

4 A Proposta MIRROR

4.1. Introdução

A inadequação de alguns padrões adotados no IP Multicast ao contexto das redes WDM e da comutação baseada em rótulos, aliada às perspectivas de adoção de IP sobre WDM na maioria dos backbones mundiais, oferece uma grande oportunidade para se reformular alguns aspectos da difusão seletiva adotada na Internet e melhor adequá-la às futuras gerações de inter-redes IP.

O conjunto de adaptações sugeridas na proposta MIRROR (“Multicast IP para Redes baseadas em Rajadas Ópticas Rotuladas”) consiste de adaptações ao IP Multicast para torná-lo menos complexo, mais escalável em relação ao número de grupos ativos simultaneamente, e mais apropriado às redes baseadas em comutação óptica. A MIRROR baseou-se nas investigações realizadas nas três áreas analisadas nos capítulos anteriores – difusão seletiva, redes ópticas e comutação por rótulos – para identificar as otimizações e melhorias que poderiam ser feitas no modelo de difusão seletiva adotado na Internet, sem que se comprometesse suas principais virtudes e funcionalidades. Desta forma, a MIRROR explora as virtudes de novas abordagens como a comutação de rajadas ópticas (OBS) e o GMPLS, ao mesmo tempo que mantém, com alguns aperfeiçoamentos em relação ao IP Multicast tradicional, o endereçamento de grupo e os protocolos de sinalização e de roteamento multiponto.

Este capítulo apresenta em detalhes a proposta MIRROR e as respectivas melhorias e adaptações sugeridas ao IP Multicast. Primeiro define o modelo referência de inter-redes adotado na proposta. Em seguida, descreve os principais aspectos da proposta para a construção de árvores de distribuição multiponto no contexto de comutação óptica rotulada e as questões referentes ao compartilhamento dessas árvores. Depois, discute os aspectos de sinalização e controle relacionados à interação da difusão seletiva com GMPLS. Finaliza com algumas considerações sobre proteção e recuperação.

4.2. Modelo de Referência Adotado

O modelo de referência adotado neste trabalho consiste de roteadores IP/MPLS¹ conectados via inter-redes ópticas, aptas a realizar difusão seletiva, através de caminhos de luz comutados dinamicamente (Figura 4.1). As redes ópticas que compõem estas inter-redes são baseadas nos paradigmas OBS e MPLS. A opção pela comutação de rajadas ópticas (OBS), deve-se tanto pela sua maior eficiência, já que ela não necessita que lambdas fiquem dedicadas a cada ramo da árvore multiponto, como pela sua maior adequação ao ambiente IP sobre WDM, uma vez que ela simplifica o processo de provisionamento dos recursos, aumentando a eficiência desses tipos de redes. Já a adoção do MPLS, como mencionado no Capítulo 2, se justifica pela sua flexibilidade e capacidade de engenharia de tráfego, além da facilidade de adequação à tecnologia WDM, usando lambdas como rótulos.

Como a proposta MIRROR é essencialmente focada para redes centrais (de “backbone”), não serão discutidos aqui o comportamento de redes locais ou de estações dos usuários. No contexto deste trabalho, os termos membros do grupo, emissor e receptores, referem-se, a priori, a roteadores ou dispositivos de comutação de uma forma geral.

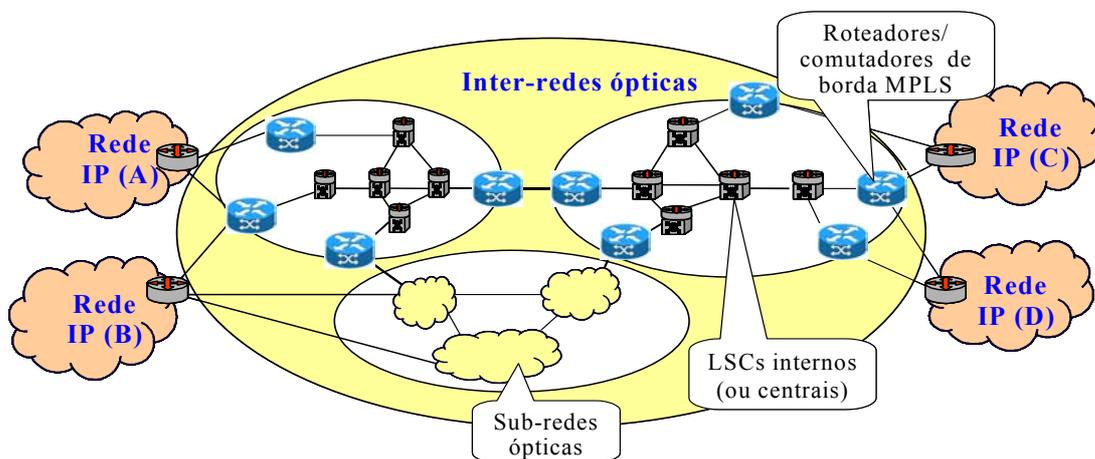


Figura 4.1 - Modelo de rede adotado para a proposta MIRROR, composto de múltiplos dispositivos de comutação ópticos (LSC), interconectados através de uma malha óptica.

¹ - Daqui em diante usar-se-á o termo MPLS de forma genérica para indicar o uso de MPLS, ou de seus aperfeiçoamentos MPλS, ou GMPLS.

Supõe-se que as inter-redes ópticas consistam de múltiplas redes ópticas, que possam ser administradas por diferentes entidades. Cada rede óptica pode ser formada por sub-redes compostas de múltiplos dispositivos de comutação óptica, aptos a realizar comutação por rótulos (“Lambda Switching Crossconnects-LSCs”) e interconectados por enlaces ópticos em uma topologia geral, chamada de malha óptica. Esses LSCs podem ser equipamentos de diferentes fabricantes e apenas alguns possuem capacidade de difusão seletiva e de conversão de comprimento de onda. Por questões de simplicidade, supõe-se também que existe um mapeamento um para um entre os controladores IP e os comutadores WDM.

A sinalização nas inter-redes ópticas é realizada fora de banda (“out of band”), existindo apenas um canal/lambda para sinalização de alta capacidade por fibra. As mensagens de sinalização são processadas eletronicamente por todos os nós inclusive os internos. Os dados não sofrem qualquer tipo de processamento nos nós intermediários, assim como nenhuma suposição precisa ser feita sobre qual a taxa de transmissão dos dados. A inteligência da rede fica concentrada essencialmente nas bordas e nenhum tipo de sincronização global é necessária.

Considera-se ainda que seja integrado o modelo de controle adotado, conforme apresentado no Capítulo 2, onde tanto o domínio óptico como o domínio IP são gerenciados de forma unificada. Para estes dois domínios existe apenas uma instância de protocolo de roteamento e um plano de controle baseado no MPLS. No caso de haver só um AS (“Autonomous System”) envolvido, será considerado um único protocolo intra-domínio. Quando diversos ASs estiverem envolvidos, um protocolo de roteamento inter-domínio também deve ser usado, ambos, claro, com as devidas extensões para tecnologias ópticas.

Nesta estrutura OBS rotulada (“LOBS-Labeled OBS”) os nós da rede são classificados em dois grupos: nós internos (ou centrais) e nós de borda. Os nós internos realizam a comutação de rajadas baseadas em rótulos e possuem funcionalidades semelhantes aos nós centrais LSR (roteadores eletrônicos comutados por rótulos) da arquitetura MPLS, os quais essencialmente realizam operações de comutação por rótulos. Apenas cada pacote de controle das rajadas pode ser considerado um “rótulo jumbo”, já que este deve conter não apenas informações de rótulos, mas também outras, como o tempo de ajuste entre o pacote de controle e a rajada de dados e o tamanho da rajada.

Os nós de borda, por sua vez, possuem as funcionalidades eletrônicas pertinentes dos roteadores IP e são os responsáveis pelo processo de montagem das rajadas, o qual pode envolver a definição de classes de equivalência (FEC) do MPLS, o empilhamento de rótulos e a agregação de LSPs (caminhos comutados por rótulos). Durante a operação de montagem das rajadas, múltiplos pacotes IP são juntados em uma única rajada e o correspondente pacote de controle é construído. Além disso, diversos LSPs podem ser aglutinados em caminhos LOBSs de maior capacidade, desde que seja respeitada a capacidade do canal.

Em relação às características de difusão seletiva, em nosso modelo de referência poderá existir apenas um emissor por grupo e as árvores multiponto geradas pelos protocolos de roteamento multiponto são apenas do tipo originadas no emissor. A identificação dos grupos será feita unicamente pela dupla $\langle S, G \rangle$, onde 'S' representa o endereço IP do emissor e 'G' o endereço IP classe D de grupo, como no EXPRESS (Holbrook et al., 1999).

4.3.Árvore de Distribuição e Roteamento Multiponto

Como ressaltado no Capítulo 3 (Seção 3.4), a difusão seletiva no contexto de IP sobre WDM, apresenta antigos problemas oriundos de questões mal resolvidas do IP Multicast, como a falta de escalabilidade, assim como possui novos desafios típicos de redes WDM, como a possibilidade de nem todos os nós internos serem aptos a realizar a difusão seletiva.

Além destas duas questões citadas no parágrafo anterior, possíveis problemas e novos paradigmas como Diffserv e MPLS, destacados na Seção 3.4.2, sugerem o emprego de estratégias alternativas na forma de manter as informações de estado relativas a um grupo multiponto. A proposta MIRROR sugere uma abordagem alternativa para solucionar tais questões, com o bônus de ser mais adequada às redes ópticas.

Ao invés de manter as informações de estado referentes aos grupos em todos os nós pertencentes à árvore multiponto, como ocorre no IP Multicast atual, propõe-se a manutenção dessas informações de estado apenas nos roteadores de borda que fazem parte da árvore multiponto dentro de cada domínio. Como nosso modelo de referência utiliza o paradigma OBS, as informações sobre a árvore multiponto passam a ser encapsuladas nos pacotes de controle (BCP) das rajadas, os quais já são processados eletronicamente em cada nó da rede. Além disso,

como a proposta também faz uso de MPLS, os BCPs passam a ser incorporados em novas mensagens dos protocolos de controle do MPLS (e.g. CR-LDP ou RSVP), as quais são enviadas durante o processo de estabelecimento dos caminhos comutados por rótulos (LSPs). A partir disso, as rajadas ópticas passam a ser comutadas por rótulos ao longo de uma árvore de distribuição pré-estabelecida, atenuando eventuais custos adicionais causados pelo esquema de encapsulamento.

Para que as informações relativas à árvore multiponto possam ser inseridas nos BCPs e os nós internos sejam capazes de recuperá-las, utiliza-se uma árvore de busca binária (“BST-Binary Search Tree”). Nesta árvore, cada nó interno tem uma entrada com um campo para sua identificação, juntamente com campos para entradas de descendentes à direita e à esquerda. Enquanto o campo de identificação do nó tem que ser único, as entradas para os descendentes podem utilizar apenas um índice da lista da árvore multiponto, de acordo com a Figura 4.2. Cada entrada também usa um bit para representar cada uma de suas interfaces por onde os dados devem ou não ser replicados. O número total de bits para este campo é igual ao número máximo (grau máximo – G_m) de interfaces por onde o tráfego pode ser ramificado, em qualquer roteador interno da rede. Desta forma, cada nó interno quando recebe a informação da árvore multiponto encapsulada no BCP, procura na árvore binária por sua identificação e verifica por que portas deve ramificar as informações.

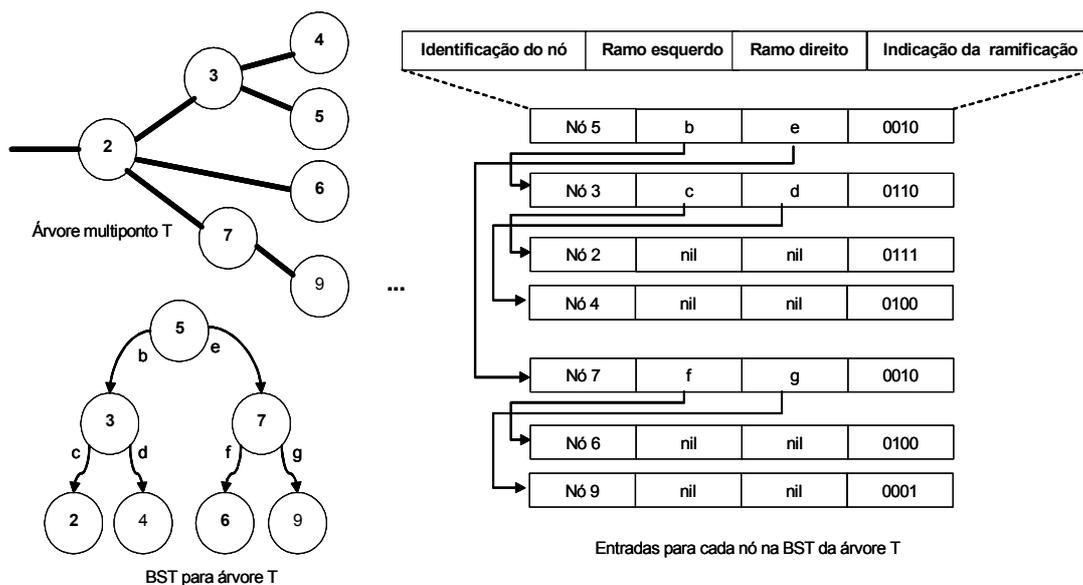


Figura 4.2 - Visão geral sobre o esquema de encapsulamento.

É pertinente observar que a opção pelo uso de BSTs se deve, entre outros motivos, ao fato destas serem uma solução tradicional de fácil implementação e possuírem um custo de busca razoavelmente baixo, proporcional a $\log_2 H$ quando balanceadas, onde H é a altura da árvore. Outros esquemas mais otimizados poderiam ser empregados, envolvendo inclusive variações de BSTs (Cormen, 2001). Contudo, este trabalho não tem o objetivo principal de investigar técnicas de otimização, deixando tal questão para possíveis trabalhos futuros.

Pelo descrito nos parágrafos anteriores, fica claro que o protocolo de roteamento adotado no IP Multicast atual, conhecido como PIM-SM, não é a melhor alternativa. Entre outros motivos, pode-se destacar o fato que no PIM-SM as árvores de distribuição multiponto são construídas a partir dos receptores para o emissor (ou para um elemento central, o RP), o que dificultaria o emprego do esquema de encapsulamento sugerido. Outro fator que desabona o uso do PIM-SM é que este não oferece nenhuma facilidade para o emprego de técnicas de engenharia de tráfego.

O mais adequado é um esquema de roteamento baseado no conhecimento da topologia da rede, da capacidade e da disponibilidade dos recursos. Tais informações podem ser armazenadas e usadas por um esquema centralizado ou por um esquema distribuído, como é o caso dos protocolos de estado de enlaces, como o MOSPF. A nossa sugestão, que inclusive está de acordo com a proposta da IETF (Rajagopalan et al., 2003), é a adoção de protocolos de estado de enlace, com as devidas adaptações e extensões ao contexto óptico, sendo que iniciativas nesse sentido já existem (Kompela et al., 2002). As referidas extensões devem incorporar os parâmetros relativos aos enlaces ópticos e também qualquer restrição que seja específica para redes ópticas como, por exemplo, as informações de quais nós são aptos a ramificar os feixes de luz e quais não o são.

No protocolo MOSPF, cada roteador que possui membros pertencentes a um determinado grupo multiponto deve comunicar tal fato para todos os outros roteadores do domínio. Esta divulgação é feita através de anúncios de informações de estado de enlace, denominadas “group-membership-LSAs”, as quais indicam quais os vértices de trânsito (i.e. o roteador propriamente dito e/ou qualquer rede de trânsito diretamente conectada) que não devem ser podados quando da construção da árvore de menor custo, chamada árvore SPT (“Shortest Path Tree”) (Moy, 1994). A necessidade de divulgar estas informações para todos os roteadores

do domínio, independente destes fazerem ou não parte da árvore, deve-se, principalmente, ao modelo de difusão seletiva adotado no IP Multicast atual, onde os grupos podem ter diversos emissores. Desta forma, qualquer roteador multiponto no domínio, quando receber pacotes de dados para transmitir para o respectivo grupo, deve estar apto a construir a árvore SPT.

Na proposta MIRROR porém, restringiu-se o modelo de difusão seletiva, adotando um esquema de canal (ver seção 4.2), onde existe apenas um emissor por grupo e o endereço IP deste é explicitamente indicado no endereço de grupo. Como já se sabe a priori quem será o emissor do grupo, elimina-se a necessidade de divulgar as informações de estado de enlace referentes aos vértices de trânsito que não devem ser podados quando da construção da árvore para todos os roteadores do domínio. A princípio, estas LSAs devem ser divulgadas apenas para os roteadores de borda que oferecem conectividade direta ou indireta com o emissor ou com o domínio deste, ou seja, aqueles roteadores de borda mais próximos do emissor e que poderão atuar como raiz da árvore multiponto no domínio. Isto é possível porque, os roteadores de borda, através do BGP, recebem e divulgam para seus pares no domínio informações de alcançabilidade oriundas de outros domínios, como por exemplo qual a melhor rota (melhor roteador de borda) para encaminhar informações para a rede onde se encontra o emissor.

Quando a transmissão é iniciada e os pacotes de dados chegam na inter-rede óptica, o roteador de borda que atuará como raiz da árvore multiponto no domínio inicia o processo de montagem da rajada, mapea a árvore multiponto, calculada através do algoritmo SPF no nível de rede, para o nível MPLS e inicia o processo de estabelecimento dos caminhos comutados por rótulos. Neste processo, a árvore SPT encapsulada é encaminhada através de mensagens dos protocolos apropriados (vide Seção 4.4) e processada eletronicamente em cada nó pertencente à árvore. Uma vez estabelecida a árvore, as próximas rajadas passam a ser comutadas por rótulos.

É possível que, em situações particulares, o tráfego para um determinado grupo chegue a roteadores de borda que não mantenham informações de estado sobre este grupo. Neste caso, estes roteadores devem solicitar informações sobre o grupo aos outros roteadores de borda do domínio.

No que diz respeito ao roteamento inter-domínios, deve-se adotar um protocolo de roteamento com suporte a difusão seletiva, tal como o BGP-4, com

as devidas extensões para tecnologia óptica. Ressalta-se que também já existe proposta da IETF nesse sentido (Xu et al., 2002).

4.3.1. Compartilhamento das Árvores multiponto

Outra característica da proposta MIRROR é a possibilidade de compartilhamento de uma árvore de distribuição multiponto por diferentes grupos ou sessões multiponto. Como ressaltado no Capítulo 3, as árvores multiponto compartilhadas, da forma como são construídas no IP Multicast padrão, não são adequadas ao contexto de redes ópticas, principalmente quando lambdas são usados como rótulos, já que lambdas não são “aglutináveis”. Além disso, essas árvores possuem complexidade razoável em virtude da necessidade de suporte aos núcleos (RPs) dessas para cada AS envolvido. Em função disso, definiu-se no modelo referência adotado na proposta (Seção 4.2) que apenas árvores de distribuição multiponto originadas no emissor seriam utilizadas.

Diferente do que possa parecer, neste esquema adotado na proposta também é possível realizar o compartilhamento das árvores de distribuição multiponto. A princípio, o único pré-requisito para tal compartilhamento é que as árvores multiponto se originem em um mesmo roteador de borda do domínio. Atendida esta prerrogativa, o compartilhamento pode ocorrer em três situações: quando ocorrer um casamento exato dos roteadores de borda que pertencem às árvores de distribuição de diferentes grupos ou sessões, como ilustrado na Figura 4.3(a); quando ocorrer um casamento quase exato dos roteadores de borda que pertencem às árvores multiponto, em que uma das árvores possui apenas um ou mais ramos em relação as outras, de tal modo que as árvores menores fiquem inclusas na maior (ver Figura 4.3(b)); ou quando ocorrer apenas um casamento mínimo dos roteadores de borda que pertencem às árvores multiponto, como mostra a Figura 4.3(c). No primeiro caso, como os nós origem e folhas (i.e. os roteadores de borda) das árvores multiponto de diferentes grupos são iguais, pode-se usar qualquer uma delas como árvore compartilhada. Na segunda hipótese, apesar dos nós folhas das árvores multiponto não serem idênticos, existe uma árvore que inclui todos os nós folhas das outras árvores e esta pode ser usada como árvore multiponto compartilhada. No terceiro caso, que nada mais é do que uma generalização das situações anteriores, os nós folhas das árvores multiponto das diferentes sessões têm apenas um "grau" mínimo de convergência e a árvore

compartilhada deve ser formada a partir da união das árvores de distribuição dos diferentes grupos ou sessões multiponto.

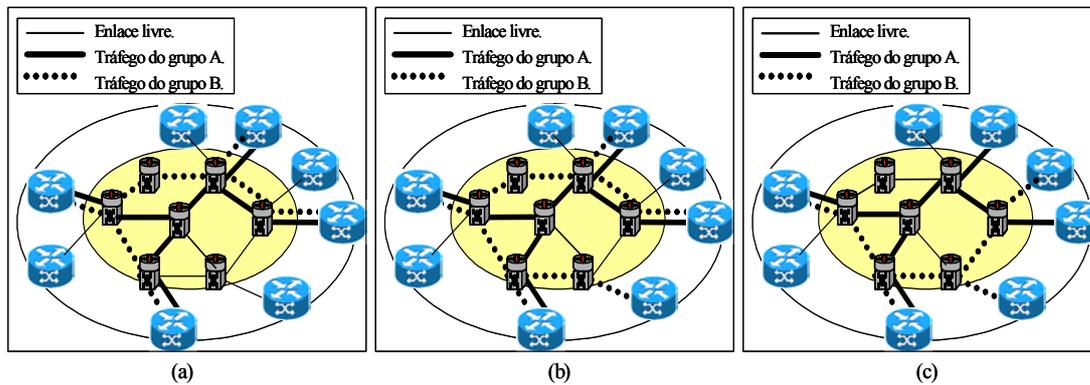


Figura 4.3 – Situações possíveis de ocorrer o compartilhamento da árvore multiponto.

Obviamente, no caso geral (terceiro), nem sempre será válido adotar uma árvore multiponto compartilhada, sendo necessário algum esquema simples e eficiente para realizar tal avaliação. Entre os possíveis parâmetros para determinar a viabilidade ou não de compartilhamento, pode-se destacar o grau de convergência entre os roteadores de borda das diferentes sessões, ou entre os nós internos, ou ainda o ganho de largura de banda. O esquema de avaliação adotado para determinar se deve haver ou não o compartilhamento é determinante na eficiência e no custo dessas árvores.

Jeong et al. (2002) propuseram um esquema de avaliação para determinar se deve haver ou não o compartilhamento de árvores originadas no emissor e sugeriram duas abordagens para a construção dessas árvores compartilhadas, uma centralizada e outra distribuída. A proposta deles permite o uso de diferentes parâmetros para determinar o compartilhamento, como por exemplo o ganho de largura de banda, e consiste em identificar entre todas as sessões multiponto oriundas de um mesmo roteador de borda, as duas que maximizam o valor do parâmetro definido previamente, no nosso caso, ganho de largura de banda. Se a junção dessas duas primeiras sessões selecionadas não resultam em um ganho de largura de banda acima de um limite mínimo previamente estabelecido, não há compartilhamento. Se esse limite for atendido, então passa-se a avaliar as sessões excluídas, uma a uma, agrupando-se às sessões já selecionadas. A cada nova sessão avaliada testa-se o novo valor do parâmetro utilizado. Caso este permaneça acima do valor limite, a sessão é agrupada com as outras. Caso contrário, ela é desconsiderada para o compartilhamento.

No contexto da proposta MIRROR, o compartilhamento de árvores multiponto é facilitado pelo emprego da comutação baseada em rótulos. Tráfegos para diferentes grupos multiponto com árvores de distribuição que atendam as exigências descritas no parágrafo anterior (ou outro esquema de avaliação qualquer), podem ser atribuídos a uma mesma FEC e encaminhados em uma mesma rajada através de uma única árvore compartilhada comutada por rótulos. Este compartilhamento possibilita, entre outras melhorias, a redução do custo com informações de controle, pois permite que os fluxos de diferentes grupos sejam enviados em um única rajada com apenas um pacote de controle (BCP) associado.

4.3.2. Engenharia de Tráfego

Como mencionado no Capítulo 3, a utilização de mecanismos baseados em engenharia de tráfego para a geração de árvores de distribuição multiponto começa a ser bastante incentivada e investigada no contexto de redes ópticas.

Caso se deseje estabelecer rotas através de critérios de custo diferentes do convencional, os protocolos de roteamento baseados em estado de enlace, adotados em nosso modelo, podem ser facilmente adequados para transportar as informações necessárias a tal abordagem, como por exemplo, informações sobre a topologia de rede ou sobre os recursos disponíveis (Osborne & Simha, 2002).

4.4. Sinalização e Controle

Uma vez definido que o modelo de inter-redes adotado neste trabalho é baseado em comutação de rajadas ópticas rotuladas (LOBS), é necessário indicar como será a interação da difusão seletiva com MPLS, no que diz respeito aos aspectos de sinalização e controle.

Os protocolos associados ao MPLS precisam ser adaptados para trabalhar com OBS, sem que percam as propriedades de engenharia de tráfego. Obviamente, os protocolos relacionados à sinalização usarão os canais de controle do OBS para trocar informações. Dentro da (sub)rede LOBS, a associação dos rótulos de entrada/saída de um LSP deve ser implementada usando a base de informação de rótulos (“LIB – Label Information Base”) do MPLS (também chamada de tabela de entradas para encaminhamento para o próximo nó). Além disso, os BCPs devem ser enviados através de novas mensagens dos protocolos de sinalização do MPLS, discutidas na Seção 4.4.3, uma vez que eles contêm a informação necessária ao ajuste dos comutadores, entre as quais destacam-se: o

tempo de ajuste, o tamanho da rajada e a árvore de distribuição multiponto encapsulada. Esta seção apresenta as opções adotadas na proposta MIRROR para algumas das principais questões relacionadas à adequação da difusão seletiva ao contexto da comutação baseada em rótulos, discutidas no Capítulo 3 (Seção 3.3).

4.4.1. Formas de Disparar o Estabelecimento de LSPs

Em relação às formas de disparar o estabelecimento de LSPs, como visto na Seção 3.3, não há consenso sobre qual a melhor alternativa no âmbito da difusão seletiva. Logo, buscou-se adotar na proposta MIRROR um esquema que seja adequado às características desta, ao mesmo tempo que atenuar as possíveis desvantagens dos métodos existentes. Entre as características da MIRROR que foram levadas em consideração para definição do esquema, destaca-se o tipo de roteamento adotado, baseado em protocolos de estado de enlace, com as devidas extensões e adaptações para redes ópticas. No MOSPF, como mencionado na Seção 4.3, as requisições de adesão dos membros do grupo geram anúncios de informações de estado de enlace “group-membership-LSAs”, que indicam quais os vértices de trânsito que não devem ser podados quando da construção da árvore SPT. Contudo, as árvores de distribuição multiponto para um determinado grupo só são construídas quando dados chegam a esses roteadores.

Teoricamente, em função do uso de um protocolo de estado de enlace, a forma de disparar o estabelecimento de LSPs que mais se adaptaria à proposta MIRROR seria a orientada por topologia, onde o estabelecimento de um LSP é feito a partir do mapeamento da árvore de roteamento da camada 3 para uma árvore na camada 2. Contudo, como visto na Seção 3.3, o mapeamento será feito mesmo se não houver tráfego, gerando um desperdício de rótulos, o que não é conveniente para o caso de lambdas. Desta forma, sugere-se que o esquema de disparo de LSPs para a proposta MIRROR seja uma combinação da abordagem orientada por topologia com a orientada pelo tráfego. Em outras palavras, propõe-se que ocorra o mapeamento da árvore de roteamento da camada 3 para uma árvore na camada MPLS. Porém, sugere-se que este mapeamento só aconteça quando o roteador de borda receber tráfego para determinado grupo. Tal procedimento minimiza os principais problemas das duas abordagens envolvidas, pois ao mesmo tempo que evita a utilização de rótulos quando não houver tráfego pelo roteador em questão, torna desnecessária a inundação dos dados pelos ramos

da árvore multiponto para o estabelecimento dos LSPs, evitando os possíveis problemas existentes na abordagem orientada pelo tráfego

Uma possível crítica a esta proposta seria que a realização da consulta à tabela de roteamento do nível 3 apenas quando chegarem dados provocaria atrasos no encaminhamento destes. Entretanto, deve-se lembrar que, em nosso modelo baseado no paradigma OBS, os pacotes que chegam não são imediatamente encaminhados, mas sim armazenados temporariamente para a construção das rajadas de dados. Ou seja, o atraso resultante do mapeamento da tabela de roteamento do nível de rede para o nível MPLS apenas depois da chegada dos dados é diluído no processo de montagem da rajada.

4.4.2. Controle Independente versus Controle Ordenado

Como discutido no Capítulo 3 (Seção 3.3.2), tanto o controle independente quanto o controle ordenado podem ser utilizados com a difusão seletiva. Na proposta MIRROR, as duas opções podem ser utilizadas, porém, o controle ordenado é preferível, uma vez que os roteadores de borda deverão ter informações suficientes para permitir o estabelecimento de LSPs de forma adequada, minimizando os possíveis bloqueios e descartes das rajadas. Entre as informações que os roteadores de borda deverão possuir, pode-se citar: qual a árvore de distribuição multiponto a ser adotada, quais os LSC aptos a ramificar os feixes de luz, quais os lambdas disponíveis e quais as capacidades ociosas em LSPs já estabelecidos, entre outras (vide Seção 2.4).

O único inconveniente na adoção do controle ordenado é que, segundo a proposta original do MPLS (vide Seção 3.3.2), a atribuição dos rótulos é feita a partir do nó egresso (de saída) da rede (“downstream”). Em outras palavras, a solicitação de rótulos percorre todos os nós do caminho a ser estabelecido, até o nó egresso, o qual inicia a efetiva atribuição de rótulos. Só depois disso os dados podem ser encaminhados. Obviamente que esta abordagem não é a melhor alternativa para redes baseadas no paradigma OBS, pois, entre outros motivos, reduziria o aproveitamento do processo de reserva do canais feito sem confirmação, o qual é uma importante virtude do OBS.

Desta forma, para a proposta MIRROR sugere-se a preferência pelo controle ordenado, porém com um esquema de atribuição de rótulos diferente do adotado no MPLS para comunicação ponto a ponto (descrito acima). Tal esquema, descrito

em detalhes na seção seguinte (Seção 4.4.3), procura otimizar as virtudes do paradigma OBS com as características do MPLS.

4.4.3. Atribuição de Rótulos

Na difusão seletiva, a princípio, a atribuição de rótulos pode ocorrer, tanto a partir dos nós de saída dos enlaces (“downstream”), nas variações sob demanda ou não solicitada, como a partir dos nós de entrada dos enlaces (“upstream”), nas formas sob demanda, não solicitada ou implícita (vide Seção 2.4). No entanto, como mencionado na seção anterior, a atribuição de rótulos a partir dos nós de saída dos enlaces, sob demanda, a qual costuma ser adotada no MPLS quando utiliza-se controle ordenado, não é a melhor alternativa para a proposta MIRROR.

Para a MIRROR sugere-se duas alternativas de atribuição de rótulos, a primeira, mais conservadora, consistindo de uma forma de atribuição de rótulos sob demanda, e a segunda, mais ousada, baseada em uma forma iniciada a partir dos nós de entrada dos enlaces, na variação não solicitada. Na primeira alternativa, o processo inicial é semelhante ao esquema convencional utilizado no MPLS, ou seja, quando um novo caminho comutado por rótulo (LSP) precisar ser estabelecido, a mensagem de atribuição de rótulos será enviada pelo roteador de borda responsável, através da árvore multiponto (pré-calculada). Contudo, sugere-se neste trabalho que o nó de entrada de cada enlace faça uso da extensão proposta no GMPLS, sugerindo um rótulo, no caso um lambda, para o nó na saída do enlace e que o nó egresso de cada enlace confirme a aceitação do rótulo sugerido, tão logo receba a mensagem. Este comportamento difere do comportamento padrão do MPLS para controle ordenado onde a solicitação sob demanda de rótulos teria que percorrer todos os nós do caminho a ser estabelecido, até o nó egresso da rede, que iniciaria a efetiva confirmação dos rótulos. Outra sugestão é que o nó de entrada dos enlaces espere pela confirmação de aceitação do rótulo apenas o tempo previamente estipulado para o envio da rajada. A princípio, este tempo é mais do que suficiente para a confirmação de aceitação ou não do rótulo. Caso a resposta não seja recebida dentro deste intervalo de tempo, por qualquer motivo, a rajada será enviada no lambda sugerido. Na opinião do autor, esta opção se mostra mais sensata do que o descarte prematuro da rajada, por um eventual atraso na confirmação de aceitação do rótulo, apesar de poder gerar um desperdício de banda caso a rajada tenha que ser descartada no nó seguinte.

A mensagem de atribuição de rótulos, nesta primeira alternativa, deverá conter, além do rótulo “sugerido”, ou seja o lambda, as informações relativas ao pacote de controle da rajada (BCP), que são, essencialmente, o tempo de ajuste, o tamanho da rajada e a árvore de distribuição multiponto encapsulada.

Na segunda alternativa, da mesma forma como na primeira, quando um novo caminho comutado por rótulo (LSP) precisar ser estabelecido, a mensagem de atribuição de rótulos será enviada pelo roteador de borda responsável, através da árvore multiponto (pré-calculada), com o rótulo “sugerido”, no caso o lambda. Nesta alternativa, porém, não há necessidade de confirmação por parte do nó de saída do enlace da aceitação do rótulo. A rajada de dados será enviada, no momento estabelecido, sem esperar por nenhum tipo de confirmação de aceitação do rótulo. A justificativa para tal comportamento é que, a princípio, os nós ao longo do caminho multiponto, através do protocolo de estado de enlaces ou mesmo de mensagens de protocolos do próprio MPLS, terão disponíveis as informações sobre quais os lambdas livres nos seus pares. Caso ocorra qualquer problema e a rajada enviada com o lambda “sugerido” não possa ser encaminhada por qualquer motivo, ela deverá ser descartada.

A mensagem de atribuição de rótulos nesta segunda alternativa conterá, a princípio, as mesmas informações da proposta anterior. Ressalta-se, contudo, que caso deseje-se considerar que os nós internos da rede não possuam informações sobre os lambdas disponíveis no seus pares e apenas os roteadores de borda contenham tais informações, as mensagens de atribuição de rótulos deverão conter todos os rótulos que serão utilizados em cada nó ao longo da árvore. Tais informações podem ser inseridas nas informações sobre a árvore multiponto que já vão encapsuladas nas mensagens de atribuição de rótulos, bastando para isso que se insira um novo campo em cada entrada da árvore de busca binária ilustrada na Figura 4.2.

4.4.4. Engenharia de Tráfego e Outras Questões

A adaptação dos mecanismos relacionados à sinalização e controle sugeridos para a proposta MIRROR ao contexto da engenharia de tráfego, a princípio, é razoavelmente simples, uma vez que os protocolos utilizados baseados no GMPLS são essencialmente baseados em extensões de engenharia de tráfego ao MPLS.

A maior diferença estaria na forma como a árvore multiponto seria calculada. Contudo, o processo de sinalização poderia ser basicamente o mesmo, com o estabelecimento dos LSPs sendo disparado como descrito na Seção 4.4.1 e o processo de atribuição de rótulos sendo baseado nos esquemas sugeridos na Seção 4.4.3. Desta forma, após a obtenção da árvore multiponto através de critérios (ou algoritmos) de engenharia de tráfego, esta seria mapeada para o nível 2 quando da chegada de tráfego aos roteadores de borda da rede MPLS e os LSPs relacionados passariam a ser estabelecidos utilizando ou o esquema flexibilizado de atribuição de rótulos a partir dos nós de saída dos enlaces, sob demanda, ou o iniciado a partir dos nós de entrada dos enlaces, na variação não solicitada.

Adicionalmente, a flexibilidade da estrutura baseada em MPLS também possibilita algum tipo de ambigüidade na especificação dos caminhos LOBS, criando perspectivas interessantes nos esquemas de roteamento de caminhos LOBS. Por exemplo, parte das rotas pode ser especificada como “liberada”, ou mesmo os nós de borda podem não especificar explicitamente todos os nós ao longo do caminho, mas apenas um subconjunto deles. Dessa forma, apenas parte do caminho LOBS seria previamente definido, deixando o restante para ser definido dinamicamente.

No que diz respeito ao campo TTL, como visto no Capítulo 3, no contexto da difusão seletiva este costuma ser usado também para limitar o escopo da comunicação. Contudo, na comutação baseada em rótulos nem sempre os LSRs internos suportam a função de decremento do campo TTL. Na proposta MIRROR, como em redes OBS de um modo geral, sugere-se a inserção do campo TTL em cada pacote de controle das rajadas. Como o BCP é processado eletronicamente em todos os nós da rede, é possível decrementar o campo em cada nó da rede e, conseqüentemente, manter as funcionalidades relacionadas a este sem a necessidade de maiores artifícios.

4.5. Proteção e Recuperação

Apesar de não estar entre os objetivos principais desta tese tratar de questões relativas a proteção e recuperação de falhas em redes baseadas em comutação óptica, algumas alternativas de solução para a proposta MIRROR serão sugeridas aqui, apenas de forma geral, visando contribuir para um melhor esclarecimento da

proposta. O detalhamento e a avaliação destas serão deixados para possíveis trabalhos futuros.

Entre os diversos esquemas de proteção e recuperação de falhas discutidos no Capítulo 2, a maioria pode ser estendida e adaptada para a proposta MIRROR. Uma alternativa interessante é manter os LSPs principais protegidos por “n” LSPs de reserva, de menor capacidade, cada um ficando responsável por uma fração do tráfego principal (e.g. $1/n$). Isso pode ser feito enviando-se as rajadas por diferentes lambdas ao longo de um único caminho de reserva, ou mesmo ao longo de diferentes caminhos de reserva. Em ambos os casos, é preciso tomar cuidado com a reordenação das rajadas no nó de saída da rede LOBS. É relevante observar que, mesmo quando o esquema de proteção 1:1 é usado, um esquema de reordenação das rajadas é necessário, já que o caminho de reserva pode ser mais curto que o primário.

O uso deste esquema de proteção oferece uma série de vantagens. Primeiro, diversas rajadas podem compartilhar um lambda, e os recursos de reserva podem ser usados de maneira mais eficiente. Segundo, como um LSP primário pode possuir mais que um LSP de reserva, o esquema de proteção irá funcionar mesmo se alguns caminhos de reserva apresentarem problemas. Terceiro, nas redes comutadas por lambdas os comutadores ao longo do caminho reserva precisam ser ajustados antes do tráfego afetado poder ser transmitido, enquanto no nosso caso o tráfego pode ser enviado através do caminhos de reserva tão logo a falha seja detectada.