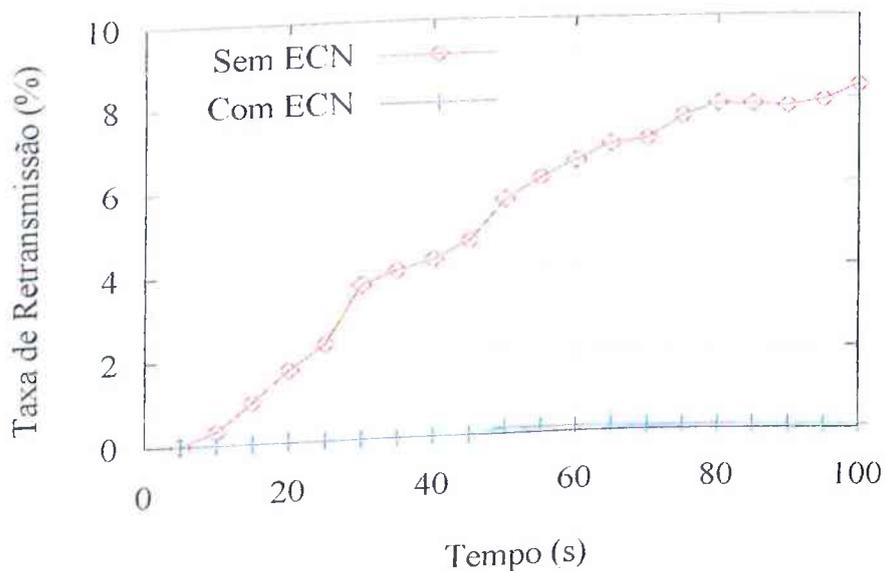


Figura 5.5 – Taxas de Retransmissão das Simulações.

Como nos gráficos apresentados anteriormente, o gráfico da Figura 5.5 também demonstra a superioridade do mecanismo ECN, já que este apresentou menor quantidade de retransmissões e conseqüente melhoria de desempenho, menor variação do retardo percebido pelos sistemas finais e menor desperdício de largura de banda.

5.4.2. Rede Mal Dimensionada

Os resultados apresentados até agora mostraram o impacto da utilização do ECN no desempenho de uma rede DiffServ em um cenário onde a rede foi bem dimensionada. Serão

apresentados agora os resultados obtidos em uma rede mal dimensionada, onde a largura de banda contratada é superior à capacidade de transmissão. Novamente foram utilizadas 10 fontes de tráfego; entretanto, nestas simulações, cada fonte possui 120 kbps de largura de banda garantida pelo SLA, o que representa uma reserva total de 120% da capacidade de transmissão. Como não existe largura de banda excedente para ser compartilhada, o comparativo entre as arquiteturas avaliadas será feito em função da degradação de desempenho das fontes.

A Tabela 5.3 apresenta o nível de serviço obtido por cada uma das fontes, a eficiência total do enlace e o índice de justiça na degradação de desempenho das simulações. Os resultados apresentados nesta tabela se referem aos últimos 40 s de simulação. Observando as colunas 2 e 5 desta tabela é possível verificar o comportamento das fontes de tráfego quando o ECN não foi utilizado. Já as colunas 3 e 6 apresentam os resultados das simulações que utilizaram o ECN.

Os resultados apresentados mostram que em nenhuma das situações foi possível às fontes alcançar a largura de banda contratada. Este comportamento já era esperado, uma vez que o total de largura de banda reservado era superior à capacidade de transmissão. Também pode ser verificado que, apesar de ter alcançado um menor índice de justiça no compartilhamento de largura de banda, o uso do ECN garantiu melhor aproveitamento do enlace, oferecendo uma melhor vazão para a maioria das fontes. Neste cenário esta melhoria é mais significativa, representando uma melhoria de 4%, o que corresponde a 28 kbps.

TABELA 5.3 – NÍVEL DE SERVIÇO EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.

Rede Mal Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		Tipo do Tráfego	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem	Com		Sem	Com
	ECN	ECN		ECN	ECN
120	85%	94%	TCP	103	113
120	83%	70%	TCP	100	84
120	82%	74%	TCP	99	89
120	79%	74%	TCP	95	89
120	75%	95%	TCP	91	115
120	84%	81%	TCP	101	98
120	81%	83%	TCP	98	100
120	72%	88%	TCP	87	106
120	81%	80%	TCP	98	96
120	79%	87%	TCP	95	105
Eficiência	96%	100%		967	995
Justiça	96%	81%		96%	81%

O comparativo da eficiência do enlace alcançada, com e sem o uso do ECN, durante 100 s de simulação pode ser visto no gráfico da Figura 5.6. Novamente observa-se que o

comportamento apresentado pelos resultados de simulação para a rede bem dimensionada se repete, e a superioridade do ECN se estende por todo o período de simulação.

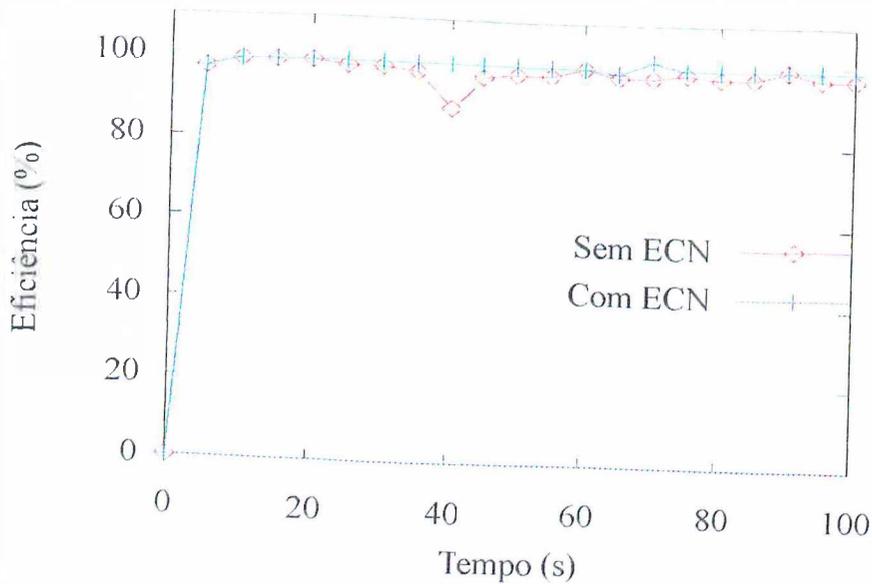


Figura 5.6 – Influência do ECN na Eficiência do Enlace de uma Rede Mal Dimensionada.

Avalia-se agora os indicadores de perdas de pacotes. A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos nas simulações. As colunas 2 e 3 apresentam respectivamente os resultados de simulação com e sem o uso do ECN. Observando estes resultados é possível constatar que, assim como na rede bem dimensionada, o mecanismo ECN contribui para com a minimização das perdas, reduzindo as taxas de descarte, *timeouts* e retransmissões. Isto garante portanto os mesmos benefícios citados na seção anterior, oferecendo um ambiente mais adequado às novas aplicações que vêm se disseminando.

TABELA 5.4 – TAXAS DE PERDAS EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.

	Rede Mal Dimensionada	
	Sem ECN	Com ECN
Taxa de Descarte AF	6,3%	< 0,1%
Taxa de Descarte IN	0,5%	< 0,1%
Taxa de Descarte OUT	22%	< 0,1%
Taxa de Timeout	2,2%	< 0,1%
Taxa de Retransmissão	8,5%	< 0,1%

Os gráficos das Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostram a evolução dos resultados apresentados na Tabela 5.4, durante 100 s de simulação. As Figuras 5.7 a), b) e c) ilustram as taxas de descarte de pacotes nas simulações, apresentando os gráficos comparativos dos resultados obtidos com e sem o uso do ECN. Pode-se observar em a) as taxas de descarte de pacotes AF; em b) as taxas de descarte de pacotes IN e em c) as taxas de descarte de pacotes OUT. Novamente, como na simulação feita para a rede mal dimensionada, os ganhos obtidos são provenientes principalmente da minimização dos descartes de pacotes OUT; entretanto, pode-se notar que, neste caso, houve também um crescimento na diferença entre as taxas de descarte de pacotes IN das simulações feitas com e sem o uso do ECN. Isto ocorre porque, quando o ECN não é utilizado, ocorrem descartes de pacotes IN para controlar situações de congestionamento, enquanto que com a utilização do ECN, manteve-se o mesmo comportamento apresentado em uma rede bem dimensionada, conseguindo assim controlar as situações de congestionamentos sem que fosse necessário o descarte de pacotes IN. Como não

foi necessário incorrer a descartes e o mecanismo de prevenção de congestionamento foi desvinculado do temporizador do protocolo TCP, foi possível oferecer uma resposta mais rápida aos congestionamentos, garantindo uma maior estabilidade do sistema e resultando em melhoria de eficiência conforme demonstram os resultados da Tabela 5.3.

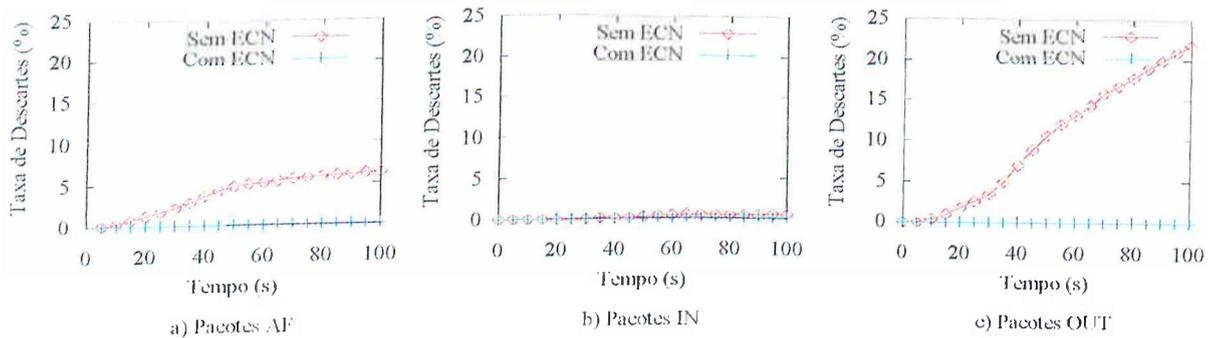


Figura 5.7 – Taxas de Descarte de Pacotes.

A Figura 5.8 apresenta o gráfico comparativo da evolução da taxa de *timeout* para as simulações feitas com e sem o uso do ECN em uma rede mal dimensionada. Também nesta simulação, o comportamento da rede bem dimensionada se repete e a taxa de *timeouts* da simulação que não utilizou ECN é maior durante todo o período observado, resultando em desperdício de largura de banda e variações de retardo de transferência percebido pelos sistemas finais.

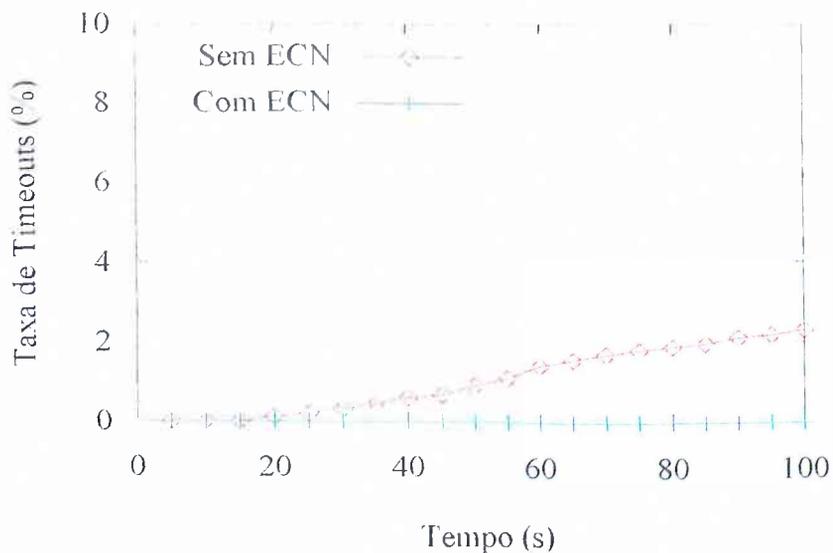


Figura 5.8 – Taxas de *Timeout*.

O gráfico comparativo da evolução das taxas de retransmissão em uma rede mal dimensionada é apresentado na Figura 5.9. Este gráfico também demonstra a superioridade do mecanismo ECN, que apresentou menor quantidade de retransmissões, resultando em um melhor desempenho, menor variação do retardo e menor desperdício de largura de banda.

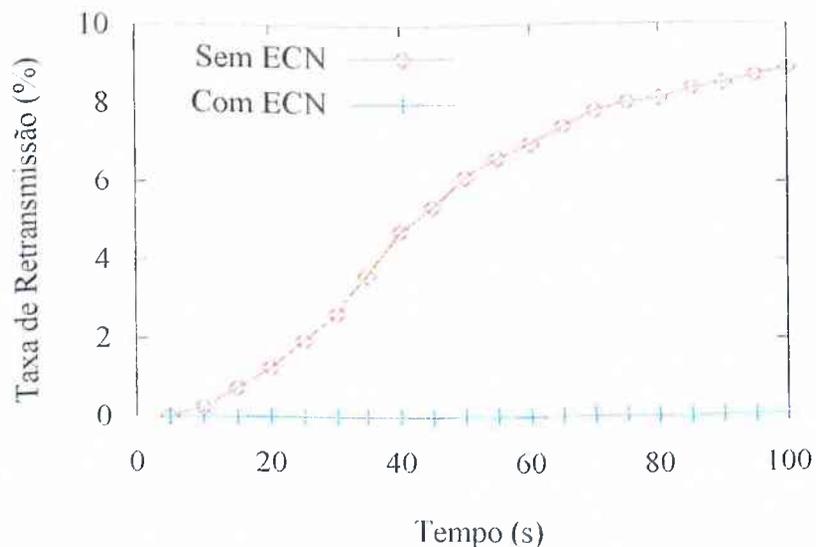


Figura 5.9 – Taxas de Retransmissão.

5.4.3. Influência do Dimensionamento da Rede

O objetivo desta seção é estender os resultados obtidos nas simulações anteriores a um intervalo mais amplo de condições de dimensionamento da rede. Foram implementadas simulações variando-se o percentual de reserva de largura de banda de 20% a 140% da capacidade total de transmissão. Os resultados das simulações são apresentados pelos gráficos das Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 que serão analisados a seguir.

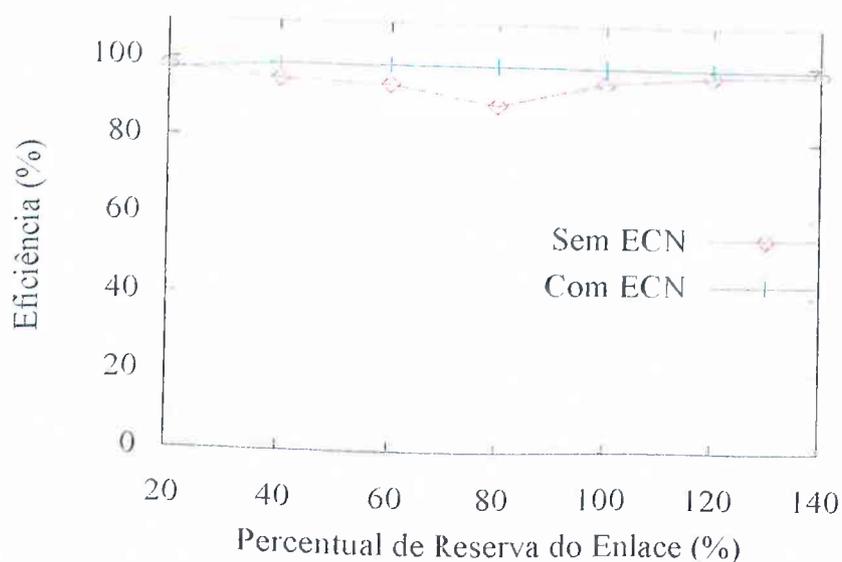


Figura 5.10 – Influência do Percentual de Reserva do Enlace na Eficiência.

O gráfico da Figura 5.10 apresenta a eficiência alcançada em cada uma das condições de dimensionamento simuladas. Este gráfico demonstra que a utilização do ECN garantiu um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis em todas as simulações executadas, sendo que seus benefícios são melhor evidenciados quando a largura de banda total reservada pelo SLA atinge valores próximos, mas não excedentes à capacidade de transmissão. Isto se deve

ao fato de que, quando a reserva de largura de banda se aproxima da capacidade de transmissão, a competição entre as fontes pelos recursos excedentes aumenta. Esta situação é melhor gerenciada pelo ECN que não necessita incorrer a descartes para controlar a competição e consegue portanto manter estável o seu nível de desempenho. Quando o ECN não é utilizado, esta competição é gerenciada através dos descartes, os quais geram desperdícios e atrasos que resultam em uma degradação do nível de eficiência.

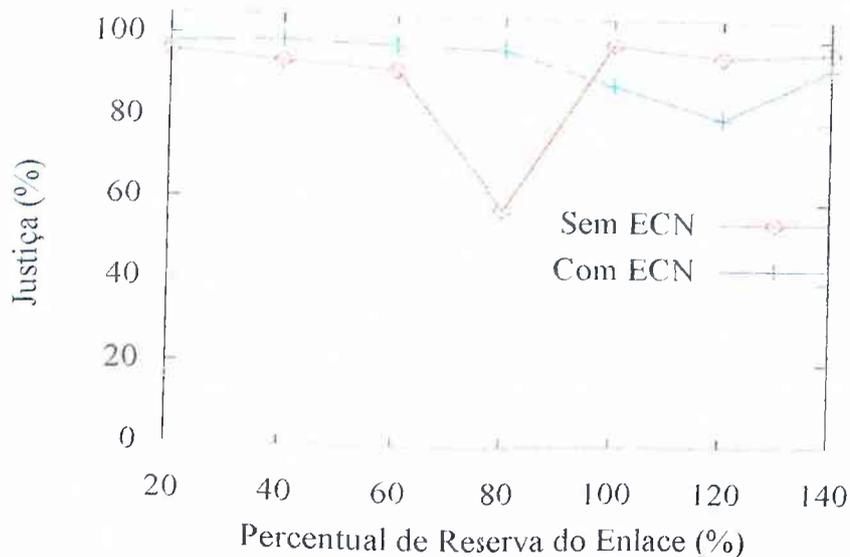


Figura 5.11 – Influência do Percentual de Reserva do Enlace na Justiça do Compartilhamento de Largura de Banda.

O índice de justiça no compartilhamento de largura de banda, em função da evolução do percentual de reserva de transmissão, é mostrado pelo gráfico da Figura 5.11. Este gráfico demonstra que, em uma rede bem dimensionada, onde a largura de banda total reservada é inferior à capacidade de transmissão, o uso do ECN garante um alto nível de justiça no compartilhamento de largura de banda, obtendo resultados superiores que são mais

evidenciados quando o percentual de reserva se aproxima, mas não ultrapassa a capacidade total de transmissão. Já em uma rede mal dimensionada, apesar de obter índices relativamente altos, o ECN alcança resultados inferiores aos obtidos nas simulações que não utilizaram o ECN.

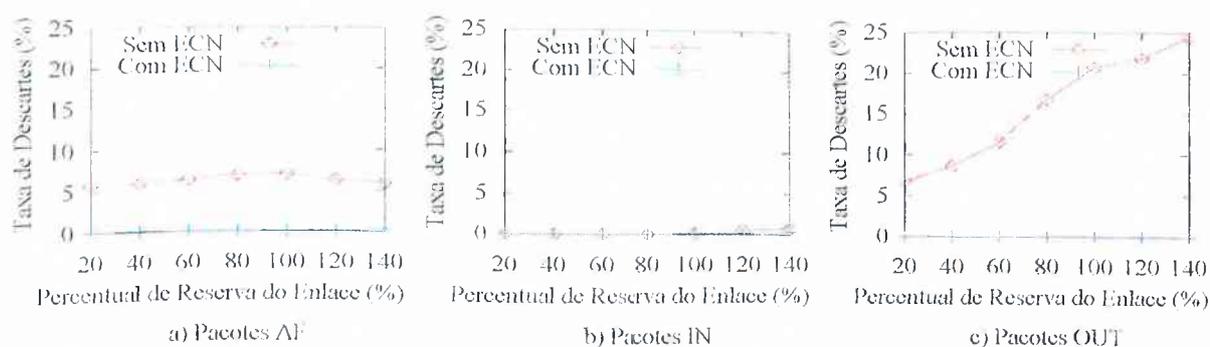


Figura 5.12 – Influência do Percentual de Reserva do Enlace nas Taxas de Descarte de Pacotes das Simulações.

Os gráficos da Figura 5.12 a), b) e c) apresentam o crescimento da taxa de descartes de pacotes à medida em que foi aumentado o percentual de reserva do enlace. Os resultados obtidos demonstram que o mecanismo ECN foi eficiente, conseguindo manter a quantidade de descartes quase nula em todas as simulações, mesmo quando o percentual de reserva excede a capacidade de transmissão. As simulações que não utilizaram o ECN tiveram uma taxa de descartes muito maior, ocorrendo inclusive um aumento desta taxa à medida que o percentual de reserva do enlace era incrementado. Este mesmo comportamento pode ser observado para as taxas de *timeout* e retransmissão de pacotes apresentadas a seguir nas Figura 5.13 a) e b). As diferenças apresentadas nas taxas de perda das simulações com e sem ECN são responsáveis pela melhoria eficiência obtido com a utilização do ECN apresentados anteriormente.

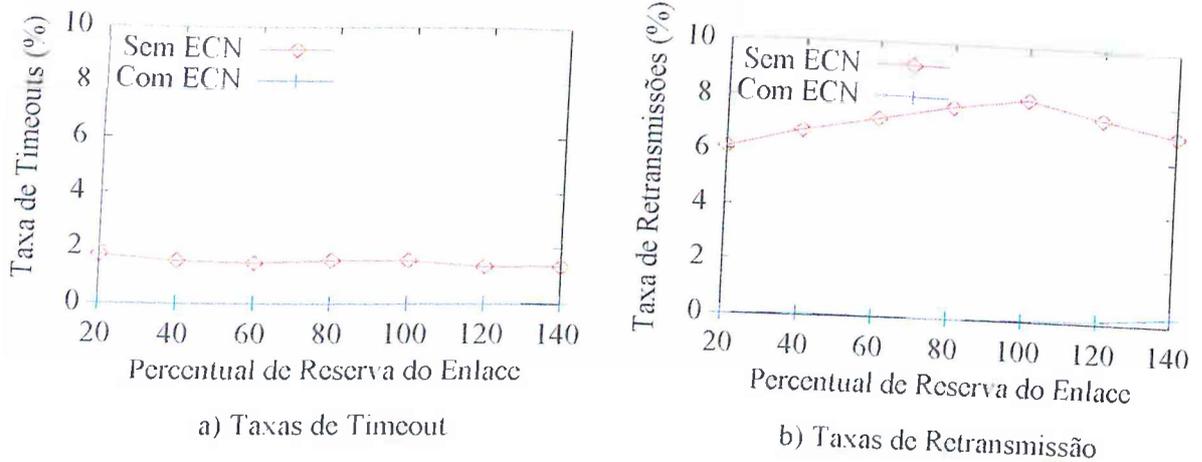


Figura 5.13 – Influência do Percentual de Reserva do Enlace nas Taxas de Retransmissão e *Timeout* de Pacotes.

5.4.4. Influência do Número de Fluxos Ativos

Para garantir a escalabilidade dos resultados, serão estudados nesta seção os resultados de simulações feitas com a utilização de diferentes quantidades de fontes ativas. Os cenários de simulação retratam duas situações distintas de dimensionamento. Em um ambiente de rede a soma da largura de banda contratada corresponde a 40% da capacidade de transmissão e em outro o percentual contratado é de 120%, excedendo o total de largura de banda disponível. Os resultados obtidos demonstram que os ganhos de desempenho resultantes do uso do ECN são mantidos, independentemente do número de fontes utilizadas.

Os gráficos da Figura 5.14 a) e b) ilustram a eficiência do enlace tanto para uma rede bem dimensionada quanto para a rede mal dimensionada. Pode-se verificar que, o uso do ECN garantiu um melhor desempenho, oferecendo níveis mais altos de eficiência para todo o escopo de quantidade de fluxos ativos observado.

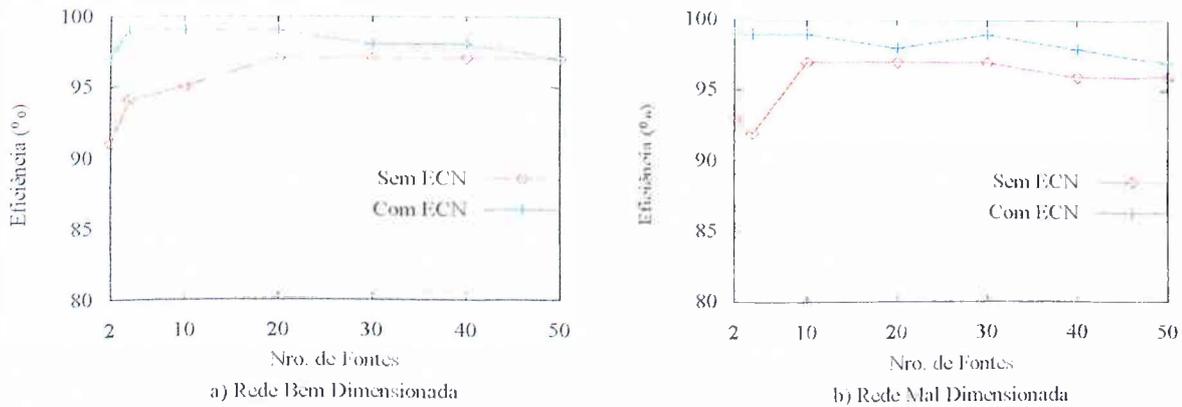


Figura 5.14 – Influência do Número de Fontes Ativas na melhoria de Eficiência do Enlace obtida com o uso do ECN para dois cenários de condições de dimensionamento.

Um comparativo do nível de justiça no compartilhamento de largura de banda das simulações pode ser observado nos gráficos a) e b) da Figura 5.15. Estes gráficos validam os resultados obtidos na seção anterior, apresentando um melhor desempenho do ECN no cenário não congestionado, onde o aumento do número de fontes degrada de forma mais agressiva o índice de justiça no compartilhamento de largura de banda da simulação que não utiliza ECN. Já no cenário em que a rede foi mal dimensionada, ocorre a situação oposta, e este índice é mais agressivamente degradado pelo aumento no número de fontes na simulação que utiliza ECN.

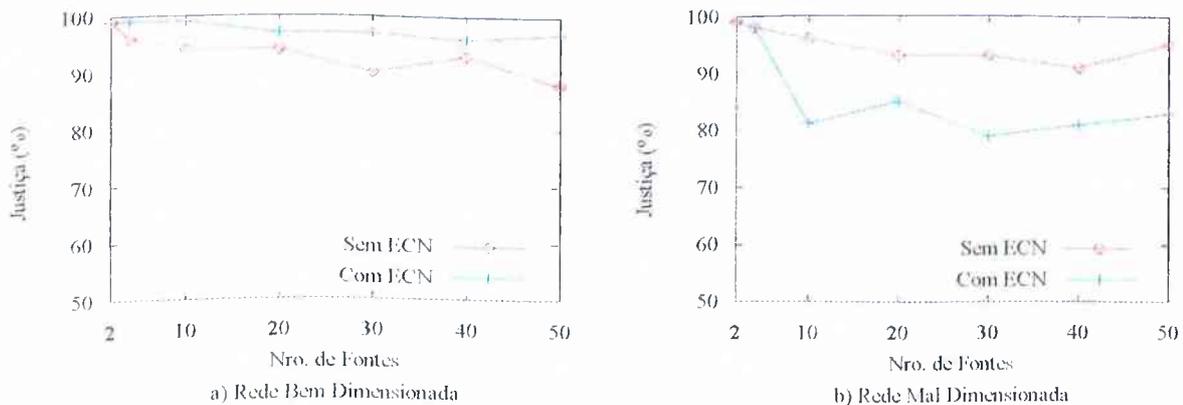


Figura 5.15 – Influência do Número de Fontes Ativas na Justiça do Compartilhamento de Largura de Banda obtida com e sem o uso do ECN para dois cenários de dimensionamento.

Os gráficos a), b), e c) da Figura 5.16 apresentam um comparativo das taxas de descartes das simulações feitas com e sem o uso do ECN em uma rede mal dimensionada para diferentes quantidades de fontes de tráfego ativas. É possível observar que, o mecanismo ECN foi eficiente na prevenção de descartes, independentemente do número de fontes ativas. Estes gráficos também indicam que, a partir de um número máximo de 10 fontes ativas a taxa de descartes da simulação que não utilizou o ECN permaneceu estável, mas ainda assim o valor alcançado é muito superior ao apresentado pela simulação que utilizou o ECN, o que resulta portanto em um desempenho inferior.

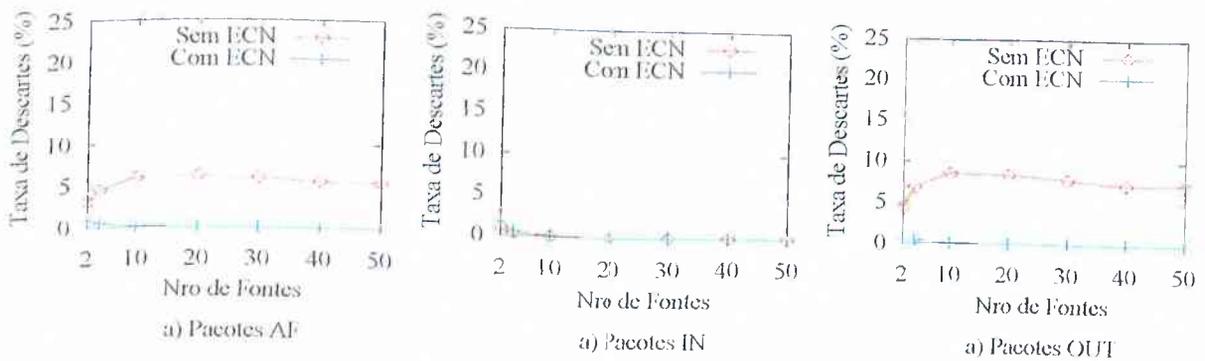


Figura 5.16 – Influência do Número de Fontes Ativas nas Taxas de Descarte de Pacotes em uma Rede Bem Dimensionada.

O comparativo das taxas de descartes das simulações feitas em uma rede mal dimensionada é apresentado pelos gráficos da Figura 5.17. O comportamento apresentado para as diferentes quantidades de fontes de tráfego ativas é análogo ao da rede bem dimensionada, comprovando a eficiência do mecanismo ECN para este cenário de simulação. Também é possível observar que neste cenário, a taxa de descartes quando o ECN não é utilizado é muito alta, o que representa aumento do retardo e do *jitter* dos pacotes, além de desperdícios de processamento, largura de banda e ocupação das filas.

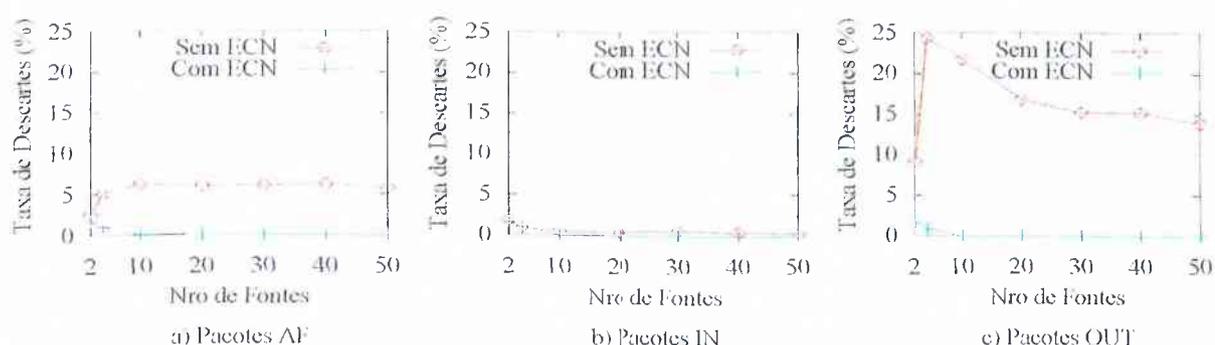


Figura 5.17 – Influência do Número de Fontes Ativas nas Taxas de Descarte de Pacotes em uma Rede Mal Dimensionada.

Os gráficos a), b) e c) da Figura 5.18 apresentam o comportamento das taxas de *timeout* das simulações à medida em que foi aumentada quantidade de fluxos ativos. São apresentados resultados obtidos para dois cenários de dimensionamento. É possível observar que, em ambos os cenários, a taxa de *timeout* da simulação que utiliza ECN é quase nula, enquanto que a simulação que não utiliza ECN apresenta uma taxa de *timeout* bem maior e que se manteve estável com o aumento no número de fontes.

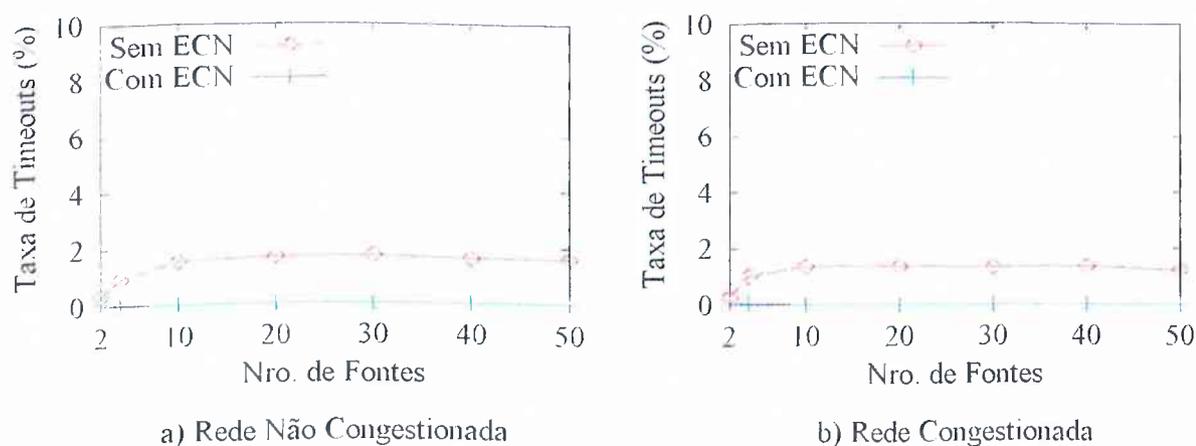


Figura 5.18 – Influência do Número de Fontes Ativas nas Taxas de *Timeout* para dois cenários de condições de dimensionamento.

Como os pacotes retransmitidos são exatamente aqueles descartados ou que sofreram *timeout*, as taxas de retransmissão de pacotes, apresentadas a seguir nas Figura 5.19 a) e b), refletem os comportamentos observados anteriormente na análise das Figuras 5.17 e 5.18. Este gráfico também retrata a superioridade do ECN, que apresenta menor quantidade de retransmissões e acarreta portanto, melhoria de desempenho e redução de desperdícios de largura de banda.

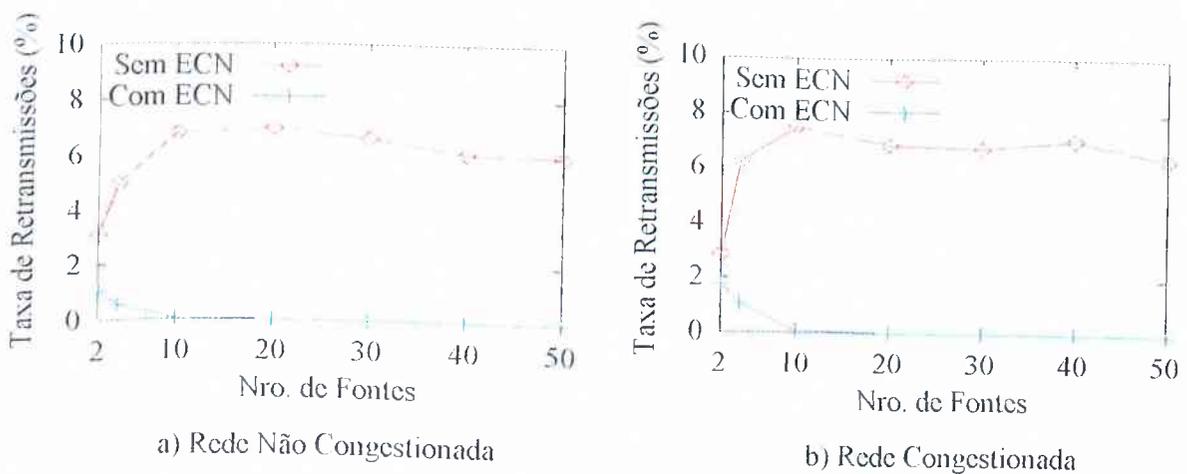


Figura 5.19 – Influência do Número de Fontes Ativas nas Taxas de Retransmissão de Pacotes para dois cenários de condições de dimensionamento.

5.5. Conclusões

Neste capítulo foram avaliados os resultados de simulações implementadas para avaliar os efeitos da utilização do ECN no nível de serviço oferecido por uma rede DiffServ. Foram estudados a eficiência do enlace, a justiça no compartilhamento da largura de banda e as taxas de descarte, *timeout* e retransmissão de pacotes. As simulações feitas foram estendidas a um vasto intervalo de cenários de dimensionamento e diferentes quantidades de fluxos ativos e os resultados obtidos foram analisados através de um comparativo do modelo que implementa

ECN com o modelo atualmente utilizado. Esta análise comparativa permitiu um melhor entendimento da eficiência do uso combinado das duas técnicas abordadas.

Os resultados apresentados mostraram que os seguintes benefícios são oferecidos pelo modelo que implementa ECN: a) aumento da eficiência do enlace em todos os cenários de dimensionamento da rede, independentemente do número de fluxos ativos; b) melhor distribuição da largura de banda excedente em redes bem dimensionadas para todo o escopo de quantidade de fluxos ativos analisado; c) controle dos descartes, resultando em redução das taxas de *timeout* e reenvio de pacotes, evitando desperdícios de processamento, largura de banda e ocupação das filas e reduzindo o retardo e o *jitter* dos pacotes.

A análise dos resultados permite concluir que o uso do ECN otimiza o desempenho da arquitetura DiffServ nos mais variados cenários de simulação avaliados. Em especial, quando a rede é corretamente dimensionada, é possível observar que o uso do ECN, além de prover ganhos de desempenho, também otimiza o compartilhamento da largura de banda excedente, garantindo maior equidade na distribuição de recursos entre as fontes. Estas características são particularmente evidenciadas quando o total de reserva de largura de banda se aproxima da capacidade total de transmissão.

CAPÍTULO 6

INFLUÊNCIA DO ECN NOS EFEITOS DE FATORES QUE AFETAM O NÍVEL DE SERVIÇO EM REDES DIFFSERV

6.1. Introdução

Estudos anteriores [42][59] demonstraram que, em uma rede de Serviços Diferenciados, a justiça no compartilhamento da largura de banda disponível na rede entre fontes de tráfego que possuam contratos de nível de serviço idênticos, pode ser afetada por um considerável número de fatores. Estes fatores também interferem na proporcionalidade do compartilhamento da largura de banda entre fontes com contratos de nível de serviço distintos. Em uma rede bem dimensionada, estes fatores afetam a equidade na distribuição da largura de banda excedente, enquanto que, em uma rede mal dimensionada, a característica mais influenciada é a homogeneidade na degradação de desempenho percebido pelas fontes.

As considerações acima tornam evidente que, para uma análise abrangente dos efeitos do ECN em uma rede DiffServ, é importante investigar a influência da utilização deste

mecanismo nos efeitos causados pelos diversos fatores que influenciam o nível de serviço oferecido pela rede.

Neste capítulo apresenta-se um estudo sobre os efeitos da utilização do ECN no comportamento das redes DiffServ mediante fatores que influenciam o nível de serviço oferecido. Desta forma procura-se identificar possíveis benefícios que o uso do ECN possa oferecer quando a rede se encontra sob a influência destes fatores.

Diferente do capítulo anterior, em que foram estudados cenários homogêneos, onde todas as fontes possuíam características idênticas, os cenários de simulação apresentados neste capítulo terão como principal característica a heterogeneidade, o que permitirá o estudo de questões como interação com fontes não cooperantes, fluxos com RTT distintos, variações no tamanho do pacote, efeito da agregação de fluxos, influência da largura de banda contratada e interação com algoritmos de controle de fluxo diversos. Tanto situações de subdimensionamento da rede quanto de excesso de disponibilidade de recursos serão avaliadas.

6.2. Topologia da Rede e Parâmetros de Simulação

O modelo de simulação utilizado neste capítulo é similar ao utilizado no capítulo anterior, e esta representado na Figura 6.1. O que diferencia este modelo do anterior é a divisão da fontes em dois grupos, sendo que as características das fontes pertencentes a cada um destes grupos serão alteradas em cada uma das simulações, construindo assim cenários que estejam sob a influência de fatores que afetam o nível de serviço de uma rede DiffServ.

A definição dos parâmetros de simulação seguiram os seguintes critérios:

1. O tráfego gerado é unidirecional, isto é, somente as fontes enviam dados sendo que apenas ACKs trafegam na direção oposta.
2. Cada uma das fontes começa a transmitir em instantes distintos, sendo iniciadas em intervalos de 5 s de simulação.
3. O tamanho máximo da janela de congestionamento foi definido de forma a permitir o preenchimento de toda a extensão do enlace lógico TCP, não restringindo a vazão.
4. Tanto os enlaces de acesso aos roteadores R1 e R2 quanto os enlaces da rede núcleo possuem largura de banda igual a 1 Mbps.
5. Os parâmetros de descarte do algoritmo RIO para pacotes em conformidade (IN) foram definidos como: $\text{min_in} = 12$, $\text{max_in} = 25$, $\text{Pmax_in} = 0,1$, conforme recomendações apresentadas em [10].
6. Os parâmetros dos pacotes não em conformidade (OUT) foram definidos como: $\text{min_out} = 6$, $\text{max_out} = 12$, $\text{Pmax_out} = 0,1$, conforme recomendações apresentadas em [10].
7. Condições específicas, que dizem respeito aos fatores que afetam o nível de serviço da rede DiffServ, serão mencionados nas respectivas subseções de simulação.
8. Parâmetros que não tenham sido citados nesta seção, nem sejam mencionados nas subseções que descrevem cada simulação, foram mantidos em conformidade com os padrões utilizados pelo simulador de rede NS versão 2.1b5 [55], e pela ferramenta DiffServ package for ns-2 [56].

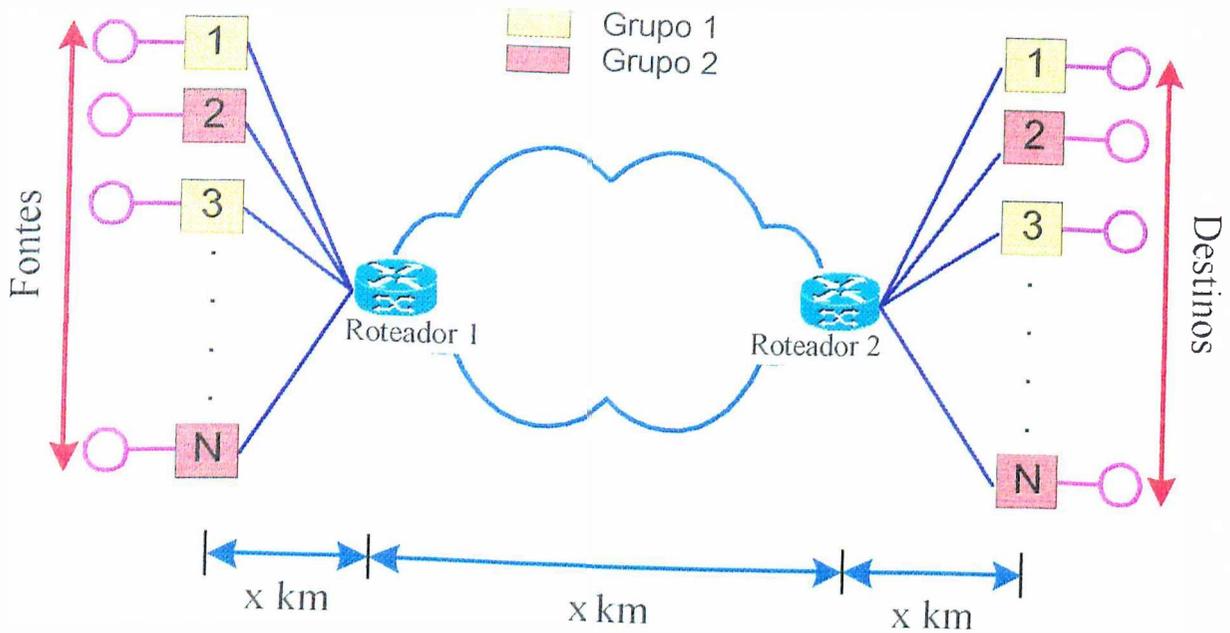


Figura 6.1 – Modelo de Simulação.

6.3. Métricas

As métricas utilizadas na avaliação da influência do ECN nos efeitos causados pelos fatores que afetam o nível de serviço da rede foram: a) o nível de serviço obtido; b) a eficiência do enlace; c) a justiça no compartilhamento da largura de banda; d) as taxas de descarte de pacotes; e) a taxa de *timeouts*; e f) a taxa de retransmissões. Estas métricas são as mesmas utilizadas no Capítulo 5 e sua descrição pormenorizada se encontra na seção 5.4 deste capítulo.

6.4. Interação com Fontes não Cooperantes

Estudos anteriores [42][60] comprovaram que, quando as fontes TCP compartilham uma mesma Classe de Serviço DiffServ com fontes não cooperantes tais como UDP, ocorre favorecimento das fontes não cooperantes. Em uma rede bem dimensionada, apenas as fontes não cooperantes conseguem obter uma parcela da largura de banda excedente, enquanto que,

em uma rede mal dimensionada, estas fontes são submetidas a uma degradação de desempenho menor que as fontes TCP.

O objetivo do estudo apresentado nesta seção é avaliar a influência da utilização do ECN na minimização do problema exposto. Primeiramente avalia-se um ambiente onde a largura de banda contratada é inferior à capacidade de transmissão. Em seguida apresenta-se a situação oposta, onde a largura de banda contratada excede a capacidade de transmissão. Finalmente, para garantir a universalidade e escalabilidade dos resultados obtidos, realiza-se um estudo que abrange intervalos distintos de largura de banda contratada e número de fluxos ativos.

6.4.1. Rede Bem Dimensionada

Neste estudo avalia-se o impacto da utilização do ECN no compartilhamento da largura de banda excedente entre fontes TCP & UDP em um ambiente onde a largura de banda contratada é inferior à capacidade de transmissão.

Foram utilizadas 10 fontes de tráfego, sendo que cada fonte possui 40 kbps de largura de banda garantida pelo SLA, o que representa uma reserva total de 40% da capacidade de transmissão. A Tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos para cada uma das fontes, a eficiência do enlace e a justiça alcançada no compartilhamento da largura de banda excedente. Os gráficos a) e b) da Figura 6.2 ilustram a evolução do comportamento das fontes durante todo o intervalo de simulação.

TABELA 6.1 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES TCP & UDP EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.

Rede Bem Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		Tipo do Protocolo	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem	Com		Sem	Com
	ECN	ECN		ECN	ECN
40	100%	150%	TCP	40	60
40	392%	347%	UDP	157	139
40	95%	147%	TCP	38	59
40	400%	345%	UDP	160	138
40	97%	147%	TCP	39	59
40	397%	347%	UDP	159	139
40	97%	152%	TCP	39	61
40	400%	350%	UDP	160	140
40	95%	152%	TCP	38	61
40	397%	350%	UDP	159	140
Eficiência	98%	100%	Eficiência	989	996
Justiça	49%	69%	Justiça	49%	69%

O comportamento das fontes na ausência do ECN é apresentado pelo gráfico a) da Figura 6.2 e pelas colunas 2 e 5 da Tabela 6.1. O gráfico a) mostra que, apesar de possuírem SLAs idênticos, o total de largura de banda obtido pelas fontes UDP é muito superior ao obtido pelas fontes TCP. Isto ocorre porque, como pode ser observado nas colunas 2 e 5 da Tabela 6.1, todas as fontes TCP obtiveram aproximadamente 100% da largura de banda

reservada, enquanto que as fontes UDP obtiveram cerca de 400% da banda passante reservada. Estes dados demonstram que, tanto as fontes TCP quanto as fontes UDP conseguiram obter o nível de serviço contratado; entretanto, apenas as fontes UDP usufruíram da largura de banda excedente.

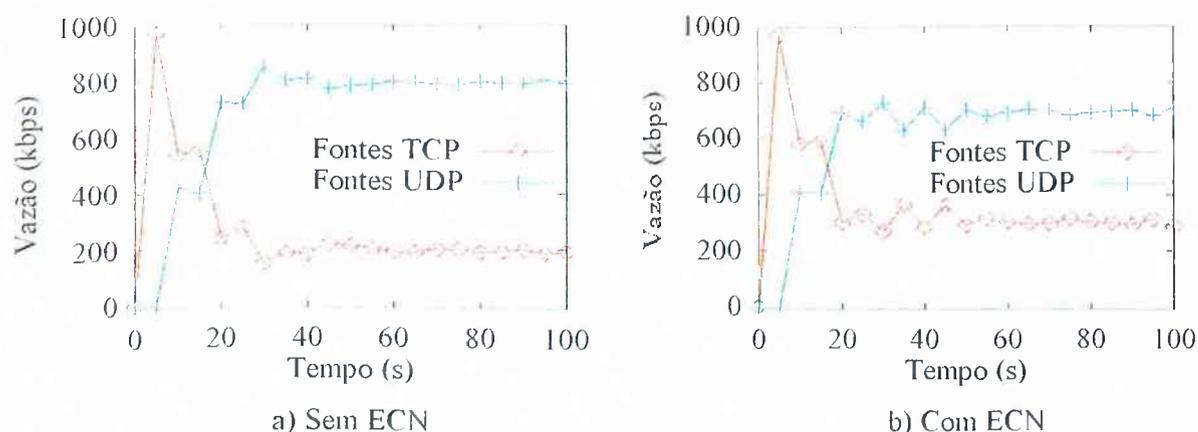


Figura 6.2 – Vazão Total Alcançada por Fontes TCP & UDP em uma Rede Bem Dimensionada.

O gráfico b) da Figura 6.2 e as colunas 3 e 6 da Tabela 6.1 apresentam o comportamento das fontes quando é utilizado o mecanismo ECN. Comparando os gráficos a) e b) pode-se constatar que ocorreu um aumento considerável no total de largura de banda obtido pelas fontes TCP. A análise das colunas 3 e 6 da Tabela 6.1 permite verificar que isto ocorreu porque, com a utilização do ECN, as fontes TCP se tornaram mais competitivas e foram também capazes de obter uma parcela da largura de banda excedente, alcançando uma vazão equivalente a cerca de 150% do total de largura de banda contratado. Isto representa um aumento de 50% na vazão das fontes TCP e uma melhoria de 40% na justiça do compartilhamento da largura de banda excedente.

6.4.2. Rede Mal Dimensionada

Os resultados apresentados até agora mostraram o compartilhamento da largura de banda quando a rede foi bem dimensionada. Serão apresentados agora resultados obtidos em um cenário em que a rede foi mal dimensionada e a largura de banda contratada é superior à capacidade de transmissão.

O ambiente de simulação é o mesmo do cenário anterior, entretanto, cada fonte possui 120 kbps de largura de banda garantida, o que representa uma reserva total de 120% da capacidade de transmissão. A Tabela 6.2 e os gráficos a) e b) da Figura 6.3 apresentam os resultados obtidos.

As colunas 2 e 5 e o gráfico a) apresentam o comportamento das fontes quando não é utilizado o ECN. A análise das informações apresentadas nas colunas 2 e 5 permite verificar que, apesar dos SLAs serem idênticos, ocorre uma maior degradação no desempenho percebido pela fontes TCP, que alcançam um nível de serviço médio em torno de 68%, enquanto que as fontes UDP obtêm resultados superiores a 95%. Isto demonstra que, em um cenário em que a rede foi mal dimensionada, ocorre o favorecimento das fontes UDP, as quais são submetidas a uma menor degradação de desempenho que as fontes TCP.

TABELA 6.2 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES TCP & UDP EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.

Rede Mal Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		Tipo do Protocolo	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem ECN	Com ECN		Sem ECN	Com ECN
120	69%	72%	TCP	83	87
120	96%	93%	UDP	116	112
120	74%	66%	TCP	89	80
120	97%	92%	UDP	117	111
120	70%	81%	TCP	84	98
120	96%	90%	UDP	116	109
120	63%	70%	TCP	76	84
120	96%	92%	UDP	116	111
120	63%	76%	TCP	76	92
120	96%	92%	UDP	116	111
Eficiência	98%	99%	Eficiência	989	995
Justiça	58%	73%	Justiça	58%	73%

O gráfico a) demonstra que o favorecimento das fontes UDP se estende por todo o intervalo de simulação, já que o total de largura de banda obtido pelas fontes UDP é superior ao das fontes TCP em todos os instantes amostrados. A comparação dos resultados aqui apresentados com os resultados do cenário não congestionado mostra que, em um ambiente congestionado, o favorecimento das fontes UDP é menos potencializado. Isto ocorre porque, neste caso, o

DiffServ consegue oferecer alguma proteção ao TCP contra a agressividade do UDP, impedindo que este último monopolize o enlace.

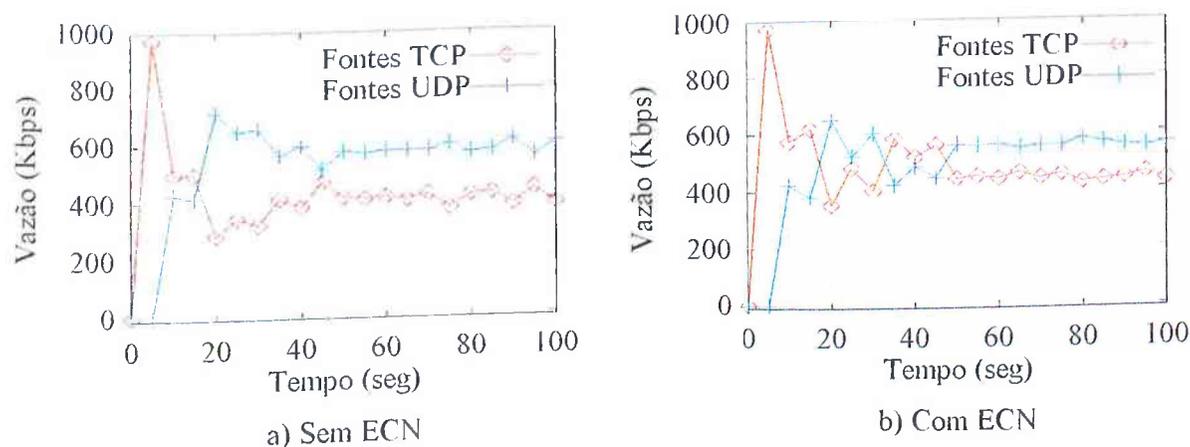


Figura 6.3 – Vazão Total Alcançada por Fontes TCP & UDP em uma Rede Mal Dimensionada.

O gráfico b) da Figura 6.3 e as colunas 3 e 6 da Tabela 6.2 apresentam o comportamento das fontes quando é utilizado o mecanismo ECN. Comparando os gráficos a) e b) é possível constatar que ocorreu um aumento na largura de banda total obtida pelas fontes TCP. Isto pode ser verificado através da análise das colunas 3 e 6 da Tabela 6.2, que mostra que, o nível de serviço médio alcançado pelas fontes TCP subiu de 68% para 73% enquanto que os resultados obtidos pelo UDP caíram para a faixa de 90%. Como neste cenário o favorecimento do UDP era menos significativo, os benefícios obtidos com a utilização do ECN são menos evidentes; entretanto, os resultados demonstram um menor favorecimento do UDP e uma degradação de desempenho mais amena para as fontes TCP que conseguiram aumentar sua vazão em cerca de 8%. Esta menor degradação das fontes TCP representa uma melhoria de 26% no índice de justiça no compartilhamento da largura de banda.

6.4.3. Influência do Número de Fluxos Ativos

Para garantir a escalabilidade dos resultados apresentados, as simulações descritas nas seções anteriores foram reproduzidas variando-se a quantidade de fontes ativas. Os resultados obtidos demonstram que o aumento no número de fontes potencializa ainda mais os benefícios do ECN.

O gráfico da Figura 6.4 ilustra o comportamento das fontes em uma rede bem dimensionada. Pode-se verificar que, em todas as simulações feitas, o uso do ECN garantiu uma maior equidade no compartilhamento da largura de banda excedente entre o tráfego TCP & UDP, principalmente quando foi utilizado um maior número de fontes. Estes resultados comprovam o que foi apresentado na seção anterior.

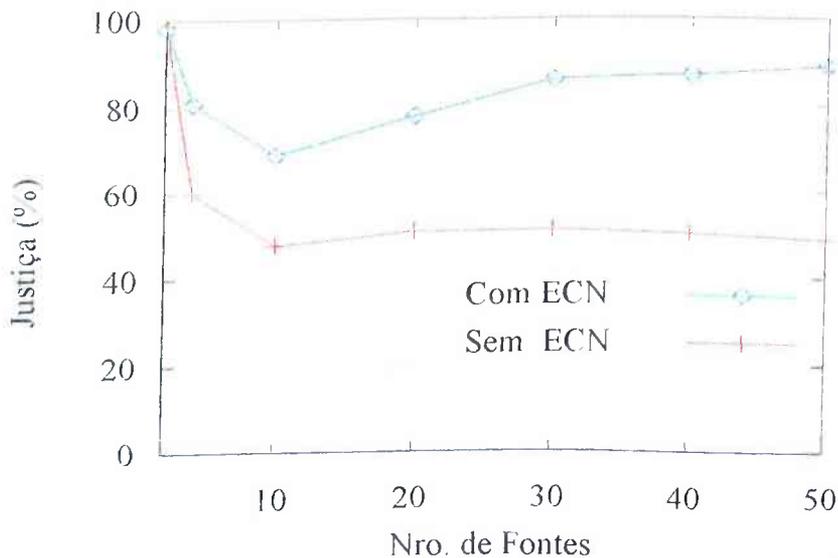


Figura 6.4 – Influência do Número de Fluxos Ativos na Justiça do Compartilhamento de Banda entre as Fontes em uma Rede Bem Dimensionada.

Os resultados obtidos em uma rede mal dimensionada são apresentados pelo gráfico da Figura 6.5. Pode-se verificar que, novamente, o uso do ECN garantiu uma degradação mais amena do desempenho do TCP em todas as situações simuladas, comprovando os resultados obtidos anteriormente e abrangendo um escopo mais amplo quanto à quantidade de fluxos ativos.

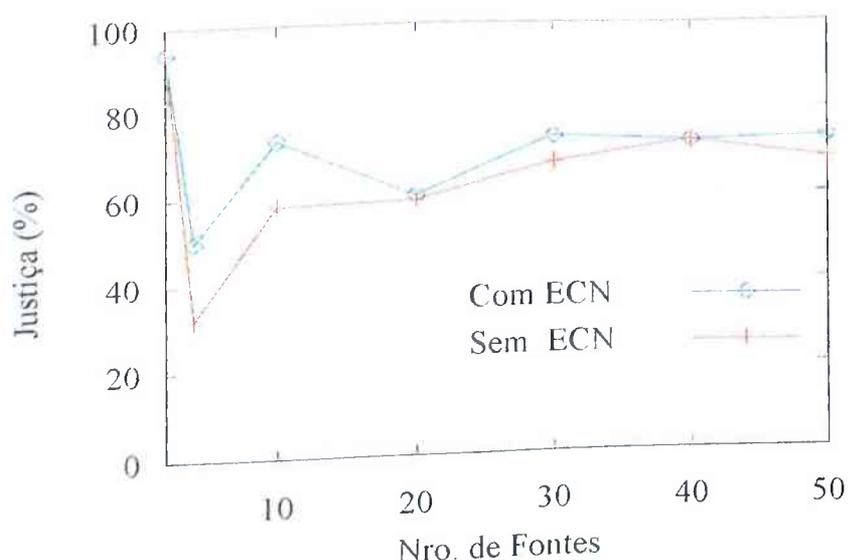


Figura 6.5 – Influência do Número de Fluxos Ativos na Justiça do Compartilhamento de Banda entre as Fontes em uma Rede Mal Dimensionada.

6.4.4. Influência do Dimensionamento da Rede

O objetivo desta simulação é estender os resultados obtidos nas simulações anteriores a um intervalo mais amplo de condições de dimensionamento da rede. Foram implementadas simulações variando-se o percentual de reserva de largura de banda de 20% a 140%. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 6.6. Pode-se verificar que, a utilização do ECN garante uma melhor distribuição dos recursos em todas as simulações

executadas, sendo que seus benefícios são melhor evidenciados quando a largura de banda total reservada pelo SLA atinge valores próximos da capacidade de transmissão.

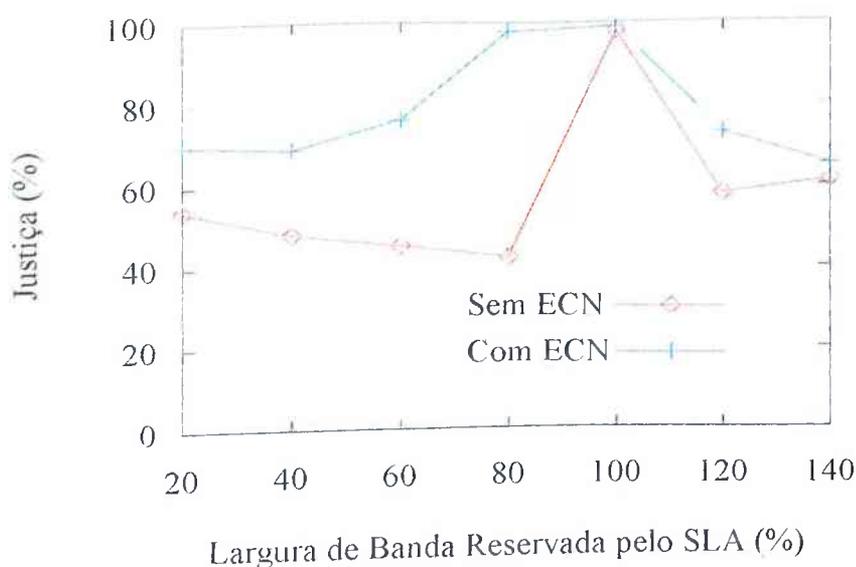


Figura 6.6 – Influência do Percentual de Reserva Total do Enlace na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Fontes TCP & UDP.

6.5. Favorecimento de Fontes submetidas a um menor RTT

Esta seção tem por objetivo avaliar os efeitos da utilização do ECN em um cenário onde existe interação entre fontes que possuem RTTs distintos. Primeiramente será apresentado o comportamento das fontes ao longo do tempo, em um ambiente onde o RTT de metade dos fluxos ativos é 5 vezes maior que o RTT da outra metade. Em seguida serão efetuadas simulações em que o RTT de metade das fontes é mantido fixo, enquanto que RTT da outra metade é variado de forma a se obter desde uma situação onde todas as fontes possuem o mesmo RTT, até a situação em que o RTT de metade das fontes é 5 vezes maior que o RTT da outra metade. Todas as simulações serão executadas para duas situações distintas de

dimensionamento da rede, a saber, uma situação de extrema disponibilidade de recursos, e outra de subdimensionamento da rede.

6.5.1. Rede Bem Dimensionada

Nesta primeira simulação será avaliado o impacto da utilização do ECN no compartilhamento da largura de banda excedente entre fontes que possuem RTT distintos em um cenário onde a largura de banda contratada é inferior à capacidade de transmissão.

Foram utilizadas 10 fontes de tráfego, sendo que para cada fonte foi atribuído 40 kbps de largura de banda garantida pelo SLA, o que representa uma reserva total de 40% da capacidade de transmissão. O RTT das fontes pode ser igual a 30 ms ou 150 ms, sendo que fontes com RTT distintos são iniciadas de forma intercalada. A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos para cada uma das fontes, a eficiência do enlace e a justiça alcançada no compartilhamento da largura de banda excedente.

O comportamento das fontes na ausência do ECN é apresentado pelas colunas 2 e 5, enquanto que as colunas 3 e 6 apresentam os resultados obtidos quando o ECN foi utilizado. A representação gráfica dos resultados, durante todo o intervalo de simulação, é também apresentado pelos gráficos a) e b) da Figura 6.7, sendo que o gráfico a) retrata os resultados da simulação feita sem a utilização do ECN, enquanto que o gráfico b) mostra os resultados obtidos quando este mecanismo foi utilizado.

TABELA 6.3 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES COM RTTs DISTINTOS EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.

Rede Bem Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		RTT (ms)	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem	Com		Sem	Com
	ECN	ECN		ECN	ECN
40	290%	308%	30	116	123
40	178%	208%	150	71	83
40	290%	308%	30	116	123
40	218%	248%	150	87	99
40	290%	285%	30	116	114
40	175%	193%	150	70	77
40	273%	275%	30	109	110
40	185%	218%	150	74	87
40	323%	268%	30	129	107
40	213%	185%	150	85	74
Eficiência	97%	100%	Eficiência	973	997
Justiça	88%	92%	Justiça	88%	92%

Os resultados demonstram que, apesar dos SLAs serem idênticos, o total de largura de banda obtido pelas fontes com RTT menor foi superior ao obtido pelas fontes com RTT maior. Isto ocorre porque, apesar de todas as fontes conseguirem obter o nível de serviço contratado, as fontes com RTT menor obtêm uma maior parcela da largura de banda excedente. Este comportamento é no entanto amenizado pela utilização do ECN que, além de aumentar a

eficiência do enlace, beneficia a justiça no compartilhamento da largura de banda excedente, permitindo que as fontes com RTT maior alcancem um melhor desempenho. Isto pode ser verificado pela comparação dos índices de eficiência e justiça alcançados em cada uma das simulações feitas, que são apresentados na Tabela 6.3.

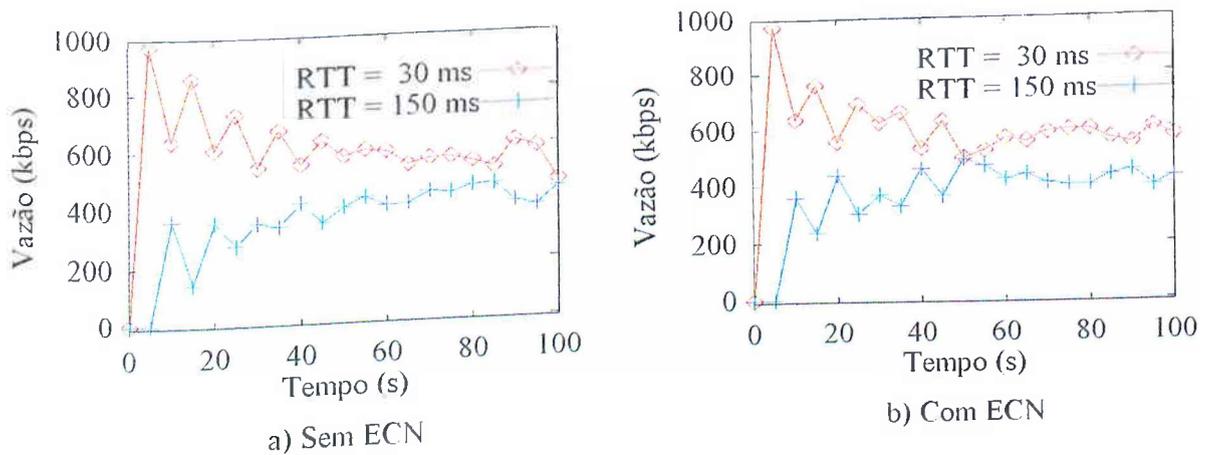


Figura 6.7 – Comparativo da Vazão Total alcançada por Fontes com RTT distintos em uma Rede Bem Dimensionada.

6.5.2. Rede Mal Dimensionada

Será avaliado agora o impacto da utilização do ECN na degradação de desempenho de fontes que possuem RTT distintos, em um cenário onde a largura de banda contratada é superior à capacidade de transmissão.

O modelo de simulação é o mesmo utilizado na simulação anterior; entretanto a largura de banda reservada pelo SLA de cada fonte é de 120 kbps, o que representa uma reserva total de 120% da capacidade de transmissão. A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos para cada uma das fontes, a eficiência do enlace e a justiça na degradação de desempenho.

TABELA 6.4 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES COM RTTs DISTINTOS EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.

Rede Mal Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		RTT (ms)	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem ECN	Com ECN		Sem ECN	Com ECN
120	83%	95%	30	100	114
120	68%	60%	150	82	73
120	85%	95%	30	103	114
120	72%	77%	150	87	93
120	89%	99%	30	107	119
120	83%	65%	150	100	78
120	85%	92%	30	102	111
120	72%	78%	150	87	94
120	88%	90%	30	106	108
120	78%	76%	150	94	92
Eficiência	96%	99%	Eficiência	968	996
Justiça	88%	64%	Justiça	88%	64%

O comportamento das fontes na ausência do ECN é apresentado pelas colunas 2 e 5 da Tabela 6.4, enquanto que os resultados obtidos quando foi utilizado o ECN são mostrados nas colunas 3 e 6. Os gráficos a) e b) da Figura 6.8 mostram o comportamento das fontes durante todo o intervalo de simulação.

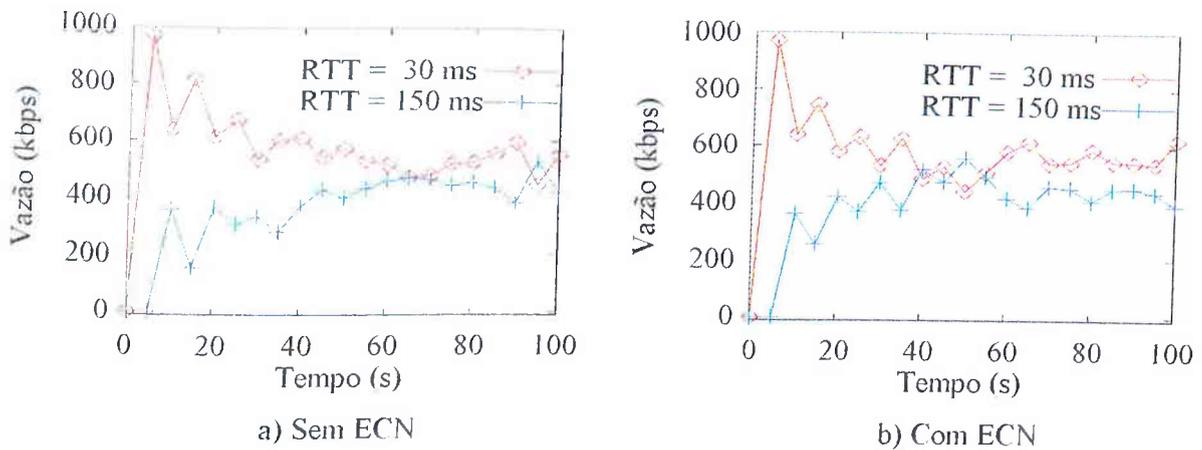


Figura 6.8 – Impacto da utilização do ECN na Vazão Total alcançada por Fontes com RTT distintos em uma Rede Mal Dimensionada.

Estes resultados demonstram que, também nesta situação, apesar dos SLAs serem idênticos, o total de largura de banda obtido pelas fontes com RTT menor foi superior ao obtido pelas fontes com RTT maior. Neste cenário, isto ocorre porque, apesar de nenhuma das fontes conseguir obter o nível de serviço contratado, a degradação de desempenho das fontes com RTT menor não é tão significativa quanto a das fontes com RTT maior e, diferentemente do cenário anterior, este comportamento não é amenizado pela utilização do ECN. Neste caso, o uso do ECN beneficia apenas a eficiência do enlace, mas reduz o índice de justiça no compartilhamento da largura de banda. Os índices de eficiência e justiça alcançados por cada uma das simulações são mostrados na Tabela 6.4.

6.5.3. Variação da Diferença de RTT.

Os resultados apresentados na seção anterior retrataram um ambiente de rede onde metade das fontes foram submetidas a um RTT 5 vezes maior o da outra metade. Nesta seção pretende-se validar estes resultados através da implementação de simulações onde o RTT de metade das

fontes é mantido fixo, enquanto que RTT da outra metade é variado de forma a se obter desde uma situação onde todas as fontes possuem o mesmo RTT, até a situação em que o RTT de metade das fontes é 5 vezes maior que o RTT da outra metade. Desta forma poderá ser avaliado o impacto do aumento da diferença de RTT entre as fontes no nível de serviço oferecido pela rede.

Os gráficos a) e b) da Figura 6.9 ilustram o comportamento das fontes em uma rede bem dimensionada. Pode-se verificar que, à medida em que se aumenta o RTT ao qual estão submetidas metade das fontes, as fontes cujo RTT permanece fixo são beneficiadas, conseguindo obter uma maior porção da largura de banda disponível. Este comportamento fica mais evidenciado quanto maior for a diferença no RTT, e ocorre tanto na simulação que utilizou o ECN quanto na feita sem o uso deste mecanismo.

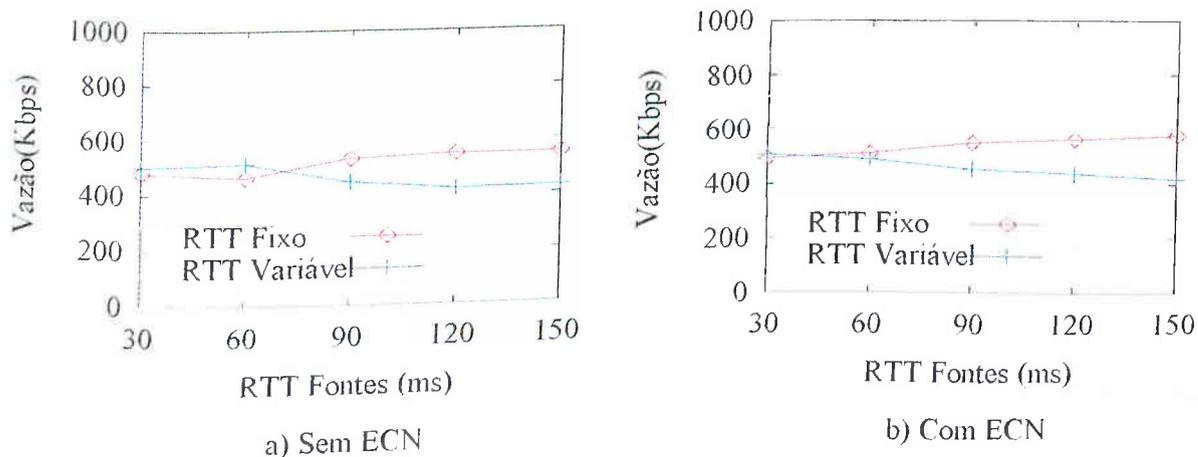


Figura 6.9 – Influência da Diferença de RTT na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Bem Dimensionada.

A largura de banda alcançada pelas fontes em uma rede mal dimensionada é apresentada nos gráficos a) e b) da Figura 6.10. O comportamento observado é o mesmo da rede bem dimensionada, e portanto, à medida que se aumenta o RTT de metade das fontes, as fontes cujo RTT permanece fixo são beneficiadas. Entretanto neste caso, pode-se observar que este comportamento é menos evidente quando o ECN não é utilizado.

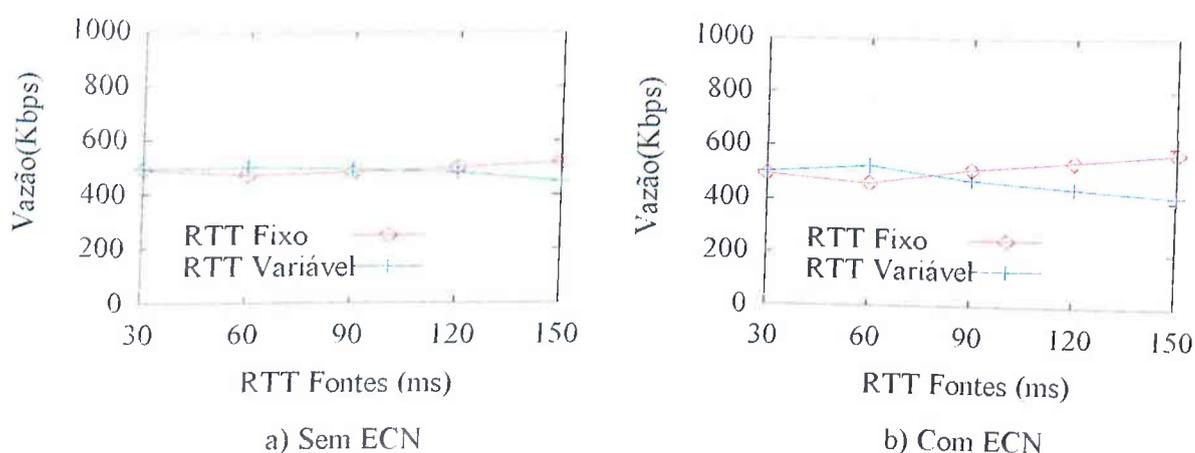


Figura 6.10 – Influência da Diferença de RTT na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Mal Dimensionada.

Os gráficos a) e b) da Figura 6.11 mostram um comparativo do comportamento da rede quanto à justiça no compartilhamento de largura de banda em função da utilização ou não do mecanismo ECN. Pode-se verificar que, em uma rede bem dimensionada, onde a largura de banda total contratada não excede a capacidade de transmissão, o uso do ECN oferece melhor equidade no compartilhamento da largura de banda excedente. No caso de uma rede mal dimensionada, onde a ocorrência de congestionamento é freqüente, a utilização deste mecanismo faz com que a largura de banda disponível seja dividida de forma ainda mais heterogênea, prejudicando ainda mais fontes com maior RTT.

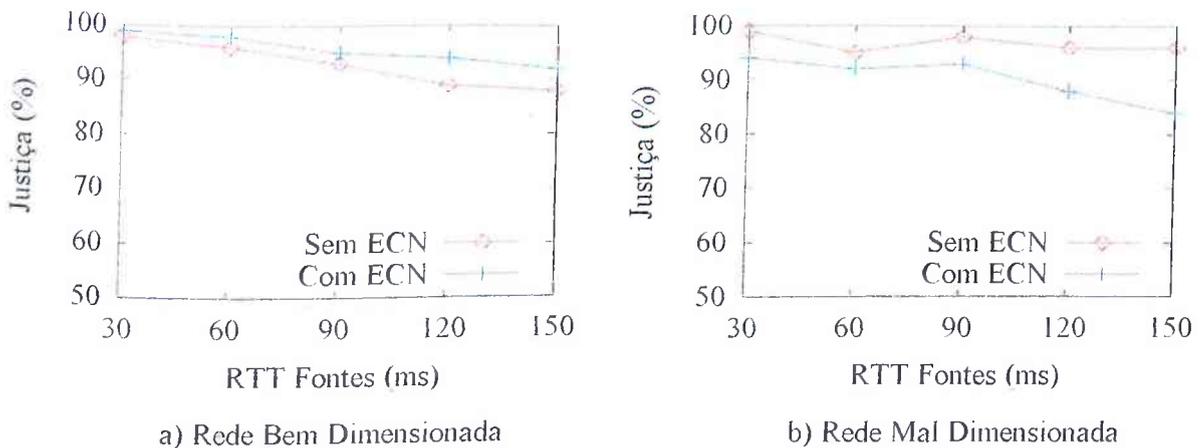


Figura 6.11 – Influência da Diferença de RTT na Justiça do Compartilhamento de Largura de Banda.

6.5.4. Influência do Dimensionamento da Rede

Nesta seção serão implementadas simulações com o objetivo de estender os resultados das simulações anteriores a um intervalo mais amplo de condições de dimensionamento da rede. Foram utilizadas 10 fontes de tráfego, sendo que o RTT ao qual estas fontes estão submetidas pode ser igual a 30 ms ou 150 ms. Fontes com RTT distintos são iniciadas de forma intercalada. O percentual de reserva de largura de banda foi variado entre 20% e 140% e os índices de justiça no compartilhamento de largura de banda alcançados por cada uma das simulações são apresentados pelo gráfico da Figura 6.12. Estes resultados demonstram que, quando o total de reserva de largura de banda é inferior à capacidade de transmissão, o índice de justiça das simulações que utilizaram o mecanismo ECN é superior ao índice das simulações que não utilizaram este mecanismo. Este comportamento se evidencia à medida que o percentual de reserva do enlace se aproxima, mas não ultrapassa, a capacidade total de transmissão. Entretanto, em situações de mal dimensionamento da rede, ocorre a situação

oposta, e o índice de justiça das simulações que não utilizaram o ECN é superior ao das simulações feitas com o uso deste mecanismo.

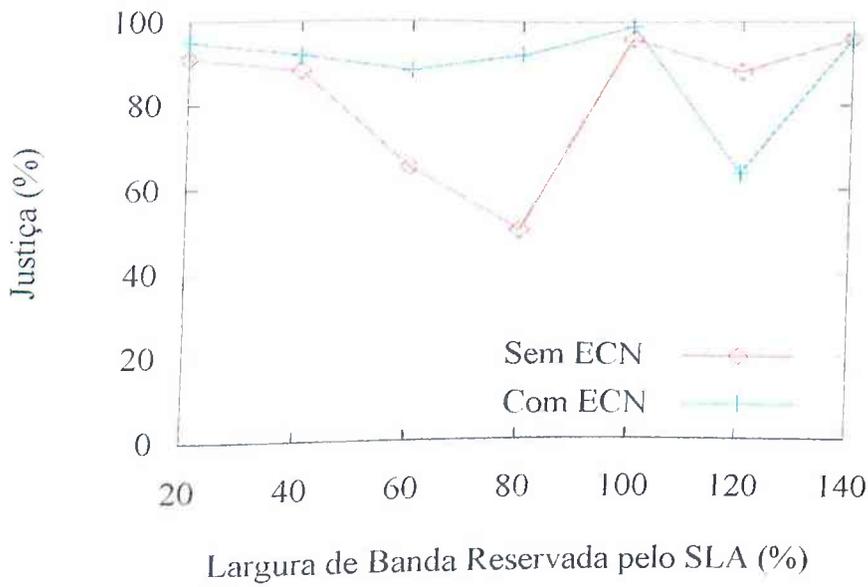


Figura 6.12 – Influência do Percentual de Reserva Total do Enlace na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Fontes com RTTs distintos.

6.6. Influência do Tamanho do Pacote

Um estudo apresentado em [61] indica que o tráfego da Internet é constituído predominantemente por pacotes com tamanhos próximos a 40, 512 e 1500 bytes. Os pacotes de 40 bytes correspondem principalmente aos pacotes de confirmação de recebimento (ACKs), enquanto que os pacotes de 512 e 1.500 bytes são efetivamente utilizados no transporte de dados.

Nesta seção serão avaliados os efeitos da utilização do ECN em cenários de simulação onde a largura de banda contratada para cada conexão é idêntico, entretanto as conexões são heterogêneas entre si, sendo constituídas por fluxos que utilizam tamanhos de pacotes variados. As simulações foram implementadas de forma a abranger diferentes situações de dimensionamento da rede, e o tamanho dos pacotes foi variado entre 512 e 1.536 bytes.

6.6.1. Rede Bem Dimensionada

Esta simulação irá apresentar o comportamento das fontes em uma rede bem dimensionada, onde o total de largura de banda contratada é inferior à capacidade de transmissão. Serão utilizadas 10 fontes de tráfego, cada fonte possuindo 40 kbps de largura de banda garantida pelo SLA, o que representa uma reserva total de 40% da capacidade de transmissão. Metade das fontes será configurada para utilizar pacotes de tamanho igual a 512 bytes, enquanto que o restante irá utilizar pacotes de tamanho 1.536 bytes. As fontes com tamanho de pacote distintos serão iniciadas de forma intercalada. A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos para cada uma das conexões, a eficiência do enlace e a justiça alcançada no compartilhamento da largura de banda excedente.

O nível de serviço oferecido para cada conexão quando o ECN não foi utilizado é apresentado pelas colunas 2 e 5, enquanto que as colunas 3 e 6 apresentam os resultados obtidos quando este mecanismo foi utilizado. Os gráficos a) e b) da Figura 6.13 mostram a representação gráfica do comportamento das conexões durante todo o intervalo de simulação.

TABELA 6.5 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES QUE UTILIZAM DIFERENTES TAMANHOS DE PACOTE EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.

Rede Bem Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		Tamanho do Pacote	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem ECN	Com ECN		Sem ECN	Com ECN
40	150%	170%	512	60	68
40	322%	310%	1536	129	124
40	137%	175%	512	55	70
40	300%	320%	1536	120	128
40	177%	185%	512	71	74
40	307%	342%	1536	123	137
40	137%	172%	512	55	69
40	290%	352%	1536	116	141
40	170%	190%	512	68	76
40	275%	270%	1536	110	108
Eficiência	90%	100%	Eficiência	907	995
Justiça	90%	94%	Justiça	90%	94%

A observação destes resultados permite concluir que, em uma rede bem dimensionada, constituída por fluxos que possuem uma mesma porção de largura de banda reservada pelo seu SLA, existe favorecimento dos fluxos que utilizam um tamanho de pacote maior. Isto acontece porque, apesar de todos os fluxos alcançarem a largura de banda contratada, os fluxos que utilizam pacotes maiores obtêm vantagem, em relação aos fluxos com pacotes

menores, na disputa pela largura de banda excedente. Este comportamento é atenuado pela utilização do ECN, que também oferece como benefício um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, otimizando a eficiência do enlace.

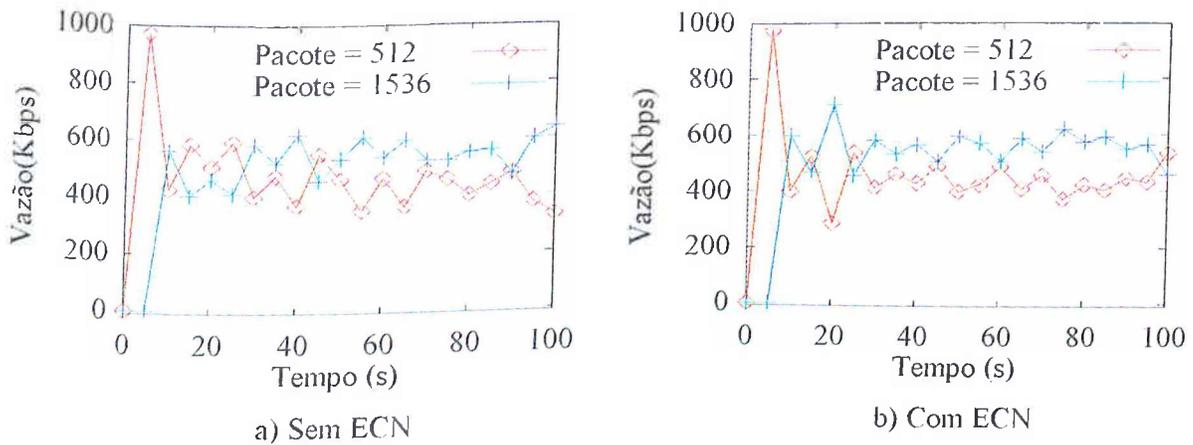


Figura 6.13 – Comparativo da Vazão Total alcançada por Fontes com Tamanhos de Pacote Distintos em uma Rede Bem Dimensionada.

6.6.2. Rede Mal Dimensionada

Nesta seção será avaliado um cenário em que a rede foi mal dimensionada. Este cenário também será constituído por 10 fontes de tráfego; entretanto neste caso, o SLA de cada fonte irá garantir 120 kbps de largura de banda, totalizando uma reserva de 120% da capacidade de transmissão. Como na simulação anterior, metade das fontes será configurada para utilizar pacotes de tamanho igual a 512 bytes, enquanto que a outra metade irá utilizar um tamanho de pacote igual a 1536 bytes. A Tabela 6.6 apresenta os resultados obtidos para cada uma das fontes, a eficiência do enlace e a justiça na degradação de desempenho.

TABELA 6.6 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES QUE UTILIZAM DIFERENTES TAMANHOS DE PACOTE EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.

Rede Mal Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		Tamanho do Pacote	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem ECN	Com ECN		Sem ECN	Com ECN
120	76%	64%	512	92	77
120	88%	98%	1536	106	118
120	74%	68%	512	89	82
120	91%	105%	1536	110	126
120	70%	70%	512	84	84
120	91%	107%	1536	110	129
120	70%	57%	512	85	69
120	91%	100%	1536	110	121
120	73%	59%	512	88	71
120	83%	98%	1536	100	118
Eficiência	97%	99%	Eficiência	974	995
Justiça	91%	77%	Justiça	91%	77%

O comportamento das fontes, na ausência do ECN, é apresentado pelas colunas 2 e 5 da Tabela 6.6, enquanto que os resultados obtidos quando foi utilizado o ECN são mostrados nas colunas 3 e 6. Os gráficos a) e b) da Figura 6.14 mostram o comportamento das fontes durante todo o intervalo de simulação.

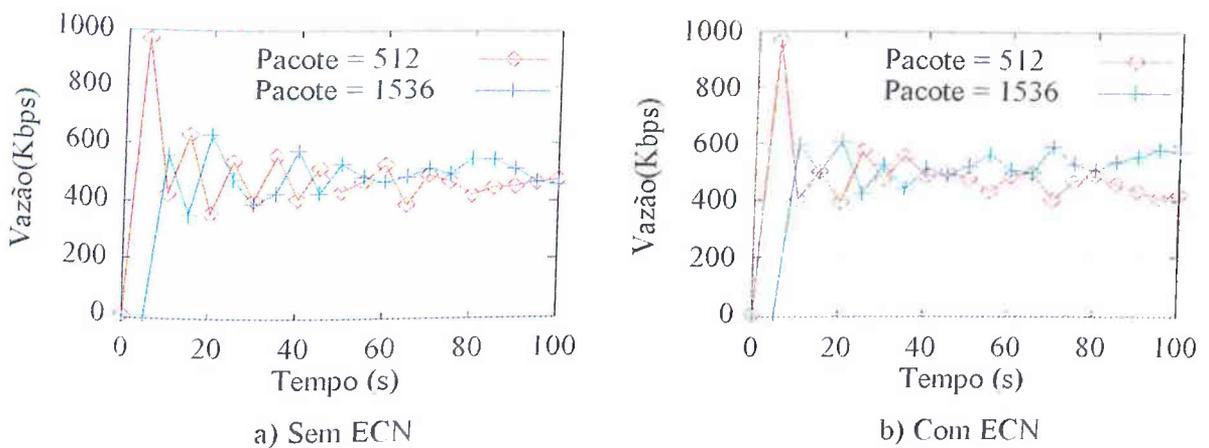


Figura 6.14 – Comparativo da Vazão Total alcançada por Fontes com Tamanhos de Pacote Distintos em uma Rede Mal Dimensionada.

Os resultados apresentados demonstram que, também em um cenário em que a rede foi mal dimensionada, apesar dos SLAs serem idênticos, o total de largura de banda obtido pelas fontes que possuem tamanho de pacote maior é superior ao obtido pelas fontes com tamanho de pacote menor. Isto ocorre porque, apesar da maioria das fontes não conseguir obter o nível de serviço contratado, as fontes com tamanho de pacote maior sofrem uma menor degradação de desempenho que as fontes com tamanho de pacote menor. Neste cenário, diferentemente do cenário anterior, este comportamento não é amenizado, mas sim evidenciado pela utilização do ECN, causando redução do índice de justiça no compartilhamento da largura de banda, e portanto, oferecendo como benefício apenas a otimização da eficiência do enlace.

6.6.3. Variação da Diferença no Tamanho do Pacote

Nesta seção serão efetuadas simulações em que o tamanho do pacote de metade das fontes será mantido fixo e igual a 512 bytes, enquanto que o tamanho do pacote da outra metade será variado entre 512 e 3072 bytes. Estas simulações têm por objetivo validar os resultados

apresentados na seção anterior para diferentes cenários de heterogeneidade de tamanho de pacote. Todas as simulações serão executadas para duas situações distintas de dimensionamento da rede. Primeiramente serão apresentados os resultados obtidos em uma situação de extrema disponibilidade de recursos. Em seguida, serão apresentados resultados da simulação de um cenário de subdimensionamento da rede. O resultado destas simulações permitirão a avaliação do impacto do aumento da diferença de tamanho de pacote entre as fontes no nível de serviço oferecido pela rede.

Os gráficos a) e b) da Figura 6.15 ilustram o comportamento das fontes em uma rede bem dimensionada. Pode-se verificar que, à medida em que se aumenta o tamanho do pacote de metade das fontes, também aumenta a vazão total alcançada por estas fontes, ao mesmo tempo em que se diminui a vazão alcançada pelo restante das fontes. Este comportamento fica mais evidenciado quanto maior for a diferença no tamanho dos pacotes, e ocorre tanto na simulação que utilizou o ECN quanto na que não utilizou este mecanismo. Pode-se observar também que esta diferença de vazão é menor quando o ECN foi utilizado.

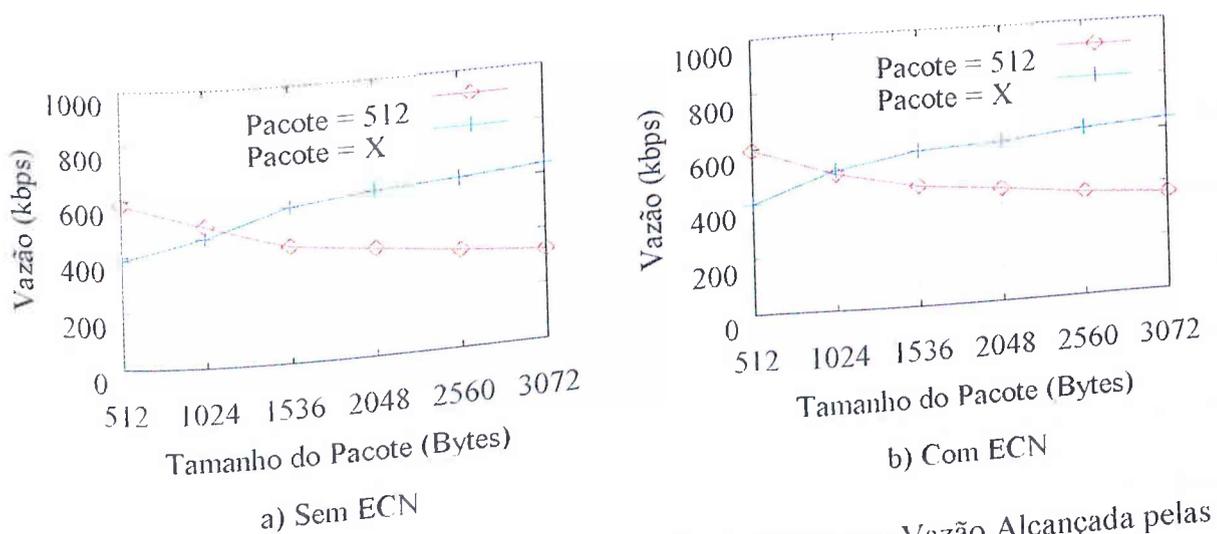


Figura 6.15 – Influência da Diferença no Tamanho do Pacote na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Bem Dimensionada.

Os gráficos da Figura 6.16 ilustram a largura de banda alcançada pelas fontes em uma rede mal dimensionada. O comportamento observado é o mesmo da rede bem dimensionada, isto é, à medida que se aumenta o tamanho do pacote de metade das fontes, também aumenta a vazão total alcançada por estas fontes, e diminui a vazão alcançada pelo restante das fontes. Diferente da simulação anterior, neste caso, a diferença de vazão é menor quando o ECN não é utilizado.

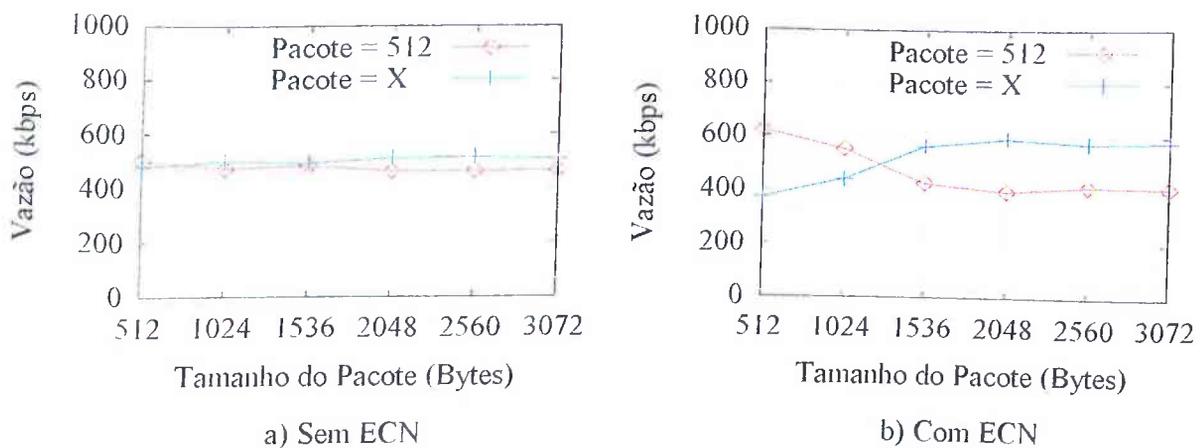


Figura 6.16 – Influência da Diferença no Tamanho do Pacote na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Mal Dimensionada.

O comparativo do comportamento da rede, quanto à justiça no compartilhamento de largura de banda, em função da utilização ou não do mecanismo ECN, é apresentado pelos gráficos da Figura 6.17. Pode-se verificar que, em uma rede bem dimensionada, onde a largura de banda total contratada não excede a capacidade de transmissão, o uso do ECN oferece melhor equidade no compartilhamento da largura de banda excedente, entretanto, caso a rede tenha sido mal dimensionada, a utilização deste mecanismo faz com que a largura de banda

disponível seja dividida de forma mais heterogênea, prejudicando mais as fontes que utilizam um tamanho de pacote menor.

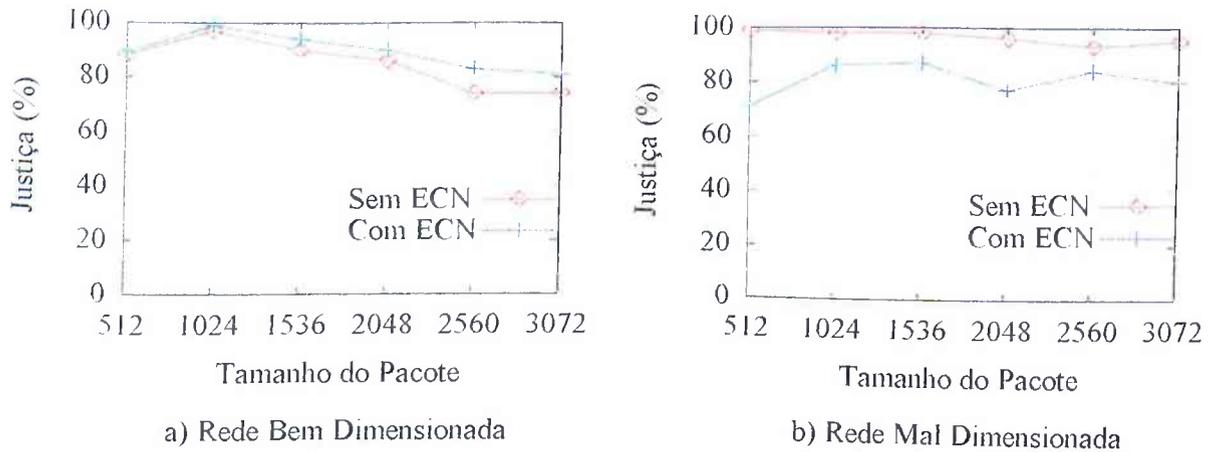


Figura 6.17 – Influência da Diferença no Tamanho do Pacote na Justiça do Compartilhamento de Largura de Banda.

6.6.4. Influência do Dimensionamento da Rede

Para se estender os resultados obtidos nas simulações anteriores a um intervalo mais amplo de condições de dimensionamento da rede foram implementadas simulações variando o percentual de reserva do enlace entre 20% e 140% do total de largura de banda disponível. Foram utilizadas 10 fontes de tráfego, sendo que metade destas fontes utilizou um tamanho de pacote igual a 512 bytes, enquanto que o tamanho do pacote do restante das fontes foi configurado como 1536 bytes.

Os índices de justiça no compartilhamento de largura de banda alcançados por cada uma das simulações são apresentados pelo gráfico da Figura 6.18. Pode-se verificar que, quando a rede esta bem dimensionada, o índice de justiça apresentado nas simulações que utilizaram o ECN

é melhor que o índice obtido nas simulações que não utilizaram este mecanismo o ECN. Este comportamento é melhor evidenciado quando o percentual total de largura de banda reservada se aproxima, mas não ultrapassa, da capacidade máxima de transmissão. Entretanto, quando é permitido reservar um percentual superior à capacidade de transmissão, esta situação se inverte, e o índice de justiça no compartilhamento de largura de banda é melhor quando o ECN não é utilizado. Estes resultados validam os resultados obtidos anteriormente.

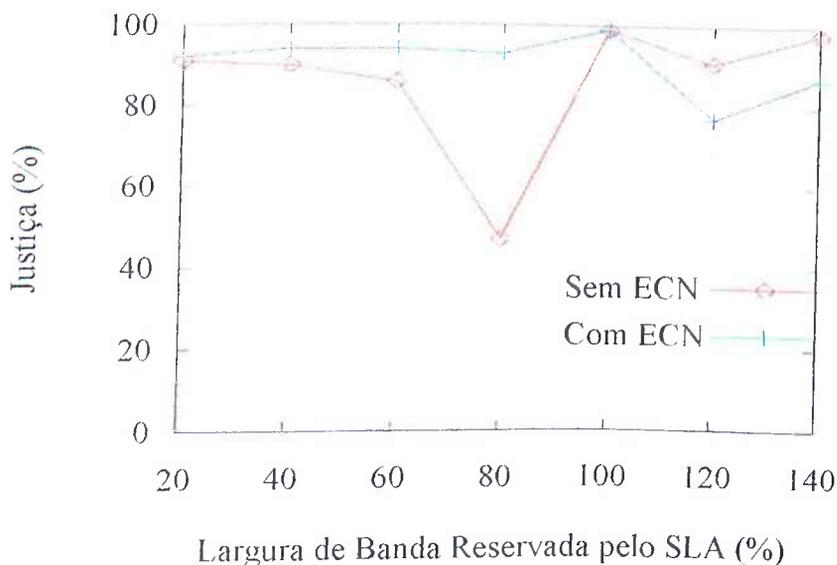


Figura 6.18 – Influência do Percentual de Reserva Total do Enlace na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Fontes com Tamanhos de Pacote Distintos.

6.7. Impacto da Agregação de Fluxos

Outro fator impactante no nível de serviço oferecido por uma rede DiffServ é o número de microfluxos agregados em uma mesma conexão. Em uma rede DiffServ, os SLAs podem ser estabelecidos de forma a disponibilizar uma determinada largura de banda para um conjunto

de sistemas finais. Estes sistemas finais irão portanto competir entre si pela largura de banda contratada.

Os resultados das simulações apresentadas nesta seção irão permitir a avaliação da influência da utilização do ECN no nível de serviço oferecido a conexões que possuem uma mesma largura de banda contratada pelo SLA, mas diferentes quantidades de microfluxos ativos. Será avaliado o comportamento das fontes em um ambiente onde a largura de banda contratada é inferior à capacidade de transmissão, bem como a situação oposta, onde a largura de banda contratada excede a capacidade de transmissão. Para garantir a universalidade e escalabilidade dos resultados obtidos, será feito também um estudo que abrange intervalos distintos de largura de banda contratada e número de microfluxos ativos.

6.7.1. Rede Bem Dimensionada

Esta simulação irá permitir a avaliação do impacto da utilização do ECN no compartilhamento da largura de banda excedente entre conexões que possuem diferentes quantidades de microfluxos ativos em um cenário onde existe excesso de disponibilidade de recursos.

Cada simulação possui 10 conexões ativas, sendo que para cada conexão foi reservado pelo SLA um total de 40 kbps de largura de banda. Isto representa uma reserva total de 40% da capacidade de transmissão. O número de microfluxos em cada conexão pode ser igual a 2 ou a 8, sendo que as conexões com diferentes quantidade de microfluxos são iniciadas de forma intercalada. A Tabela 6.7 apresenta os resultados obtidos para cada uma das conexões, a eficiência do enlace e a justiça alcançada no compartilhamento da largura de banda excedente.

TABELA 6.7 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR CONEXÕES COM DIFERENTES QUANTIDADES DE MICROFLUXOS ATIVOS EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.

Rede Bem Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		Microfluxos Ativos	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem	Com		Sem	Com
	ECN	ECN		ECN	ECN
40	192%	155%	2 μ	77	62
40	282%	275%	8 μ	113	110
40	200%	187%	2 μ	80	75
40	292%	342%	8 μ	117	137
40	207%	180%	2 μ	83	72
40	257%	217%	8 μ	103	87
40	160%	245%	2 μ	64	98
40	325%	290%	8 μ	130	116
40	170%	182%	2 μ	68	73
40	302%	415%	8 μ	121	166
Eficiência	95%	100%	Eficiência	956	996
Justiça	85%	78%	Justiça	85%	78%

O desempenho das conexões, na ausência do ECN, é apresentado pelas colunas 2 e 5 da Tabela 6.7, enquanto que as colunas 3 e 6 apresentam os resultados obtidos quando foi

utilizado o ECN. Os gráficos a) e b) da Figura 6.19 mostram a representação gráfica do comportamento das conexões durante todo o intervalo de simulação.

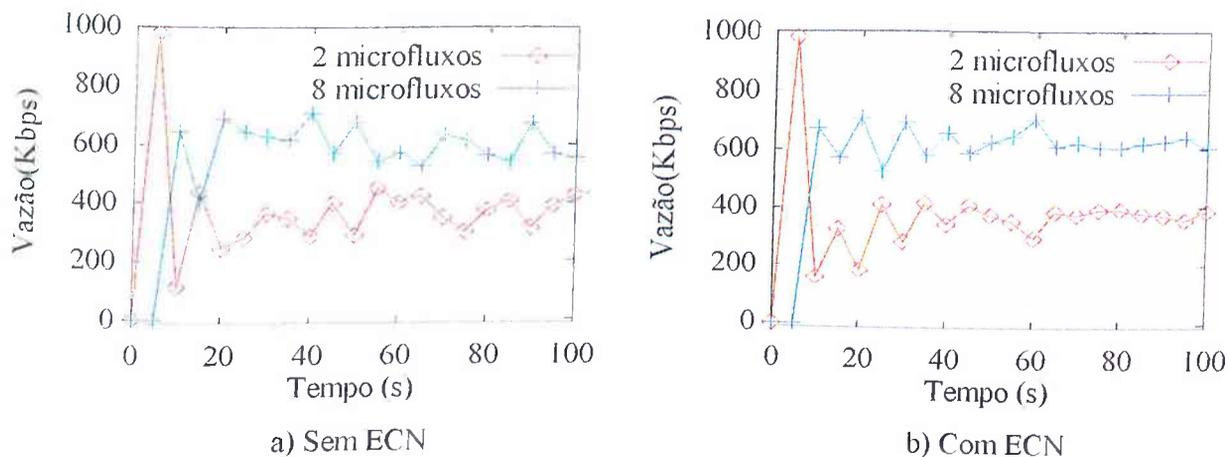


Figura 6.19 – Comparativo da Vazão Total alcançada por Fontes com Número de Microfluxos Distintos em uma Rede Bem Dimensionada.

Observando os resultados das simulações é possível perceber que, apesar de possuírem SLAs idênticos, o total de largura de banda obtido pelas conexões com 8 microfluxos é bastante superior ao das conexões que possuem apenas 2 microfluxos. Também pode ser observado que nem todas as conexões com menor quantidade de microfluxos conseguiram sequer obter o nível de serviço contratado. A utilização do ECN, apesar de aumentar a eficiência total do enlace, não oferece melhorias a este comportamento. Na verdade, quando o ECN é utilizado, as conexões que possuem maior quantidade de microfluxos agregados são ainda mais beneficiadas, o que é impactante no índice de justiça no compartilhamento de largura de banda.

6.7.2. Rede Mal Dimensionada

Nesta seção estuda-se o impacto da utilização do ECN na degradação de desempenho de conexões que possuem diferentes quantidades de microfluxos ativos em um cenário onde a largura de banda contratada é superior à capacidade de transmissão.

O modelo utilizado é o mesmo da simulação anterior, entretanto, para cada conexão foi reservado pelo SLA 120 kbps de largura de banda. Isto representa uma reserva total de 120% da capacidade de transmissão. A Tabela 6.8 apresenta os resultados obtidos para cada uma das conexões, a eficiência do enlace e a justiça alcançada na degradação de desempenho das conexões.

As colunas 2 e 5 da Tabela 6.8 apresentam o desempenho das conexões, na ausência do ECN, enquanto que as colunas 3 e 6 apresentam os resultados obtidos quando o ECN foi utilizado. O comportamento das conexões observado neste cenário é o mesmo do cenário anterior, e portanto, apesar de possuírem SLAs idênticos, as conexões com maior agregação de microfluxos conseguem novamente obter melhor nível de serviço que as conexões com menor agregação. A rede mal dimensionada evidencia ainda mais este comportamento, prejudicando mais agressivamente as conexões que possuem menor quantidade de microfluxos. Isto implica em índices de justiça no compartilhamento de largura de banda ainda menores que os índices do cenário anterior. Também neste cenário, a utilização do ECN aumenta a eficiência total do enlace, mas não oferece melhorias ao comportamento mencionado, funcionando inclusive como agente catalisador do efeito de favorecimento das conexões com maior agregação de fluxos.

TABELA 6.8 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR CONEXÕES COM DIFERENTES QUANTIDADES DE MICROFLUXOS ATIVOS EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.

Rede Mal Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido			Vazão Obtida (kbps)	
	Sem	Com	Microfluxos	Sem	Com
	ECN	ECN		ECN	ECN
120	70%	48%	2 μ	85	58
120	91%	113%	8 μ	110	136
120	83%	32%	2 μ	100	39
120	85%	122%	8 μ	102	147
120	68%	99%	2 μ	82	119
120	90%	108%	8 μ	108	130
120	72%	57%	2 μ	87	69
120	90%	105%	8 μ	109	127
120	71%	20%	2 μ	86	25
120	90%	125%	8 μ	109	150
Eficiência	97%	100%	Eficiência	978	1000
Justiça	80%	16%	Justiça	80%	16%

O comportamento das conexões durante todo o intervalo de simulação é ilustrado pelos gráficos a) e b) da Figura 6.20.

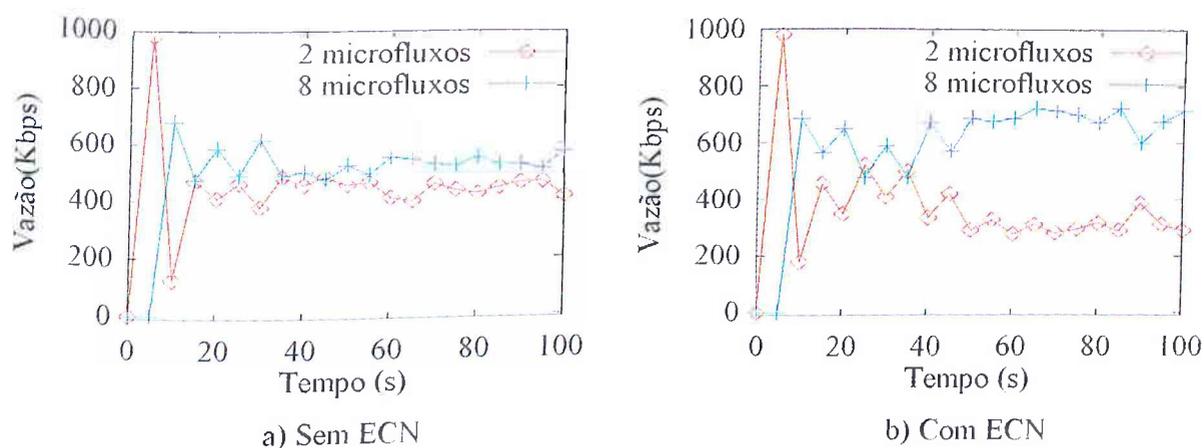


Figura 6.20 – Comparativo da Vazão Total alcançada por Fontes com Número de Microfluxos Distintos em uma Rede Mal Dimensionada.

6.7.3. Variação da Diferença no Número de Microfluxos Ativos

No modelo de simulação utilizado na seção anterior metade das conexões possuíam apenas 2 microfluxos ativos, enquanto que a outra metade possuía 8 microfluxos. Nesta seção também foram utilizadas 10 conexões, sendo que o número de microfluxos de metade destas conexões será mantido fixo e igual a 2, enquanto que os microfluxos da outra metade será variado entre 2 e 14. O objetivo destas simulações é validar os resultados obtidos nas seções anteriores, estendendo seus resultados à situações que envolvam conexões com quantidades variadas de microfluxos ativos, bem como avaliar o impacto na diferença do número de microfluxos no nível de serviço oferecido para cada conexão. Serão avaliados os resultados de simulações feitas para dois cenários de dimensionamento da rede, um onde existe grande disponibilidade de recursos, e outro onde o total contratado é inferior à capacidade de transmissão.

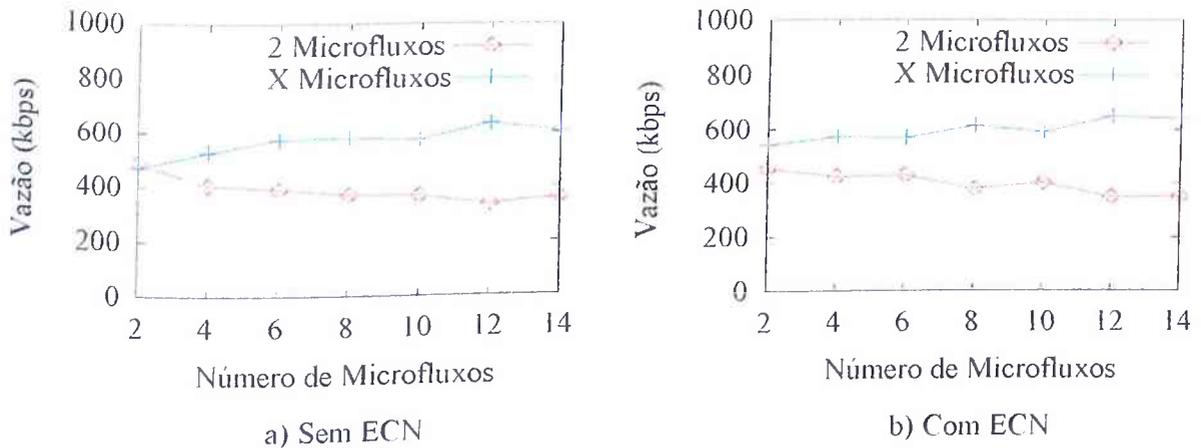


Figura 6.21 – Influência da Diferença no Número de Microfluxos na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Bem Dimensionada.

O comportamento das fontes em uma rede bem dimensionada é mostrado pelos gráficos a) e b) da Figura 6.21. Estes gráficos demonstram que, independentemente do uso ou não do ECN, as conexões que mantiveram fixa a quantidade de microfluxos ativos, foram mais prejudicadas à medida em que o número de microfluxos das outras conexões foi aumentado.

O mesmo comportamento observado na rede bem dimensionada é válido para a situação de subdimensionamento da rede. Isto pode ser observado através dos gráficos a) e b) da Figura 6.22, onde novamente as fontes que mantiveram fixo o número de microfluxos ativos foram mais prejudicadas à medida em que a quantidade de microfluxos do restante das fontes era incrementado. Também nesta situação o uso ou não do ECN não influencia este comportamento.

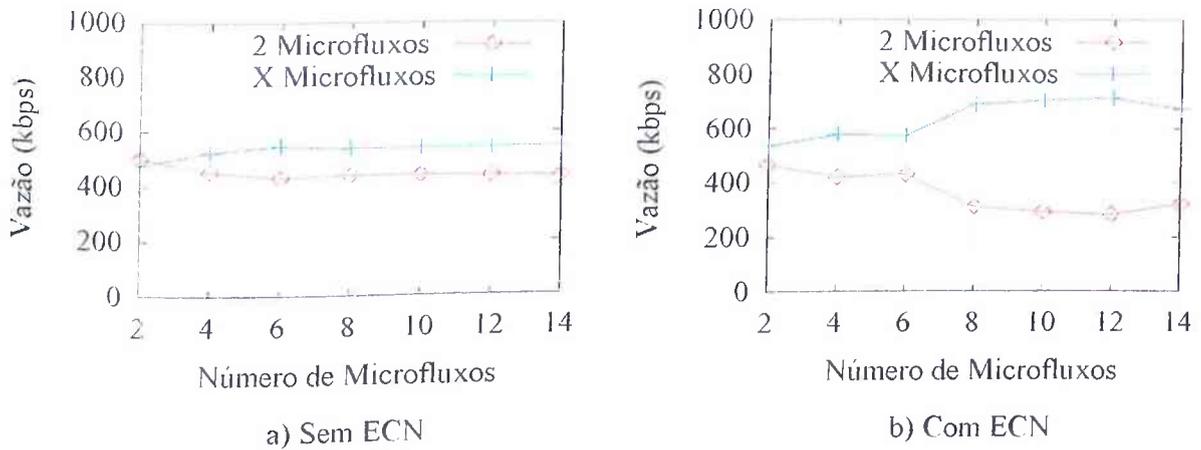


Figura 6.22 – Influência da Diferença no Número de Microfluxos na Vazão Alcançada pelas Fontes em uma Rede Mal Dimensionada.

Um comparativo dos índices de justiça no compartilhamento da largura de banda obtidos pelas simulações feitas com e sem o uso do ECN nos dois cenários já apresentados nesta seção é mostrado nos gráficos a) e b) da Figura 6.23. A observação destes gráficos permite concluir que, a diferença no número de microfluxos ativos de conexões que compartilham um mesmo enlace e possuem um mesmo percentual de reserva de largura de banda, impacta fortemente a equidade na distribuição da largura de banda, favorecendo as conexões com maior quantidade de fluxos ativos e prejudicando o restante das conexões. Os níveis de justiça alcançados em todas as simulações foram muito baixos, e em geral, o uso do ECN contribuiu ainda mais com este comportamento.

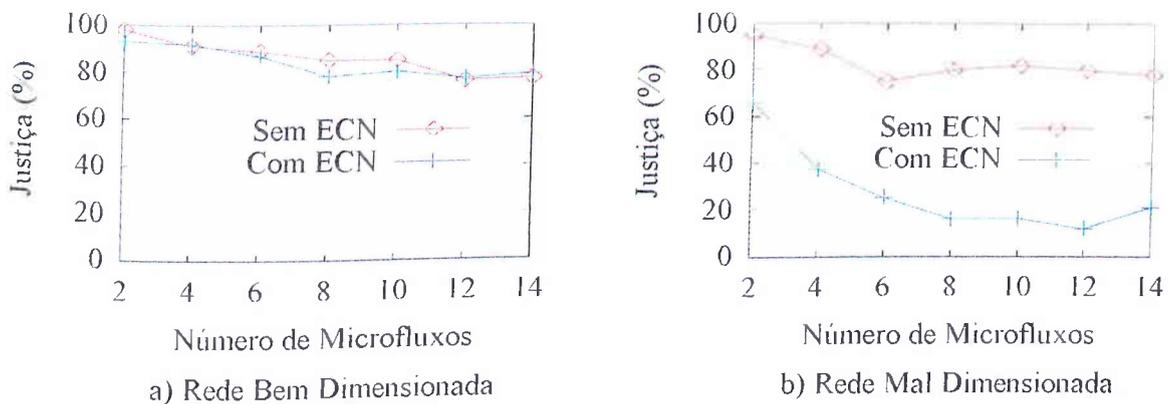


Figura 6.23 – Influência da Diferença no Número de Microfluxos na Justiça do Compartilhamento de Largura de Banda.

6.7.4. Influência do Dimensionamento da Rede

As simulações implementadas nesta seção têm por objetivo estender os resultados obtidos nas simulações anteriores a um intervalo mais amplo de condições de dimensionamento da rede. Foram utilizadas 10 conexões, sendo que metade destas conexões possuíam 2 microfluxos ativos enquanto que a outra metade possuía 8 microfluxos. O percentual de reserva de largura de banda foi variado entre 20% e 140% e os índices de justiça no compartilhamento de largura de banda alcançados por cada uma das simulações são apresentados pelo gráfico da Figura 6.24. Pode-se verificar que, todas as simulações obtiveram índices baixos de justiça, o que significa uma distribuição inadequada dos recursos disponíveis. Em especial, os índices obtidos pelas simulações feitas com a utilização do ECN foram ainda menores, o que significa que, neste caso, as conexões que possuíam maior quantidade de microfluxos ativos foram beneficiadas em todas as situações de dimensionamento simuladas. Estes resultados validam os resultados obtidos anteriormente.

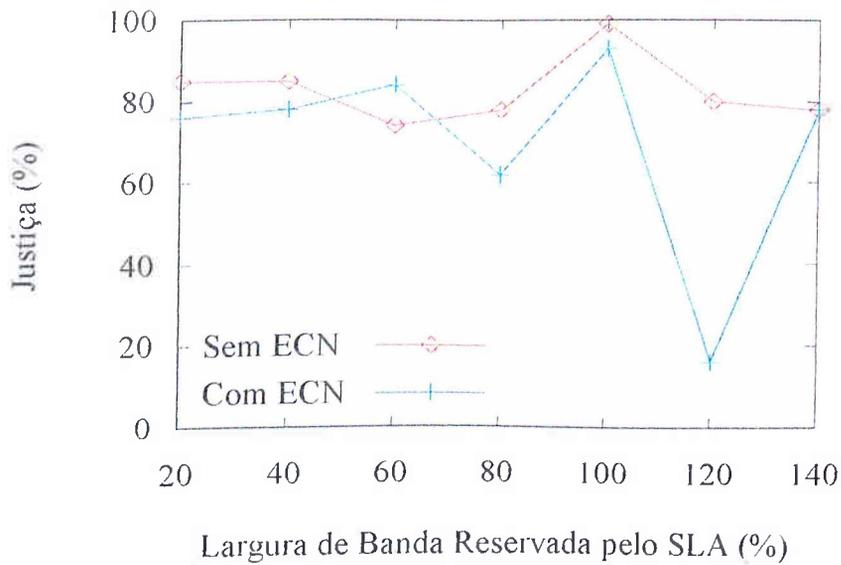


Figura 6.24 – Influência do Percentual de Reserva Total do Enlace na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Conexões com diferentes quantidades de Microfluxos Ativos.

6.8. Influência da Vazão Contratada

O objetivo desta seção é apresentar um estudo sobre a influência do ECN, no nível de serviço oferecido por uma rede DiffServ em um ambiente de interação entre fontes com diferentes parcelas de largura de banda contratada. Serão apresentados resultados de simulações para diversos cenários de dimensionamento, abrangendo desde situações de alta disponibilidade de recursos, até condições extremas de dimensionamento da rede. Inicialmente será apresentado o comportamento de um grupo de conexões onde a vazão contratada por metade das fontes é 3 vezes maior que a do restante das fontes. Em seguida, serão apresentados os resultados de simulações em que a parcela de largura de banda contratada por metade das fontes foi mantida fixa, enquanto que a da outra metade foi aumentada gradualmente. A análise dos resultados, nos cenários onde existe alta disponibilidade de recursos, será feita com base na

proporcionalidade na distribuição da largura de banda excedente. Já nos cenários de mal dimensionamento da rede, esta análise levará em consideração a proporcionalidade da degradação de desempenho.

6.8.1. Rede Bem Dimensionada

Os resultados de simulação apresentados nesta seção irão permitir uma análise sobre os efeitos do ECN na proporcionalidade da distribuição da largura de banda excedente entre fontes que possuem parcelas distintas de largura de banda garantidas no SLA.

O modelo de simulação utilizado possui 10 fontes de tráfego ativas, sendo que metade destas fontes possui 20 kbps de vazão contratada, enquanto que a outra metade possui 60 kbps, sendo que fontes com SLAs distintos são iniciadas de forma alternada. A somatória dos valores utilizados resultam em uma reserva total equivalente a 40% da capacidade de transmissão. A Tabela 6.9 apresenta os resultados alcançados por cada uma das fontes, a eficiência do enlace e o índice de justiça no compartilhamento de largura de banda. Como as fontes possuem reservas de largura de banda distintas, o índice de justiça foi calculado em função do percentual de largura de banda reservada pelo SLA que foi efetivamente alcançado.

As colunas 2 e 5 da Tabela 6.9 apresentam o desempenho das fontes quando não foi utilizado o ECN, enquanto que o comportamento das fontes quando este mecanismo é utilizado é mostrado pelas colunas 3 e 6. Os gráficos a) e b) da Figura 6.25 ilustram a diferença entre a vazão alcançada e a largura de banda reservada pelo SLA nos dois cenários durante todo o tempo de simulação.

TABELA 6.9 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR CONEXÕES QUE POSSUEM PARCELAS DE RESERVA DE LARGURA DE BANDA DISTINTAS EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.

Rede Bem Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		Tipo do Tráfego	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem	Com		Sem	Com
	ECN	ECN		ECN	ECN
20	375%	400%	TCP	75	80
60	196%	210%	TCP	118	126
20	370%	375%	TCP	74	75
60	176%	223%	TCP	106	134
20	465%	380%	TCP	93	76
60	195%	201%	TCP	117	121
20	460%	400%	TCP	92	80
60	180%	200%	TCP	108	120
20	350%	360%	TCP	70	72
60	175%	183%	TCP	105	110
Eficiência	95%	99%	Eficiência	958	994
Justiça	73%	81%	Justiça	73%	81%

Os resultados apresentados demonstram que, em uma rede bem dimensionada, constituída por fluxos que possuem garantias de largura de banda distintas, todas as fontes alcançam a vazão

contratada. Entretanto, a distribuição da largura de banda excedente não é feita de forma proporcional ao contratado, resultando em um melhor nível de serviço sendo oferecido às fontes que possuem reservas menores de largura de banda. Nos resultados de simulação apresentados, a reserva total de largura de banda foi de 400 kbps, sendo que, 25% deste total foi reservado pelas 5 fontes com largura de banda contratada igual a 20 kbps, enquanto que os 75% restantes foram reservados pelas 5 fontes com largura de banda contratada igual a 60 kbps. Esta proporção não é mantida na distribuição da largura de banda excedente, já que, como pode ser observado nos gráficos a) e b) da Figura 6.25, tanto as fontes com 20 kbps de reserva, quanto as fontes com reserva de 60 kbps, obtêm aproximadamente 50% da largura de banda excedente.

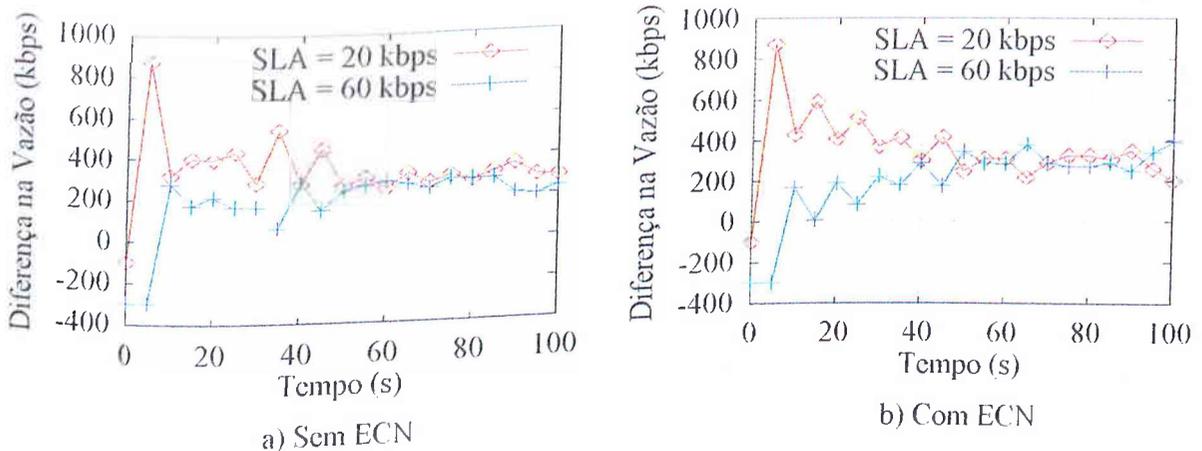


Figura 6.25 – Diferença da Vazão Alcançada em relação à Parcela de Largura de Banda Contratada por Grupos de Fontes com SLAs Distintos em uma Rede Bem Dimensionada.

Os índices de justiça apresentados na Tabela 6.9 demonstram que a utilização do ECN consegue oferecer uma pequena melhoria na proporcionalidade da distribuição da largura de banda excedente. Isto se comprova já que, na simulação feita sem a utilização do ECN, as

fontes com 25% de reserva obtêm 42% da largura de banda total, enquanto que as fontes com 75% de reserva obtêm 57%, enquanto que na simulação que utiliza o ECN, estas fontes obtiveram respectivamente, 38% e 61% do volume total trafegado.

6.8.2. Rede Mal Dimensionada

Será estudado agora, os efeitos do ECN na proporcionalidade da degradação de desempenho de fontes com SLAs distintos, em uma cenário onde o total de largura de banda contratada é superior à capacidade de transmissão.

Assim como na simulação anterior, foram utilizadas 10 fontes de tráfego, entretanto nesta simulação, a parcela de largura de banda contratada por metade das fontes será igual a 60 kbps, enquanto que a da outra metade será igual a 180 kbps, sendo que fontes com SLAs distintos serão iniciadas de forma alternada. A somatória dos SLAs de cada fonte resulta em uma reserva total equivalente a 120% da capacidade de transmissão. Os resultados alcançados por cada uma das fontes, a eficiência do enlace e o índice de justiça no compartilhamento de largura de banda são apresentados na Tabela 6.10. Como as fontes possuem reservas de largura de banda distintas, o índice de justiça foi calculado em função do percentual de largura de banda contratada que foi realmente alcançado.

O desempenho das fontes quando não é utilizado o ECN é apresentado pelas colunas 2 e 5, enquanto as colunas 3 e 6 mostram o comportamento das fontes quando este mecanismo é utilizado. A diferença entre a vazão alcançada e a largura de banda contratada, durante todo o tempo de simulação, é ilustrado pelos gráficos a) e b) da Figura 6.26.

TABELA 6.10 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR CONEXÕES QUE POSSUEM PARCELAS DE RESERVA DE LARGURA DE BANDA DISTINTAS EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.

Rede Mal Dimensionada					
LBC (kbps)	Percentual Obtido		Tipo do Tráfego	Vazão Obtida (kbps)	
	Sem	Com		Sem	Com
	ECN	ECN		ECN	ECN
60	110%	111%	TCP	66	67
180	72%	66%	TCP	131	120
60	105%	111%	TCP	63	67
180	62%	76%	TCP	112	138
60	113%	116%	TCP	68	70
180	72%	76%	TCP	131	138
60	105%	108%	TCP	63	65
180	71%	76%	TCP	128	137
60	110%	110%	TCP	66	66
180	84%	71%	TCP	152	128
Eficiência	98%	99%	Eficiência	980	996
Justiça	20%	14%	Justiça	20%	14%

Também neste cenário, o nível de serviço oferecido às fontes que possuem reservas menores é superior, ficando caracterizado que não houve proporcionalidade entre a largura de banda reservada e a degradação de desempenho das fontes. A reserva total de largura de banda foi de 1200 kbps, sendo que a proporção da simulação anterior foi mantida, o que significa que 25% deste total foi reservado pelas 5 fontes com largura de banda contratada igual a 60 kbps,

enquanto que os 75% restantes foram alocados por 5 fontes cujo total de largura de banda contratada era igual a 180 kbps. O que se observa na análise da degradação de desempenho, apresentada pelos gráficos da Figura 6.26, é que esta proporção não é mantida, e enquanto as fontes com 60 kbps de reserva praticamente não sofrem degradação, as fontes com reserva de 180 kbps, sofrem uma degradação de aproximadamente 27% em relação à vazão garantida pelo SLA. Os índices de justiça apresentados na Tabela 6.10 demonstram que a utilização do ECN não oferece melhorias a esta situação.

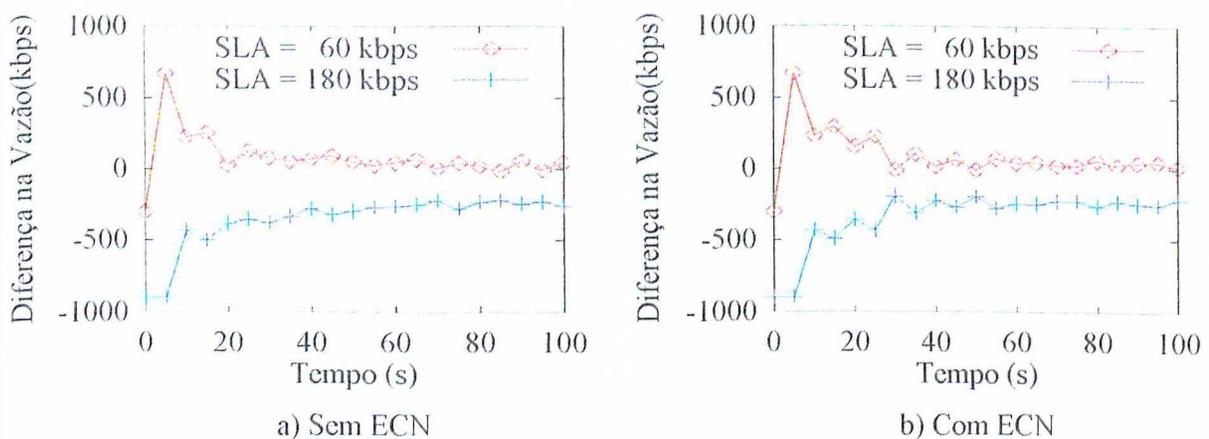


Figura 6.26 – Diferença da Vazão Alcançada em relação à Parcela de Largura de Banda Contratada por Grupos de Fontes com SLAs Distintos em uma Rede Mal Dimensionada.

6.8.3. Variação da Diferença de Vazão Contratada

As simulações implementadas até o momento mantiveram fixas as porções de largura de banda contratadas por cada grupo de fontes em 25% e 75% do total reservado. Esta seção pretende estudar o comportamento de grupos de fontes cujas diferenças de vazão contratada sejam maiores, e portanto, esta proporção não será mantida. O modelo de simulação foi mantido e considera 10 fontes de tráfego. A largura de banda contratada por metade destas

fontes será mantida fixa e igual a 20 kbps, totalizando 100 kbps de reserva para este grupo, enquanto a largura de banda contratada pelo restante das fontes será variada entre 100 kbps e 1300 kbps.

O nível de serviço obtido por cada grupo de fontes é apresentado pelos gráficos a) e b) da Figura 6.27. Como nas simulações anteriores, verifica-se que, o nível de serviço do grupo de fontes que possui menor quantidade de largura de banda reservada é superior ao obtido pelo grupo com reserva maior.

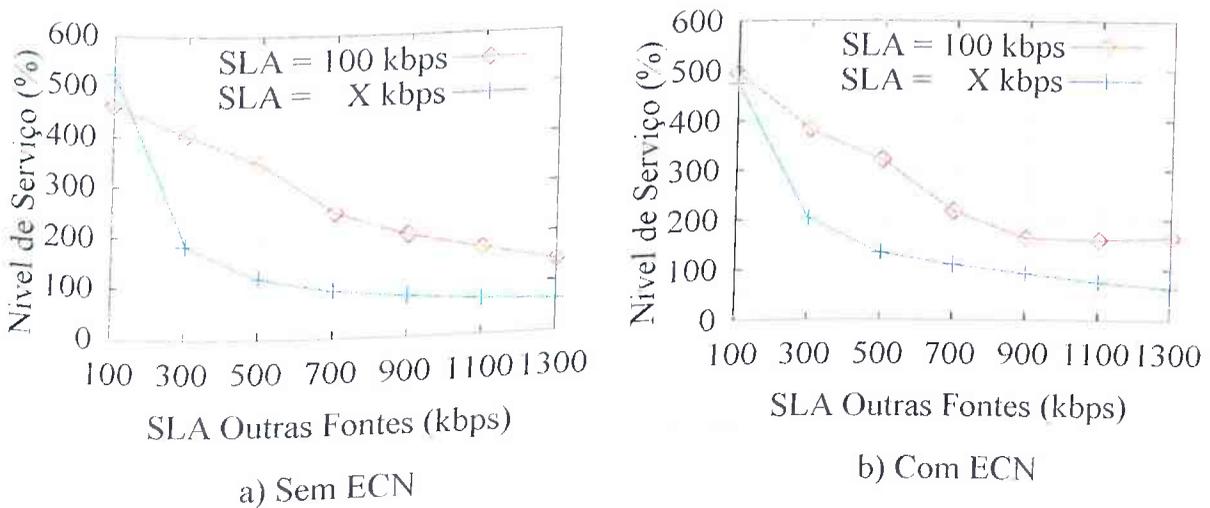


Figura 6.27 – Influência da Parcela de Largura de Banda Contratada no Nível de Serviço Obtido por Fontes com SLAs distintos.

A influência do ECN no comportamento observado é melhor observado através da análise do gráfico da Figura 6.28, que apresenta a justiça no compartilhamento de largura de banda entre as fontes, levando-se em consideração a proporcionalidade desta distribuição em relação à porção de largura de banda reservada. Os índices apresentados demonstram que, quanto maior

a diferença de vazão contratada, menor a proporcionalidade na distribuição, sendo que a utilização do ECN evidencia ainda mais este comportamento.

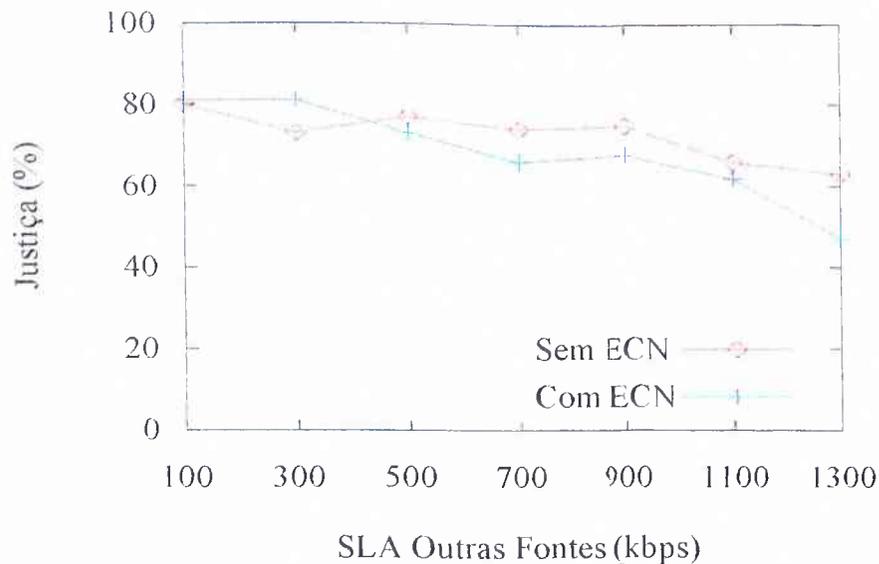


Figura 6.28 – Influência da Diferença de Vazão Contratada na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Fontes com SLAs distintos.

6.8.4. Influência do Dimensionamento da Rede

Nesta seção serão apresentados os resultados de simulações similares às implementadas nas seções anteriores, abrangendo um intervalo de reserva de largura de banda que varia de 20% a 140%. O modelo de simulação foi mantido e considera 10 fontes de tráfego, sendo que, metade destas fontes possui 25% do total de reserva de largura de banda, enquanto que os 75% restantes são alocados pela outra metade.

Os gráficos a) e b) da Figura 6.29 apresentam o nível de serviço obtido por cada grupo de fontes nas diversas simulações efetuadas. Pode-se observar que, em todas as simulações, o

nível de serviço obtido pelo grupo de fontes que possui menor percentual de reserva é superior ao obtido pelo grupo com percentual maior.

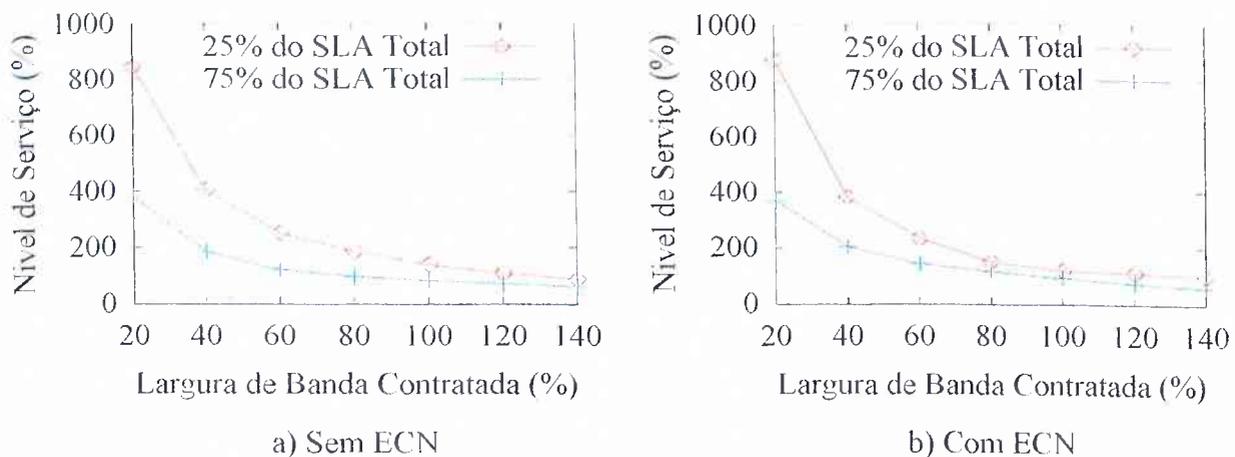


Figura 6.29 – Influência da Situação de Dimensionamento da Rede no Nível de Serviço Obtido por Fontes com SLAs distintos.

Para melhor entender com o ECN influencia este comportamento deve-se analisar o gráfico da Figura 6.30. Este gráfico apresenta a justiça no compartilhamento de largura de banda entre fontes com diferentes valores contratados levando-se em consideração a proporcionalidade desta distribuição em relação à porção de largura de banda reservada. Os índices de justiça apresentados demonstram que, quando a rede se encontra bem dimensionada, a utilização do ECN consegue otimizar a proporcionalidade da distribuição da largura de banda; entretanto esta situação se inverte quando a rede é mal dimensionada.

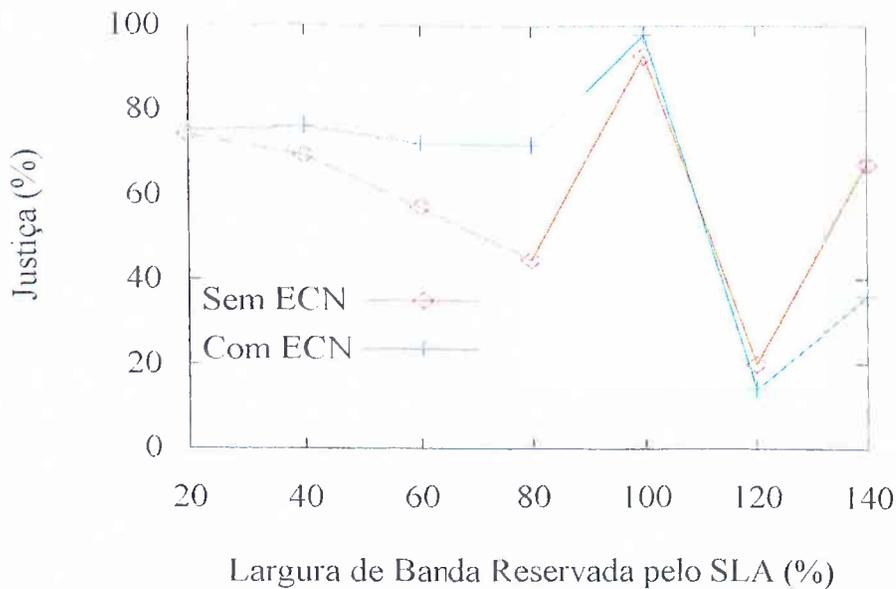


Figura 6.30 – Influência da Situação de Dimensionamento da Rede na Justiça do Compartilhamento da Largura de Banda entre Fontes com SLAs distintos.

6.9. Interação com Outros Algoritmos de Controle de Congestionamento

Os algoritmos Reno, *New Reno*, Sack e Vegas são algumas das implementações do TCP desenvolvidas para implementar melhorias aos mecanismos de controle de congestionamento *Slow Start* e *Congestion Avoidance* inicialmente implementados pelo TCP *Vanilla*. O Reno é o mais difundido destes algoritmos, sendo atualmente o mais utilizado. Estes algoritmos, divergem principalmente na forma de tratamento dos descartes de pacotes, o que irá influenciar a agressividade com que as fontes tentam manter a vazão na ocorrência de congestionamentos. Em uma rede DiffServ, estas diferenças no tratamento dos descartes podem acarretar variações na distribuição de largura de banda entre fontes que possuem SLAs idênticos.

Nesta seção serão apresentados e analisados resultados de simulação para avaliar o nível de serviço que a rede DiffServ oferece às fontes ECN, em um ambiente de interação com fontes que implementam cada um dos algoritmos de controle de congestionamento citados. Serão avaliados intervalos distintos de largura de banda contratada, que irão abranger desde situações de excesso de disponibilidade de recursos, até situações de subdimensionamento da rede. Também será estudada a interação simultânea de fontes ECN com fontes Reno, *New Reno*, Sack e Vegas.

6.9.1. Rede Bem Dimensionada

Esta simulação irá estudar o compartilhamento da largura de banda excedente, entre fontes ECN e fontes que implementam os algoritmos Reno, *New Reno*, Sack e Vegas, em um cenário onde existe excesso de disponibilidade de recursos.

Cada simulação considera 10 fontes de tráfego ativas, sendo que para cada conexão foi reservado pelo SLA um total de 40 kbps de largura de banda, o que representa uma reserva total de 40% da capacidade de transmissão. Fontes que utilizam algoritmos de controle de congestionamento distintos são iniciadas de forma intercalada. A Tabela 6.11 apresenta os resultados obtidos para cada uma das fontes, a eficiência do enlace e a justiça alcançada no compartilhamento da largura de banda excedente. As colunas 2, 3, 4 e 5 apresentam os resultados da interação de Fontes ECN com Fontes Reno, *New Reno*, Sack e Vegas respectivamente. Os gráficos a), b), c) e d) da Figura 6.31 ilustram o comportamento das fontes durante todo o intervalo de simulação.

TABELA 6.11 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES QUE IMPLEMENTAM DIFERENTES ALGORITMOS DE CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO QUANDO INTERAGINDO COM FONTES ECN EM UMA REDE BEM DIMENSIONADA.

Rede Bem Dimensionada					
LBC (kbps)	Reno	New Reno	Sack	Vegas	Fonte ECN
40	327%	285%	280%	302%	Sim
40	175%	185%	187%	202%	Não
40	327%	255%	325%	307%	Sim
40	195%	202%	150%	217%	Não
40	307%	300%	285%	247%	Sim
40	197%	215%	180%	197%	Não
40	232%	315%	325%	295%	Sim
40	180%	197%	205%	192%	Não
40	322%	312%	307%	295%	Sim
40	190%	205%	215%	220%	Não
Eficiência	98%	99%	98%	99%	Eficiência
Justiça	83%	89%	84%	91%	Justiça

Os resultados apresentados demonstram que em uma rede bem dimensionada, apesar de todas as fontes possuírem SLAs idênticos, as fontes que utilizam o ECN conseguem obter um melhor desempenho, alcançando uma vazão superior à alcançada pelas fontes que implementam os outros algoritmos. Isto ocorre porque, como o ECN evita o descarte de pacotes, as fontes que utilizam este mecanismo, não desperdiçam largura de banda para

ajustar sua vazão à capacidade de transmissão, e acabam conseguindo uma porção maior do da largura de banda excedente. Este comportamento foi observado na interação do ECN com todos os algoritmos de controle de congestionamento avaliados, sendo que o melhor índice de justiça no compartilhamento da largura de banda excedente foi obtido quando as fontes ECN interagiram com fontes Vegas, e os piores índices foram obtidos na interação com Reno e Sack. Como todas as fontes, independentemente do algoritmo utilizado, conseguem o nível de serviço contratado e ainda usufruem de uma parcela da largura de banda excedente, pode-se concluir que as fontes ECN não causam danos ao desempenho das outras fontes.

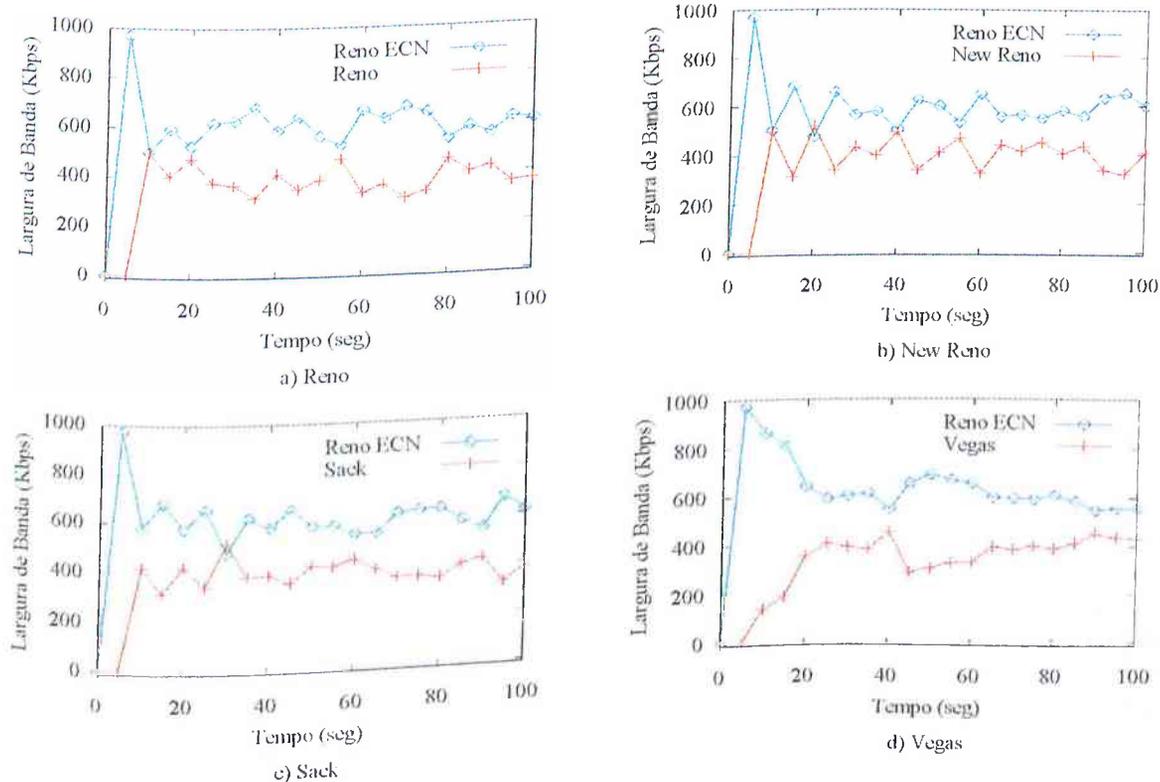


Figura 6.31 – Comparativo de desempenho em um ambiente de interação entre Fontes ECN e Fontes que implementam algoritmos de controle de congestionamento Reno, *New Reno*, Sack e Vegas em uma Rede Bem Dimensionada.

6.9.2. Rede Mal Dimensionada

A análise dos resultados das simulações implementadas nesta seção, tem por objetivo avaliar o nível de serviço oferecido às fontes ECN, quando estas interagem com fontes Reno, *New Reno*, Sack e Vegas, em um cenário onde a largura de banda contratada é superior à capacidade de transmissão.

TABELA 6.12 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES QUE IMPLEMENTAM DIFERENTES ALGORITMOS DE CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO QUANDO INTERAGINDO COM FONTES ECN EM UMA REDE MAL DIMENSIONADA.

Rede Mal Dimensionada					
LBC (kbps)	Reno	<i>New Reno</i>	Sack	Vegas	Fonte ECN
120	100%	95%	93%	97%	Sim
120	65%	76%	84%	45%	Não
120	96%	94%	88%	102%	Sim
120	67%	68%	80%	43%	Não
120	97%	99%	80%	90%	Sim
120	63%	69%	68%	84%	Não
120	97%	93%	94%	91%	Sim
120	70%	79%	83%	89%	Não
120	103%	80%	80%	100%	Sim
120	66%	71%	73%	84%	Não
Eficiência	99%	99%	99%	99%	Eficiência
Justiça	52%	70%	83%	42%	Justiça

O modelo de simulação utilizado é o mesmo da simulação anterior, entretanto, a largura de banda contratada para cada fonte é igual a 120 kbps, o que representa uma reserva total de 120% da capacidade de transmissão. A Tabela 6.12 apresenta os resultados obtidos para cada uma das fontes, a eficiência do enlace e a justiça na degradação de desempenho das fontes. As colunas 2, 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos em um ambiente de interação com fontes Reno, *New Reno*, Sack e Vegas. A representação gráfica do comportamento das fontes, durante todo o intervalo de simulação, é apresentado pelos gráficos a), b), c) e d) da Figura 6.32.

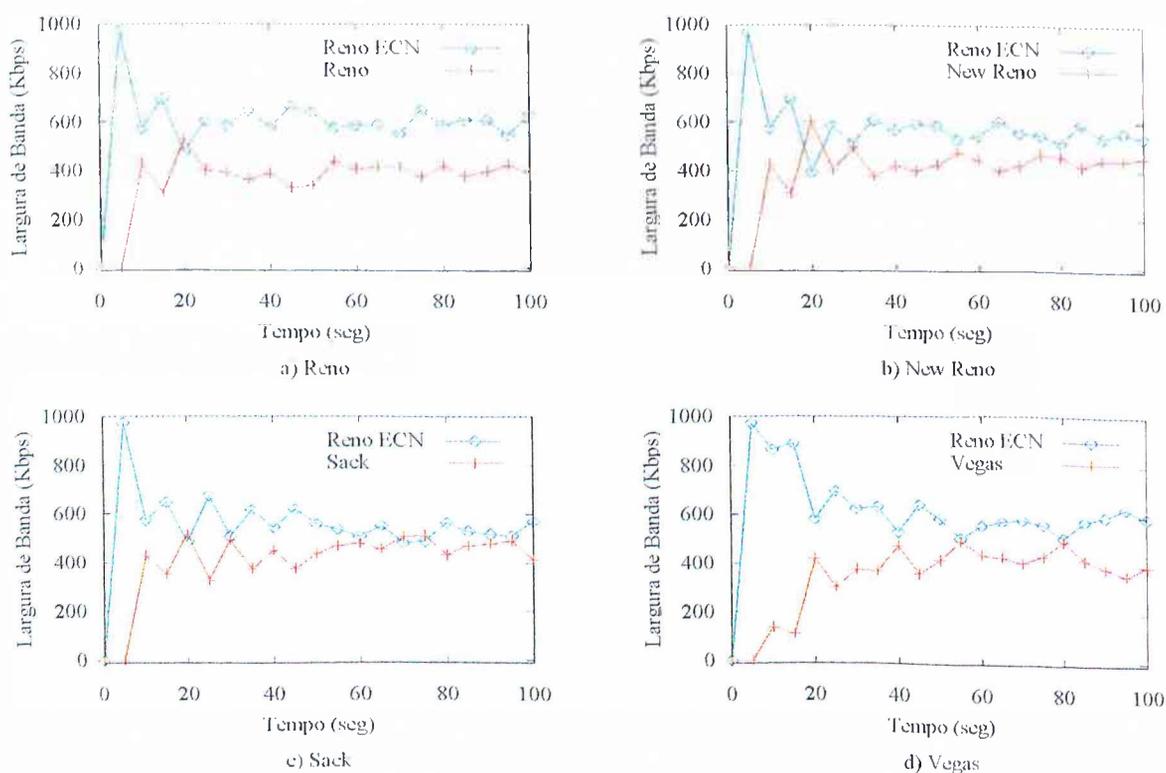


Figura 6.32 – Comparativo de desempenho em um ambiente de interação entre Fontes ECN e Fontes que implementam algoritmos de controle de congestionamento Reno, *New Reno*, Sack e Vegas em uma Rede Mal Dimensionada.

Os resultados apresentados acima mostram que, o comportamento das fontes neste cenário de simulação é o mesmo do cenário anterior. Isto é, apesar de todas as fontes possuírem SLAs idênticos, as fontes que implementam o ECN conseguem um desempenho melhor que o restante das fontes. Entretanto, neste caso, ao contrário do observado nas simulações anteriores, a interação com fontes Vegas é a que apresenta o pior índice de justiça no compartilhamento da largura de banda, enquanto que o melhor índice é obtido na interação com fontes Sack.

6.9.3. Influência do Dimensionamento da Rede

Esta seção reproduz as simulações feitas anteriormente, variando-se o percentual de reserva de largura de banda entre 20% e 140%. O objetivo destas simulações é estender os resultados obtidos na seção anterior a um intervalo mais amplo de condições de dimensionamento da rede.

Foram utilizadas 10 fontes de tráfego, sendo que, em cada simulação, metade destas fontes utilizou o mecanismo ECN, enquanto que a outra metade utilizou um dos algoritmos de controle de congestionamento avaliados, a saber, Reno, *New Reno*, Sack e Vegas. O gráfico da Figura 6.33 apresenta os índices de justiça no compartilhamento de largura de banda obtidos em cada uma das simulações. Pode-se observar que, independentemente da situação de dimensionamento da rede, os piores índices de justiça foram obtidos quando as fontes ECN interagiram com fontes Reno e Vegas., enquanto que os índices mais elevados foram obtidos, nas simulações em que fontes ECN interagiram com fontes Sack e *New Reno*.

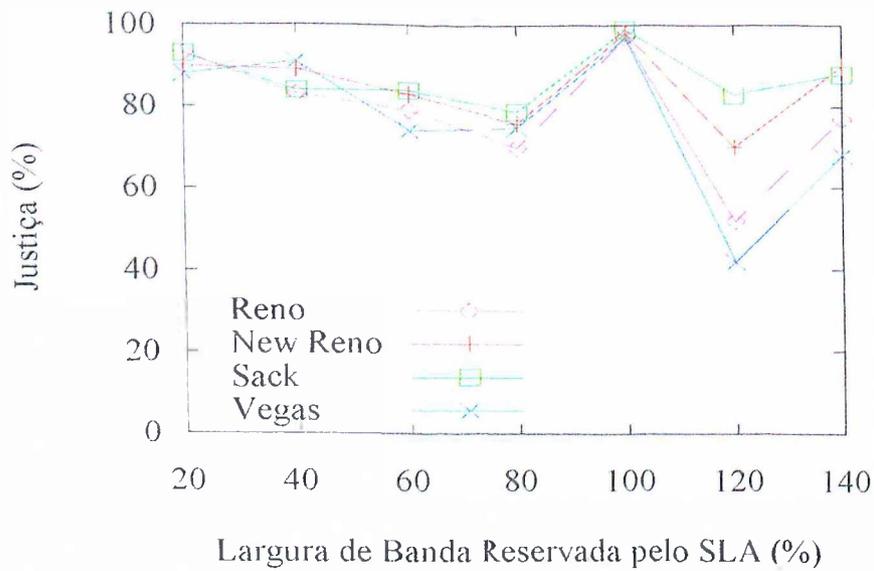


Figura 6.33 – Influência da Situação de Dimensionamento da Rede no Índice de Justiça no compartilhamento de Largura de Banda entre Fontes ECN e Fontes que implementam os algoritmos de controle Reno, *New Reno*, Sack e Vegas.

Os resultados apresentados na Figura 6.33 são consequência do melhor desempenho das fontes ECN, mediante fontes que implementam outros mecanismos de controle de congestionamento e congestionamento. Para uma melhor compreensão destes resultados é necessário observar o gráfico da Figura 6.34. Este gráfico apresenta a vazão das fontes Reno, *New Reno*, Sack e Vegas, em cada uma das situações de dimensionamento avaliadas. Comparando-se este gráfico com o gráfico da Figura 6.33, é possível verificar que, quanto maior a vazão alcançada pelas fontes não ECN, maior também é o índice de justiça no compartilhamento da largura de banda da simulação. Isto acontece porque, quanto maior a vazão obtida por estas fontes, mais esta vazão se aproxima da metade da capacidade de transmissão, fazendo com que a largura de banda alocada pelas fontes ECN também se aproxime desta quantidade. Estes resultados demonstram que, quando competindo com fontes

ECN, é necessário uma maior agressividade, para se alcançar proporcionalidade adequada na distribuição da largura de banda.

Pode-se concluir que, em ambientes de interação com algoritmos Reno, *New Reno*, Sack e Vegas, as fontes ECN sempre obtêm melhor desempenho, sem contudo causar danos ao desempenho das outras fontes, já que estas conseguem uma porção da largura de banda excedente quando a rede esta bem dimensionada, e não se anulam quando a rede esta mal dimensionada.

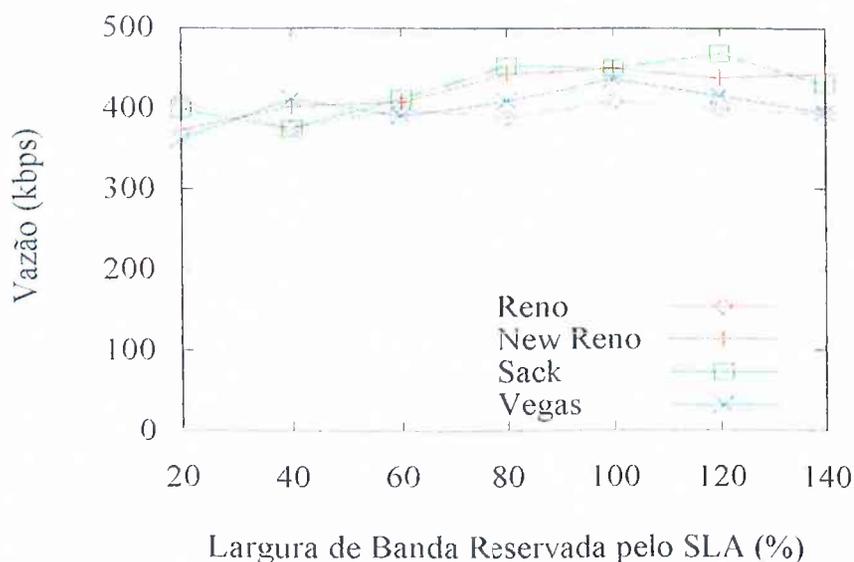


Figura 6.34 – Vazão alcançada pelas fontes Reno, *New Reno*, Sack e Vegas, em um ambiente de interação com Fontes ECN para diferentes situações de Dimensionamento da Rede.

6.9.4. Interação entre todos os Algoritmos de Controle de Congestionamento

Os resultados apresentados a seguir mostram o comportamento das conexões em um ambiente de integração simultânea entre fontes ECN e fontes Reno, *New Reno*, Sack e Vegas. As

simulações foram feitas para dois ambientes distintos de dimensionamento da rede. Em um cenário existe excesso de disponibilidade de recursos, enquanto que no outro a rede foi subdimensionada.

Cada simulação considera 5 fontes de tráfego ativas, sendo que, no cenário de disponibilidade de recursos, foi reservado para cada fonte 80 kbps de largura de banda, enquanto que, no cenário de subdimensionamento, esta reserva é de 240 kbps. Estes valores representam respectivamente, um total de reserva equivalente a 40% e 120% da capacidade de transmissão. A Tabela 6.13 apresenta os resultados obtidos para cada uma das fontes, a eficiência do enlace e a justiça alcançada no compartilhamento da largura de banda.

TABELA 6.13 – NÍVEL DE SERVIÇO OBTIDO POR FONTES QUE IMPLEMENTAM DIFERENTES ALGORITMOS DE CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO QUANDO INTERAGINDO SIMULTANEAMENTE ENTRE SI E COM FONTES ECN.

Rede Bem Dimensionada			Algoritmo Utilizado	Rede Mal Dimensionada		
LBC (kbps)	Percentual Obtido	Vazão (kbps)		LBC (kbps)	Percentual Obtido	Vazão (kbps)
80	321%	257	ECN	240	99%	238
80	252%	202	New Reno	240	84%	203
80	227%	182	Reno	240	69%	166
80	221%	177	Sack	240	85%	205
80	203%	163	Vegas	240	76%	183
Eficiência				Eficiência	99%	99%
Justiça				Justiça	74%	74%

O desempenho das fontes em uma rede bem dimensionada é apresentado pelas colunas 2 e 3 da Tabela 6.13, enquanto que as colunas 6 e 7 apresentam os resultados obtidos em rede mal dimensionada. Os gráficos a) e b) da Figura 6.35 ilustram o comportamento de cada conexão durante todo o intervalo de simulação.

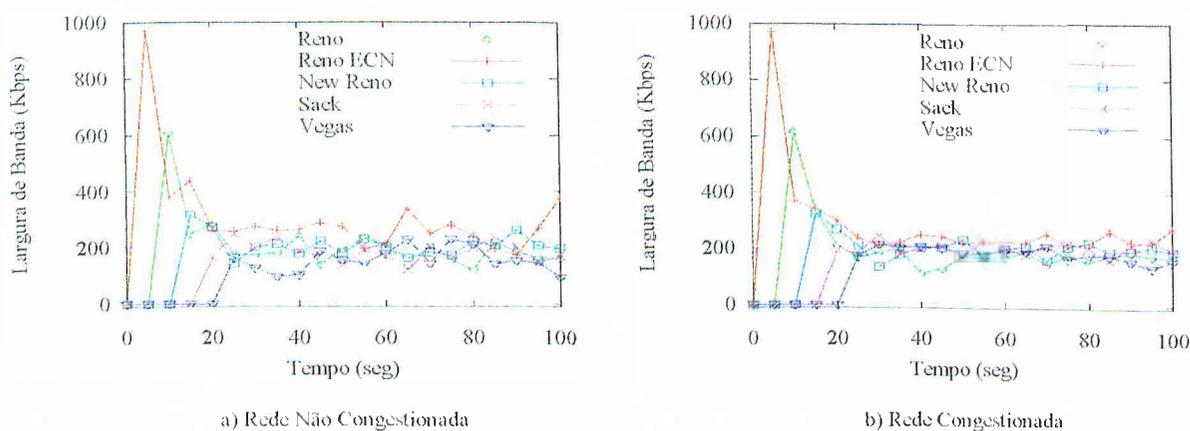


Figura 6.35 – Desempenho das Conexões em um cenário de integração simultânea entre fontes ECN, Reno, *New Reno*, Sack e Vegas para duas situações opostas de Dimensionamento da Rede.

A observação dos resultados acima permite concluir que, tanto no cenário de excesso de disponibilidade de recursos, quanto no cenário de subdimensionamento da rede, as fontes ECN conseguem desempenho melhor que todas as outras fontes, enquanto que os piores resultados são obtidos pelas fontes Reno e Vegas.

Apesar de beneficiadas, as fontes ECN não causam danos ao desempenho das outras fontes, já que, quando a rede não está congestionada, todas as fontes conseguem usufruir de uma parcela da largura de banda excedente, enquanto que no ambiente congestionado, nenhuma

das fontes que implementam outros algoritmos se anula. O gráfico da Figura 6.36 estende estes resultados a um intervalo mais amplo de situações de dimensionamento, validando assim as conclusões apresentadas. Os resultados obtidos garantem que é possível fazer uma transição gradativa, incorporando o mecanismo ECN sem prejudicar o bom funcionamento de fontes que ainda não implementem este mecanismo.

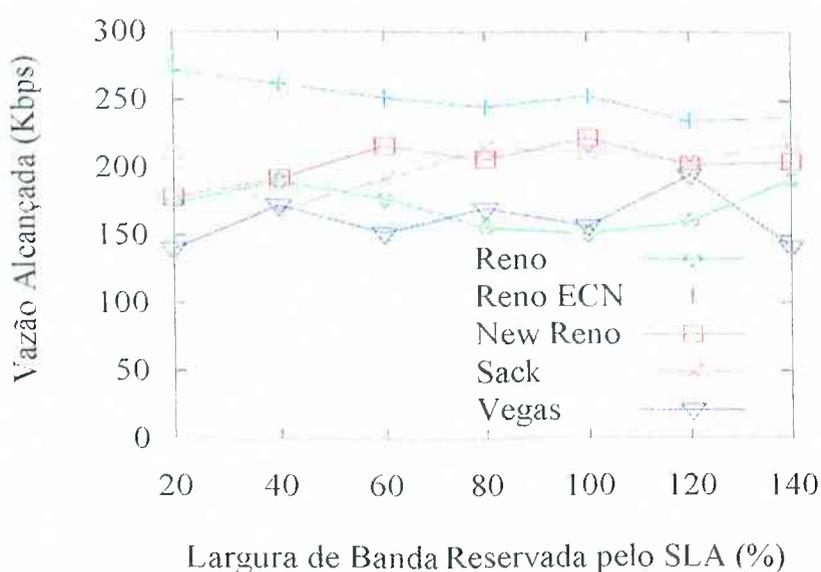


Figura 6.36 -- Vazão alcançada pelas fontes Reno, Reno ECN, *New Reno*, Sack e Vegas, em um ambiente de interação entre todos os algoritmos para diferentes situações de Dimensionamento da Rede.

6.10. Conclusões

O estudo baseado em modelagem e simulação apresentado neste capítulo teve por objetivo a análise dos efeitos da utilização do ECN no comportamento de uma rede DiffServ, quando esta se encontra sob o efeito de fatores que sabidamente afetam o nível de serviço oferecido. Foram estudados: a interação com fontes não cooperantes, o comportamento de fluxos com

RTT distintos, a influência do tamanho do pacote, o efeito da agregação de fluxos, o impacto de diferentes larguras de banda contratadas e a interação com algoritmos de controle de congestionamento diversos. Situações de subdimensionamento da rede, bem como de excesso de disponibilidade de recursos foram avaliadas, tanto para o modelo que implementa ECN, quanto para o modelo convencional atualmente utilizado. Os resultados obtidos foram analisados através de um comparativo entre estes modelos, permitindo a identificação de benefícios oferecidos pelo uso do ECN nas diversas situações estudadas.

A análise dos resultados obtidos permitiu a identificação dos seguintes benefícios oferecidos pelo modelo que implementa ECN: a) otimização do uso do enlace em todas as simulações implementadas; b) melhor distribuição da largura de banda em cenários de interação com fontes não cooperantes; c) redes bem dimensionadas, sob o efeito dos fatores estudados, conseguem melhorar o índice de justiça no compartilhamento de largura de banda, sendo que a única exceção é o cenário em que as conexões possuem diferentes quantidades de microfluxos ativos; d) melhor eficiência das fontes ECN em ambientes de interação com outros algoritmos de controle de congestionamento.

É possível concluir que, quando a rede é bem dimensionada, o uso do ECN ameniza os efeitos da maioria dos fatores que influenciam o nível de serviço oferecido à fontes com características distintas. Este resultado se inverte quando a rede está mal dimensionada, o que reforça o fato de que para obter desempenho satisfatório de uma rede DiffServ, é necessário prevenir que a largura de banda contratada seja maior que a capacidade de transmissão. Esta premissa irá garantir que as fontes melhor usufruam dos benefícios do uso combinado da arquitetura DiffServ e do mecanismo ECN, nos mais variados ambientes.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES GERAIS

A rápida transformação da Internet em uma rede comercial, e a disseminação de aplicações do tipo voz, vídeo, ensino à distância e comércio eletrônico, faz crescer a demanda por Qualidade de Serviço (QoS) em redes baseadas na arquitetura TCP/IP. Considerados como elementos chave no atendimento à esta demanda, a diferenciação de serviços e o gerenciamento do tráfego, são alvos de estudo desta dissertação. As tecnologias avaliadas foram: a arquitetura de Serviços Diferenciados (DiffServ) e o mecanismo de Notificação Explícita de Congestionamento (ECN), ambos desenvolvidos pelo IETF com o objetivo de adequar o modelo atual e otimizar o funcionamento das redes TCP/IP.

A arquitetura DiffServ tem como objetivo suportar diversos tipos de aplicação através da implementação de diferentes garantias de serviço. Nesta arquitetura os pacotes são marcados de forma diferenciada, criando assim classes de serviço que serão tratadas pela rede de forma distinta. As classes de serviço suportadas, e os respectivos volumes de tráfego permitidos, são

definidos através de Acordos de Nível de Serviço (SLAs), que podem ser estabelecidos entre as fontes de tráfego e a rede, ou entre domínios DiffServ adjacentes. Quando o SLA não é observado pelas fontes de tráfego, os pacotes que excedem a taxa estipulada são marcados como não em conformidade e terão maior probabilidade de descarte na ocorrência de congestionamentos. O descarte de pacotes dispara mecanismos de controle de congestionamento do TCP, fazendo com que as fontes ajustem sua carga de dados.

Embora viabilize o transporte de serviços heterogêneos, a arquitetura DiffServ se apoia nas técnicas de controle de congestionamento do TCP, não prevendo mecanismos para sua otimização. Entretanto, estas técnicas se baseiam no descarte de pacotes, o que reduz o desempenho da rede, além de aumentar o tráfego e o retardo de transferência, tornando este mecanismo inadequado para aplicações interativas, já que estas são sensíveis ao retardo e à perda de pacotes. Desta forma, uma vez que esta arquitetura de QoS tenha sido disseminada, surgirá a demanda por mecanismos que otimizem o seu gerenciamento de tráfego.

A proposta do ECN tem por objetivo otimizar o gerenciamento de tráfego do TCP, desvinculando seu funcionamento do descarte de pacotes. Assim sendo, esta estratégia pode ser utilizada para melhorar a eficiência do DiffServ, proporcionando assim níveis de QoS que melhor atendam aos requisitos das aplicações interativas.

Nesta dissertação foi apresentado um estudo para determinar a viabilidade de um ambiente que combine a tecnologia DiffServ e o mecanismo ECN. A primeira parte deste estudo avalia os efeitos da utilização do ECN no nível de serviço oferecido pela rede DiffServ. Esta avaliação é feita através de um comparativo do modelo que implementa ECN com o modelo

atualmente utilizado, permitindo assim a identificação do ambiente que proporciona melhor desempenho e QoS. Os resultados obtidos são apresentados e analisados, contemplando cenários variados quanto à utilização do ECN, situação de dimensionamento da rede e número de fluxos ativos. Os parâmetros estudados foram: a eficiência do enlace, a justiça no compartilhamento da largura de banda e as taxas de descarte, *timeout* e retransmissão de pacotes.

A análise dos resultados de simulação obtidos indicam que o uso do ECN otimiza o desempenho da arquitetura DiffServ nos mais variados cenários de simulação avaliados. Em especial, quando a rede é corretamente dimensionada, é possível observar que o uso do ECN, além de prover ganhos de desempenho, também otimiza o compartilhamento da largura de banda excedente, garantindo maior equidade na distribuição dos recursos disponíveis. Estas características são particularmente evidenciadas quando o total de reserva de largura de banda se aproxima da capacidade total de transmissão. Também foi observado, que o controle dos descartes, resulta em redução das taxas de *timeout* e reenvio de pacotes, evitando desperdícios de processamento, largura de banda e ocupação das filas o que terá como benefício a redução do retardo e do *jitter* dos pacotes.

Uma segunda etapa deste estudo analisa a influência da utilização do ECN nos efeitos causados por diversos fatores que impactam o nível de serviço oferecido pela rede DiffServ. Estes fatores interferem na justiça no compartilhamento de largura de banda entre fontes de tráfego que possuem contratos de nível de serviço idênticos, e influenciam a proporcionalidade deste compartilhamento entre fontes com contratos de nível de serviço distintos. Foram estudados: a interação com fontes não cooperantes, o comportamento de

fluxos com RTT distintos, a influência do tamanho do pacote, o efeito da agregação de fluxos, o impacto de diferentes larguras de banda contratadas e a interação com algoritmos de controle de congestionamento diversos. Tanto situações de excesso de disponibilidade de recursos quanto de subdimensionamento da rede foram avaliadas, sendo que, no caso de excesso de recursos, a característica estudada foi a distribuição da largura de banda excedente, enquanto que, no caso de subdimensionamento, foi analisada a homogeneidade na degradação de desempenho das fontes.

A análise dos resultados obtidos nas simulações de interação com fontes não cooperantes demonstram que, quando a reserva total do enlace é inferior à sua capacidade, o uso do ECN permite que as fontes cooperantes usufruam da largura de banda excedente, o que não ocorre na ausência deste mecanismo. Além disto, se a reserva total for superior à capacidade de transmissão, o uso do ECN impede que, como ocorre na ausência deste mecanismo, apenas as fontes cooperantes se degradem, garantindo assim uma melhor distribuição da largura de banda disponível.

Também foi observado que, quando a rede é bem dimensionada, o uso do ECN ameniza, tanto o favorecimento de fontes com menor RTT, quanto de fontes com tamanhos de pacote maiores, melhorando assim os índices de justiça no compartilhamento de largura de banda. Este comportamento é ainda mais evidenciados quando o percentual de reserva se aproxima, da capacidade total de transmissão. Já em redes mal dimensionadas, o resultado se inverte, e os índices de justiça alcançados pelas simulações que utilizaram o ECN são inferiores aos obtidos pelas simulações que não utilizam este mecanismo.

O cenário de interação entre conexões com diferentes quantidades de microfluxos foi o único em que o uso do ECN não otimizou os índices de justiça no compartilhamento de largura de banda, independentemente do bom ou mal dimensionamento da rede. Neste cenário, apesar dos índices alcançados nas simulações com ECN serem bastante próximos aos das simulações feitas sem o uso deste mecanismo, os resultados obtidos ainda são inferiores. Convém entretanto ressaltar que, apesar de não amenizar o favorecimento de conexões com maior quantidade de microfluxos, o uso do ECN aumenta a eficiência total do enlace.

Quanto à distribuição de recursos, entre fontes com diferentes larguras de banda contratadas, foi observado que, estando a rede bem dimensionada, o uso do ECN garante uma melhor proporcionalidade nesta distribuição. Esta situação se torna menos evidenciada à medida em que se aumenta o percentual de reserva do enlace, chegando a se inverter à partir do instante em que o total reservado ultrapassa a capacidade total de transmissão.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a definição e avaliação de um modelo que integre o mecanismo ECN, a arquitetura DiffServ e a técnica de encaminhamento de pacotes MPLS. Esta técnica, que tem se destacado por oferecer uma solução eficiente e econômica para o encaminhamento rápido de pacotes em redes IP, permite o agrupamento das aplicações em classes de equivalência, o que facilita sua integração com o DiffServ conforme proposto em [63]. Espera-se portanto que o suporte ao ECN em um modelo que implemente DiffServ sobre MPLS possibilite um melhor gerenciamento dos recursos garantindo um melhor desempenho. Uma proposta de mapeamento entre ECN e MPLS é apresentada em [64] e [65], entretanto não foi encontrada na bibliografia pesquisada uma proposta de integração simultânea entre estas três tecnologias. Outra sugestão seria o desenvolvimento de estudos

similares aos apresentados em [66], onde são propostas melhorias que permitem maior cooperação entre o mecanismo ECN e a arquitetura DiffServ. Também em [67] e [68] são apresentadas sugestões de melhorias ao ECN que necessitam de investigação mais detalhada no que se refere à integração com mecanismos como o DiffServ.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] STARDUST.COM, INC., "Quality of Service (QoS) Networking", White Paper, July 1999.
- [02] STARDUST.COM, INC., "The Need for QoS", White Paper, July 1999.
- [03] BERNET, Y., "The Complementary Roles of RSVP and Differentiated Services in the Full Service QoS Network", IEEE Communications Magazine, 38(2):154-162, February 2000.
- [04] FERGUSON, P. & HUSTON, G., "Quality of Service in the Internet: Fact, Fiction, or Compromise?", INET'98, July 1998, Geneva, Switzerland.
- [05] FLUCKIGER, F., "Understanding Networked Multimedia: Applications and Technology". First Edition. Prentice Hall. 1995.
- [06] KAMIENSKI, C. A. & SADOK, D., "Qualidade de Serviço na Internet", SBRC 2000, Maio 2000, Belo Horizonte, Brasil.
- [07] STARDUST.COM, INC., "QoS Protocols & Architectures", White Paper, July 1999.
- [08] ANDERSSON, L., DOOLAN, P., FELDMAN, N., FREDETTE, A. and THOMAS, B., "LDP Specification", IETF, RFC 3036, January 2001.
- [09] FLOYD, S., and JACOBSON, V., "Random Early Detection gateways for Congestion Avoidance", IEEE/ACM Transactions on Networking, V.1 N.4 p. 397-413, August 1993,.
- [10] BRADEN, B., CLARK, D., CROWCROFT, J., DAVIE, B., DEERING, S., ESTRIN, D., FLOYD, S., JACOBSON, V., MINSHALL, G., PARTRIDGE, C., PETERSON, L., RAMAKRISHNAN, K., SHENKER, S., WROCLAWSKI, J. and

- ZHANG, L., "Recommendations on Queue Management and Congestion Avoidance in the Internet", IETF, RFC 2309, April 1998.
- [11] BAGAL, P., KALYANARAMAN, S., PACKER, B., "Comparative study of RED, ECN and TCP Rate Control". Technical Report, Department of ECSE, RPI, March 1999, Available at <http://www.packeteer.com/technology/Pdf/> in January 2000.
- [12] TANEMBAUM, A. "Computer Networks", Third Edition, Prentice Hall International Inc., 1996.
- [13] HÄNDEL, R., "ATM Networks. Concepts, Protocols, Applications", Third Edition, Addison-Wesley, 1998.
- [14] XIAO, X., NI, L. M., "Internet QoS: A Big Picture", IEEE Network March/April 1999. Available at <http://www.cse.msu.edu/~xiaoxipe/> in December 1999.
- [15] BRADEN, R., CLARK, D., and SHENKER, S., "Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview", IETF, RFC 1633, June 1994.
- [16] BRADEN, R., ZHANG, E. L., BERSON, S., HERZOG, S., JAMIN, S., "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification", IETF, RFC 2205, September 1997.
- [17] BLAKE, S., BLACK, D., CARLSON, M., DAVIES, E., WANG, Z. and WEISS, W., "An Architecture for Differentiated Services", IETF, RFC 2475, December 1998.
- [18] ROSEN, E., VISWANATHAN, A., and CALLON, R., "Multiprotocol Label Switching Architecture," Internet draft, IETF, RFC 3031, January 2001.
- [19] AWDUCHE, D., MALCOLM, J., AGOGBUA, J., O'DELL, M., McMANUS, J., "Requirements for Traffic Engineering over MPLS", IETF, RFC 2702, September 1999.

- [20] CRAWLEY, E., NAIR, R., RAJAGOPALAN, B., SANDICK, H., "A Framework for QoS-based Routing in the Internet", IETF, RFC 2386, August 1998.
- [21] SHENKER, S., PARTRIDGE, C. and GUERIN, R., "Specification of Guaranteed Quality of Service", IETF, RFC 2212, September 1997.
- [22] WROCLAWSKI, J., "Specification of the Controlled Load Network Element Service", IETF, RFC 2211, September 1997.
- [23] OLIVEIRA, R., and GUARDIEIRO, P. R., "A comparative study of TCP Reno and TCP Vegas in a Differentiated Services Network", ConfTele2001, Figueira da Foz, Portugal, April 2001, pp. 125 - 129.
- [24] ROSEN, E., VISWANATHAN, A. and CALLON, R., "Multiprotocol Label Switching Architecture", IETF, RFC 3031, January 2001.
- [25] TRILLIUM, "Multiprotocol Label Switching (MPLS) Tutorial". Available at <http://www.iec.org/tutorials/mpls/index.html>. in January 2000.
- [26] ARMITAGE, G., "MPLS: The Magic Behind the Myths", IEEE Communications Magazine, pp 124 - 131, January 2000.
- [27] LI, T., "MPLS and The Evolving Internet Architecture", IEEE Communications Magazine, pp 38 - 41, December 1999.
- [28] AWDUCHE, D. O., "MPLS and Traffic Engineering in IP Networks" IEEE Communications Magazine, pp 42 - 47, December 1999.
- [29] ATG, "Multiprotocol Label Switching". Available at <http://www.techguide.com>. in February 2000.
- [30] AWDUCHE, D., MALCOLM, J., AGOGBUA, J., O'DELL, M., McMANUS, J., "Requirements for Traffic Engineering Over MPLS", IETF, RFC 2702, September 1999.

- [31] CRAWLEY, E., NAIR, R., RAJAGOPALAN, B., SANDICK, H., "A Framework for QoS-based Routing in the Internet", IETF, RFC 2386, August 1998.
- [32] WROCLAWSKI, J., "Specification of the Controlled-Load Network Element Service", IETF, RFC 2211, September 1997.
- [33] BERNET, Y., FORD, P., YAVATKAR, R., BAKER, F., ZHANG, L., SPEER, M., BRADEN, R., DAVIE, B., WROCLAWSKI, J., FELSTAIN, E., "A Framework for Integrated Services Operations over Diffserv Networks", IETF, RFC 2998, November 2000.
- [34] FAUCHEUR, L. et al., "MPLS Support of Differentiated Services", draft-ietf-mpls-diff-ext-02.txt, October 1999.
- [35] DAVIE, B., LAWRENCE, J., MCCLOGHRIE, K., ROSEN, E., SWALLOW, G., REKHTER, Y., DOOLAN, P., "MPLS using LDP and ATM VC Switching", IETF, RFC 3035, January 2001.
- [36] EICHLER, G., HUSSMANN, H., MAMAIS, G., VENIERIS, I., PREHOFER, C., and SALSANO, S., "Implementing Integrated and Differentiated Services for the Internet with ATM Networks: A Practical Approach", IEEE Communications Magazine, pp 132 - 140, January 2000.
- [37] HORLAI, E., ROUHANA, N., "Differentiated Services and Integrated Services Use of MPLS", Proceedings of the Fifth IEEE Symposium on Computers and Communications, July 2000.
- [38] POSTEL, J., Editor, "Internet Protocol", IETF, STD 5, RFC 791, September 1981.
- [39] DEERING, S. and HINDEN, R., "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", IETF, RFC 2460, December 1998.

- [40] HEINANEM, J., BAKER, F., WEISS, W. and WROCLAWSKI, J., "Assured Forwarding PHB Group", IETF, RFC 2597, June 1999.
- [41] JACOBSON, V., NOCHOLS, K. and PODURI, K., "An Expedited Forwarding PHB", IETF, RFC 2598, June 1999.
- [42] SEDDIGH, N., NANDY, B., PIEDA, P., "Bandwidth Assurance Issues for TCP Flows in a Differentiated Services Network", Globecom 99, December 1999, Rio de Janeiro, Brazil.
- [43] FANG, W., "TCP Mechanisms for DiffServ Architecture", Technical Report TR-605-99, Computer Science Department, Princeton University, July 1999.
- [44] NICHOLS, K., JACOBSON, V., and ZHANG, L., "A Two-Bit Differentiated Services Architecture for the Internet," IETF, RFC 2638, July 1999.
- [45] POSTEL, J. B., "Transmission Control Protocol – Darpa Internet Program Protocol Specification", IETF, RFC 793, September 1981.
- [46] POSTEL, J. B., "Internet Protocol – Darpa Internet Program Protocol Specification", IETF, RFC 791, September 1981.
- [47] SOCOLOFSKY, T., KALE, C., "A TCP/IP Tutorial", IETF, RFC 1180, January 1991.
- [48] STEVENS, W., "TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit, and Fast Recovery Algorithms", IETF, RFC 2001, January 1997.
- [49] FLOYD, S., HENDERSON, T., "The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm", IETF, RFC 2582, April 1999.
- [50] MATHIS, M., MAHDAVI, J., FLOYD, S., A. Romanow, "TCP Selective Acknowledgement Options", IETF, RFC 2018, October 1996.

- [51] FLOYD, S., "TCP and Explicit Congestion Notification", ACM Computer Communication Review, V.24 N.5, pp 10 - 23, October 1994.
- [52] RAMAKRISHNAN, K., FLOYD, S., BLACK, D., "The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP", IETF, RFC 3168, September 2001.
- [53] CLARK, D., WROCLAWSKI, J., "An Approach to Service Allocation in the Internet", Internet Draft, draft-clark-diff-svc-alloc-00.txt, July 1997.
- [54] CLARK, D., FANG, W., "Explicit Allocation of Best Effort Packet Delivery Service", <http://diffserv.lcs.mit.edu/exp-alloc-ddc-wf.ps>, 1998.
- [55] NS Simulator, Version 2.1b5 , Available at <http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns> in January 2000.
- [56] MURPHY, S., "Diffserv package for ns-2, Available at <http://www.teltec.dcu.ie/murphys/ns-work/diffserv/index.html> in January 2000.
- [57] BAUMGARTNER, F., BRAUN, T., SIEBEL, C., "Fairness of Assured Service", 13th European Simulation Conference – ESM'99, Vol.1, p.390-397, Warsaw, Poland, June 1999.
- [58] LIU, C., JAIN, R., "Improving Explicit Congestion Notification with the Mark-Front Strategy", Computer Networks, Vol 35, no 2-3, pp 185-201, February 2001.
- [59] KOLAROV, A., "Study of the TCP/UDP Fairness Issue for the Assured Forwarding Per Hop Behavior in Differentiated Services Networks", IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, pp. 190 - 196, Dallas, USA, May 2001.
- [60] SEDDIGH, N., NANDY, B., PIEDA, P., "DiffServ's Assured Forwarding PHB: What Assurance does the Customer Have?", IWQoS '99, London, United Kingdom, February 1999.

- [61] THOMPSON K, MILLER G, WILDER R, "Wide-Area Internet Traffic Patterns and Characteristics", IEEE Network Magazine, November/December 1997.
- [62] SALIM, J. H., AHMED, U., "Performance Evaluation of Explicit Congestion Notification (ECN) in IP Networks", IETF, RFC 2884, July 2000.
- [63] LE FAUCHEUR, F., et al. "Multi-protocol Label Switching (MPLS) Support for Differentiated Services", IETF, RFC-3270, May 2002.
- [64] RAMAKRISHNAN, K. K., FLOYD, S., DAVIE, B., "A Proposal to Incorporate ECN in MPLS", Internet draft, IETF, draft-ietf-mpls-ecn-00.txt, December 1999.
- [65] SHAYMAN, M., JAEGER R., "Using ECN to Signal Congestion Within an MPLS Domain" Internet draft, IETF, draft-shayman-mpls-ecn-00.txt, May 2001.
- [66] LEUNG, K.K. and MUPPALA, J. K., "Sustaining TCP Throughput Using Assured Forwarding and ECN in a Differentiated Services Network", Proceedings of the 21st International Performance, Computing and Communications Conference – IPCCC 2002, Phoenix, AZ, USA, April 2002.
- [67] MISRA, A. and OTT, T.J., "Performance Sensitivity and Fairness of ECN-Aware Modified TCP", In Networking 2002: Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; and Mobile and Wireless Communications, Second International IFIP-TC6 Networking Conference Proceedings, Pisa, Italy, May 2002.
- [68] KELLY, T., "On Engineering a Stable and Scalable TCP Variant" Technical Report CUED/F-INFENG/TR 435, Laboratory for Communication Engineering, Cambridge University, June 2002.

TRABALHOS PUBLICADOS PELA AUTORA

- [69] BORGES, E. A. S., GUARDIEIRO, P. R., "Proposal of Explicit Congestion Notification Mechanism Use for Optimizing the Service Level Offered by Differentiated Services Networks", Proceedings of Third International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing – CSNDSP 2002, pp. 189 - 192, Staffordshire University, UK, July 15-17, 2002.
- [70] BORGES, E. A. S., GUARDIEIRO, P. R., "A Comparative Study of Explicit Congestion Notification Mechanism Effects in the Service Level of Differentiated Services Networks", Proceedings of Third International Network Conference – INC 2002, pp. 287 - 294, Plymouth University, UK, July 16-18, 2002.
- [71] BORGES, E. A. S., GUARDIEIRO, P. R., "Using Explicit Congestion Notification Mechanism to Mitigate the Effects of Factors that Affect the Service Level Offered by Differentiated Services Networks", accepted for publication on the WSEAS International Conference on Computer Networks – ICCON 2002, Rio de Janeiro, Brazil, October 14-17, 2002.
- [72] BORGES, E. A. S., GUARDIEIRO, P. R., "Mitigating the Effects of Factors that Affect the Service Level of DiffServ Networks", under evaluation for publication on the SBrT Journal.
- [73] BORGES, E. A. S., GUARDIEIRO, P. R., "Optimising Fairness of TCP and UDP Interaction in Differentiated Services Networks", under evaluation for publication on the IEE Electronics Letters.