



Pós-Graduação em Ciência da Computação

**“MPLS como Suporte à Engenharia de Tráfego em
Ambiente com Diferenciação de Serviço”**

Por

Christiane Silva da Purificação

Dissertação de Mestrado



Universidade Federal de Pernambuco

posgraduacao@cin.ufpe.br

www.cin.ufpe.br/~posgraduacao

RECIFE, SETEMBRO/2002



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

CHRISTIANE SILVA DA PURIFICAÇÃO

“MPLS como Suporte à Engenharia de Tráfego em Ambiente
com Diferenciação de Serviço”

*ESTE TRABALHO FOI APRESENTADO À PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO DO CENTRO DE INFORMÁTICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: REDES DE COMPUTADORES

ORIENTADOR: DJAMEL FAWZI HADJ SADOK

RECIFE, SETEMBRO/2002

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Djamel Sadok pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

Ao meu noivo Fábio, aos meus pais, meus irmãos e amigos pela compreensão e estímulos constantes.

A Deus pela oportunidade de viver e por ter colocado pessoas tão especiais na minha estrada.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	III
LISTA DE ACRÔNIMOS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABELAS.....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivos da Dissertação.....	4
1.3 Estrutura da Dissertação.....	5
CAPÍTULO 2 QUALIDADE DE SERVIÇO.....	7
2.1 Introdução.....	8
2.2 Parâmetros de Qualidade de Serviço.....	8
2.3 Classes de Serviço.....	9
2.4 Propostas do IETF.....	10
2.5 Considerações Finais.....	13
CAPÍTULO 3 LABEL SWITCHING.....	14
3.1 Introdução.....	15
3.2 Componentes Funcionais do Roteamento da Camada de Rede:	
Controle e Encaminhamento.....	18
3.2.1 Classes de Equivalência de Encaminhamento – FECS.....	20
3.2.2 O Componente de Encaminhamento do Label Switching.....	21
3.2.3 O Componente de Controle do Label Switching.....	21
3.2.4 Construção das Tabelas de Encaminhamento.....	22
3.2.5 Métodos de Associação Rótulo/FEC.....	24
3.2.6 Construção e Destruição de Associações.....	25
3.2.7 Distribuição dos Rótulos.....	26
3.2.8 Soluções Proprietárias.....	29
3.3 Considerações Finais.....	31

CAPÍTULO 4 A TECNOLOGIA MPLS.....	32
4.1 Introdução.....	33
4.2 Componentes do MPLS.....	34
4.3 Funcionamento do MPLS.....	37
4.4 Considerações Finais.....	40
CAPÍTULO 5 ENGENHARIA DE TRÁFEGO.....	41
5.1 Introdução.....	42
5.2 Objetivos da Engenharia de Tráfego	42
5.3 Limitações dos Mecanismos de Controle Existentes.....	45
5.4 Considerações Finais.....	48
CAPÍTULO 6 MPLS como Suporte à Engenharia de Tráfego.....	50
6.1 Introdução.....	51
6.2 Troncos de Tráfego.....	51
6.3 Aspectos do MPLS Atrativos à Engenharia de Tráfego	53
6.4 Capacidades Adicionais para Engenharia de Tráfego sobre MPLS.....	55
6.4.1 Atributos e Características de Troncos de Tráfego.....	55
6.4.2 Roteamento Baseado em Restrições (Constraint Based Routing).....	60
6.4.3 Divulgação das Informações de Estado de Enlace.....	62
6.4.4 Relação entre Roteamento Baseado em Restrições e MPLS.....	63
6.4.5 Protocolos de Sinalização.....	64
6.5 Considerações Finais.....	65
CAPÍTULO 7 MPLS EM REDES DIFFSERV	66
7.1 Introdução.....	67
7.2 Serviços Diferenciados.....	68
7.2.1 Políticas de Encaminhamento do DiffServ.....	69
7.2.2 Mecanismos de Escalonamento.....	70
7.3 Serviços Diferenciados em Ambientes MPLS.....	75
7.4 Considerações Finais.....	77
CAPÍTULO 8 ESTADO DA ARTE.....	78
8.1 Introdução.....	79

8.2 MPLS E ATM: Comutação de Rótulos – Um Experimento.....	80
8.3 Análise de Desempenho com o Emprego de Troncos de Tráfego.....	81
8.4 Engenharia de Tráfego Adaptativa.....	83
8.5 Considerações Finais.....	85
CAPÍTULO 9 ESTUDO DE CASO: MPLS COMO SUPORTE À ENGENHARIA DE TRÁFEGO EM UM AMBIENTE DE DIFERENCIAÇÃO DE SERVIÇOS.....	86
9.1 Introdução.....	87
9.2 Simulação 1: Explorando os Recursos do MPLS.....	87
9.2.1 Topologia da Simulação 1.....	87
9.3 Simulação2: MPLS e Engenharia de Tráfego em um ambiente com Diferenciação de Serviço.....	91
9.3.1 Topologia da Simulação 2.....	92
9.3.2 Resultados Obtidos.....	93
9.4 Considerações Finais.....	99
CAPÍTULO 10 CONCLUSÕES.....	100
10.1 Contribuições.....	101
10.2 Trabalhos Futuros.....	101
10.3 Considerações Finais.....	102
CAPÍTULO 11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104

LISTA DE ACRÔNIMOS

ABR	Available Bit Rate
AF	Assured Forwarding
ARIS	Aggregate routed-based IP Switching
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BE	Best Effort
CBQ	Class-based Queuing
CBR	Constant Bit Rate
CFQ	Class-Based Fair Queuing
CoS	Class of Service
CQ	Custom Queuing
CR	Constraint Based Routing
CV	Circuito Virtual
DE	Default Behavior
DiffServ	Differentiated Services
DS	Differentiated Services
DSCP	Differentiated Services Code Point
ECMP	Equal-Cost MultiPath
EF	Expedited Forwarding
EIGRP	Enhanced Interior Gateway Routing Protocol
E-LSR	Edge Label Switching Router
FEC	Forwarding Equivalence Class
FIB	Forwarding Information Base

FIFO	First In First Out
FQ	Fair Queueing
FTP	File Transfer Protocol
GSMP	General Switch Management Protocol
IETF	Internet Engineering Task Force
IGP	Interior Gateway Protocol
IntServ	Integrated Service
IP	Internet Protocol
IFMP	Ipsilon's Flow Management Protocol
ISP	Internet Service Provider
LAN	Local Area Network
LDP	Label Distribution Protocol
LSP	Label Switched Path
LSR	Label Switch Router
MPLS	Multiprotocol Label Switching
NS	Network Simulator
OSPF	Open Shortest Path First
PHB	Per Hop Behavior
PQ	Priority Queueing
PRR	Priority Round Robin
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoS	Quality of Service
QoSR	QoS Routing
RIP	Routing Information Protocol
RSVP	Resource ReSerVation Protocol

RTCP	Real-Time Transport Control Protocol
RTT	Round Trip Time
SIP	Session Initiation Protocol
SLA	Service Level Agreement
SPL	Switched Path Label
TCP	Transport Control Protocol
TE	Traffic Engineering
TIB	Tag Information Base
ToS	Type of Service
UDP	User Datagram Protocol
VBR	Variable Bit Rate
VCI	Virtual Channel Identifier
VoIP	Voice Over IP
VPI	Virtual Path Identifier
VPN	Virtual Private Network
WAN	Wide Area Network
WFQ	Weighted Fair Queuing
WRED	Weighted Random Early Detection
WRR	Weighted Round Robin

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Ambiente que emprega a Comutação de Rótulos
- Figura 2: Componentes Funcionais de Roteamento: Controle e Encaminhamento
- Figura 3: Componentes de Controle do Label Switching
- Figura 4: Componentes de Construção da Tabela de Encaminhamento
- Figura 5: Métodos de Associação Downstream e Upstream
- Figura 6: Cabeçalho do MPLS
- Figura 7: Label Switch Routers
- Figura 8: Label Switch Path
- Figura 9: Funcionamento do MPLS
- Figura 10: Encaminhamento de um pacote
- Figura 11: Exemplo de métricas IGP levando a congestionamento
- Figura 12: Relação entre Fluxo, Tronco, LSP e Link
- Figura 13: Ilustração de um processo de Constraint Based Routing
- Figura 14: Topologia usada na Simulação do Trabalho QOS-ANALISYS
- Figura 15: Topologia da simulação 1
- Figura 16: Fluxo dos Tráfegos das fontes Fonte0, Fonte1 e Fonte2
- Figura 17: Caminho Explícito determinado para a fonte Fonte1
- Figura 18: Comportamento da Rede durante queda do enlace n3-n8
- Figura 19: Reroteamento do Caminho entre n0 e n13
- Figura 20: Topologia da simulação 2
- Figura 21: Vazão

Figura 22: Atraso Máximo

Figura 23: Máximo Jitter

Figura 24: Atraso médio

Figura 25: Evolução da vazão sem MPLS

Figura 26: Evolução da vazão com MPLS

Figura 27: Evolução do atraso/percentual de pacotes recebidos sem MPLS

Figura 28: Evolução do atraso/percentual de pacotes recebidos com MPLS

Figura 29: Evolução da variação de atraso/percentual de pacotes recebidos sem
MPLS

Figura 30: Evolução da variação de atraso/percentual de pacotes recebidos com
MPLS

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre Label Switching e Roteamento Convencional.

Tabela 2: Vazão alcançada com o uso do MPLS

Tabela 3: Atraso Máximo.

Tabela 4: Máximo jitter.

Tabela 5: Atraso médio.

RESUMO

A crescente demanda e o explosivo crescimento da Internet está impondo novos desafios para a garantia de serviços em termos de performance, confiabilidade e Qualidade de Serviço (QoS). Muitas aplicações de missão crítica que dependem das tecnologias de rede não podem funcionar sem garantias expressas de entrega. Entretanto, as redes de dados atuais não oferecem nenhuma garantia de que as exigências feitas a nível de serviço possam ser garantidas sem algum tipo de degradação a qualquer hora, do dia ou da noite, a despeito de outros usuários da rede.

Para atender essas exigências, a infra-estrutura da rede precisa ser melhorada com novas tecnologias que ofereçam aos operadores de rede ferramentas para controlar o comportamento da mesma. Juntas, as capacidades oferecidas pela Engenharia de Tráfego, pelo MPLS (Multiprotocol Label Switching) e pelo DiffServ possibilitam o controle e o balanceamento de carga na rede necessários à entrega de serviço de acordo com contratos personalizados.

Este trabalho apresenta o MPLS associado à Engenharia de Tráfego como solução para o problema de alocação ineficiente dos recursos em uma rede e o conseqüente congestionamento provocado por tal problema. O esquema de encaminhamento de pacotes do MPLS é empregado como estratégia para minimizar o congestionamento ou alternativamente maximizar a utilização dos recursos, através da alocação eficiente dos mesmos, garantindo, num ambiente com diferenciação de serviço, uma melhor Qualidade de Serviço em termos de redução na perda de pacotes, no atraso e na variação de atraso, e no aumento da vazão agregada.

ABSTRACT

The increasing demand and explosive growth of the Internet is placing new challenges on the network for service guarantees in terms of performance, reliability and service quality (QoS). There are several mission critical applications that depends on communication and cannot afford a service that fails to deliver. The data networks of today simply do not offer any guarantees that your service-level requirements can be met without some degradation at any time, day or night, irrespective of other users of the network.

To meet these requirements, the network must be enhanced with new technologies that offer the network operator capabilities for controlling its behavior. Together, the capabilities offered by the combination of Traffic Engineering, MultiProtocol Label Switching and DiffServ enhance the ability of the network operator to control and balance the load into the network to deliver service according to customized service contracts.

This work presents Traffic Engineering as a solution to solve the inefficient allocation of resource problem into a network and its consequent congestion issue. The MPLS (Multiprotocol Label Switching) forwarding scheme is explored in order to help congestion control and increase resource utilization through their efficient allocation. Furthermore, MPLS is used in Differentiated Services domains to improve QoS guarantees, such as low end-to-end delay and jitter, and balance the backbone traffic.

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o contexto no qual esta dissertação encontra-se inserida, apresentando as motivações para a sua realização, seus principais objetivos, além da sua estruturação em capítulos.

1.1. MOTIVAÇÃO

Durante os últimos 30 anos, a Internet evoluiu de uma rede de pesquisa mantida pelo governo norte-americano para a rede atual, internacional e comercialmente operada. As tecnologias e protocolos das redes de computadores estão sofrendo grandes transformações nos últimos anos, principalmente em função da aplicabilidade cada vez maior das redes de comunicação, da utilização de tecnologias de rede de alta velocidade e da utilização em larga escala dos protocolos TCP/IP devido, principalmente, à massificação das aplicações e serviços WWW (World Wide Web).

Além das transformações citadas, novas aplicações como voz sobre IP (VoIP), vídeo-conferência, educação à distância, aplicações colaborativas, telemedicina, vídeo sob demanda, dentre outras, somam-se às aplicações convencionais como correio eletrônico e transferência de arquivos, criando grandes possibilidades e tornando as redes muito mais atrativas.

Neste contexto, migrar o tráfego da rede comercial para redes IP públicas pode significar grandes oportunidades para investidores/clientes comerciais com o objetivo de reduzir custos operacionais, riscos em investimentos e complexidade operacional.

Entretanto, apesar do rápido crescimento da Internet, alguns problemas de implementação ainda persistem. Por exemplo, o surgimento do tráfego multimídia sobre redes IP impõe grandes demandas por diferenciação/priorização de serviço no ambiente IP. As novas aplicações representam um conjunto bastante diversificado em termos de grau de complexidade, níveis de qualidade de serviço e requisitos funcionais exigidos, impondo um desafio técnico para os administradores das grandes redes.

Percebe-se, que a Internet atual se apresenta bastante inadequada para garantir o tipo de confiabilidade e performance que as empresas comerciais estão requerendo

e com as quais estão acostumadas em suas redes privadas. Estas empresas não irão correr o risco de oferecer aplicações multimídia, de voz, ou de dados de missão crítica em redes IP públicas até que estas sejam capazes de oferecer um serviço seguro, previsível, mensurável e garantido.

Devido ao atual direcionamento no sentido de maior performance e confiabilidade na Internet, o principal objetivo dos provedores de serviço é oferecer Qualidade de Serviço fim-a-fim garantida para o tráfego de seus usuários nas redes IP, incluindo dados, vídeo, multimídia, e voz.

Após uma avaliação das aplicações comerciais e dos requisitos necessários para que a Internet possa oferecer um infra-estrutura adequada às suas operações, chegou-se as seguintes observações:

- Classes de tráfego diferentes requerem características de serviço específicas que devem ser garantidas ao longo do caminho completo da rede (e entre múltiplos Sistemas Autônomos);
- As infra-estruturas IP das empresas de transporte de dados (*carrier-class*) e dos provedores de serviço (ISPs) requerem redes robustas que possam gerenciar os recursos de forma mais eficiente.

Muitos modelos de serviços e mecanismos têm sido propostos no sentido de aumentar a disponibilidade dos meios de transmissão das redes, a qualidade de serviço oferecida e a velocidade de operação dos equipamentos que realizam a comutação dos pacotes que compõem as mensagens que trafegam na Internet.

Entretanto, pesquisadores e empresas especializadas em equipamentos e serviços Internet perceberam que nem sempre é suficiente produzir roteadores com maior capacidade, mais rápidos e mais complexos para alcançar esses objetivos.

Neste sentido, o Internet Engineering Task Force (IETF) – força tarefa envolvendo pesquisadores de diversas partes do mundo e que é responsável pela especificação de padrões para a Internet – tem organizado equipes de trabalho para pesquisa e

padronização de alguns modelos de serviço e mecanismos de operação, visando atender as demandas por QoS.

Dentre os modelos propostos, encontramos o MPLS, um esquema de encaminhamento de pacotes, especificado pela RFC 3031, onde um rótulo de tamanho fixo é adicionado aos pacotes e usado para determinar o encaminhamento e o tratamento dos pacotes.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Para possibilitar o suporte às aplicações que demandam diferenciação e qualidade de serviço na Internet, estudos vêm sendo realizados com o intuito de melhorar a eficiência das redes IP no transporte dessas aplicações.

Nesta dissertação, analisaremos o esquema de encaminhamento de pacotes utilizado no MPLS, seus componentes, suas aplicações, e seus possíveis benefícios. Nossa proposta é apresentar o MPLS associado à Engenharia de Tráfego como solução para o problema de alocação ineficiente dos recursos em uma rede visando a redução do congestionamento provocado por tal problema.

Mostraremos através de simulação, que quando o congestionamento é minimizado através da alocação eficiente de recursos, a perda de pacotes diminui, o atraso e a variação de atraso diminuem e a vazão agregada aumenta. Desta forma, a percepção da qualidade de serviço da rede experimentada pelos usuários finais se torna significativamente melhorada com relativamente menos esforço.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar as principais propostas existentes para oferecer Qualidade de Serviço às aplicações na Internet;

- Estudar e avaliar o MPLS, uma tecnologia emergente e em estágio de padronização;
- Implementar o esquema de encaminhamento do MPLS em um ambiente de simulação para comprovar a eficiência do modelo em cenários que podem ser encontrados na Internet atualmente.
- Estimular a implementação de QoS em redes IP baseada na tecnologia MPLS.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação contém mais sete capítulos organizados da seguinte forma:

- **Capítulo 2 – Qualidade de Serviço:** este capítulo descreve os principais aspectos relacionados aos requisitos de Qualidade de Serviço das aplicações atuais. Em seguida, descrevemos as principais propostas do IETF para oferecer Qualidade de Serviço na Internet;
- **Capítulo 3 – Label Switching:** este capítulo descreve as características da técnica de encaminhamento baseada em rótulos segundo os conceitos encontrados na literatura atual. São apresentadas as soluções proprietárias que empregam esta técnica, descrevendo as especificidades de cada uma delas. Também são abordados os componentes funcionais do roteamento da camada de rede: controle e encaminhamento;
- **Capítulo 4 – MPLS:** este capítulo descreve as características do encaminhamento de pacotes específicas do MPLS, seus componentes e modo de operação, destacando as aplicações e os serviços relacionados como o mesmo. Ao final do capítulo, são discutidas as principais vantagens, as desvantagens e os desafios técnicos da tecnologia;
- **Capítulo 5 – Engenharia de Tráfego:** Neste capítulo, os conceitos fundamentais da Engenharia de Tráfego são apresentados e discutidos;

- **Capítulo 6 – MPLS como Suporte à Engenharia de Tráfego:** Neste capítulo, são analisados os aspectos do esquema de encaminhamento de pacotes do MPLS para que possa ser utilizado como suporte à Engenharia de Tráfego;
- **Capítulo 7 – MPLS em Redes DiffServ:** este capítulo apresenta a proposta de Serviços Diferenciados na Internet, destacando os conceitos envolvidos e os mecanismos propostos para sua implementação. Em seguida, comparamos o MPLS com o DiffServ e comentamos a sinergia existente entre as duas propostas;
- **Capítulo 8 – Estado da Arte:** este capítulo ressalta os principais aspectos do MPLS identificados pela comunidade técnico/científica e descreve alguns dos trabalhos divulgados e disponibilizados para a comunidade em geral e que nos permitem consolidar os conhecimentos adquiridos por meios muitas vezes teóricos;
- **Capítulo 9 – Estudo de Caso:** neste capítulo é analisado o desempenho da transmissão dos pacotes de dados, inicialmente em uma rede MPLS padrão e, em seguida, sobre redes IP com Diferenciação de Serviço, utilizando Engenharia de Tráfego e o esquema de encaminhamento de pacotes do MPLS;
- **Capítulo 10 – Conclusões:** este capítulo apresenta as conclusões sobre o estudo realizado, as principais contribuições do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros que podem servir de direcionamento com o objetivo de mostrar novas direções que podem estender este trabalho;
- **Capítulo 11 – Referências Bibliográficas:** as referências bibliográficas contidas nesta dissertação são apresentadas neste capítulo.

2. QUALIDADE DE SERVIÇO

Este capítulo apresenta a Qualidade de Serviço segundo os requisitos funcionais das aplicações atuais e as soluções propostas pelo IETF em termos de mecanismos e modelos de serviço.

2.1 INTRODUÇÃO

Qualidade de Serviço, ou QoS, é um termo usado para medir um conjunto específico de “atributos de performance” tipicamente associados com um serviço. No âmbito das redes IP, QoS refere-se à performance apresentada pelos pacotes IP fluindo através de uma ou mais redes.

2.2 PARÂMETROS DE QOS

Em termos operacionais, a QoS exigida pelas aplicações pode ser expressa como a combinação dos seguintes parâmetros mensuráveis:

Confiabilidade de Serviço – refere-se à disponibilidade das conexões dos usuários ao serviço Internet;

Atraso (delay) – também conhecido como latência; refere-se ao intervalo entre a transmissão e o recebimento dos pacotes entre dois pontos de referência;

Variação de Atraso – também conhecida como jitter; refere-se à variação no tempo de duração entre os pacotes consecutivos em um fluxo percorrendo a mesma rota;

Vazão – a taxa de transmissão na qual os pacotes são transmitidos em uma rede; pode ser expressa como uma taxa média ou de pico;

Taxa de Perda de Pacotes – a taxa máxima na qual os pacotes podem ser descartados durante a transferência através de uma rede; a perda de pacotes geralmente resulta de congestionamento na rede.

2.3 CLASSES DE SERVIÇO

Para que a QoS requerida por uma determinada aplicação seja atendida, existem níveis ou classes de serviço que precisam ser disponibilizados para o tráfego do usuário, isto porque os tráfegos atravessando uma rede sob diferentes classes de serviço recebem diferentes níveis de qualidade.

Os serviços oferecidos geralmente são classificados como serviços “em tempo-real” e serviços “em tempo-não-real”.

Os Serviços em Tempo-Real representam aplicações que envolvem informações que precisam ser reproduzidas de maneira contínua, sendo, portanto, sensíveis a atrasos e variações de atraso. Exemplos típicos são os seguintes:

Constant Bit Rate (CBR) – também conhecido como serviço de taxa de bit constante; utilizado para aplicações que necessitam de uma taxa de dados fixa, que seja continuamente disponibilizada durante a existência da conexão. O CBR é ideal para aplicações de áudio e vídeo não comprimidos, transmissão de voz, multicast e broadcast de áudio e vídeo não comprimidos;

Real-Time Variable Bit Rate (rt-VBR) – também conhecido como serviço de taxa de bit variável em tempo-real; aplicações sensíveis a atrasos estão nesta categoria. Sinais de áudio e vídeo comprimidos apresentam taxas de dados variáveis. Neste tipo de serviço a banda de transmissão é alocada dinamicamente, de maneira assíncrona, de acordo com a demanda requerida no momento.

Os Serviços em Tempo-não-Real são aqueles que atendem aplicações cujo tráfego se caracteriza pela presença de rajadas e que não sejam sensíveis a atrasos:

Non-Real-Time Variable Bit Rate (nrt-VBR) – também conhecido como serviço de taxa de bit variável em tempo-não-real; É utilizado por aplicações que geram tráfego variável na rede, mas que não são sensíveis a atrasos.

Desta forma, a rede pode disponibilizar banda de transmissão, dinamicamente, garantindo melhorias em termos de atraso e taxa de erros.

2.4 PROPOSTAS DO IETF

Visando atender as demandas por Qualidade de Serviço na Internet, o IETF determinou a criação de vários grupos de pesquisa e padronização de modelos operacionais e arquiteturas abertas que de alguma forma possam suportar os requisitos de Qualidade de Serviço. A seguir, apresentamos um resumo dos principais modelos e arquiteturas que já se apresentam definidos ou mesmo implementados.

- Modelo de Serviços Integrados (IntServ)

Esta arquitetura foi definida na Request For Comments (RFC 1633), que propôs o RSVP (Resource Reservation Protocol – RFC 2205) como protocolo de sinalização para o modelo Intserv. Este protocolo assume que os recursos (largura de banda do enlace, espaço no buffer dos equipamentos) são reservados para cada fluxo requerendo QoS em cada roteador ao longo do caminho entre o receptor e o transmissor, usando uma sinalização fim-a-fim.

Sua proposta é caracterizar um modelo na Internet composto pelo serviço de melhor esforço (best effort – BE), serviço de compartilhamento controlado do enlace, e o serviço de tempo real. No contexto deste modelo, garantias não podem ser obtidas sem que os recursos sejam reservados.

Além de introduzir uma nova sinalização (com o uso do RSVP), uma importante limitação desta arquitetura refere-se à escalabilidade, uma vez que o Intserv requer uma sinalização fim-a-fim e precisa manter um estado do tipo *soft state*¹ por fluxo em cada roteador ao longo do caminho.

Outras preocupações referem-se à autorização e priorização das solicitações de reserva, e o que pode acontecer caso a sinalização não seja empregada fim-a-fim.

- Modelo de Serviços Diferenciados (DiffServ)

Refere-se a um grupo de trabalho relativamente recente no IETF, sua arquitetura foi definida na RFC 2475, que definiu um modelo com maior escalabilidade e que utiliza o conceito de agregação de fluxos e marcação de pacotes para oferta de serviços diferenciados.

Neste modelo, os pacotes IP são marcados com diferentes prioridades e de acordo com essas prioridades, os recursos necessários para cada agregação de fluxo são reservados pelos roteadores.

Quando comparado ao modelo IntServ, o DiffServ oferece uma forma mais simples de priorização. Ele minimiza a sinalização e se concentra no tratamento dado aos fluxos agregados de acordo com um conjunto de classes de tráfego. Os fluxos são classificados de acordo com regras pré-estabelecidas, possibilitando que muitos fluxos de aplicações sejam agregados a um conjunto limitado de classes de fluxos.

O modelo DiffServ introduz uma importante fundamentação para QoS na Internet, mas ele não pode prover uma arquitetura de QoS fim-a-fim por si próprio. De fato, as marcações do DiffServ se comportam como um mecanismo de sinalização simplificado entre as bordas dos domínios e nós da

¹ O processo de sinalização é chamado *soft-state* quando a sessão pode ser desfeita caso não seja reativada de acordo com intervalos de *refresh* pré-definidos.

rede, transportando informações sobre os requisitos de Qualidade de Serviço de cada pacote.

- Multiprotocol Label Switching (MPLS)

É um esquema de encaminhamento de pacotes especificado pela RFC 3031, onde um rótulo de tamanho fixo é adicionado aos pacotes e usado para determinar o encaminhamento e o tratamento dos pacotes.

Devido ao esquema adotado, o MPLS pode ser visto como uma solução relativamente simples e que apresenta diversos benefícios como versatilidade e escalabilidade, podendo ser utilizado separadamente ou em conjunto com outros modelos.

- Engenharia de Tráfego

A Engenharia de Tráfego é amplamente definida como aquele aspecto da rede que lida com o problema de avaliação da performance da rede e otimização da performance das redes IP operacionais.

Podemos ainda dizer que a Engenharia de Tráfego é o processo de arranjar por onde os fluxos devem fluir numa rede de tal forma que o congestionamento causado pela má distribuição da carga ou de utilização dos recursos possa ser evitada.

Mais especificamente, a Engenharia de Tráfego sempre lida com o efetivo mapeamento das demandas por tráfego na topologia da rede e, dinamicamente, adapta ou reconfigura o mapeamento feito para mudanças feitas nas condições da rede.

- Roteamento baseado em QoS (QoS Routing)

É uma estratégia de roteamento usada para calcular rotas que estão sujeitas a múltiplas restrições e que serão utilizadas pelos pacotes de acordo com seus requisitos de QoS. Como exemplo, podemos citar o QOSPF (uma referência ao Open Shortest Path First – OSPF, com capacidades adicionais para otimizar a determinação, por parte dos usuários, de parâmetros de Qualidade de Serviço).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as soluções aqui apresentadas foram definidas separadamente. No entanto, como pode ser visto neste e em outros trabalhos de pesquisa, existe a possibilidade de integração entre elas. Como veremos, através da exploração e associação de algumas características das arquiteturas mencionadas, é possível construir redes robustas, escaláveis, estáveis e com Qualidade de Serviço.

3. LABEL SWITCHING

Para que possamos entender o MPLS, no entanto, faz-se necessário que tenhamos em mente alguns conceitos fundamentais. Com este objetivo, introduzimos neste capítulo os conceitos relativos ao processo de *Label Switching* – ou Comutação de Rótulos – que representa a pedra fundamental de funcionamento do MPLS.

Inicialmente, apresentaremos o *label switching* propriamente dito, em seguida, uma descrição da decomposição funcional do roteamento da camada de rede, e concluindo, os componentes de roteamento e encaminhamento segundo o modelo de comutação de rótulos.

3.1. INTRODUÇÃO

Para que os pacotes que compõem as mensagens que trafegam na Internet possam sair de sua origem e chegar ao destino pretendido, as redes roteadas tradicionais processam o campo de endereço do cabeçalho dos pacotes em cada roteador ao longo do caminho percorrido pelo pacote. Este processo é conhecido como roteamento salto-a-salto.

Com o passar do tempo, algumas empresas desenvolveram uma técnica de encaminhamento de pacotes baseada na comutação de rótulos, denominada *label switching*. Na prática, o termo "*Label Switching*" é uma referência geral para qualquer tecnologia de encaminhamento de pacotes baseada em rótulos, incluindo o MPLS [SWITCHING].

As soluções de *label switching* podem ser caracterizadas pelo uso de encaminhamento de pacotes com comutação de rótulos (*Label Switching Packet Forwarding*) combinado com protocolos de controle IP e mecanismos de distribuição de rótulos. A diferença em detalhes destes fatores é que distingue cada uma das técnicas que têm sido propostas.

No *Label Switching*, um pequeno rótulo de tamanho fixo é gerado e adicionado ao pacote no momento em que ele entra na rede. Em todos os nós subsequentes dentro da rede o rótulo, e não o cabeçalho IP, é usado para as decisões de encaminhamento do pacote. Finalmente, os pacotes rotulados ao saírem da rede têm seus rótulos removidos pelo roteador final.

A Figura 1 é uma representação de um pacote atravessando um caminho em um domínio que emprega a técnica de comutação de rótulos.

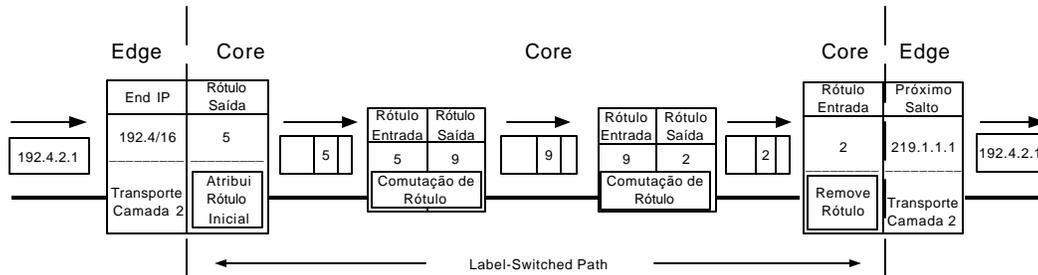


Figura 1: Ambiente que emprega a Comutação de Rótulos.

Como benefícios diretos desta técnica, temos:

- Maior velocidade de roteamento - o algoritmo de encaminhamento pode ser implementado em hardware, permitindo maior velocidade sem necessidade de hardware mais caro;
- Possibilidade de realizar o encaminhamento de pacotes com base em fatores como: QoS, serviços diferenciados, etc;
- Unificação das políticas de encaminhamento entre sub-redes e sistema heterogêneos (ATM, IP, Frame Relay, etc), quebrando as barreiras entre os mesmos.

O *label switching* apresenta outras vantagens quando comparado com o roteamento salto-a-salto. Algumas destas vantagens são mostradas na Tabela 1.

PROCEDIMENTOS/ RECURSOS	ROTEAMENTO CONVENCIONAL (Salto-a-salto)	LABEL SWITCHING
Análise completa do cabeçalho IP	Ocorre em todos os nós	Ocorre apenas uma vez no nó de extremidade da rede quando o rótulo é designado.
Suporte a Unicast e Multicast	Requer múltiplos e complexos algoritmos de encaminhamento	Requer um único algoritmo de encaminhamento
Decisões de roteamento	Baseadas apenas no endereço	Podem ser baseadas em qualquer número de parâmetros, tais como QoS, informações de acesso a VPNs, roteamento explícito.

Tabela 1: Comparação entre *Label Switching* e Roteamento Convencional.

As comparações apresentadas nesta tabela serão melhor compreendidas quando analisarmos, nas próximas seções, os componentes funcionais do roteamento da camada de rede: controle e encaminhamento.

3.2 COMPONENTES FUNCIONAIS DO ROTEAMENTO DA CAMADA DE REDE: CONTROLE E ENCAMINHAMENTO

O roteamento da camada de rede pode ser particionado em dois componentes básicos: Controle e Encaminhamento. O componente de encaminhamento é responsável pelo encaminhamento real dos pacotes da entrada para a saída através de um *switch* ou roteador [SWITCHING]. Para encaminhar um pacote, o componente de encaminhamento faz uso de duas fontes de informação: uma tabela de encaminhamento mantida por um roteador e a informação carregada no próprio pacote. A Figura 2 representa os componentes de controle e de encaminhamento do roteamento.

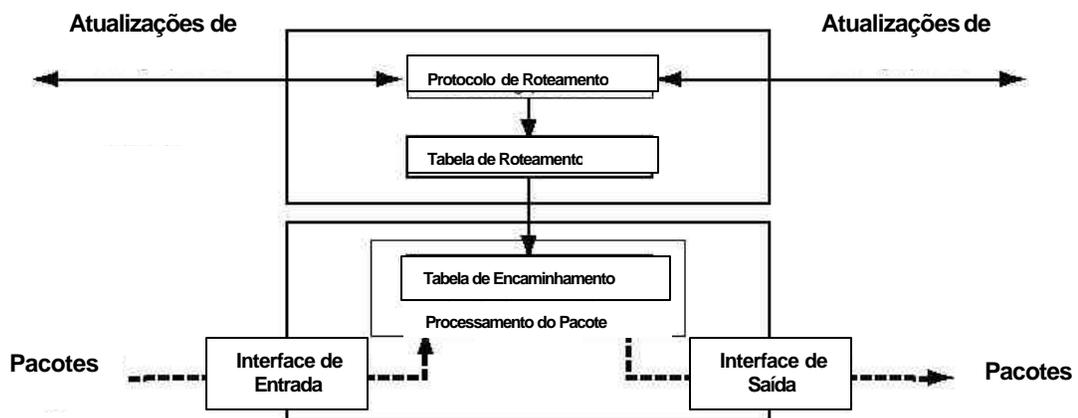


Figura 2: Componentes Funcionais de Roteamento: Controle e Encaminhamento.

Cada roteador em uma rede implementa os dois componentes. O roteamento de fato é realizado como uma composição dos componentes de controle e encaminhamento, e é implementado de um modo distribuído pelo conjunto de roteadores que formam a rede.

O componente de controle consiste de um ou mais protocolos de roteamento que provêm a troca de informações de roteamento entre os roteadores, como também os procedimentos (algoritmos) que um roteador usa para converter esta informação

em uma tabela de encaminhamento. Portanto, o componente de controle representa os protocolos de roteamento que são responsáveis pela construção e manutenção das tabelas de encaminhamento. *Open Shortest Path First (OSPF)*, *Border Gateway Protocol (BGP)* e *Protocol Independent Multicast (PIM)* são exemplos de tais protocolos de roteamento.

O componente de encaminhamento consiste de um conjunto de algoritmos que um roteador usa para tomar uma decisão de encaminhamento sobre um pacote. Os algoritmos definem que informação do pacote o roteador deverá usar para encontrar uma determinada entrada em sua tabela de encaminhamento, como também os procedimentos exatos que cada roteador deve usar para encontrar esta entrada.

Como exemplo, para um encaminhamento *unicast*, a informação de um pacote que um roteador usa para encontrar uma determinada entrada na tabela de encaminhamento é o endereço de destino da camada de rede. O procedimento que o roteador usa para encontrar a entrada é o algoritmo de associação mais longa (*longest match algorithm*).

Para um encaminhamento *unicast* com Tipos de Serviço, a informação de um pacote que um roteador usa para encontrar uma determinada entrada na tabela de encaminhamento é o endereço de destino da camada de rede e o valor do campo *Type of Service (ToS)* do cabeçalho IP.

O procedimento que o roteador usa para encontrar a entrada é o algoritmo de associação mais longa (*longest match algorithm*) para o endereço de destino e o algoritmo de associação exata (*exact match algorithm*) para o valor do campo ToS.

Para um encaminhamento *multicast* a informação do pacote usada por um roteador para encontrar uma determinada entrada na tabela de encaminhamento é uma combinação dos endereços de fonte e destino da camada de rede e da interface de entrada (por onde o pacote chega), e o procedimento que o roteador usa para encontrar a entrada pode ser tanto o algoritmo de associação mais longa (*longest match algorithm*) como o algoritmo de associação exata (*exact match algorithm*).

Independente do tipo de encaminhamento utilizado, os procedimentos usados pelo componente de encaminhamento representam uma forma de particionamento do conjunto de todos os possíveis pacotes que um roteador pode encaminhar em um número finito de subconjuntos. Estes subconjuntos representam as Classes de Equivalência de Encaminhamento de Pacotes ou FECs (do inglês, *Forwarding Equivalence Classes*), descritas a seguir.

3.2.1 CLASSES DE EQUIVALÊNCIA DE ENCAMINHAMENTO - FECs

Do ponto de vista do encaminhamento, os pacotes pertencentes a cada subconjunto são tratados pelo roteador da mesma forma (por exemplo, eles são todos enviados para o mesmo próximo salto), mesmo que os pacotes dentro do subconjunto difiram entre eles com relação a informação contida no cabeçalho da camada de rede destes pacotes.

O mapeamento entre a informação carregada no cabeçalho da camada de rede dos pacotes e as entradas na tabela de encaminhamento é do tipo 'muitos-para-um', o que permite aos roteadores encaminharem todos os pacotes pertencentes a uma determinada FEC da mesma maneira, aplicando o mesmo tratamento. Em outras palavras, pacotes com diferentes cabeçalhos da camada de rede podem ser mapeados para a mesma entrada na tabela de encaminhamento, ao passo que a entrada descreve uma determinada FEC.

Uma informação essencial que faz parte da entrada de encaminhamento mantida por um roteador é o endereço do roteador que representa o próximo salto a ser enviado o pacote. Um pacote a ser encaminhado pertencente a uma FEC associada a uma determinada entrada de encaminhamento, é encaminhado para o próximo roteador especificado pela entrada. A construção da tabela de encaminhamento pelo componente de controle significa, portanto, a construção de um conjunto de FECs e o próximo salto para cada uma dessas FECs.

3.2.2 O COMPONENTE DE ENCAMINHAMENTO NO LABEL SWITCHING

Nos roteadores IP convencionais, os planos de encaminhamento (verificação do cabeçalho IP) e controle (geração de tabelas de roteamento) estão bastante acoplados. Como o encaminhamento do MPLS é baseado em rótulos é possível separar o plano de encaminhamento (baseado em rótulos) do plano de controle do protocolo de roteamento [TECGUIDE1, SWITCHING].

O algoritmo usado pelo componente de encaminhamento do *label switch* para tomar suas decisões de encaminhamento sobre um pacote usa duas fontes de informação:

1. uma tabela de encaminhamento mantida por um *Label Switch Router* (LSR),
2. o rótulo carregado pelo pacote.

3.2.3 O COMPONENTE DE CONTROLE DO LABEL SWITCHING

O componente de controle da arquitetura de roteamento convencional não é suficiente para suportar o *label switching*. De fato, ele representa um subconjunto do componente de controle *do label switching*. Isso deve-se ao fato da informação provida pelo componente de controle da arquitetura de roteamento convencional não ser suficiente para construir as tabelas de encaminhamento usadas pelo componente de encaminhamento do *label switching*, pois estas tabelas precisam conter mapeamentos entre rótulos e os próximos saltos. Para preencher estas informações, são necessários procedimentos através dos quais um LSR possa:

- (1) Criar associações entre rótulos e FECs;
- (2) Informar aos outros LSRs sobre as associações que ele criou;
- (3) Utilizar (1) e (2) para construir e manter a tabela de encaminhamento usada pelo componente de encaminhamento de rótulos.

A estrutura do componente de controle do *label switching* é mostrada na Figura 3. Os protocolos de roteamento da camada de rede provêm os LSRs com o mapeamento entre FECs e os endereços dos próximos saltos. Os procedimentos para as associações entre rótulos e FECs, e para distribuição das informações dessas associações entre os comutadores de rótulos, provêm os LSRs com o mapeamento entre FECs e rótulos.

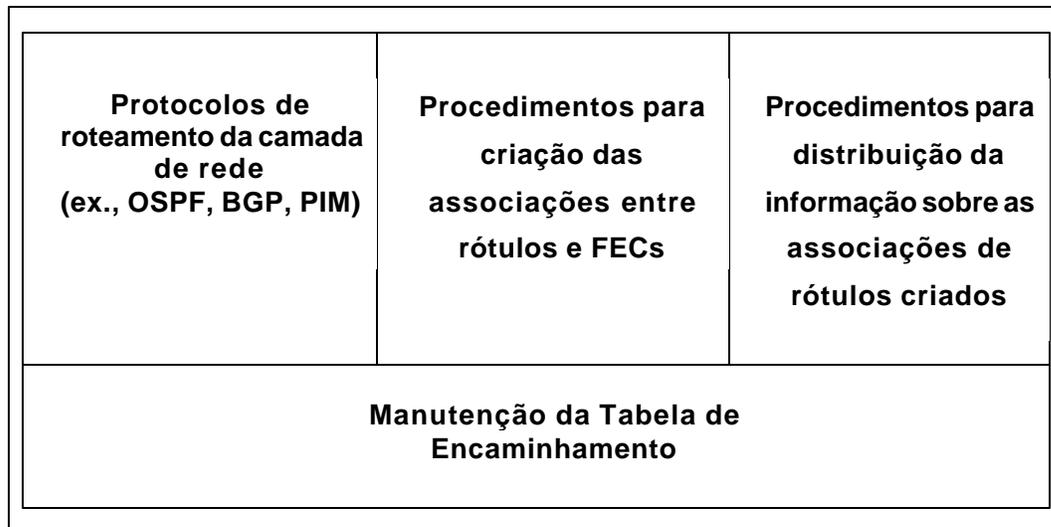


Figura 3: Componentes de Controle do Label Switching.

3.2.4 CONSTRUÇÃO DAS TABELAS DE ENCAMINHAMENTO

A combinação do mapeamento fornecido pelos protocolos de roteamento da camada de rede e do mapeamento rótulo/FEC provêm a informação necessária para construir as tabelas de encaminhamento usadas pelo componente de encaminhamento do *label switching*. A Figura 4 ilustra os componentes usados na construção da tabela de encaminhamento do *Label Switching*.

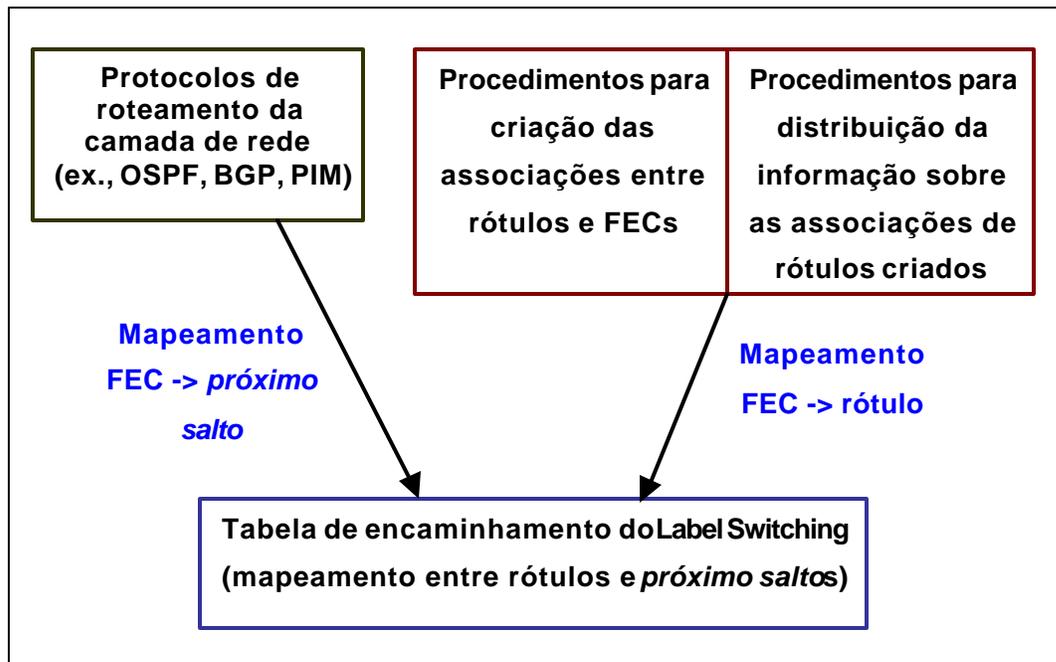


Figura 4: Componentes de Construção da Tabela de Encaminhamento.

Protocolos como OSPF, BGP e PIM possibilitam a troca de informação de roteamento entre os roteadores da rede, oferecendo uma associação entre uma FEC e o próximo salto correspondente a mesma.

Em cada LSR são realizados procedimentos para associar cada FEC a um rótulo correspondente. Os LSRs que compõem a rede realizam procedimentos para publicar as associações locais de rótulo/FEC para que os LSRs vizinhos possam aplicar corretamente os rótulos antes de enviá-los ao próximo salto.

Os métodos de associação e de distribuição de rótulos serão explicados nas próximas seções.

3.2.5 MÉTODOS DE ASSOCIAÇÃO RÓTULO/FEC

Cada entrada na tabela de encaminhamento mantida por um LSR contém um rótulo de entrada e um ou mais rótulos de saída. Para a inclusão desses rótulos, o componente de controle pode fazer uso de dois tipos de associações:

1. associação local – onde o rótulo é escolhido e designado localmente, pelo LSR considerado, e
2. associação remota – onde o roteador recebe de algum outro LSR a informação de associação de rótulo que corresponde à associação criada (escolhida) por esse outro roteador.

O componente de controle usa tanto associações remotas como locais para preencher sua tabela de encaminhamento com rótulos de entrada e de saída. Isso é padronizado da seguinte forma: quando os rótulos de uma associação local são usados como rótulos de entrada, e rótulos de uma associação remota são usados como rótulos de saída, então diz-se que o roteador está usando uma associação de rótulos *downstream*, no caso oposto, quando os rótulos de uma associação local são usados como rótulos de saída, e rótulos de uma associação remota são usados como rótulos de entrada, então diz-se que o roteador está usando uma associação de rótulos *upstream*. A Figura 5 mostra os métodos *downstream* e *upstream*.

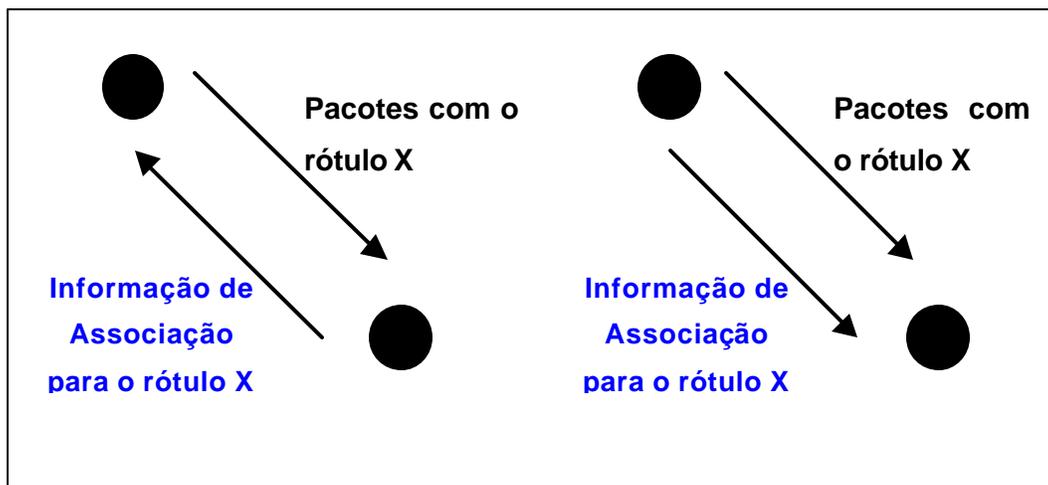


Figura 5: Métodos de Associação Downstream e Upstream.

Segundo definido em sua arquitetura [ARCH], o MPLS usa a ligação *downstream* na qual os rótulos associados localmente são usados como rótulos de saída. Para o MPLS, as entradas na tabela de encaminhamento são estabelecidas como segue:

- o próximo salto é provido pelos protocolos de roteamento (a FEC para mapeamento do próximo nó);
- o rótulo de entrada é provido pela criação de uma associação local entre uma FEC e um rótulo;
- o rótulo de saída é provido pela criação de uma associação remota entre uma FEC e um rótulo.

3.2.6 CONSTRUÇÃO E DESTRUIÇÃO DE ASSOCIAÇÕES

Um LSR cria ou destrói uma associação entre um rótulo e uma FEC como resultado de um determinado evento. Tal evento pode ser disparado tanto por pacotes de dados que devem ser encaminhados pelo LSR, quanto pela informação de controle ou roteamento (por exemplo, atualizações de roteamento do OSPF, mensagens JOIN/PRUNE do PIM, mensagens PATH/RESV do RSVP) que tem de ser processada pelo LSR. Quando a criação ou destruição das associações é disparada pelos pacotes de dados, então a associação é chamada de *data-driven*, no segundo caso, ela é chamada de *control-driven*.

Existem vantagens e desvantagens na utilização de um ou outro método. No modo *data-driven*, as associações são criadas sob demanda, apenas quando existe um tráfego de dados que possa se utilizar do rótulo gerado por tal associação. Como resultado, considerando que todos os demais fatores sejam iguais, as tabelas de encaminhamento construídas utilizando o *data-driven* tendem a ser sempre menores ou iguais em tamanho (entradas) que aquelas construídas utilizando o método *control-driven*.

Por outro lado, o *data-driven* também apresenta desvantagens com relação ao *control-driven*. A quantidade de tráfego de controle necessário para distribuir a informação de associação de rótulos do *data-driven* pode ser maior do que a necessária com o *control-driven*. Isso acontece porque no *data-driven*, a informação de associação de rótulo precisa ser distribuída em resposta tanto a mudanças no mapeamento FEC/*próximo salto*, como em resposta a mudanças no tráfego de dados. Diferentemente, com *control-driven*, a informação de associação é distribuída apenas em resposta a mudanças no mapeamento FEC/*próximo salto*.

Como pode ser observado, o *data-driven* assume que um LSR suporta tanto o componente de encaminhamento do *label switching*, quanto o componente de encaminhamento do roteamento convencional, o que não acontece com o *control-driven*. O uso do *data-driven* também complica o comportamento geral do sistema, uma vez que as operações do componente de controle são controladas por uma mistura do tráfego de dados e de controle, enquanto que com o *control-driven*, as operações do componente de controle são controladas unicamente pelo tráfego de controle.

Por problemas de compatibilidade com soluções proprietárias que empregam um método ou outro, o IETF tem tentado padronizar o MPLS com os dois métodos, apesar de promover fortemente o uso do *control-driven* na associação dos rótulos, visto que este esquema torna o sistema mais escalável.

3.2.7 DISTRIBUIÇÃO DOS RÓTULOS

Sempre que um LSR cria ou destrói uma associação entre um rótulo escolhido localmente e uma FEC, ele precisa informar aos outros LSRs ligados a ele sobre a associação feita sobre o rótulo. Isso permite que os outros LSRs obtenham a informação dos rótulos remotos que eles precisam para preencher suas tabelas de encaminhamento. A distribuição da informação de associação de rótulos, ou simplesmente dos rótulos, pode ser realizada de várias maneiras [BELL_LABS].

Um protocolo de distribuição de rótulos - LDP (*Label Distribution Protocol*) é um conjunto de procedimentos através dos quais um LSR informa outro sobre as ligações rótulo/FEC que ele fez.

Dois LSRs que utilizam um protocolo de distribuição de rótulos para trocar informações são conhecidos como "*Label Distribution Peers*" com respeito às informações de associação que eles trocam.

A arquitetura do MPLS não assume a existência de um único protocolo de distribuição de rótulos. Alguns protocolos convencionais como BGP e RSVP têm sido estendidos para suportar a distribuição de rótulos, o que pode ser denominado de "piggybacking". Outros protocolos estão sendo definidos com propósito explícito de distribuição de rótulos como o LDP (*Label Distribution Protocol*) e o CR-LDP (*Constraint based Routing - Label Distribution Protocol*). A seguir descreveremos essas duas abordagens.

Utilizando Protocolos de Roteamento Convencionais - Piggybacking

Esta abordagem só é possível em esquemas *control-driven*, porque ela amarra a distribuição de rótulos à distribuição da informação de controle (roteamento). Neste caso, a informação de associação de rótulos é bastante consistente com a informação de distribuição de roteamento, e a operação do sistema é bem simples, pois elimina-se a necessidade de um protocolo separado para distribuição dos rótulos.

Entretanto, esta abordagem apresenta algumas limitações, uma vez que a informação de roteamento que é distribuída por um determinado protocolo pode não ser compatível para a distribuição dos rótulos. Apenas os protocolos onde a informação de roteamento contém de forma explícita o mapeamento entre FECs e *próximo saltos* podem ser utilizados para esse fim.

Mesmo que a informação de roteamento distribuída por um protocolo torne o protocolo compatível para a distribuição de rótulos, o fato de ter que estender este protocolo para carregar esta informação pode envolver mudanças no formato das mensagens usadas pelo protocolo, o que pode, por sua vez, resultar numa certa incompatibilidade.

Utilizando o Label Distribution Protocol – LDP

Restringir a comutação de rótulos aos ambientes onde os protocolos de roteamento podem suportar a informação de associação de rótulos não é uma opção interessante. Para superar esta limitação, faz-se necessária a adoção de um protocolo separado com o propósito específico de distribuição de rótulos ou um *Label Distribution Protocol – LDP*.

A utilização de um protocolo de distribuição de rótulos separado, entretanto, torna mais difícil a atividade de controle e pode apresentar problemas de inconsistência entre as informações de roteamento e de associação entre rótulos e FECs, uma vez que pode ocorrer das informações de roteamento estarem desatualizadas ou do LSR não dispor delas no momento da distribuição dos rótulos ou vice-versa [SWITCHING].

Outra limitação dessa abordagem é a introdução de um novo protocolo no sistema, o que normalmente aumenta a complexidade total do sistema.

Segundo pudemos observar, pareceu-nos interessante a possibilidade de “pegar uma carona” nos protocolos de roteamento padrão que sejam compatíveis com a distribuição dos rótulos, deixando a segunda opção para os casos em que se fizer realmente necessário.

3.2.8 SOLUÇÕES PROPRIETÁRIAS

A integração IP/ATM e as dificuldades associadas com o mapeamento entre os modelos de protocolos IP e ATM foram os impulsionadores para o desenvolvimento das tecnologias denominadas de *Label Switching*. Contudo, na prática, as soluções que empregam o *Label Switching* têm sido desenvolvidas e empregadas considerando não só esse, mas muitos outros aspectos.

Várias soluções utilizando o *label switching* foram propostas e empregadas por empresas fabricantes de equipamentos de comutação. Cada uma dessas soluções apresenta vantagens/limitações que as tornam mais ou menos interessantes segundo as necessidades e a avaliação custo/benefício de cada cliente.

IP Switching

É uma solução desenvolvida pela Ipsilon Corporation (atual Nokia), que provê uma alternativa para o roteamento de pacotes: o IP Switching converte os pacotes IP em células ATM e então as envia sobre um canal virtual ATM existente; ao final do canal, as células são reconvertidas em pacotes e são localmente comutadas para o seu destino final, eliminando as decisões de roteamento intermediárias necessárias em cada nó ao longo do caminho.

O IP Switching foi projetado para tirar vantagem das características da comutação ATM como orientação à conexão, alta velocidade, e escalabilidade. O IP Switching não utiliza sinalização fim-a-fim ou faz resolução de endereços entre IP e ATM, reduzindo o *overhead* no emprego do ATM.

O IP Switching usa um protocolo relativamente simples, chamado *General Switch Management Protocol (GSMP)*, o qual permite que um *switch* ATM seja controlado por um “controlador” de comutação IP, desta forma transformado-o em um *switch* IP [SWITCHING]. A comunicação entre equipamentos é provida pelo protocolo de gerenciamento de fluxo da Ipsilon – o IFMP (*Ipsilon’s Flow Management Protocol*).

Apesar de não ter sido a primeira solução a empregar o *label switching*, o IP Switching foi o primeiro a disponibilizar produtos reais e contribuir para o desenvolvimento do Tag Switching e, finalmente, a formação do Grupo de Trabalho do MPLS.

Aggregate routed-based IP Switching (ARIS)

ARIS é uma abordagem da IBM Corporation para comutação na camada 3. Segundo a sua especificação, estão definidas as seguintes características:

- Mapeamento do roteamento da camada de rede para caminhos comutados da camada de enlace;
- Depende do encaminhamento IP na borda e do encaminhamento de rótulos no núcleo da rede;
- Utiliza a designação de rótulo baseada na topologia;
- Suporta o IP e outros protocolos de rede;
- É capaz de coexistir com o roteamento tradicional e comutação ATM;
- Provê uma opção de roteamento explícito

Os nós vizinhos que empregam o ARIS podem trocar informações para o estabelecimento de caminhos comutados ou *Switched Path Labels* (SPLs) via um simples protocolo baseado em mensagens. Esta solução também define uma base de dados, chamada FIB (*Forward Information Base*), usada para armazenar rótulos e informações de roteamento convencional.

Tag Swintching

Tag Switching (RFC 2105) é uma tecnologia desenvolvida pela Cisco Systems. Neste modelo, os rótulos são designados nas bordas da rede para rotear os pacotes dentro de uma rede de larga escala. Quando um pacote chega em um switch, o rótulo é usado como índice em uma *Tag Information Base* (TIB), um banco de dados

de rótulos que é construído e mantido por um protocolo de roteamento como OSPF [SWITCH_NETS].

Cada entrada na TIB contém um rótulo de saída, uma interface de saída, e a situação do enlace. Quando um pacote chega, o rótulo do pacote é comparado com o conteúdo da TIB. Se for encontrada uma entrada correspondente na tabela e a situação do enlace estiver normal, o rótulo do pacote é substituído pelo rótulo de saída e pacote é colocado na interface de saída.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As soluções desenvolvidas pelos diversos fabricantes são consideradas proprietárias. Visando desenvolver um padrão interoperável de encaminhamento de pacotes baseado na comutação de rótulos, o IETF (Internet Engineering Task Force) desenvolveu um padrão chamado MPLS (*Multiprotocol Label Switching*).

Inspirado em experiências anteriores, como o TAG Switching da Cisco, ARIS da IBM e IP Switching da Ipsilon, o grupo MPLS do IETF propôs uma forma padronizada de comutação de pacotes baseada na troca de rótulos. Neste modelo substitui-se o mecanismo padrão de encaminhamento salto-a-salto baseado no destino por um conceito de troca de rótulo. Isto traz o benefício de simplificar o encaminhamento de pacotes, permitindo escalabilidade para taxas de comunicação bastante elevadas, além de permitir o desacoplamento das funções de encaminhamento e roteamento.

O MPLS modifica um paradigma fundamental hoje existente nas redes IP: a superposição de um rótulo ao datagrama tem a propriedade de imprimir à comunicação uma característica de “orientação a conexão”. O MPLS, seus componentes e sua operacionalidade serão apresentados no próximo capítulo.

4. A TECNOLOGIA MPLS

O MPLS é um esquema de encaminhamento padrão do IETF. Como padrão, o MPLS mantém algumas características que garantem a compatibilidade com as soluções proprietárias e define algumas outras. Neste capítulo, discutiremos suas características mais importantes.

4.1 INTRODUÇÃO

O MPLS evoluiu principalmente da necessidade de se usar nas redes de roteadores existentes as altas velocidades de tecnologias tais como o ATM. Através da integração da característica “não-orientado a conexão” do IP com a capacidade do hardware de comutação dos comutadores ATM, a tecnologia MPLS acaba sendo de grande importância aos roteadores Internet convencionais. Isto porque o MPLS adiciona a estes dispositivos a característica de “orientação a conexão”, trazendo, portanto, os benefícios associados a este modo de operação. Ou seja, pode-se começar a pensar em engenharia de tráfego e qualidade de serviço para estes sistemas de forma similar ao que existe disponível para a tecnologia ATM.

Desta forma, reduz-se a lacuna existente entre estes dois paradigmas, ficando um pouco minimizada a vantagem competitiva do ATM quando comparada aos roteadores IP tradicionais. Além disso, com o advento dos *gigarouters*, capazes de oferecer alta taxa de comutação de pacotes, esta lacuna tende a se estreitar ainda mais. Se a tecnologia MPLS juntamente com *gigarouters* desbancará ou não o ATM no segmento de *backbones* faixa-larga, é uma questão que o futuro responderá, havendo um componente mercadológico grande nesta briga.

Como as demais soluções de *Label Switching*, a proposta do MPLS é permitir a utilização conjunta dos equipamentos roteadores e *switches* no processo de encaminhamento de pacotes, oferecendo uma solução para melhoria do desempenho das redes IP de larga escala.

O MPLS é um esquema de encaminhamento padrão do IETF que inicialmente foi baseado no Tag Switching da Cisco e utiliza um paradigma de encaminhamento de pacotes baseado em um algoritmo de comutação de rótulos, onde os rótulos indicam tanto rotas como atributos de serviço [BIGPICTURE].

No nó de entrada, os pacotes são processados e os rótulos selecionados e aplicados. Os nós do núcleo da rede simplesmente lêem os rótulos, aplicam os serviços apropriados e encaminham os pacotes de acordo com o rótulo. O intensivo processo de análise do cabeçalho do pacote IP, classificação e filtragem acontece apenas uma vez, no nó de entrada quando o rótulo é aplicado. No nó de saída, os rótulos são removidos e os pacotes encaminhados ao seu destino final ou a um outro domínio [FRAME].

As principais características do MPLS são:

- A análise completa do cabeçalho do pacote IP ocorre apenas uma vez na entrada da rede quando o rótulo é designado;
- Suporte a unicast e multicast requer um único algoritmo de encaminhamento;
- As decisões de roteamento podem ser baseadas em qualquer número de parâmetros, tais como QoS e identificação de participação em uma determinada VPN ;
- O cabeçalho MPLS é encapsulado entre os cabeçalhos das camadas 2 e 3;
- O protocolo de rede pode ser IP ou outro. O MPLS é multiprotocolo;
- Está projetado para redes IP de larga escala, garantindo escalabilidade.

4.2 COMPONENTES DO MPLS

O MPLS define os seguintes componentes como parte de sua arquitetura:

Label – um rótulo pequeno de tamanho fixo, facilmente processável que provê uma representação do cabeçalho do pacote IP. O formato do rótulo depende das características da rede [FERGUSON]. Em redes comutadas o rótulo é um cabeçalho de 32 bits separado. Em redes ATM, o rótulo é colocado no par VPI/VCI da célula. O formato padrão do cabeçalho MPLS é mostrado na Figura 6 com a quantidade de bits correspondente a cada campo: *Label*

refere-se ao rótulo propriamente dito; *EXP* é um campo experimental ainda sem função definida, mas que pode ser utilizado, por exemplo, para transportar informações que permitam a diferenciação do serviço quando ocorrer o emprego do MPLS com o DiffServ, ou para agregação de fluxos em troncos de tráfego; *S* (de stack) refere-se ao indicador do topo da pilha de rótulos, devendo estar setado para 1 caso seja a última entrada na pilha e 0 para as demais entradas; e *TTL* (Time To Live) refere-se ao número máximo de saltos.



Figura 6: Cabeçalho do MPLS.

Label Switch Router (LSR) – é qualquer dispositivo (*switch* ou roteador) que suporta tanto o componente de controle IP padrão (protocolos de roteamento, RSVP, etc), como o componente de encaminhamento com troca de rótulos. Este dispositivo é responsável pela comutação de pacotes rotulados de acordo com tabelas de comutação pré-processadas. Os LSRs são classificados como:

Edge LSRs (E-LSRs) – O nó de extremidade (edge) que realiza o processamento e classificação inicial do pacote e aplica o primeiro rótulo na entrada (ingress) do pacote. Na saída (egress) do pacote, este dispositivo retira o rótulo do pacote e o encaminha ao seu destino final. Este dispositivo pode ser tanto um roteador como um *switch* com funções de roteamento.

Core LSRs (C-LSRs) – são os comutadores do núcleo da rede e oferecem comutação em alta velocidade.

A Figura 7 exemplifica a posição relativa dos LSRs numa rede MPLS.

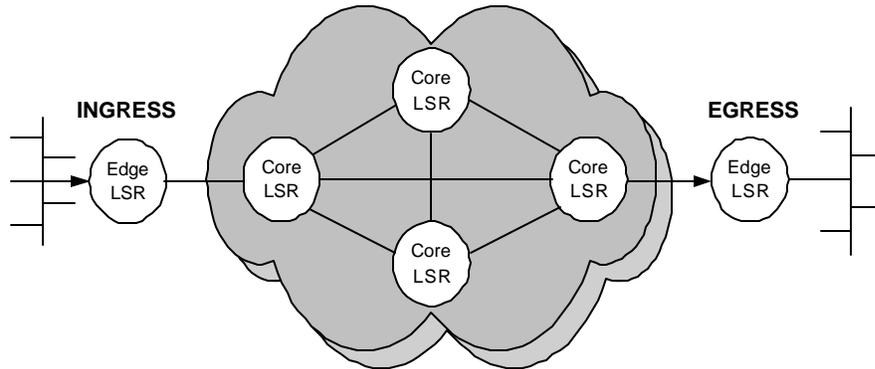


Figura 7: Label Switch Routers

Label Switch Path (LSP) – o caminho definido por todos os rótulos atribuídos entre dois pontos finais. Um LSP pode ser dinâmico ou estático. LSPs dinâmicos são providos automaticamente usando informação de roteamento. LSPs estáticos são providos explicitamente. A Figura 8 representa os dois tipos de rotas, onde a linha clara representa uma rota escolhida pelos protocolos de roteamento tradicionais e a linha mais escura um LSP explícito, o qual tem prioridade sobre os demais.

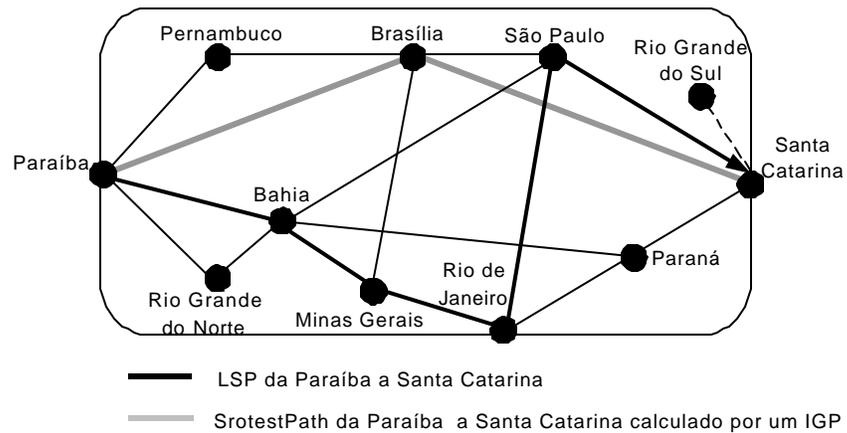


Figura 8: Label Switch Path.

Label Distribution Protocol (LDP) – protocolo que distribui os rótulos e seus significados entre LSRs. Ele atribui rótulos em dispositivos finais e de núcleo para estabelecer LSPs podendo operar em conjunto com protocolos de roteamento como OSPF, IS-IS, RIP, EIGRP e BGP.

Forwarding Equivalence Class (FEC) – É definido como um grupo de pacotes que podem ser tratados de forma equivalente para propósitos de encaminhamento. Por exemplo, um conjunto de pacotes cujos endereços fonte e destino são os mesmos.

4.3. FUNCIONAMENTO DO MPLS

A Figura 9 representa o funcionamento do MPLS. Basicamente, sua operação constitui-se das seguintes atividades [CISCO1]:

1. construção das tabelas de roteamento e encaminhamento;
2. escolha e atribuição dos rótulos aos pacotes no momento em que eles atingem o nó de entrada da rede;
3. encaminhamento dos pacotes;
4. retirada do rótulo no momento em que o pacote deixa a rede passando pelo nó de saída.

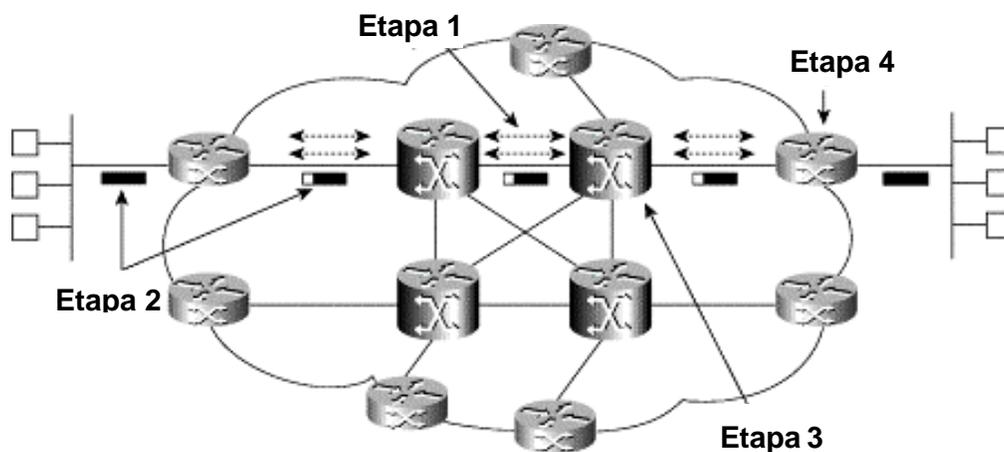


Figura 9: Funcionamento do MPLS .

Dividindo a operação do MPLS em etapas, podemos descrever seu funcionamento da seguinte forma:

Etapa 1 – Construção das Tabelas

Utilizando protocolos como o OSPF, a rede automaticamente constrói tabelas de roteamento por toda a rede do provedor de serviço.

O LDP usa a topologia de roteamento das tabelas para estabelecer valores de rótulos entre dispositivos adjacentes. Esta operação cria LSPs, mapas pré-configurados entre pontos finais de destino. Os rótulos são designados automaticamente.

Etapa 2 – Entrada do Pacote na Rede

Um pacote entra no E-LSR de entrada, onde é processado para determinar quais serviços da camada 3 ele requer (gerenciamento de largura de banda, QoS). Baseado nas exigências de roteamento e de serviço, o E-LSR seleciona e aplica um rótulo ao pacote e o encaminha.

Etapa 3 – Encaminhamento do Pacote na Rede

O LSR no núcleo lê o rótulo em cada pacote, substitui o rótulo com um novo de acordo com a sua tabela e encaminha o pacote. Esta ação se repete em todo os nós do núcleo interior da rede.

Etapa 4 – Saída do Pacote

O E-LSR de saída retira o rótulo, lê o cabeçalho do pacote, e encaminha o pacote para o destino final.

Na Figura 10, temos um exemplo de encaminhamento de pacotes no MPLS numa rede roteada.

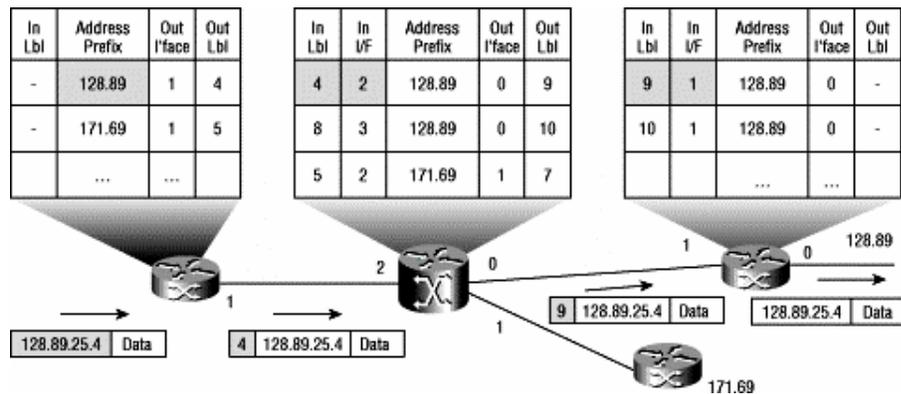


Figura 10: Encaminhamento de um pacote.

Para o exemplo da figura 10, sua operação ocorreria da seguinte maneira:

1. Um pacote chega ao E-LSR, o qual lê o pacote e baseado no prefixo do endereço destino consulta a tabela de comutação e insere o rótulo 4 correspondente e então encaminha o pacote pela interface de saída 1.
2. O core LSR lê o rótulo e consulta sua tabela para encontrar a entrada correspondente. Então ele substitui o rótulo 4 pelo seu correspondente, no caso 9, e encaminha o pacote pela interface de saída 0.
3. Quando atinge o roteador de saída, este lê e procura o rótulo 9 em sua tabela, a qual diz para retirar o rótulo e encaminhar o pacote através da interface 0.
4. Neste momento, o roteador usará o endereço IP de destino do pacote para encaminhá-lo para o seu destino final ou para uma outra subrede que não pertença ao domínio MPLS, que não opera com comutação de rótulos e portanto é incapaz de compreendê-los.

A tabela provê no mínimo as informações de interface de saída e um novo rótulo, mas pode conter outras informações como a disciplina de fila a ser aplicada ao pacote [ARCH].

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como vimos no modo de operação apresentado neste capítulo, o MPLS apresenta-se como um modelo que oferece diversas aplicabilidades. Através da técnica de comutação de rótulos empregada no MPLS e da possibilidade de se transportar em seu cabeçalho informações adicionais como parâmetros de QoS, orientações de tráfego, identificações requisitos de usuários, dentre outras, o MPLS permite aos administradores das redes IP empregá-lo para diversas finalidades.

No próximo capítulo, apresentaremos a Engenharia de Tráfego, no capítulo 6 discutimos como o esquema de encaminhamento de pacotes do MPLS pode ser utilizado para que a Engenharia de Tráfego possa ser empregada de forma efetiva.

No capítulo 7, passaremos a discutir o Modelo Diffserv e como o MPLS pode ser integrada a esta arquitetura para garantir a Qualidade de Serviço oferecida pelos provedores de serviço (ISPs) de acordo com os SLAs.

5. ENGENHARIA DE TRÁFEGO

É impossível pensar em redes de larga escala sem mencionar Engenharia de Tráfego. Entretanto, muita confusão tem se estabelecido em torno de um termo conhecido há muito tempo pela maioria de nós. Neste capítulo, introduzimos os principais conceitos relacionados a Engenharia de Tráfego e esclarecemos muitos de seus aspectos e objetivos.

5.1 INTRODUÇÃO

Engenharia de Tráfego é uma técnica bastante difundida e de tradição no campo da telefonia para planejamento, por exemplo, do número de chamadas que transitam por uma determinada central telefônica. É realmente impossível pensar em um bom funcionamento (no caso, disponibilidade) das linhas telefônicas sem o emprego de uma Engenharia de Tráfego adequada.

Com o passar do tempo e diante da necessidade de se controlar melhor os recursos das redes de computadores que geralmente representam um alto investimento para as empresas, percebeu-se a possibilidade de trazer todo o conhecimento adquirido durante os vários anos de experiência com sua aplicação pelas empresas de telefonia para seu emprego nas redes IP.

5.2 OBJETIVOS DA ENGENHARIA DE TRÁFEGO

No âmbito das redes IP, Engenharia de Tráfego é a atividade que se dedica à otimização do desempenho das redes operacionais. Em geral, refere-se à aplicação de tecnologias e de princípios científicos para a medição, modelagem, caracterização, e controle do tráfego da Internet e aplicação de tal conhecimento e técnicas para alcançar alguns objetivos de performance específicos [TE-MPLS].

Do ponto de vista operacional, a Engenharia de Tráfego se faz necessária na Internet principalmente porque os protocolos de roteamento atuais normalmente são configurados para utilizar os caminhos considerados os mais curtos para encaminhar o tráfego.

Na prática, a utilização dos caminhos mais curtos pode causar os seguintes problemas:

1. Os caminhos mais curtos de diferentes fontes se sobrepõem em alguns enlaces, causando congestionamento nestes enlaces;

2. O tráfego de uma determinada fonte para um determinado destino pode exceder a capacidade do caminho mais curto, enquanto um caminho mais longo entre esses dois pontos permanece subutilizado;
3. Todas as fontes convergirão para o(s) caminho(s) mais curto(s), sobrecarregando-os.

O principal objetivo da Engenharia de Tráfego na Internet é facilitar as operações da rede de forma eficiente e confiável, enquanto, simultaneamente, permite uma utilização dos recursos de forma mais otimizada e melhora o desempenho do tráfego. Os principais objetivos de desempenho associados com a Engenharia de Tráfego podem ser classificados como:

1. Orientados a Tráfego ou
2. Orientados a recurso.

Os objetivos de desempenho orientados a tráfego referem-se aos aspectos que melhoram a QoS dos fluxos de tráfego, atendendo as garantias dos serviços contratados.

No modelo de serviço de melhor esforço da Internet atual, os objetivos de desempenho orientados a tráfego incluem:

- Minimização da perda de pacotes;
- Minimização do atraso;
- Maximização da vazão;
- Aplicação das regras contratuais de nível de serviço (SLAs).

Os objetivos do desempenho orientados a recurso incluem os aspectos pertinentes a otimização da utilização dos recursos. Estes objetivos podem ser atendidos de maneira adequada através de um gerenciamento eficiente dos recursos de rede. É desejável garantir que determinados recursos de rede não se tornem congestionados e super utilizados enquanto outros permaneçam sub-utilizados, quando muitas vezes eles representam caminhos alternativos viáveis para o tráfego

em questão. Largura de banda, por exemplo, é um recurso crucial nas redes contemporâneas. Uma das funções centrais da Engenharia de Tráfego é o gerenciamento eficiente de recursos de largura de banda.

O objetivo primário da Engenharia de Tráfego, referente à melhoria de desempenho orientado tanto a tráfego como a recurso, é a minimização dos problemas causados pelo congestionamento prolongado das redes.

Tipicamente o congestionamento se manifesta sob dois cenários:

- 1 – Quando os recursos de rede são insuficientes ou inadequados para acomodar a carga oferecida;
- 2 – Quando fluxos de tráfego são ineficientemente mapeados dentro dos recursos disponíveis, fazendo com que subconjuntos de recursos da rede se tornem sobre-utilizados enquanto outros se mantêm subutilizados.

O primeiro tipo de problema de congestionamento pode ser solucionado pela expansão da capacidade ou aplicação de técnicas de controle de congestionamento clássicas, ou ambas. Técnicas de controle de congestionamento clássicas tentam manter a demanda de forma que o tráfego se adeqüe aos recursos disponíveis. Essas técnicas incluem: controle de admissão, limitação de taxas, controle de fluxo da janela, gerenciamento da fila do roteador e outros.

O segundo tipo de problema de congestionamento, resultante da alocação ineficiente de recursos, pode normalmente ser solucionado através da Engenharia de Tráfego.

Em geral, o congestionamento resultante da alocação ineficiente de recursos pode ser reduzido pela adoção de políticas de balanceamento de carga. O objetivo de tais estratégias é minimizar ao máximo o congestionamento ou alternativamente minimizar a sobrecarga de certos recursos, através da alocação eficiente dos mesmos.

Quando o congestionamento é minimizado através da alocação eficiente de recursos, a perda de pacotes diminui, o atraso e a variação de atraso diminuem e a vazão agregada aumenta. Desta forma, a percepção da qualidade de serviço da rede experimentada pelos usuários finais se torna significativamente melhorada.

Essencialmente, a otimização de desempenho das redes é um problema de controle: o Engenheiro de Controle formula uma política de controle, observa o estado da rede através de sistemas de monitoração, e aplica ações de controle para levar a rede ao estado desejado, de acordo com a política de controle.

Apesar da Engenharia de Tráfego não ser uma atividade nova, mesmo no âmbito das redes TCP/IP, ainda hoje os esquemas utilizados são muitas vezes inadequados ou ineficientes para se atingir altos níveis de desempenho e/ou diferenciação de serviço adequada. Percebe-se ainda falta de ferramentas apropriadas ou de integração entre os modelos ou técnicas existentes.

A próxima seção apresenta as principais limitações dos mecanismos de controle atualmente empregados nas redes roteadas.

5.3 LIMITAÇÕES DOS MECANISMOS DE CONTROLE EXISTENTES

Os protocolos de roteamento intra-domínio ou IGP's hoje disponíveis na Internet apresentam uma capacidade de controle inadequada para Engenharia de Tráfego. Embora os IGP's baseados nos algoritmos de menor caminho contribuam de forma significativa no combate ao problema de congestionamento, pela possibilidade de utilização de múltiplos caminhos, estes algoritmos geralmente se baseiam na otimização de uma métrica aditiva simples.

Uma vez que estes protocolos são dirigidos à topologia, a disponibilidade de largura de banda e características de tráfego não são levadas em conta na tomada de decisões de roteamento.

Utilizando-se de uma única métrica para encontrar o(s) melhor(es) caminhos, estes protocolos apresentam as seguintes limitações:

1. Entre os múltiplos caminhos com custos iguais – Equal-Cost MultiPaths (ECMP) – que podem ser usados para o transporte dos pacotes transmitidos de uma determinada fonte para um determinado destino, cada caminho terá uma parcela igual da carga compartilhada que não poderá ser modificada. Assim, em um determinado momento, um dos caminhos pode transportar um tráfego significativamente maior que outros caminhos porque ele também transporta tráfego de outras fontes;
2. A divisão da carga não pode ser feita entre múltiplos caminhos de custos diferentes.

Portanto, sempre será possível se observar congestionamento quando os menores caminhos de múltiplos fluxos convergirem para determinados enlaces ou interfaces de um roteador e estes não tiverem largura de banda suficiente para acomodar o tráfego resultante. Isto poderá ocorrer mesmo que existam outros caminhos alternativos possíveis, pois o critério de decisão do algoritmo levará à escolha do caminho mais curto ou com menor número de saltos, e não necessariamente do menos congestionado.

A Figura 11 ilustra como o IGP baseado em métricas pode resultar em congestionamento. Suponha que A tenha um tráfego muito elevado com destino a C e também com destino a D. Pelas métricas apresentadas na Figura 11, a decisão de A será enviar os tráfegos A-C e A-D pelo mesmo caminho, através do roteador B. Isto poderá resultar em congestionamento nos trechos A-B e B-C.

Uma ação de controle poderia ser mudar a métrica entre C e D para 6, o que faria o tráfego A-D seguir pelo caminho A-E-D e manteria o tráfego A-C através do roteador B. Assim seria possível um certo balanceamento de carga nos diversos enlaces. Outra possibilidade seria empregar roteamento baseado na origem (roteamento explícito), com o nó A forçando o envio do tráfego A-D através de E. No entanto, para isto ele teria que ter conhecimento dos níveis de congestionamento dos

enlaces à frente, para que pudesse tomar a decisão que levasse à melhor distribuição da carga. Além disso, a alternativa de roteamento baseado na origem com datagramas IP resulta em crescimento do cabeçalho do datagrama para todos os datagramas seguindo aquele caminho, o que é altamente ineficiente.

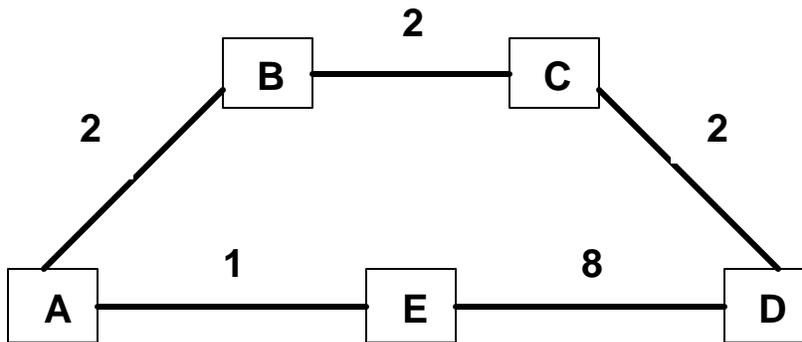


Figura 11: Exemplo de métricas IGP levando a congestionamento.

O modelo *overlay*, empregando IP sobre ATM ou frame-relay, é uma maneira de se contornar a inadequação dos IGP's a esta questão de Engenharia de Tráfego. O modelo *overlay* permite a criação de uma topologia virtual arbitrária sobre a topologia física da rede. A topologia virtual é construída a partir de circuitos virtuais, os quais aparecem como enlaces físicos para os protocolos de roteamento IGP. No caso do ATM, o modelo *overlay* também provê os seguintes serviços que suportam controle de tráfego e de recursos:

- roteamento baseado em restrições no nível dos Circuitos Virtuais (CVs);
- caminhos de CVs explícitos configuráveis administrativamente;
- controle de admissão de chamada;
- funções de formatação e policiamento de tráfego.

Desta forma, circuitos virtuais podem ser re-roteados para deslocar o tráfego de nós congestionados para outros onde os recursos estejam sub-utilizados. No entanto, as soluções do modelo *overlay* são adequadas ao mercado corporativo, apresentando restrições de escalabilidade para aplicações em grandes redes backbone. Apesar das vantagens significativas de suportar Engenharia de Tráfego, um backbone constituído de comutadores núcleo ATM ainda apresenta algumas sérias limitações:

- A malha de CVs ATM apresenta o problema de crescer com n^2 ;
- Exigem a gerência de 2 redes diferentes: uma infraestrutura ATM e um *overlay* IP;
- Duplicação de mecanismos entre as duas redes. Um exemplo seria o controle de congestionamento baseado em taxa aplicado pela classe de serviço ABR e o TCP. Em outras palavras, dois mecanismos no nível de transporte para fazer a mesma coisa: Controle de Congestionamento.

Pelo fato de rodar uma rede IP sobre uma rede ATM, um administrador dobra seu trabalho porque ele precisa gerenciar duas redes separadas. Além disso, roteamento e engenharia de tráfego acontecem em camadas distintas: o roteamento no nível dos roteadores e a engenharia de tráfego no nível do ATM, o que resulta em dois processos para projetar, operar e depurar.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Engenharia de Tráfego tem se tornado uma função indispensável em muitos Sistemas Autônomos de grande porte por causa do alto custo, dos investimentos em rede, e da natureza comercial e competitiva da Internet. Além destes fatores, as exigências de melhores serviços e os contratos firmados entre os usuários e os provedores de serviços (service level agreements – SLAs), impõem a necessidade de máxima eficiência operacional.

Através do emprego da Engenharia de Tráfego em suas redes, os ISPs podem otimizar de forma significativa a utilização dos recursos e a performance da rede, e os lucros podem ser ampliados sem grandes investimentos na atualização da infraestrutura de rede existente.

Para implementar a Engenharia de forma efetiva, o IETF introduziu o MPLS, o *Constraint Based Routing* – CR, e o *Internet Gateway Protocol* com modificações – EIGRP, [ERLDP] e [SWITCH_NETS]. Através do MPLS, é possível implementar um

nível de funcionalidade de Engenharia de Tráfego equiparável a dos modelos *overlay*.

O estudo detalhado do Constraint Based Routing e das características adicionadas aos IGPs estão fora do escopo deste trabalho. O estudo das alternativas introduzidas pelo MPLS para suporte à Engenharia de Tráfego será descrito nas próximas seções.

6. MPLS COMO SUPORTE À ENGENHARIA DE TRÁFEGO

Como definido na motivação, esta dissertação tem como objeto de estudo o MPLS e sua avaliação como suporte à Engenharia de Tráfego. Neste sentido, descrevemos a seguir às características do MPLS que o tornam uma alternativa potencial no emprego de uma Engenharia de Tráfego adequada e eficaz.

6.1 INTRODUÇÃO

O esquema de encaminhamento de pacotes do MPLS é importante para Engenharia de Tráfego porque provê a funcionalidade disponível nos modelos *overlay*, porém de uma maneira integrada e a custos menores. Além disso, oferece a possibilidade de se automatizar as funções de Engenharia de Tráfego.

O MPLS permite o roteamento explícito [QOSTE], onde os saltos que um pacote irá tomar são especificados antecipadamente e o rótulo é usado para indicar a informação de roteamento em cada pacote representando uma funcionalidade útil para oferecer QoS, permitindo aos administradores da rede estabelecerem caminhos definidos através da rede MPLS que se apliquem a certos fluxos de tráfego desejados. Este roteamento explícito acontece sem alteração do conteúdo do pacote IP.

Dentro do contexto do MPLS, os fluxos de tráfego de uma mesma classe podem ser agregados e colocados dentro de um LSP, formando o que denominamos de “tronco de tráfego” [TE-MPLS]. A próxima seção descreve os troncos de tráfego e suas características.

6.2 TRONCOS DE TRÁFEGO

Conceitualmente, tronco de tráfego é uma representação abstrata de tráfegos para o qual características específicas podem ser associadas.

Podemos dizer que um tronco de tráfego é uma agregação de fluxos de tráfego da mesma classe, os quais são colocados dentro de um mesmo LSP. Todos os pacotes de um tronco de tráfego têm o mesmo rótulo e os mesmos três bits EXP de classe de serviço.

Os troncos de tráfego podem ser vistos como objetos que podem ser roteados, ou seja, o caminho através do qual um tronco de tráfego atravessa pode ser mudado. Neste sentido, os troncos de tráfegos são similares a circuitos virtuais em ATM e redes Frame Relay.

Os túneis tornam os detalhes internos da rede MPLS transparente para as redes roteadas externas. Como o pacote é encapsulado no MPLS, o IP não vê os saltos dentro da rede MPLS. Ao invés disso ele sabe apenas que o pacote é encaminhado para a rede MPLS e que a rede MPLS o encaminha para seu próximo salto não-MPLS. Estes troncos podem ser estabelecidos estática ou dinamicamente (sob demanda) entre dois nós quaisquer de um domínio MPLS.

Apesar de na prática os termos tronco de tráfego e caminhos serem confundidos, existe uma distinção fundamental entre tronco de tráfego e caminho: um LSP é o caminho do nó ingress ao nó egress, através do qual o tronco de tráfego atravessa. A Figura 12 representa a relação entre Fluxo, Tronco, LSP e Enlace.

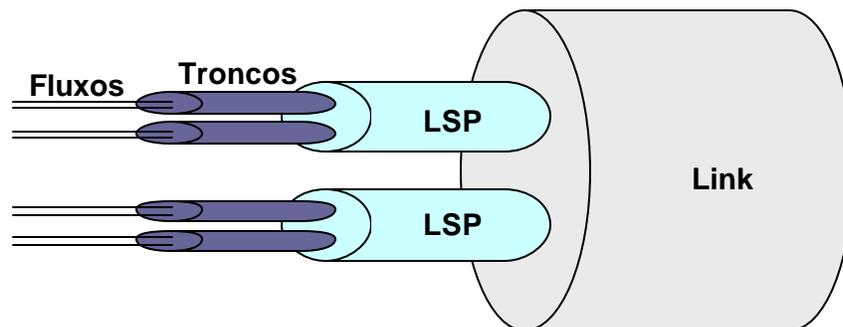


Figura 12: Relação entre Fluxo, Tronco, LSP e Link.

Um tronco pode carregar qualquer agregação de micro-fluxos, onde cada micro-fluxo consiste de pacotes pertencentes a uma única conversação ou aplicação TCP ou UDP. Em geral, espera-se que os troncos transportem vários micro-fluxos de diferentes tipos de transporte. Entretanto, como mostraremos em análise posterior, a

mistura de diferentes tipos de transporte pode causar problemas de performance devido ao comportamento destes protocolos.

Portanto, o simples fato de unirmos o MPLS à Engenharia de Tráfego não garante que a rede irá apresentar melhorias de performance significativas, podendo até mesmo prejudicar esta performance. É necessário o planejamento adequado da Engenharia de Tráfego de acordo com a carga que a rede irá transportar.

Ressaltaremos, a seguir, os aspectos do MPLS mais atrativos à Engenharia de Tráfego e discutiremos também alguns problemas relacionados ao emprego da Engenharia de Tráfego sobre o MPLS.

6.3 ASPECTOS DO MPLS ATRATIVOS À ENGENHARIA DE TRÁFEGO

Os aspectos do MPLS mais atrativos à Engenharia de Tráfego são:

1. suporte a roteamento explícito de maneira eficiente, onde as rotas podem ser criadas pelo operador ou de forma automática pelos protocolos (possivelmente a característica mais importante introduzida pelo MPLS para a Engenharia de Tráfego);
2. LSP's podem ser mantidos de maneira eficiente, através de uma identificação que permite que uma vez criados esses LSPs possam ser referenciados e, portanto, manipulados, seguindo critérios de prioridade e preempção ou de acordo com decisões administrativas;
3. troncos de tráfego podem ser instanciados e mapeados em LSP's, onde o LSP representa o caminho do nó ingress ao nó egress de um domínio MPLS percorrido por pacotes ou troncos de tráfego com um mesmo rótulo;

4. pode-se associar um conjunto de atributos a um tronco de tráfego de forma a reger suas características comportamentais;
5. pode-se associar atributos a recursos de forma a restringir a criação de LSP's e troncos de tráfego através deles;
6. MPLS permite agregação e desagregação de tráfego, ao passo que o encaminhamento baseado no esquema clássico do IP permite apenas agregação;
7. é simples integrar mecanismos de roteamento baseados em restrições com o MPLS ("Constraint Based Routing"), o que também será chave para a introdução de serviços diferenciados;
8. MPLS pode oferecer um *overhead* menor do que outras soluções para Engenharia de Tráfego.

Há três problemas fundamentais relacionados a Engenharia de Tráfego sobre MPLS:

1. Como mapear pacotes em FEC's;
2. Como mapear FEC's em troncos de tráfego;
3. Como mapear troncos de tráfego na topologia física da rede através dos LSP's.

Apesar de muito importantes os itens 1 e 2, a essência da Engenharia de Tráfego é mapear o tráfego sobre uma topologia física. Isto significa que o ponto crucial em se implementar Engenharia de Tráfego com MPLS é a determinação dos caminhos para os LSP's.

Através do MPLS, a determinação dos caminhos pode ser feita de diversas maneiras, sendo oferecido por fabricantes em seus equipamentos [OPTIMIZING] e [MPLS_ATM]. A arquitetura MPLS permite que os LSR's definam os caminhos dos

LSP's de forma automática, minimizando a intervenção do operador, podendo até mesmo criar múltiplos LSP's para a mesma origem e o mesmo destino, e com isto aplicar uma política de balanceamento de carga.

Muitas das propostas existentes para Engenharia de Tráfego sobre MPLS enfatizam apenas no potencial de criar LSP's explícitos. Apesar de fundamental para a Engenharia de Tráfego, isto não é em geral suficiente. Capacidades adicionais são requeridas para levar a uma otimização de desempenho em grandes redes. Estas capacidades adicionais serão discutidas na próxima seção.

6.4 CAPACIDADES ADICIONAIS PARA ENGENHARIA DE TRÁFEGO SOBRE MPLS

As seguintes capacidades adicionais são requisitos para a realização de uma Engenharia de Tráfego sobre MPLS:

1. Um conjunto de atributos associados a troncos de tráfego para especificar coletivamente suas características comportamentais;
2. Um conjunto de atributos associados a recursos que restrinjam o estabelecimento de troncos de tráfego através deles;
3. "Roteamento baseado em restrições", também denominado roteamento para QoS ou CR – Constraint Based Routing, usado para selecionar caminhos para troncos de tráfego sujeitos a restrições impostas pelos itens 1 e 2 acima. Embora o roteamento baseado em restrições não seja necessariamente parte do MPLS, os dois deverão estar fortemente integrados.

6.4.1 ATRIBUTOS E CARACTERÍSTICAS DE TRONCOS DE TRÁFEGO

Os atributos básicos de um tronco de tráfego importantes para Engenharia de Tráfego são:

1) Parâmetros de Tráfego

Podem ser usados para capturar as características das FEC's que deverão ser transportadas através dos troncos de tráfego. Estas incluem: taxas de pico, taxas médias, tamanho permissível da rajada, etc.

2) Atributos de Seleção e Gerência de Caminho

Definem as regras para selecionar a rota tomada por um tronco de tráfego e as regras para manutenção dos caminhos que já estiverem estabelecidos.

Caminhos podem ser computados automaticamente pelos protocolos de roteamento, ou definidos administrativamente pelo operador. Se um dado tronco de tráfego não tiver requisitos de recursos, um protocolo de rede simples pode ser usado para selecionar o caminho. Se houver requisitos de recursos, então deve-se usar um esquema de roteamento baseado em restrições.

Gerência de caminho se refere à manutenção dos caminhos cursados pelos troncos de tráfego. A implementação do MPLS deverá ser capaz de se reconfigurar dinamicamente para se adaptar a mudanças no estado do sistema.

Alguns dos atributos de seleção e gerência de caminho são:

2.a) Caminhos Explícitos Especificados Administrativamente

Um caminho explícito especificado administrativamente é calculado “off-line” e configurado pelo operador. Um componente de uma rota explícita pode ser especificado de forma categórica ou não.

Uma coleção de nós, conhecida como “Nó Abstrato”, pode ser apresentada como um único passo na rota, usando um prefixo IP ao contrário de um endereço completo, por exemplo. O LSP deve ser roteado para algum nó dentro deste Nó Abstrato como próximo salto. A rota pode conter vários saltos dentro do Nó Abstrato antes de emergir para o próximo salto especificado na Rota Explícita.

Uma Rota Explícita também pode conter o identificador de um Sistema Autônomo. Isso permite que o LSP seja roteado através de uma área da rede que esteja fora do controle administrativo do iniciador do LSP. A rota pode conter vários saltos dentro do Sistema Autônomo antes de emergir para o próximo salto especificado na Rota Explícita.

Algumas formas de especificar um caminho explícito são:

- Calcular o caminho inteiro do LSP “off-line” e estaticamente configurar os LSR’s ao longo do LSP que se deseja estabelecer, o que resulta num procedimento análogo ao que alguns ISP’s fazem hoje usando ATM;
- Calcular o caminho inteiro do LSP “off-line” e estaticamente configurar o LSR no início do LSP com este dado. O LSR inicial pode estabelecer o LSP de forma explícita (a partir da origem) através dos protocolos de distribuição de rótulos disponíveis, de forma dinâmica. Para tal, pode-se empregar o LDP ou o RSVP [OPTIMIZING]. Neste caso, o RSVP está sendo usado apenas para instalar os dados de encaminhamento ao longo dos LSR’s, sem necessariamente reservar largura de banda ou prover quaisquer garantias de atraso ou “jitter” mínimos;

- Calcular um caminho parcial para o LSP “off-line” e estaticamente configurar o LSR no início do LSP com os dados do subconjunto dos LSR’s que estão neste caminho, incluindo qualquer combinação de roteamento estritamente explícito – Strict Source Routing – e roteamento fracamente explícito – ou Loose Source Routing². Neste caso, pode-se garantir que num determinado trecho da rede o tráfego seguirá um caminho previamente definido, deixando para algum outro nó intermediário da rede a decisão de como encaminhar o tráfego a partir daquele ponto;
- Configurar o LSR no início do LSP somente com a identificação do LSR no fim do LSP. Neste caso o LSP seguirá o caminho de roteamento IP normal. Este tipo de configuração não tem um valor em termos de Engenharia de Tráfego, porém pode ser útil em situações onde se necessite de serviços do tipo Rede Privada Virtual (“Virtual Private Network” - VPN), permitindo segregar o tráfego de grandes usuários.

2.b) Hierarquia de Regras de Preferência para Múltiplos Caminhos

Pode ser útil, em alguns contextos, especificar administrativamente um conjunto de LSR’s candidatos para um dado tráfego e definir a hierarquia de preferência para escolha destes caminhos.

2.c) Distribuição de Carga Através de Múltiplos Troncos de Tráfego

² Uma Rota Explícita pode ser classificada como “strict” ou “loose”. Uma rota strict deve conter apenas aqueles nós, Nós Abstratos ou Sistemas Autônomos especificados na Rota Explícita, e devem usá-los na ordem especificada. Uma rota “loose” deve incluir todos os saltos especificados, e deve manter a ordem, mas pode incluir saltos adicionais quando necessário para alcançar os saltos especificados. Uma vez a rota loose tenha sido estabelecida, ela pode ser modificada (semelhante a uma rota salto-a-salto) ou pode ser configurada para que não sofra constantes alterações.

No MPLS pode-se criar múltiplos troncos de tráfego entre dois nós, de forma que cada um leve uma parcela do tráfego agregado, permitindo uma distribuição de carga. Portanto é necessário um atributo que indique a proporção relativa de tráfego a ser escoado por cada um deles.

2.d) Adaptabilidade

Este parâmetro pode ser usado para indicar quando um tronco de tráfego está sujeito a re-otimização em caso de mudanças nas características e estado do sistema (novos recursos se tornaram disponíveis, recursos falharam, etc.). Em alguns destes cenários, pode ser desejável modificar dinamicamente os caminhos de alguns troncos de tráfego.

2.e) Afinidade de Classe de Recurso

Este parâmetro é usado para especificar a classe de recursos que devem ser explicitamente incluídas ou excluídas do caminho de um tronco de tráfego. É uma variável binária que indica inclusão ou exclusão. Se nenhum atributo de afinidade estiver especificado, assume-se uma relação entre o tronco de tráfego e todos os recursos onde não há nenhum requisito de explicitamente incluir ou excluir algum recurso do caminho do tronco de tráfego.

3) Prioridade

O atributo de prioridade define a importância de um tronco de tráfego relativa aos demais. Ao se empregar roteamento baseado em restrições, a atribuição de

prioridades pode ser usada para determinar a ordem em que a seleção de caminhos para os troncos de tráfego é feita.

Prioridades também são importantes para definir o critério de preempção de troncos de tráfego, quando a implementação suportar esta capacidade.

4) Preempção

O atributo de preempção determina quando um tronco de tráfego pode se sobrepor a outro tronco de tráfego já estabelecido para um dado caminho. Num cenário de serviços diferenciados, pode-se utilizar preempção para garantir que troncos de tráfego de alta prioridade possam sempre ser roteados através de caminhos favoráveis, ainda que em detrimento de outros troncos de tráfego.

5) Confiabilidade

Este atributo determina o comportamento de um tronco de tráfego quando ocorrem falhas ao longo do caminho por onde ele cursa. Os problemas básicos a serem tratados são:

- Detecção da falha;
- Notificação da falha;
- Recuperação e restauração do serviço.

As implementações de MPLS deverão incorporar mecanismos que tratem estas questões. Algumas possibilidades de políticas de recuperação são:

- Não re-rotear o tráfego;

- Re-rotear através de um caminho possível com recursos suficientes. Se não existir algum, então não re-rotear;
- Re-rotear através de qualquer caminho disponível, independentemente de restrições de recursos;
- Outros, incluindo combinações dos casos acima.

6) Policiamento

Determina as ações que deverão ser tomadas quando um tronco de tráfego exceder os parâmetros de tráfego contratado (limitar em taxa, rotular o tráfego para que seja descartado em caso de congestionamento, etc.).

6.4.2 ROTEAMENTO BASEADO EM RESTRIÇÕES (*CONSTRAINT BASED ROUTING*)

Como já mencionamos anteriormente, a Engenharia de Tráfego representa o processo de controlar a maneira pela qual o tráfego escoar através das redes a fim de evitar o congestionamento causado pela sobre carga de certos recursos da rede. Evitar congestionamentos e prover degradação suave de desempenho no caso de congestionamento são funções complementares que tornam a Engenharia de Tráfego útil em todas as arquiteturas de serviço.

Atualmente, o roteamento baseado em restrições tornou-se o componente mais importante da Engenharia de Tráfego. O roteamento baseado em restrições é usado para computar rotas que são sujeitas a múltiplas restrições, representando uma evolução do esquema denominado roteamento baseado em QoS [BIGPICTURE]. Dada uma necessidade de qualidade de serviço para um fluxo ou uma agregação de fluxos, este mecanismo de roteamento encontra a rota mais provável de atender os requisitos de qualidade de serviço.

As metas do roteamento baseado em restrições são:

- Selecionar rotas que possam atender um dado requisito de QoS;
- Possibilitar aplicações/serviços avançados;
- Evitar congestionamento e melhorar a satisfação do usuário;
- Aumentar a utilização da rede.

O roteamento baseado em restrições considera os requisitos topológicos da rede, os requisitos de fluxo, a disponibilidade de recursos dos enlaces e outras políticas especificadas pelos administradores de rede. É possível, portanto, que este método retorne um caminho mais longo, porém descongestionado, ao contrário de um caminho curto, mas de tráfego comprometido pelo congestionamento.

Os principais problemas do roteamento baseado em restrições são a divulgação das informações de estado de enlace e a seleção de métricas e algoritmos de computação de rotas. A divulgação das informações de estado de enlace será vista na próxima seção.

6.4.3 DIVULGAÇÃO DAS INFORMAÇÕES DE ESTADO DE ENLACE

Para computar rotas orientadas à qualidade de serviço, os roteadores necessitam de informações de topologia e de disponibilidade de recursos da rede. Como os protocolos convencionais não suportam estas informações, uma alternativa é estender as mensagens de divulgação de estado de enlace de protocolos tais como o OSPF de maneira a acrescentar a informação de disponibilidade de recursos (a informação da topologia já é nativa nestes protocolos).

Deve ser estabelecido um compromisso entre a necessidade de informações precisas e a necessidade de se evitar propagações freqüentes dos anúncios de estado de enlace.

Outra possibilidade é distribuir os anúncios de estado de enlace apenas quando houver uma mudança de topologia ou uma mudança significativa na disponibilidade de recursos.

A fim de realizar o roteamento baseado em restrições, todos os roteadores no domínio devem ser capazes de anunciar suas informações de disponibilidade de recursos.

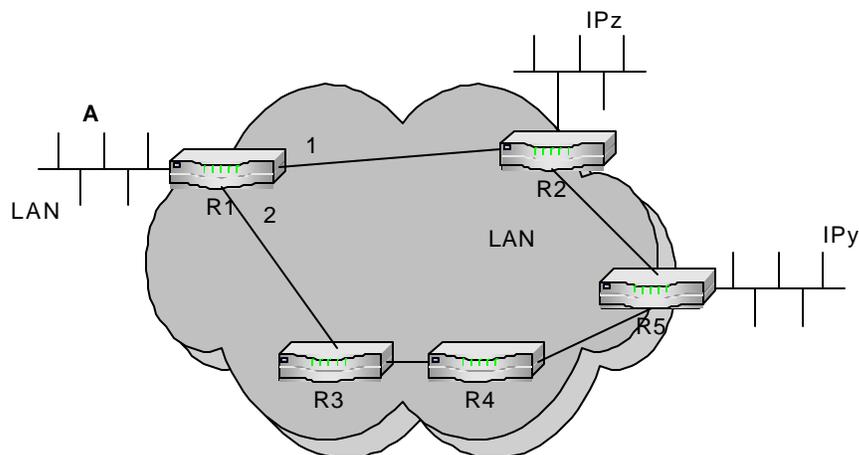


Figura 13: Ilustração de um processo de *Constraint Based Routing*.

Através da Figura 13, é possível descrever o comportamento do roteamento baseado em restrições. As distâncias entre os nós têm sempre peso 1 e cada enlace apresenta uma largura de banda disponível distinta, divulgada nas mensagens de estado de enlace do protocolo de roteamento. A seqüência de roteadores <R2,R5> representa o menor caminho de R1 até R5. No entanto, este caminho apresenta um gargalo de largura de banda neste momento, disponibilizando apenas 1 Mbps. O caminho <R3,R4,R5> é mais longo, porém deve estar mais desafogado, pois

disponibiliza 100 Mbps de largura de banda. Portanto, se um host A deseja enviar a IPy pacotes de uma aplicação que exija alta disponibilidade de banda, por exemplo envio de dados de uma sessão multimídia, ele poderá explicitamente selecionar o caminho <R3,R4,R5> e solicitar o estabelecimento de um LSP. A disponibilidade de largura de banda é um parâmetro dinâmico, que poderá variar com o tempo em função do tráfego na rede. Assim, à medida que os roteadores enviam informações atualizadas a respeito do estado de seus enlaces, R1 poderá atualizar sua tabela de encaminhamento. É possível que passado algum tempo o caminho <R2,R5> se torne des congestionado e passe a apresentar alta disponibilidade de largura de banda, e caso haja novamente a necessidade de se estabelecer uma conexão para envio de pacotes multimídia de A para um host no endereço IPy, desta vez se estabeleça um LSP através de <R2,R5>.

6.4.4 RELAÇÃO ENTRE ROTEAMENTO BASEADO EM RESTRIÇÕES E MPLS

Roteamento baseado em restrições é um mecanismo avançado de roteamento, ao passo que MPLS é um mecanismo de encaminhamento de pacotes. Portanto, teoricamente independentes, porém com bastante afinidade do ponto de vista prático. O roteamento baseado em restrições determina a rota entre dois nós baseado nas informações de topologia e de disponibilidade de recursos na rede. Ele automaticamente distribui a carga de tráfego da rede para evitar congestionamento. Ele se integra perfeitamente ao MPLS, uma vez que dadas as rotas, o MPLS usa o protocolo de distribuição de rótulos para estabelecer os LSP's, não se importando sobre como as rotas são determinadas. Os LSP's criados pelo MPLS podem prover estatísticas ao roteamento baseado em restrições. Estas estatísticas proporcionam informações precisas sobre como o tráfego flui pela rede. Com estas estatísticas, ele pode determinar de maneira mais precisa como os LSP's devem ser configurados.

6.4.5 PROTOCOLOS DE SINALIZAÇÃO

Até o momento de conclusão deste trabalho, dois protocolos tinham sido propostos no grupo de trabalho do MPLS para implementar os LSPs com Roteamento Explícito (ER-LSPs): Constraint-Based Routing usando LDP (CR-LDP) e extensões para o RSVP (RSVP-TE), ambos oferecendo mecanismos de sinalização.

O RSVP por já se encontrar implementado nos produtos que empregam o Tag Switching da Cisco Systems, tem recebido a aprovação do IETF, entretanto, podemos questionar se o fato da necessidade de uma modificação muito grande neste protocolo, para que ele se adeqüe às características e funcionalidades do MPLS, não seria uma limitação para o mesmo, ou se isso não representaria a criação de um novo protocolo, ou seja, o protocolo RSVP-MPLS.

O CR-LDP é um protocolo novo e isto já poderia representar um ponto negativo para ele, não fosse o fato dele estar se mostrando um sistema de sinalização robusto, oferecendo grande escalabilidade, alta confiabilidade e simplicidade de implementação. Além disso, é totalmente aberto (independente de fabricante), oferecendo a interoperabilidade tão crítica no ambiente de transporte.

Muitas avaliações têm sido feitas para testar a funcionalidade, performance e a implementação destes dois protocolos, em particular, a análise das capacidades de Engenharia de Tráfego do MPLS usando CR-LDP e o RSVP estendido. Algumas empresas estão se mostrando tendenciosas no sentido de uma ou outra solução e ainda há quem defenda a utilização de ambas.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, apresentamos o MPLS como suporte à Engenharia de Tráfego . Para maior compreensão de como o esquema de encaminhamento de pacotes do MPLS pode ser útil aos administradores de redes, introduzimos os conceitos básicos da

Engenharia de Tráfego, seu funcionamento e seus requisitos, e os recursos (capacidades) exigidos do MPLS para que possa ser explorado de forma mais adequada pelos técnicos com o objetivo de trazer uma contribuição eficaz à Engenharia de Tráfego.

7. MPLS EM REDES DIFFSERV

Neste capítulo, apresentaremos os principais conceitos relacionados ao modelo Diffserv e o emprego do MPLS em redes com diferenciação de serviço. Nosso objetivo é dar destaque aos aspectos cruciais para compreensão do comportamento do MPLS no ambiente DiffServ.

7.1 INTRODUÇÃO

A infra-estrutura da Internet atual está projetada para encaminhar os pacotes usando um modelo de serviço de melhor esforço (best effort - BE), o qual não oferece quaisquer garantias de vazão, atraso, ou outro requisito de Qualidade de Serviço.

Todavia, as aplicações mais recentes e a utilização da infra-estrutura da Internet para o transporte de voz, imagem e dados de missão crítica têm conduzido os esforços de toda a comunidade de pesquisadores, fabricantes, entidades governamentais e outros, no sentido de desenvolver padrões e arquiteturas interoperáveis que possam dar suporte a essas novas aplicações.

Como já mencionado, alguns modelos já desenvolvidos apresentaram limitações que os tornaram impraticáveis. Por outro lado, existem alguns que já se tornaram padrão de fato. Dentre os modelos que receberam maior aceitação, por sua escalabilidade e simplicidade, encontramos o Diffserv.

Neste capítulo, apresentaremos as principais características do Diffserv e discutiremos sua relação com o MPLS, a maneira como podem interagir e até mesmo se completar no sentido de oferecer um ambiente capaz de proporcionar a Qualidade de Serviço demandada pelos usuários das redes de grande porte.

7.2 SERVIÇOS DIFERENCIADOS

No modelo de Serviços Diferenciados – DiffServ, como proposto pelo IETF, é possível classificar o tráfego em um número de classes de prioridade e/ou atraso. O tráfego classificado como de maior prioridade e/ou atraso recebe um tratamento preferencial sobre o tráfego que é classificado em classes mais baixas.

O DiffServ, não tenta dar garantias fim-a-fim explícitas sobre a rede. Ao contrário, em segmentos da rede que estejam congestionados, o tráfego com classe de prioridade mais alta tem uma probabilidade maior de passar adiante, ou em caso de prioridade de atraso, escalonada para transmissão antes do tráfego não sensível a atraso. O DiffServ não tem granularidade de fluxo, ele trabalha com agregações de fluxo.

A informação requerida para diferenciar os pacotes nos elementos da rede é carregada no campo *Type of Service* (ToS) do cabeçalho dos pacotes IP. No contexto do DiffServ, este campo é referenciado como DS-field. Desta forma, como a informação requerida para os algoritmos de gerenciamento de buffer e de escalonamento está implicitamente dentro do pacote, serviços diferenciados não necessariamente requerem protocolos de sinalização para controlar os mecanismos que são usados para selecionar diferentes tratamentos para os diferentes pacotes.

O trabalho ainda é relativamente recente, mas o modelo de serviço provavelmente se baseará em perfis de serviço estáticos de usuários, definindo as capacidades da subscrição (por exemplo largura de banda) e funções de borda de rede que policiam o tráfego e rotulam os pacotes à medida que eles entram na rede. A marcação de pacotes, a qual classifica o tráfego de acordo com os requisitos de atraso e por valor ou importância, é usada pelos roteadores núcleo para escalonamento, manipulação de congestionamento, etc. Pacotes que violarem o acordo de nível de serviço são marcados e em caso de congestionamento da rede podem ser rebaixados de prioridade³, ou descartados.

7.2.1 POLÍTICAS DE ENCAMINHAMENTO DO DIFFSERV

Os seis primeiros bits do campo DS formam o DiffServ CodePoint – DSCP – e irão determinar o tratamento dado aos pacotes encaminhados em cada nó, ou PHB (*Per-Hop-Behavior*). Os seis bits são usados como uma tabela indexada para identificar PHBs. Eles permitem teoricamente até 64 *codepoints* independentes.

Dentre os PHBs definidos, destacam-se o PHB de Encaminhamento Expresso (*Expedited Forwarding PHB - EF-PHB*) e o PHB de Encaminhamento Assegurado (*Assured Forwarding PHB - AF-PHB*).

Expedited Forwarding (EF)

O PHB EF provê baixa perda, baixo atraso e baixa variação de atraso. O DiffServ define que a máxima taxa agregada de dados para este PHB, a qualquer momento, não deve ser maior que a mínima taxa de transmissão disponível para este PHB por nó. Esta exigência assegura que não exista crescimento de fila ocorrendo para este serviço dentro do nó, o que minimiza o atraso e variação de atraso.

Assured Forwarding (AF)

Existem N classes de encaminhamento (quatro definidas atualmente) denotadas AF1 a AFn. Dentro de cada uma dessas classes, existem ainda M subclasses (três definidas atualmente) para probabilidade de entrega. Cada classe de encaminhamento dentro deste grupo é configurada independentemente para recursos como espaço no *buffer* e mínima capacidade de saída que deve ser assegurada pelo mecanismo de escalonamento. Este PHB é indicado para aplicações que não demandam uma garantia de serviço estrita, mas por uma expectativa de serviço que será obtida por um determinado tráfego em situações de congestionamento.

³ A remarcação no interior do domínio é indesejável.

Default Behavior (DE)

Corresponde ao tráfego *Best Effort* (BE) do modelo tradicional da Internet. Este PHB define que o nó irá entregar tantos pacotes desse tipo quanto possível, tão logo quanto possível.

7.2.2 MECANISMOS DE ESCALONAMENTO

No contexto de QoS em redes IP e, em particular na arquitetura DiffServ, um modo que os elementos de rede possuem para controlar o transbordamento de pacotes na entrada de uma interface é usar um algoritmo de escalonamento para ordenar este tráfego e, então, determinar algum método de priorizar seu encaminhamento através de uma interface de saída.

De um modo geral, escalonamento é a ação de armazenar pacotes ou células em um local onde eles permaneçam até serem processados. Tipicamente, o escalonamento ocorre dentro de roteadores quando os pacotes são recebidos pelo processador de interface do dispositivo (fila de entrada), e ocorre também antes da transmissão dos pacotes para uma outra interface (fila de saída) do mesmo dispositivo.

Um roteador básico é composto por: um conjunto de processos de *entrada*, que remontam os pacotes na forma como foram recebidos, verificando a integridade de sua estrutura básica; um ou mais processos de *encaminhamento*, que determinam a interface destino do pacote; e processos de *saída*, que estruturam e transmitem os pacotes para o próximo nó da rede. A união dos processos de entrada, de encaminhamento e de saída compreendem o processo de gerenciamento de filas de pacotes.

É importante entender o papel que as estratégias de escalonamento desempenham no provimento de *serviços diferenciados*: As redes não orientadas à conexão, onde as redes IP são as principais representantes, operam segundo o

paradigma *store-and-forward*⁴ todos os pontos finais estão distantes uns dos outros mais do que um salto. Portanto, deve-se entender a complexidade do escalonamento de tráfego, o efeito que o escalonamento tem no sistema de roteamento e aplicações e porque mecanismos de gerenciamento de filas adequados são cruciais para QoS.

O gerenciamento de filas depende basicamente do algoritmo de escalonamento dos pacotes e do tamanho máximo da fila. A escolha do algoritmo e o tamanho máximo da fila podem, a primeira vista, ser relativamente simples, porém esta escolha pode ser extremamente difícil em função do padrão de comportamento do tráfego na rede ser aparentemente randômico.

- Se um tamanho elevado é imposto à fila, introduz-se um atraso e *jitter* no RTT (*Round-Trip-Time*), que pode interromper aplicações e protocolos de transporte fim-a-fim;
- Por outro lado se a fila é muito pequena, pode-se enfrentar o problema de tentar enviar dados para a rede de forma mais rápida do que ela pode aceitar, resultando em excesso de perda de pacotes.

Em tráfego de fluxo confiável, como quando se utiliza o protocolo TCP, tais pacotes descartados devem ser identificados e retransmitidos. Em fluxos de tempo-real não confiável, como quando se utiliza o protocolo UDP, tais como áudio e vídeo, os pacotes perdidos acabam por representar uma degradação do sinal. A seguir são descritas algumas técnicas para tratar o escalonamento nas interfaces de saídas, pois estas são as estratégias predominantes para tráfego do tipo *store-and-forward* e escalonamentos relacionados a QoS [IPQOS]. Cada um dos algoritmos foi projetado para resolver problemas específicos de tráfego na rede e tem um efeito particular no desempenho desta, conforme descrito.

⁴ Neste paradigma, os pacotes são armazenados no roteador e em seguida transmitidos.

Escalonamento First In, First Out (FIFO)

O escalonamento *first in, first out* (FIFO) . primeiro que entra, primeiro que sai - provê capacidade básica de armazenar e encaminhar. Em sua forma mais simples ele envolve o armazenamento de pacotes quando a rede está congestionada e o envio deles na ordem de chegada quando a rede não estiver mais congestionada.

FIFO é em muitos casos o algoritmo de escalonamento padrão, porém ele possui muitas deficiências:

- ele não toma nenhuma decisão sobre prioridade do pacote;
- a ordem de chegada determina a largura de banda que será obtida, a prioridade e a alocação de *buffers*; e?
- não provê proteção contra aplicações ou fontes de tráfego com comportamento prejudicial.

Escalonamento por Prioridade - *Priority Queuing (PQ)*

O mecanismo de escalonamento por prioridade foi projetado para dar prioridade rígida ao tráfego considerado importante. Este mecanismo é baseado no conceito que certos tipos de tráfego podem ser identificados e colocados à frente da fila de saída e desta forma transmitidos na frente de outros tráfegos.

Este mecanismo de escalonamento pode ter um efeito adverso no desempenho de encaminhamento dos pacotes por causa da reordenação destes na fila de saída e também, porque o roteador tem de analisar em detalhes cada pacote para saber como ele deve ser enfileirado, sobrecarregando, desta forma, o processador. Em ligações de baixa velocidade, o roteador tem mais tempo para examinar e manipular os pacotes. Entretanto, na medida em que a velocidade do canal de comunicação aumenta, o impacto no desempenho torna-se mais visível.

Escalonamento Baseado em Classes (CBQ)

O mecanismo de escalonamento CBQ (*Class-Based Queuing*) ou CQ (*Custom Queuing*) foi projetado para permitir que várias aplicações, com especificações de largura de banda mínimas ou exigências de latência controlada, compartilhem a rede. Este mecanismo é uma variação do escalonamento por prioridades, onde várias filas de saída podem ser definidas. Pode-se também definir a preferência em que cada fila será servida e a quantidade de tráfego enfileirado que deve ser escoada de cada fila em cada passagem na rotação do serviço neste método de escalonamento.

Utilizando-se CBQ é possível prover largura de banda garantida em um ponto potencial de congestionamento, assegurando ao tráfego especificado uma porção fixa da largura de banda disponível e deixando a banda remanescente para o restante do tráfego. CBQ manipula o tráfego assinalando um montante do espaço da fila para cada classe de pacotes e depois servindo a fila na modalidade *round-robin*⁵.

Por exemplo, podem ser criados 3 *buffers*: alto, médio e baixo. O roteador pode ser configurado para servir 200 bytes na fila de alta prioridade, 150 bytes na fila de prioridade média e 100 bytes na fila de baixa prioridade em cada rotação. Após o tráfego em cada fila ser processado, os pacotes continuam a ser servidos até que o contador exceda o limite configurado ou a fila esteja vazia. Desta forma, o tráfego categorizado e classificado para ser enfileirado em diversas filas tem boas chances de ser transmitido sem que uma latência significativa seja induzida, permitindo ao sistema evitar escassez de *buffer*.

⁵ Um algoritmo que permite que cada fila seja consultada/atendida em uma seqüência pré-definida.

Escalonamento - WFQ (*Weighted Fair Queuing*)

O mecanismo de escalonamento WFQ procura algoritmicamente prover comportamento previsível na entrega de pacotes e assegurar que os fluxos não tenham falta total de *buffers*. Este mecanismo dá aos fluxos de baixo volume de tráfego tratamento preferencial e permite aos fluxos de alto volume utilizarem o restante da capacidade de escalonamento. Ele pode ser utilizado para situações nas quais é desejável prover tempo de resposta consistente a usuários pesados e leves de modo semelhante, sem ter que adicionar largura de banda excessiva.

Este mecanismo executa duas tarefas simultaneamente:

- escalona o tráfego interativo na frente da fila para reduzir o tempo de resposta; e
- compartilha de forma imparcial a largura de banda restante entre fluxos com alto consumo de largura de banda

Adicionalmente, WFQ assegura que as filas não sofram por falta de largura de banda, e que o tráfego receba um serviço previsível. Fluxos com baixo volume de tráfego, os quais incluem a maioria do tráfego, recebem serviço preferencial, de forma que sua carga seja transmitida inteira em uma porção de tempo. Fluxos com alto volume de tráfego compartilham o restante da capacidade proporcionalmente entre eles.

O método WFQ foi projetado para minimizar esforço de configuração e adaptar-se automaticamente às mudanças nas condições de tráfego de rede. É um mecanismo eficiente na medida em que pode utilizar toda a largura de banda disponível para transmitir o tráfego de baixa prioridade se não existir tráfego de mais alta prioridade.

O nó deve decidir como os pacotes de diferentes PHBs serão escalonados para a interface de saída. O mecanismo de escalonamento pode considerar a ordem de prioridade entre as classes, mas, além disso, ele deve controlar o acesso à largura de banda do enlace para cada classe.

7.3 SERVIÇOS DIFERENCIADOS EM AMBIENTES MPLS

MPLS e DIFFSERV são metodologias que se propõem a resolver o problema de QoS do IP [DIFF_MPLS]. A combinação eficiente das duas tecnologias pode ser feita de diferentes maneiras e ainda não se encontra absolutamente definida.

Fluxos MPLS com diferentes requisitos de atraso podem ser mapeados sobre LSP's com diferentes classes de serviço e prioridade. Os mecanismos de distribuição de rótulo podem incluir a categoria de serviço diferenciado associada com o LSP.

Uma ou mais filas com uma política de serviço simples podem ser usadas. Neste caso múltiplas filas são usadas para suportar priorização por atraso. Mecanismos de escalonamento ponderado podem ser usados ao invés de escalonamento estritamente baseado na prioridade, para evitar que classes de prioridade mais baixa deixem de ter seus pacotes enviados.

O MPLS permite a alocação de largura de banda para serviços diferenciados juntamente com outros serviços de uma maneira controlada.

O campo DS irá determinar como os roteadores deverão tratar os pacotes. A QoS será garantida para uma variedade de classes de serviço pela combinação de funções de controle de admissão, tais como policiamento de tráfego (descartando o tráfego que exceder os níveis permitidos), e funções realizadas no núcleo da rede, tais como o provisionamento da largura de banda necessária. O campo DS será setado nos nós de borda da rede e nos limites administrativos.

O MPLS especifica meios para que o tráfego da camada de rede possa ser mapeado para subredes orientadas a conexão como ATM e Frame Relay. Através dos rótulos adicionados aos pacotes, ele permite que os roteadores designem rotas explícitas para várias classes de tráfego, por exemplo. O MPLS oferece ainda funcionalidades não diretamente relacionadas a QoS, como técnicas de Engenharia de Tráfego que podem, impulsionar a eficiência do roteamento IP.

Percebe-se uma grande sinergia entre o modelo de serviços diferenciados (Diffserv) e o MPLS porque eles apresentam bastantes similaridades em seus componentes, tanto no papel desempenhado pelos elementos de borda como no tratamento aplicado aos pacotes dentro de seus domínios. Uma vez que o MPLS suporta mecanismos de gerenciamento de tráfego, mecanismos eficientes de emprego de roteamento explícito e de roteamento baseado em restrições, ele pode prover uma base de sustentação sólida ao provimento dos novos serviços com características e requerimentos específicos e de acordo com os contratos ou SLAs (Service-Level Agreements).

Apesar da compatibilidade, entretanto, existem diferenças básicas entre o MPLS e o DiffServ. A seguir destacamos as principais diferenças entre eles:

- DiffServ depende de condicionadores de tráfego situados na borda da rede para indicar os requerimento de cada pacote. Esta funcionalidade pode ser adicionada via firmware adicional ou atualizações de software;
- DiffServ especifica a QoS na camada de rede e, teoricamente, pode rodar sem modificações em qualquer infra-estrutura da camada de enlace que suporte IP;
- O MPLS provavelmente será usado para adicionar funcionalidade de roteamento IP com QoS ao núcleo das redes de transporte.

Nenhuma dessas tecnologias depende uma da outra, entretanto, elas podem ser empregadas em conjunto, uma vez que a rede MPLS pode obter a informação de QoS a partir do campo DS do pacote e mapeá-lo em seu rótulo através do campo EXP, conhecido como campo experimental do rótulo MPLS, que ainda se encontra sem funcionalidade definida, está sendo analisado para ser usado quando do emprego do DiffServ com o MPLS [DSMPLS].

A forma de mapeamento do campo DS sobre o EXP ainda se encontra em discussão. Os três bits do EXP provavelmente irão permitir aos LSRs examinarem o nível de serviço requerido pelo pacote e tratá-lo de acordo. As políticas que o

primeiro LSR usa para designar um pacote para uma FEC deverá ajudá-lo a distinguir entre pacotes que requeiram diferentes níveis de serviço e designá-lo a determinados roteadores de encaminhamento.

7.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção, introduzimos os principais conceitos que fundamentam o funcionamento do DiffServ. Para melhor domínio de seus mecanismos é necessário um estudo mais detalhado, o que está fora do escopo deste trabalho. Nosso objetivo foi proporcionar uma visão que permita compreender como o DiffServ e o MPLS podem ser empregados em conjunto.

No estudo de caso apresentado no capítulo 9, empregamos o MPLS em um ambiente com diferenciação de serviço e experimentamos não só a compatibilidade existente entre os dois paradigmas bem como as contribuições introduzidas pelo MPLS.

8. ESTADO DA ARTE

O MPLS tem despontado como uma arquitetura emergente, que representa o esforço de padronização do modelo de encaminhamento de pacotes baseados em rótulos e que já existe comercialmente, produzido por uma série de fabricantes.

Neste capítulo, apresentamos ressaltamos os principais aspectos do MPLS identificados pela comunidade técnico/científica e descrevemos alguns dos trabalhos divulgados e disponibilizados para a comunidade em geral.

8.1 INTRODUÇÃO

O modelo de operação empregado pelo MPLS representa uma ferramenta a ser empregada pelos ISP (Provedores de Serviço Internet), como uma alternativa no suporte à **Qualidade de Serviço (QoS)**, à **Engenharia de Tráfego** e às **redes privadas virtuais (VPNs)**, oferecendo também a interoperabilidade e compatibilidade necessárias para compor os “backbones” que interconectarão a Internet⁶.

Dentre as principais características do MPLS podemos ressaltar:

- a agilidade no encaminhamento de pacotes proporcionada pela inspeção de rótulos, onde os pacotes são analisados somente na borda de um domínio MPLS, possibilitando também o roteamento explícito;
- Implementação de orientação a conexão em redes IP, o que propicia a Engenharia de Tráfego;
- Suporte otimizado às arquiteturas de IP QoS como o IntServ e DiffServ;
- Independência da tecnologia da camada de enlace da rede e protocolos da camada de rede, propiciando a integração e interoperabilidade em ambientes heterogêneos;
- Simplificação na interoperabilidade de redes IP não ATM e redes IP ATM, possibilitando o mapeamento de requisitos IP QoS em rede IP sobre ATM, visto que tanto em redes não ATM como em redes ATM o MPLS pode atuar como arquitetura única de encaminhamento de pacotes;

⁶ Internet2 – uma nova versão da Internet, para aplicações que demandam altas velocidades de operação e serviços de alta qualidade. Desenvolvida em parceria por universidades e empresas do mundo todo, tem demandado muitos esforços e recursos na definição de padrões de operação.

- Suporte a implementação de VPN em ambientes de grande escala, com simplificação de gerenciamento, incremento de desempenho e suporte a IP QoS.

Todos estes fatores tornam o MPLS foco de pesquisas e desenvolvimentos, apoiados por diversos fabricantes, como CISCO, NORTEL, ASCENT, IBM, NOKIA. A força tarefa do MPLS no IETF está em intensa atividade, recebendo contribuições dos fabricantes e pesquisadores, para que esta arquitetura possa suportar a infovia de comunicações de alta velocidade que contribuirá para o processo de globalização, preconizado pela Internet2.

A proposição de novas soluções para incremento e melhoria de alguns aspectos da arquitetura, como o suporte a multicast, incremento das classes de serviço no MPLS sobre arquitetura ATM, melhoria e otimização das políticas de admissão e controle, são aspectos da arquitetura que requerem muitos trabalhos de pesquisa científica e tecnológica.

Muitos dos trabalhos divulgados e disponibilizados nos permitem consolidar os conhecimentos adquiridos por meios mais teóricos. As próximas seções apresentam alguns dos trabalhos que de alguma forma estão relacionados com nossa linha de pesquisa.

8.2 MPLS E ATM: COMUTAÇÃO DE RÓTULOS - UM EXPERIMENTO

Em [LS-EXPERIM] relata-se um teste de campo realizado com o emprego de Tag Switching, uma das tecnologias precursoras do MPLS. O teste foi realizado sobre o *backbone* denominado JAMES (*Joint ATM Experiment on European Services*), conectando redes de pesquisa européias. Os testes foram realizados entre Setembro/97 e Janeiro/98. Os resultados confirmaram as expectativas em torno da tecnologia. A infraestrutura Tag Switching operando numa rede de larga escala

mostrou boa funcionalidade em termos de estabilidade de roteamento, interoperabilidade com ATM, bom tunelamento em PVC's, máxima utilização da largura de banda tanto com TCP como com UDP e boa capacidade de Engenharia de Tráfego. Este teste não cobriu algumas características mais avançadas, tais como VC merge, VPN e QoS, as quais ainda não estavam disponíveis nos equipamentos empregados. No entanto, com introdução destas funções nos equipamentos e o lançamento de produtos de diferentes fabricantes suportando a arquitetura MPLS, estes testes de campo deverão proliferar e fornecer subsídios valiosos para a maturação da tecnologia.

8.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO COM O EMPREGO DE TRONCOS DE TRÁFEGO

Em [QOS-ANALISYS] podemos encontrar uma análise comparativa sobre o serviço recebido pelos fluxos TCP e UDP quando eles compartilham um mesmo enlace ou um tronco de tráfego do MPLS. Observou-se através de simulação que, explorando a característica dos troncos MPLS poderem ser roteados por outros caminhos além daqueles correspondentes aos caminhos mais curtos (shortest paths), a vazão total da rede cresce bastante com uma Engenharia de Tráfego apropriada.

No mesmo trabalho, verificou-se que se os fluxos TCP e UDP forem misturados em um determinado tronco, os fluxos TCP recebem um serviço reduzido, a medida que a taxa de fluxos UDP cresce. Ficou evidenciado, ainda, que para se obter os benefícios da Engenharia de Tráfego, os troncos MPLS precisam ser implementados fim-a-fim, correndo o risco dos benefícios serem reduzidos ou eliminados caso alguma parte da rede não empregue a técnica de troncos de tráfego do MPLS.

A Figura 14 representa a topologia usada na simulações feitas nesse trabalho. Ela consiste de seis roteadores e seis sistemas finais. Existem três fluxos: a fonte 1 envia tráfego UDP para o destino 1; As fontes 2 e 3 enviam tráfego TCP para os destinos Dest 2 e Dest 3, respectivamente. A fonte UDP envia o tráfego a uma determinada taxa. As fontes TCP são fontes do tipo "infinite ftp" e enviam pacotes

sempre que suas janelas de congestionamento permitem. A vazão real alcançada pelas fontes é monitorada nos nós de destino.

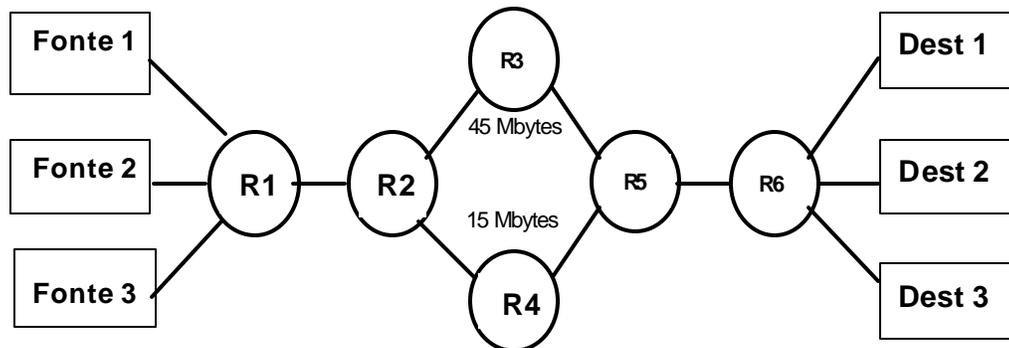


Figura 14: Topologia usada na Simulação do Trabalho QOS-ANALISYS

A simulação consistiu em criar 4 cenários. Em todos eles as fontes TCP e UDP foram misturadas de alguma forma e os autores variaram a taxa da fonte UDP para ver o comportamento das demais. Primeiramente, não se emprega o MPLS e, em seguida, empregando as técnicas do MPLS, as fontes são separadas de forma tal dentro dos troncos MPLS que é possível analisar o comportamento de cada fonte de tráfego através da vazão apresentada para cada cenário.

Foi estipulado um atraso de 0,5ms para todos os enlaces e, como podemos observar, entre os nós R2 e R5 existem dois caminhos alternativos, um R2-R3-R5 com uma largura de banda maior de 45 Mbytes e o outro R2-R4-R5 com uma largura de banda relativamente menor de 15 Mbytes.

Os autores chegaram a conclusão de que sem o MPLS, utilizando o roteamento de caminho mais curto e serviço de melhor esforço do IP, as fontes de tráfego seguem todas pelo caminho que apresenta uma maior largura de banda (R2-R3-R5) enquanto o outro caminho (R2-R4-R5) permanece inutilizado.

Concluíram também que, devido à característica das fontes de tráfego TCP serem sensíveis ao congestionamento, as mesmas podem sofrer bastante quando misturadas a fontes de tráfego UDP dentro de um mesmo tronco MPLS.

Utilizando os troncos de tráfego MPLS e Engenharia de Tráfego, chegou-se às seguintes conclusões:

- Forçando a Fonte 3 (TCP) a seguir o caminho alternativo R2-R4-R5, a vazão de todas as fontes apresenta um considerável aumento;
- Apesar do aumento apresentado, quando as Fontes 1 e 2 compartilham um mesmo tronco, a vazão da Fonte 2 (TCP) cai bastante chegando a zerar a medida que a taxa da Fonte 1 (UDP) cresce.

O trabalho é concluído ressaltando-se que a vazão total da rede melhora consideravelmente com uma Engenharia de Tráfego apropriada. Os fluxos não-sensíveis a congestionamento afetam a vazão dos fluxos sensíveis a congestionamento e, portanto, tipos diferentes de fluxos devem ser isolados em diferentes troncos para que a Qualidade de Serviço possa ser garantida, mesmo que isso implique em um certo overhead para manutenção de filas separadas para cada tronco em cada roteador.

8.4 ENGENHARIA DE TRÁFEGO ADAPTATIVA

Em [MATE] os autores propõem um mecanismo de engenharia de tráfego do tipo *time-dependent*⁷ chamado MATE (MPLS Adaptive Traffic Engineering), que visa o balanceamento de carga na rede e que apresenta as seguintes características:

- . Algoritmo de balanceamento de carga adaptativo e distribuído;

⁷ No MPLS, os mecanismos de engenharia de tráfego podem ser *time-dependet* ou *state-dependent*. Em um mecanismo *time-dependent*, informações históricas baseadas em variações sazonais do tráfego são utilizadas para pré-programar o layout dos LSPs e a designação do tráfego. O mecanismo *state-dependent* pode ser usado para lidar com a designação de tráfego adaptativo no estabelecimento dos LSPs de acordo com o estado corrente da rede que pode ser baseado na utilização, atraso de pacote, perda de pacote, etc.

- . Controle fim-a-fim entre os nós ingress e egress;
- . Decisões de otimização baseadas na medição do congestionamento;
- . Mínima reordenação de pacotes;
- . Nenhuma sincronização entre os nós.

O comportamento operacional do MATE assume que os vários LSPs explícitos entre um nó ingress e um nó egress em um domínio MPLS foram estabelecidos usando um protocolo padrão como o CR-LDP [CR-LDP-SETUP] ou o RSVP-TE [RSVP-TE], ou configurados manualmente. O objetivo do nó ingress é distribuir o tráfego entre os LSPs com o intuito de balancear a carga, minimizando, desta forma, o congestionamento. O tráfego a ser balanceado pelo nó ingress é um tronco de tráfego que compartilha o mesmo destino.

O MATE está projetado para tráfegos que não requerem reserva de largura de banda, com o tipo de tráfego dominante sendo o de melhor esforço (Tráfego BE).

No trabalho os autores apresentam um modelo analítico para balanceamento de carga entre múltiplos caminhos, derivam uma classe de algoritmos MATE assíncronos, e provam sua estabilidade e otimização.

Através de simulação eles mostram que em uma rede que tem múltiplos LSPs entre alguns nós ingress e egress, a distribuição do tráfego usando o algoritmo MATE é estável e o balanceamento de carga é alcançado. Alguns resultados são os apresentados nas figuras a seguir.

O objetivo do estudo foi aplicar a engenharia de tráfego adaptativa para utilizar os recursos da rede de forma mais eficiente, minimizando o congestionamento. A classe de algoritmos apresentada tenta alcançar estes objetivos usando o mínimo de suposições através da combinação de técnicas que controlam a quantidade de tráfego extra e atrasos marginais que são facilmente mensuráveis e não requerem sincronização de relógio. Os modelos analíticos usados por eles provam a estabilidade e otimização do algoritmo. Os resultados da simulação mostram que o

MATE pode remover os desbalanceamentos de tráfego que podem ocorrer entre múltiplos LSPs.

Finalmente, os autores observam que em muitos casos, altas taxas de perda de pacotes podem ser significativamente reduzidas pela apropriada mudança de um determinado tráfego para LSPs menos sobrecarregados.

Com o emprego de um balanceamento de carga adequado entre os múltiplos LSPs, como mostrado em [MATE], é possível beneficiar várias aplicações, principalmente àquelas tais como as TCP, que são sensíveis ao congestionamento nas redes.

8.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste trabalho, mostramos a importância da Engenharia de Tráfego e das vantagens que o esquema do MPLS oferecem aos administradores de grandes redes. Segundo as avaliações feitas em [QOS-ANALISYS] e em [MATE] podemos perceber o quanto o balanceamento de carga pode inclusive reduzir o problema de congestionamento em uma determinada rede.

9. ESTUDO DE CASO: MPLS COMO SUPORTE À ENGENHARIA DE TRÁFEGO EM UM AMBIENTE DE DIFERENCIAÇÃO DE SERVIÇOS.

Neste capítulo, apresentamos um estudo de caso que visa consolidar os conhecimentos adquiridos ao longo de nossas pesquisas e confirmar que o MPLS é de fato uma ferramenta muito poderosa no suporte a uma Engenharia de Tráfego adequada.

9.1 INTRODUÇÃO

MPLS, DiffServ e Engenharia de Tráfego são modelos que se propõem a resolver o problema de QoS na Internet e que podem ser empregados em conjunto de forma a potencializar os benefícios trazidos por cada abordagem separadamente.

Este estudo apresenta a Engenharia de Tráfego como solução para o problema de alocação ineficiente dos recursos em uma rede que em geral é percebido pelo congestionamento provocado na mesma e a conseqüente queda de performance dos serviços oferecidos. Para implementar uma Engenharia de Tráfego eficiente, utilizamos o esquema de encaminhamento de pacotes do MPLS como estratégia para minimizar o congestionamento, através do balanceamento da carga que compete pelos recursos de largura de banda dos enlaces, garantindo uma maior Qualidade de Serviço (QoS) na rede. Os resultados podem ser vistos nas simulações feitas no Network Simulator (NS-2) e apresentadas a seguir.

9.2 SIMULAÇÃO 1: Explorando os Recursos do MPLS

Antes de partirmos à avaliação do MPLS em conjunto com outras tecnologias, julgamos de vital importância a análise do comportamento básico do MPLS.

Como mencionado nos capítulos iniciais deste trabalho, o MPLS apresenta características tais como a capacidade de roteamento explícito, bem como de reroteamento de tráfego que podem ser muito úteis aos administradores de redes, em especial àqueles que se dedicam às redes de larga escala.

9.2.1 TOPOLOGIA DA SIMULAÇÃO 1

Para que pudéssemos verificar o comportamento básico do MPLS, construímos uma pequena topologia representando o tráfego de dados em um determinado trecho de

uma rede que emprega o encaminhamento de pacotes por comutação de rótulos, segundo o padrão MPLS. A topologia utilizada está representada na Figura 15.

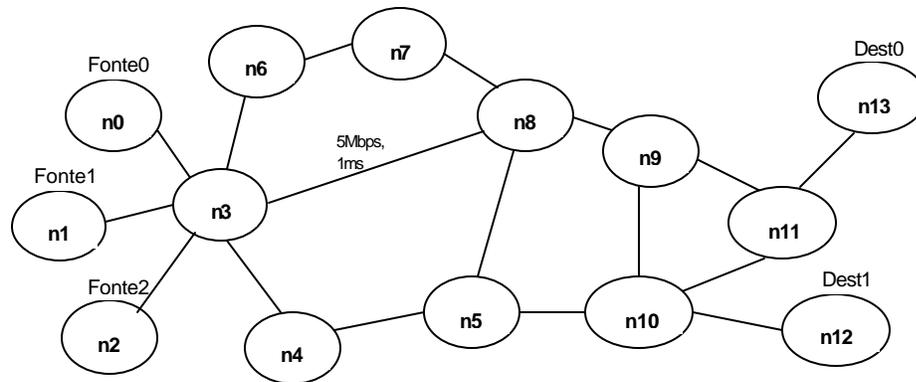


Figura 15: Topologia da simulação 1.

Como podemos verificar na Figura 15, temos três fontes de dados que podem ser referenciadas como Fonte0, Fonte1, e Fonte2 que, por razões de simplificação, geram todas um mesmo tipo de tráfego com pacotes de aplicação CBR, cuja taxa de transmissão é de 2Mbps. As fontes estão conectadas aos nós que implementam o MPLS por enlaces de 5Mbps e atraso de 1ms.

Os fluxos gerados pela fonte Fonte0 têm como destino Dest0, e aqueles gerados pelas fontes Fonte1 e Fonte2 seguem ambos para o Dest1. Durante 80 segundos, simulamos situações comuns a uma rede e verificamos o comportamento da mesma. A seguir, descrevemos um resumo de nossas observações:

- Observação 1: Inicialmente, verificamos que os tráfegos gerados pelas fontes seguiam os caminhos retratados na Figura 16, apresentando um gargalo no enlace n3-n8. Como os enlaces apresentam uma capacidade máxima de 5Mbps, a rede apresentava perda de pacotes.

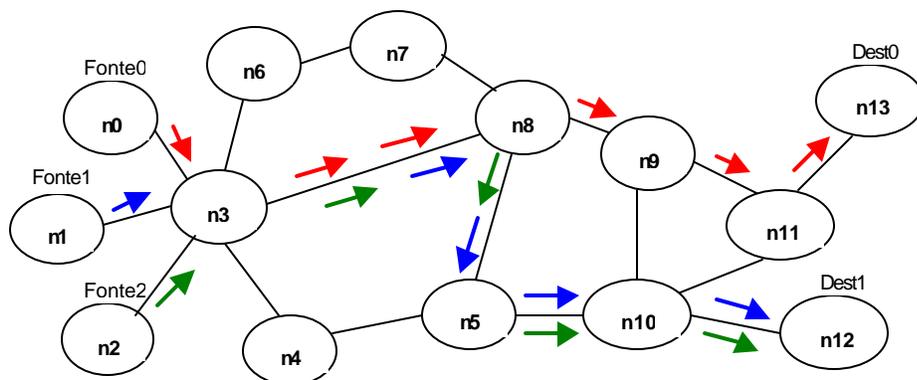


Figura 16: Fluxo dos Tráfegos das fontes Fonte0, Fonte1 e Fonte2.

Explorando a possibilidade de roteamento explícito, determinamos, então, que o tráfego gerado pela fonte Fonte1 passasse a fluir pelo caminho n1-n3-n4-n5-n10-n12, fazendo com que o mesmo apresentasse o comportamento apresentado na Figura 17.

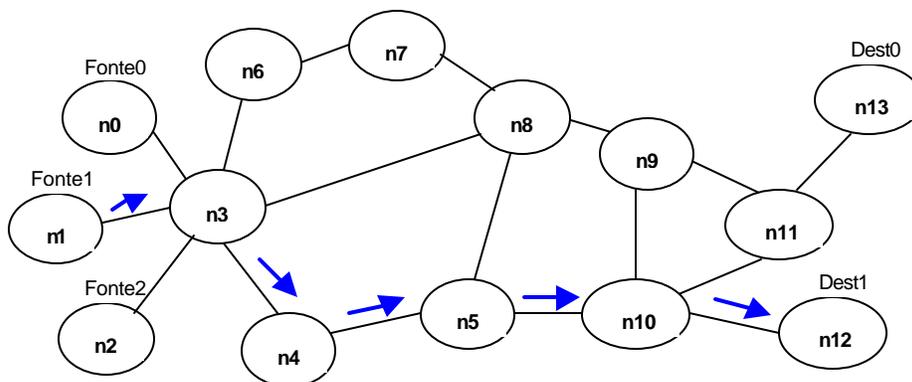


Figura 17: Caminho Explícito determinado para a fonte Fonte1.

Para uma situação onde não havia problemas de interrupção na rede, verificamos que o tráfego gerado pelas fontes seguia o mesmo caminho do início ao fim do período de simulação.

- Observação 2 Ao simularmos uma queda no enlace n3-n8, durante 10 segundos, verificamos um desvio dos fluxos gerados pelas fontes Fonte0

e Fonte2 para os caminhos n0-n3-n4-n5-n10-n11-n13 e n2-n3-n4-n5-n10-n12, respectivamente, permanecendo assim durante todo o intervalo de queda do enlace, como mostrado na Figura 18, retornando ao caminho inicial após o restabelecimento do enlace n3-n8.

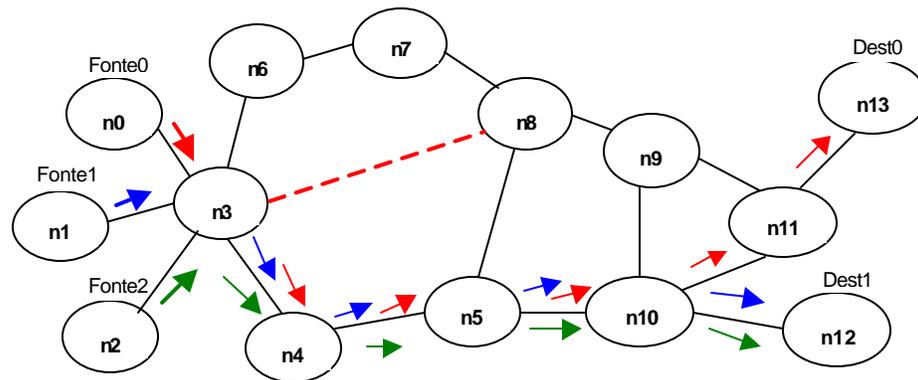


Figura 18: Comportamento da Rede durante queda do enlace n3-n8.

Como o enlace n3-n4, que compõe o caminho n3-n4-n5-n10, já estava sendo usado pelos fluxos da fonte Fonte2, sua capacidade foi extrapolada, gerando congestionamento e perda de pacotes, o que em situações reais é bastante indesejado e, dependendo dos parâmetros de prioridade e preempção dos caminhos estabelecidos, pode contrariar os contratos de serviços prestabelecidos.

Observação 3: Resolvemos testar a capacidade de roteamento de tráfego do MPLS que, teoricamente, nos permitiria, diante de uma situação como a descrita na observação 2, desviar o tráfego de um caminho preestabelecido para um outro caminho alternativo.

Determinamos, explicitamente, no exato momento em que foi verificada a queda do enlace n3-n8, um caminho alternativo para o fluxo gerado pela fonte Fonte0. O caminho estabelecido foi n0-n3-n6-n7-n8-n9-n11-n13. A Figura 19 representa o novo comportamento da rede com o estabelecimento do caminho explícito.

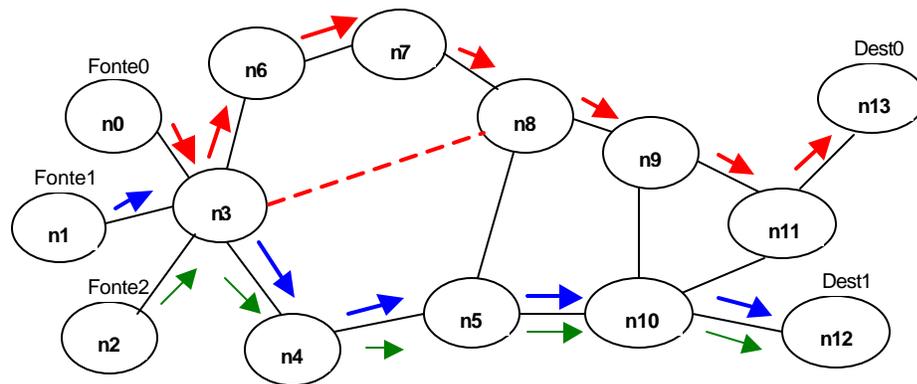


Figura 19: Reroteamento do Caminho entre n0 e n13.

O novo caminho estabelecido apresenta um custo maior em termos de quantidade de saltos entre a fonte e o destino, quando comparado com o caminho selecionado pelo protocolo de roteamento padrão. Entretanto, pareceu-nos que esta foi a alternativa que resultou em menor degradação da rede.

Através de uma simples avaliação do comportamento da rede e das possibilidades oferecidas pelo MPLS, torna-se possível ao administrador da rede uma intervenção eficaz e que garanta o oferecimento de serviços com níveis de qualidade dentro dos limites acordados. Na próxima seção, apresentamos um estudo do MPLS com avaliações mais quantitativas e em um ambiente mais complexo.

9.3 SIMULAÇÃO 2: MPLS e Engenharia de Tráfego em um Ambiente com Diferenciação de Serviço

A partir dos conceitos relacionados a cada tecnologia e a possibilidade de interação entre elas, simulamos uma rede que emprega as políticas de diferenciação de serviços em seus roteadores e o esquema de encaminhamento de pacotes por comutação de rótulos e roteamento explícito para balanceamento da carga, passando então à análise dos resultados. Devido a complexidade do ambiente criado, evitamos repetir testes como queda de enlaces e reroteamento de tráfego.

9.3.1 TOPOLOGIA DA SIMULAÇÃO 2

A topologia de simulação adotada está apresentada na Figura 20. Ela representa um ambiente onde fontes (Fonte(i)) estão conectadas a um domínio DS/MPLS por enlaces de 10Mbps e atraso de 1ms. O interior do domínio constitui-se de cinco nós LSR_i (*Label Switching Routers*) interligados por enlaces de 10Mbps e atraso de 5ms e os roteadores de entrada e saída são representados pelos roteadores de borda (*Edge Label Switching Router*) E-LSR0 e E-LSR1, respectivamente. A fonte Fonte0 gera pacotes de aplicação CBR com destino a Destino0, seu DSCP é EF e sua taxa é de 2Mbps. A fonte Fonte1 gera pacotes de aplicação FTP com destino a Destino1, seu DSCP é AF11. A fonte Fonte2 gera pacotes de aplicação FTP com destino a Destino2 e seu DSCP é BE e, finalmente, a fonte Fonte3 gera pacotes de aplicação FTP com destino a Destino3 e seu DSCP é AF12.

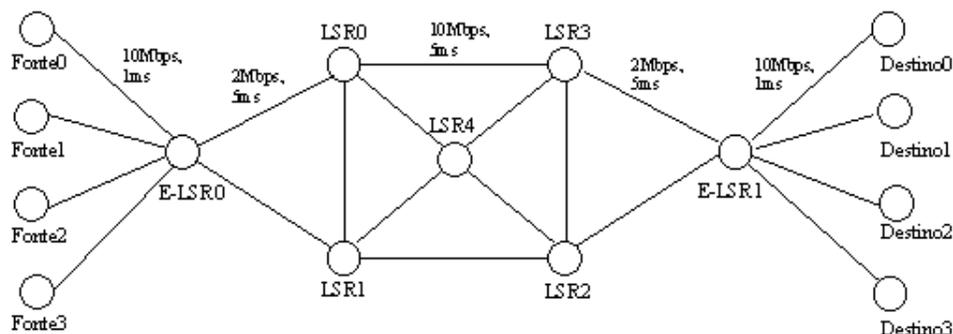


Figura 20: Topologia da simulação 2.

No cenário sem MPLS, os caminhos percorridos pelos fluxos são determinados pelo protocolo de roteamento adotado, no caso é usado o rtrproto Session do NS-2, que é um protocolo de roteamento estático baseado no algoritmo Shortest Path First (SPF) de Dijkstra. Todos os fluxos seguem um único caminho, por apresentarem todos um mesmo custo.

No cenário de simulação com MPLS, cada nó mantém além da tabela de roteamento, uma tabela de encaminhamento FIB (Forwarding Information Base) com informações de associações entre rótulos e próximos saltos. Estas tabelas são

alimentadas explicitamente de forma a garantir o balanceamento da carga através de sua distribuição entre três caminhos pré-configurados. Os fluxos gerados pelas fontes Fonte1 e Fonte3 são encaminhados pelo caminho E-LSR0_LSR0_LSR3_E-LSR1. Os fluxos gerados pela fonte Fonte0 são encaminhados pelo caminho E-LSR0_LSR1_LSR2_E-LSR1. Os fluxos gerados pela fonte Fonte2 são encaminhados pelo caminho E-LSR0_LSR0_LSR4_LSR2_E-LSR1. Os fluxos de reconhecimento seguem o caminho determinado pelo protocolo de roteamento de acordo com a tabela de roteamento.

9.3.2 RESULTADOS OBTIDOS

Como podemos observar nos dados da tabela 2 e Figura 21, a vazão total alcançada com o emprego do MPLS foi consideravelmente melhorada especialmente para as fontes Fonte1, Fonte2 e Fonte3. A vazão experimentada pela fonte Fonte0 não apresentou um aumento significativo visto que a mesma já utiliza a prioridade garantida pelo DSCP EF.

<i>1.3.1.1.0.1.1.1</i> <i>onte</i> <i>s</i>	Throughput (Kbps) - S/MPLS	Throughput (Kbps) - C/MPLS
Fonte0 – EF/CBR	990,70	1504,65
Fonte1 – AF11/FTP	518,78	1118,38
Fonte2 – BE/FTP	200,40	483,23
Fonte3 – AF12/FTP	132,52	295,75

Tabela 2: Vazão alcançada com o uso do MPLS.

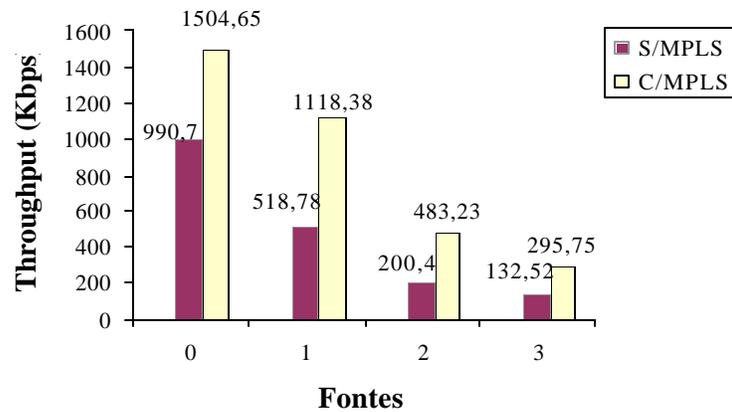


Figura 21: Vazão.

Como a fonte Fonte0 é do tipo CBR (exigindo a transmissão com uma taxa de dados fixa), definimos previamente que ela receberia um tratamento diferenciado. A fonte Fonte0 recebeu prioridade máxima através do DSCP EF. As fontes Fonte1 e Fonte3 receberam um mesmo rótulo para serem classificadas dentro de uma mesma classe de encaminhamento, e um mesmo DSCP AF para um tratamento semelhante nos nós ao longo do caminho apenas variando a prioridade de descarte entre elas.

Todas as fontes apresentaram um crescimento na vazão considerável com o emprego do MPLS. Em termos percentuais, o crescimento apresentado pelas fontes Fonte1, Fonte2 e Fonte3 superou o da vazão alcançada pela fonte Fonte0 devido à utilização de caminhos alternativos.

1.3.1.1.0.1.1.1.1.1 Fontes	Atraso Máximo (s) - S/MPLS	Atraso Máximo (s) - C/MPLS
Fonte0 – EF/CBR	0,10	0,06
Fonte1 – AF11/FTP	0,83	0,29
Fonte2 – BE/FTP	2,61	0,66
Fonte3 – AF12/FTP	0,83	0,29

Tabela 3: Atraso Máximo.

A partir da tabela 3 e da Figura 22, podemos concluir que o MPLS, através do seu Protocolo de Distribuição de Rótulos – LDP, mostrou ser capaz de oferecer um atraso máximo menor que o experimentado pelo ambiente de Serviço Diferenciado sem o mecanismo de comutação de rótulos.

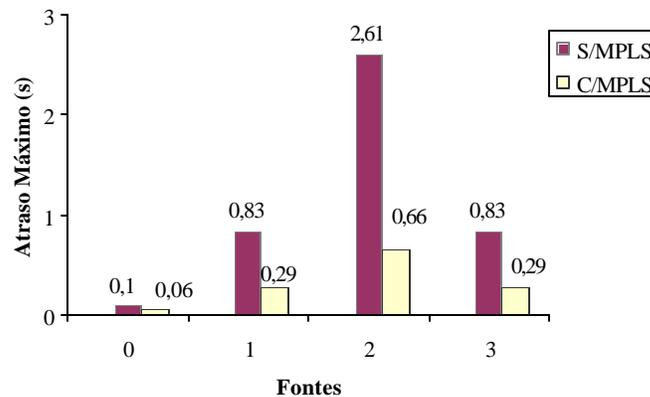


Figura 22: Atraso Máximo.

A tabela 4 e a Figura 23, apresentam os valores observados de variação de atraso máxima apresentada. Novamente, o LPD e o roteamento explícito possibilitaram uma melhor garantia de serviço para as aplicações sensíveis ao atraso e à variação de atraso. O MPLS mostrou ser capaz de oferecer uma variação de atraso bastante reduzida podendo ser empregado em redes que oferecem serviços para aplicações de tempo real.

Fontes	Máximo Jitter (s) - S/MPLS	Máximo Jitter (s) - C/MPLS
Fonte0 – EF/CBR	0,06	0,02
Fonte1 – AF11/FTP	0,23	0,01
Fonte2 – BE/FTP	0,76	0,09
Fonte3 – AF12/FTP	0,68	0,26

Tabela 4: Máximo Jitter.

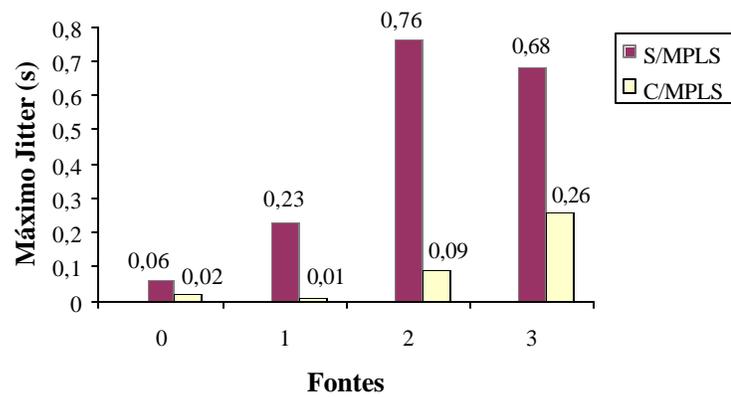


Figura 23: Máximo Jitter.

A tabela 5 e a Figura 24 mostram que com o emprego do MPLS o atraso médio é bem menor do que quando não se usa este mecanismo.

Fontes	Atraso médio (s) - S/MPLS	Atraso médio (s) - C/MPLS
Fonte0 – EF/CBR	0,04	0,03
Fonte1 – AF11/FTP	0,35	0,16
Fonte2 – BE/FTP	1,22	0,37
Fonte3 – AF12/FTP	0,40	0,17

Tabela 5: Atraso médio

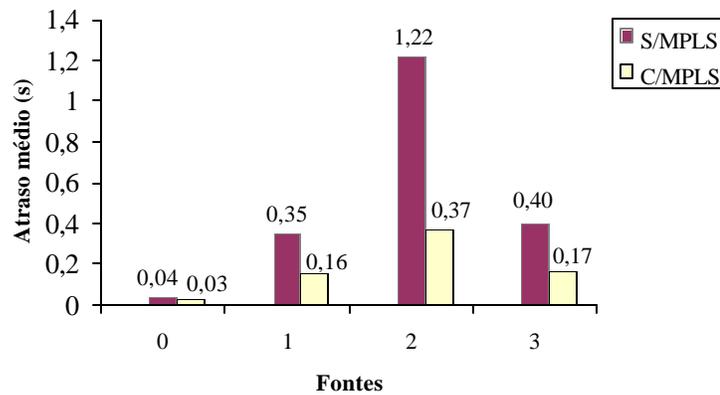


Figura 24: Atraso médio.

De acordo com as tabelas e figuras anteriores, percebemos que o uso de um caminho alternativo para a fonte Fonte2 permitiu que a mesma apresentasse uma melhoria em todos os aspectos e ao mesmo tempo não comprometesse o desempenho das demais fontes. Isso tudo graças ao mecanismo de roteamento explícito e à comutação de rótulos empregados pelo MPLS.

As figuras 25 e 26 representam a evolução da vazão no tempo no cenário sem MPLS e com MPLS, respectivamente.

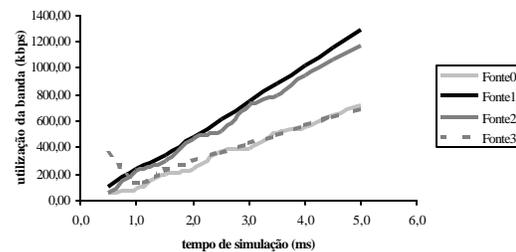
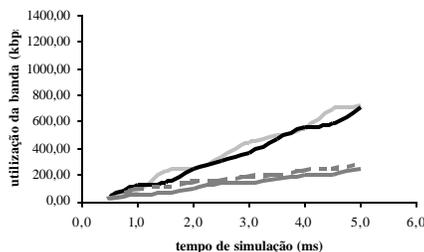


Figura 25: Evolução da vazão sem MPLS **Figura 26: Evolução da vazão com MPLS**

Como podemos observar, com o MPLS as fontes precisaram de um pequeno intervalo de tempo para superar a vazão apresentada pelo ambiente sem MPLS. A interferência de uma fonte sobre as demais diminuiu bastante com o emprego do MPLS.

As Figuras 27 e 28 representam a relação entre a evolução do atraso e o percentual de pacotes recebidos nos cenários sem MPLS e com MPLS, respectivamente.

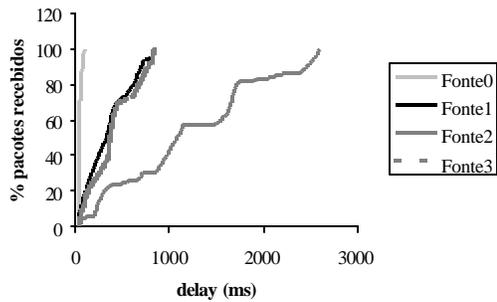


Figura 27: Evolução do atraso/percentual de pacotes recebidos sem MPLS.

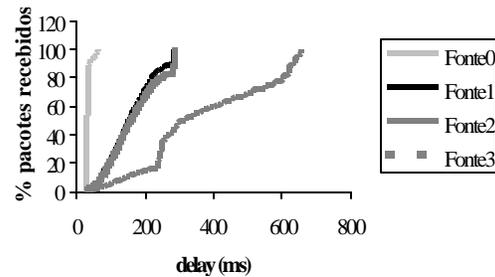


Figura 28: Evolução do atraso/percentual de pacotes recebidos com MPLS.

Nos dois cenários, o atraso experimentado pela fonte Fonte0 manteve-se constante devido às características do serviço EF. As demais fontes, no entanto, apresentaram um crescimento de atraso linear, porém bem menor com o emprego do MPLS.

As Figuras 29 e 30 representam a relação entre a evolução da variação de atraso e o percentual de pacotes recebidos nos cenários sem MPLS e com MPLS, respectivamente. Em geral, todas as fontes apresentaram uma variação de atraso reduzida com o emprego do MPLS.

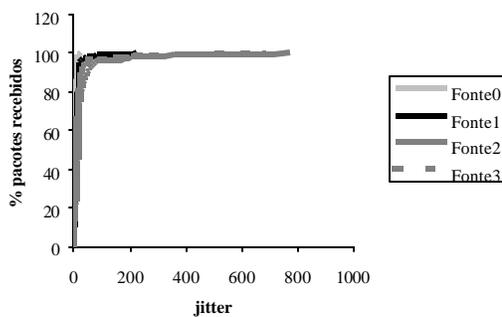


Figura 29: Evolução da variação de atraso/percentual de pacotes recebidos sem MPLS.

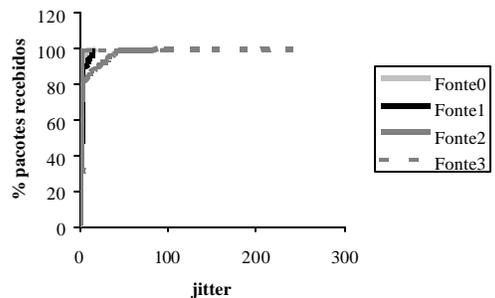


Figura 30: Evolução da variação de atraso/percentual de pacotes recebidos com MPLS.

9.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos via simulação mostram que o MPLS pode oferecer maior controle e melhor performance para os pacotes de dados IP através do uso de LSPs (*Label Switching Paths*), em particular, com o uso de LSPs explicitamente roteados (ER-LSPs).

Quando comparado aos esquemas de roteamento atuais, o MPLS oferece a grande vantagem de permitir que a carga na rede seja efetivamente balanceada entre todos os caminhos disponíveis na rede, através da determinação explícita dos mesmos, enquanto que as técnicas de roteamento que se utilizam de “caminhos mais curtos”, mesmo quando permitem que mais de um caminho seja utilizado para divisão da carga, sempre apresentam caminhos curtos congestionados e caminhos não tão curtos sempre subutilizados.

Pode-se facilmente observar as contribuições trazidas pela Engenharia de Tráfego baseada no MPLS, à medida que seus mecanismos complementam aqueles de diferenciação de serviço em cada nó através da melhor distribuição da carga de tráfego agregada entre os recursos de rede disponíveis para transmissão.

Concluimos, ressaltando que a vazão total da rede melhora consideravelmente com uma Engenharia de Tráfego apropriada e que devemos observar que fluxos não-sensíveis a congestionamento (como UDP) afetam a vazão dos fluxos sensíveis a congestionamento (como TCP) e, portanto, tipos diferentes de fluxos devem ser isolados em diferentes troncos para que a Qualidade de Serviço possa ser garantida, mesmo que isso implique em um certo *overhead* para manutenção de filas separadas para cada tronco em cada roteador.

10. CONCLUSÕES

Ao concluirmos este trabalho, gostaríamos de salientar as suas contribuições como fonte de pesquisa para a comunidade científica, destacar alguns tópicos ainda não abordados ou mesmo aprofundados neste primeiro momento e que serão objeto de pesquisa posterior, e apresentar algumas considerações finais que julgamos necessárias.

10.1 CONTRIBUIÇÕES

Neste trabalho, apresentamos o MPLS como a tecnologia de rede apropriada para entrega da capacidade de Engenharia de Tráfego e performance com QoS às redes de transporte, oferecendo também suporte aos Serviços Diferenciados.

Destacamos que o MPLS pode oferecer controle e performance para os pacotes de dados IP através do uso de LSRs , em particular, com o uso de LSPs explicitamente roteados (ER-LSPs).

Mostramos, através de trabalhos relacionados, que o MPLS para Engenharia de Tráfego em redes com Qualidade de Serviço é uma tecnologia testada e adotada e seu uso impacta numa sensível melhoria da vazão oferecida às aplicações dos usuários finais.

Simulamos um ambiente que emprega a comutação de rótulos, segundo o padrão do MPLS, para avaliação das principais características e recursos oferecidos por tal tecnologia.

Simulamos a Engenharia de Tráfego com MPLS em um ambiente que emprega Diferenciação de Serviço, comprovando que o MPLS introduz melhorias significativas em termos de maior vazão, menor atraso e menor variação de atraso.

10.2 TRABALHOS FUTUROS

Alguns aspectos e aplicações do MPLS não foram abordados neste trabalho e são objeto de estudos futuros:

- . Análise mais criteriosa dos protocolos de sinalização, para comparação entre o CR-LDP e o RSVP no suporte à Engenharia de Tráfego;
- . Interação do MPLS com domínios de QoS diferentes como o QoS Routing;

- . Emprego do MPLS em Redes Privadas Virtuais (VPNs).
- . Generalized Multiprotocol Label Switching;
- . Suporte do MPLS ao Multicast.

10.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As redes IP oferecem a escalabilidade e a flexibilidade necessárias ao rápido emprego dos serviços IP de valor agregado. Entretanto, com a crescente demanda e o crescimento explosivo da Internet, faz-se necessária uma infra-estrutura de rede que seja previsível, segura e ofereça uma performance consistente.

Os maiores desafios enfrentados por aqueles que se propõem a desenvolver tecnologias de rede ou mesmo oferecer serviços baseados em redes de computadores são a escalabilidade, a funcionalidade, a capacidade de evolução sem interrupção, e a integração.

Os problemas das redes contemporâneas são o maior volume de dados trafegando na rede, o maior número de usuários, a convergências de todas as aplicações no sentido da Internet, e a diferenciação entre as várias classes de tráfego: voz, música, vídeo.

Muitos consideram que a solução seria evoluir a arquitetura da rede IP atual de forma a prepará-la para as redes de próxima geração, permitindo uma transição gradual do ambiente atual, com controle de custos e geração de oportunidades para usuários e supridores.

Entretanto, como dissemos na introdução, não basta produzir roteadores maiores, mais rápidos e mais baratos. Existem dois outros aspectos, já considerados no desenvolvimento do modelo Label Switching:

- Diferentes classes de tráfego exigem características de serviço diferentes para atendê-las;
- O gerenciamento dos recursos necessita de redes robustas que possam realizar os serviços de forma mais eficiente.

Quando o congestionamento é minimizado através da alocação eficiente de recursos, a perda de pacotes diminui, o atraso e a variação de atraso diminuem e a vazão agregada aumenta.

O MPLS hoje é uma das poucas tecnologias que, na prática, oferece condições para um planejamento e provisionamento de recursos consistente, melhorando a performance e atendendo a demanda por serviços com maior qualidade.

O MPLS para Engenharia de Tráfego em redes com Qualidade de Serviço é uma tecnologia testada e adotada e seu uso impacta numa sensível melhoria da vazão oferecida às aplicações dos usuários finais.

De fato, podemos afirmar que a técnica de comutação de rótulos do MPLS quando empregada em redes de larga escala pode garantir aos seus usuários um retorno gratificante em termos de custo-benefício.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ARCH] Rosen, E., Viswanathan, A., Callon, R., "**Multiprotocol Label Switching Architecture**", IETF draft-ietf-mpls-arch-07.txt, Janeiro 2001.
- [FRAME] Callon, R., Freedman, N., Fredette, A., Swallow, G., Viswanathan, A., "**A Framework for Multiprotocol Label Switching**", IETF draft-ietf-mpls-framework-05.txt, Setembro 1999.
- [CISCO] Redford, R., "**Enabling Business IP Services with Multiprotocol Label Switching**", Sysco Systems, Março 1999.
- [TGUIDE] Techguide.com, "**Multiprotocol Label Switching – MPLS**", Technology Guide, 1999.
- [LDP] Anderson, L., Doolan, P., Feldman, N., Fredette, A., Thomas, B., "**Label Distribution Protocol Specification**", IETF draft-ietf-mpls-ldp-07.txt, Janeiro 2001.
- [TE-MPLS] Awduche et al, "**Requirements for Traffic Engineering over MPLS**", IETF draft-ietf-mpls-traffic-eng-00, Agosto 1999.
- [MPLS_ATM] Hagard, G., Wolf, M., "**Multiprotocol Label Switching in ATM networks**", Ericsson Review No.1, 1998.
- [QOSTE] Bhaniramka, P., Sun, W., Jain, R., "**Quality of Service using Traffic Engineering over MPLS: An Analisis**", draft-bhani-mpls-te-anal-00.txt, Março 1999.
- [DSMPLS] Heinanen, J., "**Differentiated Services in MPLS Networks**", draft-heinanen-diffserv-mpls-00.txt, Junho 1999.
- [ERLDP] Andersson L. et al, "**IP Traffic Engineering Using MPLS Explicit Routing in Carrier Networks**", Nortel Networks, 1999.
- [BIGPICTURE] Xiao e Lionel M. Ni, "**Internet QoS Big Picture**", 1999.
- [SWITCHING] Doolan P. et al, "**Switching in IP Networks: IP Switching, Tag Switching, & Related Technologies**", MK, 1998.

- [SWITCH_NETS] Black, Darryl P., "**Building switched networks: multilayer switching, QoS, IP multicast, network policy, and service level agreements**", MA, 1999.
- [DIFF_MPLS] Stephenson, A., "**Diffserv and MPLS: A Quality Choice**", Tech Tutorial, data.com/issue/981121/quality.html, Novembro 1998.
- [IPQOS] Nortel & Bay Networks, "**IP QoS – A Bold New Network**", White Paper, Setembro 1998.
- [MATE] Jin, C. et al, "**MATE: MPLS Adaptive Traffic Engineering**", 2001.
- [QOS-ANALISYS] Bhaniramka, P. et al, "**Quality of Service using Traffic Engineering over MPLS: An Analysis**", Janeiro 2001.
- [OPTIMIZING] [Semeria e Stewart, "**Optimizing Software for Reliable Internet Growth**", Julho 1998.
- [LS-EXPERIM] Ferrari, T. et al, "**Label-Based Switching: Architecture and Performance in an ATM Wide Area Network**", Abril 1998.
- [RSVP-TE] D. O. Awduche et al, "**RSVP-TE: extensions to RSVP for LSP tunnels**", Internet draft draft-ietf-mpls-rsvp-lsp-tunnel-05.txt, Fevereiro 2000.
- [CR-LDP-SETUP] B. Jamousi et al, "**Constraint-based LSP setup using LDP**", Internet draft draft-ietf-mpls-cr-ldp-03.txt, Setembro 1999.
- [MPLS-DS] Awduche et al, "**Requirements for Support of DiffServ Aware MPLS Traffic Engineering**", IETF draft-ietf-mpls-diff-te-reqts-00, 2001.
- [RE-MPLS-DS-TE] Awduche et al, "**MPLS Support of Differentiated Services**", IETF draft-ietf-mpls-diff-ext-09, Maio 2002.
- [EXTENSION] Awduche et al, "**Extension to RSVP-TE and CR-LDP for Support of DiffServ-aware MPLS Traffic Engineering**", IETF draft-ietf-mpls-diff-te-ext-01, Fevereiro 2001.
- [NS] **VINT Network Simulator** (versão 2).
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>