

2

Inter-Redes IP Baseadas em Comutação Óptica

2.1. Introdução

Como mencionado no Capítulo 1, as propostas para integrar IP com redes puramente ópticas vêm sendo baseadas em três alternativas de comutação óptica, a comutação de lambdas, a comutação de pacotes ópticos (“OPS – Optical Packet Switching”) e a comutação de rajadas ópticas (“OBS – Optical Burst Switching”).

As abordagens baseadas em comutação de lambdas são essencialmente variações do paradigma de comutação de circuitos e, conseqüentemente, sofrem das desvantagens inerentes a este esquema, como desperdício de largura de banda e problemas de atribuição de lambdas. A comutação de pacotes ópticos (OPS), por sua vez, é o equivalente óptico da comutação eletrônica de pacotes e, em função disso, tem necessidade de armazenar os pacotes ópticos, o que ainda é um problema sem solução definitiva. Na busca por um esquema de integração mais eficaz, além da arquitetura baseada em GMPLS, a qual é uma proposta da IETF (“Internet Engineering Task Force”) para estender o plano de controle do MPLS para englobar comutação por divisão de tempo, comutação por comprimento de onda e comutação por divisão de espaço, vem ganhando força a comutação de rajadas ópticas (OBS). O paradigma OBS se caracteriza por alocar canais dinamicamente, de acordo com as necessidades das aplicações, as quais geram rajadas (conjunto de pacotes) de comprimento variável, com os nós operando assincronamente. Por outro lado, por ser uma proposta relativamente recente, ainda não está totalmente claro o impacto desse esquema de sinalização do paradigma OBS no desempenho da rede.

O objetivo principal deste capítulo é apresentar, comparar e discutir os modelos teóricos e as tecnologias nas quais deverão ser baseadas as futuras gerações de inter-redes IP. Inicialmente o capítulo apresenta os diferentes paradigmas de comutação óptica, dando ênfase à comutação de rajadas ópticas (OBS). Em seguida, relata as inovações e adaptações propostas à comutação de rótulos, especificamente à GMPLS, para adequá-lo às redes puramente ópticas.

Por fim, são analisadas as principais arquiteturas que vêm sendo propostas para oferecer soluções para redes WDM compatíveis com o mundo IP, baseadas nos paradigmas de comutação óptica.

2.2. Paradigmas de Comutação Óptica

Os comutadores SONET/SDH, FDDI, ATM e Ethernet usados nas redes atuais com enlaces de fibra óptica, nada mais são que comutadores eletrônicos com as portas de entrada e de saída ópticas (OEO). Esses comutadores recebem os dados no domínio óptico, convertem-nos para o domínio eletrônico, realizam a comutação e voltam a converter os dados para o domínio óptico antes de encaminhá-los para o próximo nó (ver Figura 2.1).

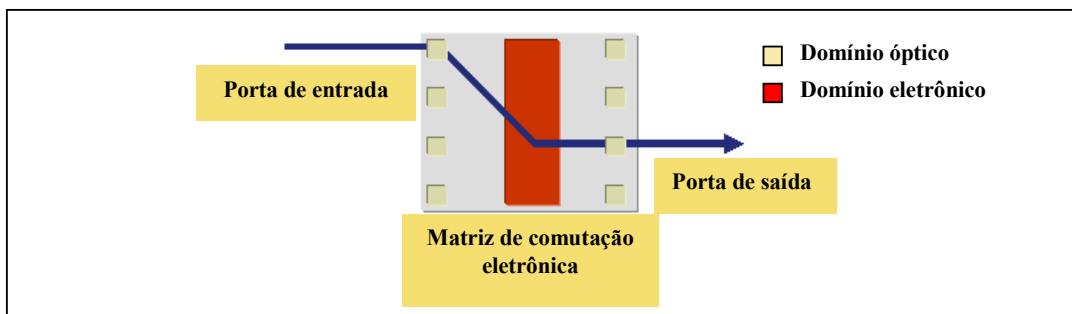


Figura 2.1 – Esquema básico de um comutador OEO (Bennett, 2002).

Na verdade esse esquema OEO não apresenta nenhuma novidade, pois faz uso de tecnologia bastante conhecida e empregada há mais de 10 anos. Essa, aliás, é uma de suas principais vantagens. Além disso, os comutadores OEO realizam a regeneração “gratuita” do sinal como parte da conversão OEO e têm facilidade para realizar a multiplexação estatística do sinal e para a manipulação “sub-lambda”. Por outro lado, os dispositivos OEO não oferecem nem transparência de taxa de bits, nem de serviços/protocolos, o que implica que tais dispositivos necessariamente devem ter embutidas as pilhas de protocolos nas quais eles serão aptos a operar. No entanto, como comentado no Capítulo 1, a limitação nas taxas máximas de comutação é o maior problema desse tipo de comutação, pois restringe a exploração da real capacidade de transmissão das fibras ópticas.

Para comutar fluxos de dados em taxas mais altas é necessário o uso de comutação puramente óptica (OOO), a qual é potencialmente mais rápida que a anterior. Os comutadores puramente ópticos, ilustrados na Figura 2.2, são dispositivos nos quais tanto as portas de entrada/saída como a matriz de comutação são ópticas.

A tecnologia mais recente empregada na construção de uma matriz de comutação óptica é denominada MEMS ("Micro Electro-Mechanical Systems") e baseia-se nos avanços em microeletrônica. Com esta tecnologia, é possível fabricar, em larga escala, fileiras uni- e bi-dimensionais de minúsculos espelhos, cujas orientações podem ser mudadas rápida e precisamente por sinais elétricos. Estes componentes podem ser utilizados para construção de comutadores ópticos com número elevado de portas, como OADMs ("Optical Add-Drop Multiplexors") e OXCs ("Optical Crossconnects") ilustrados na Figura 2.2 (Dobbelaere et al., 2002).

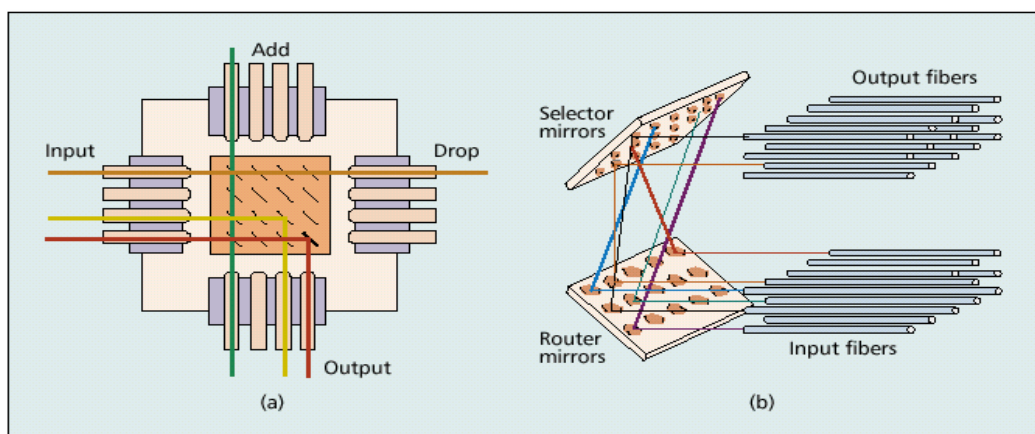


Figura 2.2 – Comutadores ópticos usando tecnologia MEMS: (a) OADM feito com tecnologia 2-D; (b) OXC feito com tecnologia 3-D.

O principal benefício desses dispositivos OOO em relação aos equipamentos OEO é a sua maior capacidade de adaptação às futuras evoluções das redes, tanto em termos de taxa de transmissão como de formato de codificação. Este maior grau de transparência dos dispositivos puramente ópticos é em decorrência de não haver necessidade desses equipamentos saberem sobre que tipo de dados eles irão realizar a comutação, uma vez que eles irão simplesmente comutar feixes de luz. Dessa forma, as redes puramente ópticas podem aceitar dados dentro de um intervalo mínimo e máximo de taxa de transmissão e em qualquer formato de protocolo dentro desses limites, permitindo as operadoras de telecomunicações oferecerem uma ampla variedade de serviços baseada apenas em uma infra-estrutura de rede.

Em contrapartida, a tecnologia de comutação óptica é ainda recente e não esta totalmente evoluída. Por exemplo, atualmente apenas uma granularidade no nível de lambda é possível na prática. Também não há possibilidade de medição de taxa de erro de bit ("Bit Error Rate" – BER), a qual costuma ser usada no

monitoramento do acordo de nível de serviço (“Service Level Agreement” - SLA), dificultando a implementação deste último. Além disso, os equipamentos OOO embora possam realizar a amplificação óptica de tráfego óptico, não fazem a regeneração 3R, que também envolve re-moldagem e re-sincronização do sinal (Abelém & Stanton, 2002a).

Outro aspecto relevante é que apesar de comutadores ópticos possuírem potencial para atender ao fluxo de tráfego advindo de uma fibra usando transmissão com WDM, como ressaltado anteriormente, sua construção ainda apresenta alguns desafios. Os principais estão relacionados às necessidades de ler e processar bits (de controle) em velocidades extremamente altas, e de armazenar “fotons”, ou durante o processamento de bits de controle, ou para fazer multiplexação estatística nas interfaces de saída, ambas facilidades úteis em comutadores de pacotes.

Atualmente, os roteadores IP mais rápidos operam em taxas de 10 Gbit/s porque esta é a taxa mais rápida que os processadores dentro dos roteadores conseguem processar as informações de controle (Green, 2001). Os comutadores ópticos estariam livres das restrições no domínio eletrônico. Porém eles precisariam estabelecer caminhos através da rede por onde o sinal óptico será transmitido, o que implica na necessidade de processar mensagens de roteamento e sinalização em velocidades extremamente altas.

O outro problema sério é o armazenamento temporário dos pacotes ópticos, por exemplo, para aguardar transmissão através de uma interface de saída em uso. Em comutadores eletrônicos, pacotes são guardados em “buffers”, implementados em memória eletrônica. No contexto óptico, a única alternativa real para armazenar um pacote ótico é retardá-lo, colocando-o num linha de retardo ou FDL (“Fibre Delay Line”) (Masetti, 1993).

As FDLs partem do princípio que a luz leva um tempo finito para percorrer um trecho de fibra óptica (aproximadamente 200.000km/s em uma fibra de sílica). Logo é possível armazenar uma unidade de dados num trecho de fibra suficientemente comprido para isso. Por exemplo, um quadro Ethernet tem em torno de 10.000 bits. Se ele for transmitido a 10 Gbit/s, serão necessários em torno de 200 m de fibra para armazená-lo. Para uma taxa de 40 Gbit/s serão necessários 50 metros de fibra.

As FDLs são análogas às memórias de retardo de linha usadas nas primeiras gerações de computadores e, conseqüentemente, sofrem dos mesmos problemas dessas. O principal deles é que uma vez que a unidade de dados foi inserida na linha de retardo, a única maneira de recuperá-la é esperar que ela percorra toda a linha. Em outras palavras, o método de acesso usado não é o randômico. As linhas de retardo podem ainda ser construídas como árvores hierárquicas com rápidos elementos de comutação 1x2 entre eles para direcionar um pacote através de um conjunto incremental de retardos. Contudo, essa técnica é complexa e cara.

No resto desta seção, serão descritos, resumidamente, os três principais paradigmas de comutação óptica: comutação de lambdas, comutação de pacotes e comutação de rajadas ópticas. Para cada um deles serão enfatizadas as características mais marcantes e a forma como eles tratam as questões discutidas nos parágrafos anteriores.

2.2.1. Comutação de Lambdas

A comutação de lambdas cria caminhos de luz, análogos a circuitos, passando por vários comutadores, e cada comutador fornece uma conexão óptica entre o lambda de entrada e o lambda de saída. Não há armazenamento de mensagens no comutador, e o controle da comutação é realizado fora de banda. A comutação de lambdas supõe uma mudança relativamente infreqüente da configuração dos caminhos de luz. A forma mais rudimentar dessa abordagem seria a comutação “manual” de lambda. A Figura 2.3 ilustra, de forma simplificada, uma rede típica baseada nessa proposta.

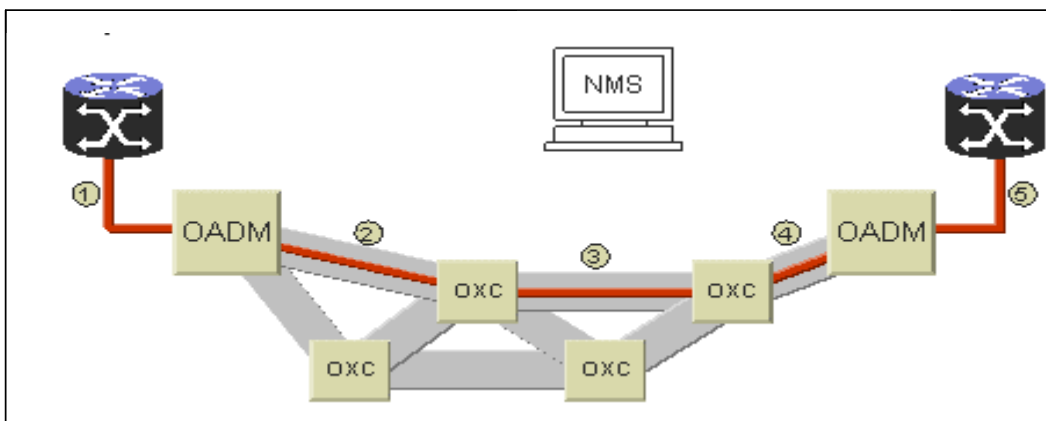


Figura 2.3- Rede óptica baseada em comutação “manual” de lambda (Bennett, 2002).

Um caminho óptico é definido, enlace por enlace, pelo operador do sistema de gerenciamento da rede (“Network Management System” - NMS). O

objetivo é estabelecer um caminho comutado por lambda entre os dois equipamentos terminais (roteadores de borda) na periferia da rede óptica. Em cada comutador (OADM ou OXC) ao longo da rota adotada, o operador do sistema deve definir o mapeamento entre o lambda de entrada e o de saída, Sucessivamente até chegar ao destino. Quando o trecho 5 for definido como saída do último comutador, o caminho estará estabelecido e os roteadores de borda podem ser ditos conectados.

Este provisionamento manual de circuitos dá ao operador o controle completo sobre os recursos da rede, mas, por outro lado, exige tempo e recursos da rede para configurar e monitorar as conexões. Além disso, os caminhos reservas também têm de ser pré-configurados. Tipicamente, o roteamento é determinado por software usado “offline” para calcular e re-otimizar os caminhos periodicamente, cabendo ao operador do sistema realizar as alterações.

De forma a eliminar definitivamente o esquema de configuração manual, os fabricantes de equipamentos e a comunidade científica em geral estão trabalhando em abordagens mais dinâmicas de comutação de lambdas baseadas no GMPLS (Mannie, 2003). Dessa forma, em uma rede GMPLS os dispositivos eletrônicos seriam conectados ao núcleo óptico via uma interface óptica usuário-rede (O-UNI) (ver Figura 2.4) e as informações de controle poderiam ser transmitidas sem uma interferência manual direta (Abelém & Stanton, 2002a).

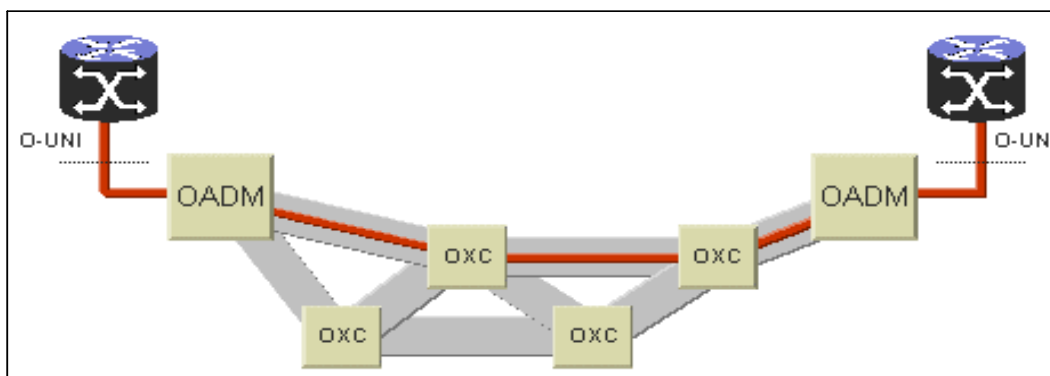


Figura 2.4 - Rede óptica baseada em comutação “dinâmica” de lambda (Bennett, 2002).

Uma vez que o caminho comutado por lambda é definido, os dispositivos ópticos de comutação não tem a necessidade de interpretar nenhum bit dentro do feixe de luz, eles apenas o comutam. Mesmo no caso da comutação dinâmica de lambdas, o plano de dados ainda é transparente e o plano de controle pode operar em velocidades mais baixas. Da mesma forma, evita-se a necessidade de armazenamento temporário, pois o caminho de luz fim a fim é usado

exclusivamente pela propagação dos feixes de luz geradas nas suas pontas, inexistindo contenção para o uso das portas de saída dos comutadores, e a conseqüente necessidade de armazenamento das informações.

2.2.2. Comutação de Pacotes Ópticos

A comutação de pacotes ópticos (“Optical Packet Switching” – OPS) nada mais é que o equivalente óptico da comutação eletrônica de pacotes. A OPS lê informações de controle transmitidas juntamente com os dados para tomar as decisões de comutação (ver Figura 2.5). Além disso, a OPS pode operar tanto no modo sem conexão, usando, por exemplo, o endereço IP de destino para realizar o encaminhamento, como no modo orientado a conexão usando os protocolos de sinalização apropriados para definir os caminhos.

Um comutador experimental, baseado no paradigma OPS, foi desenvolvido no projeto KEOPS (“Key Optical Packet Switching”) (2002), o qual consiste em um programa de pesquisa envolvendo fabricantes de equipamentos e grupos de pesquisa de diversas instituições da Europa .

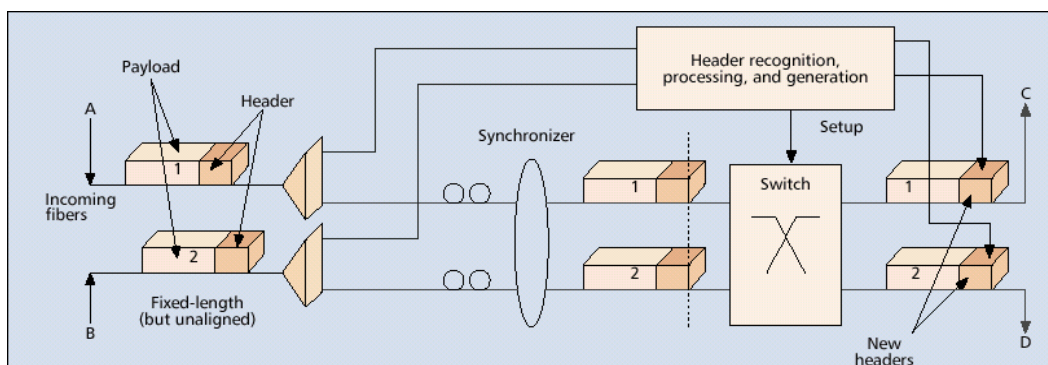


Figura 2.5 – Ilustração do funcionamento da comutação de pacotes ópticos (Qiao, 2000).

No KEOPS os nós operam sincronamente e os pacotes de tamanho fixo são colocados em fatias de tempo de duração fixa, permitindo a operação síncrona dos nós de comutação (Guilemot, 1998). Os cabeçalhos contendo as informações de controle são transmitidos em taxas mais baixas que as de dados. Para poder operar com múltiplas taxas de bits em um mesmo canal, o KEOPS usa duas técnicas (ver Figura 2.6): na primeira, usa um padrão de sincronização que permite alterar os relógios dos circuitos para uma nova taxa de bit; na segunda, utiliza “tempo de guarda” entre as fatias de tempo de tamanhos fixos.

O KEOPS utiliza um cabeçalho de 14 octetos, o que permite, supondo os rótulos MPLS de 32 bits como informação de controle, empilhar três níveis de

rótulos e ainda ficar com dois octetos para informações de controle e monitoração. A carga de tamanho de $1,35 \mu\text{s}$ é suficiente para transportar um quadro Ethernet completo à taxa de 10 Gbps.

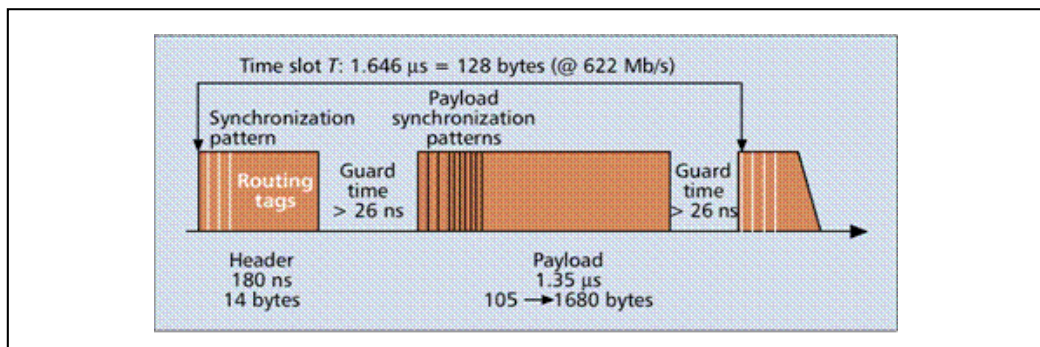


Figura 2.6 - Estrutura dos pacotes ópticos adotada no projeto KEOPS (Guilemot, 1998).

No que diz respeito ao armazenamento temporário, procura-se minimizar tais necessidades, porém, quando elas ocorrem, ou desvia-se os pacotes por linhas de retardo (FDLs), ou converte-se os pacotes para o domínio eletrônico. Em ambos os casos há ineficiência.

2.2.3. Comutação de Rajadas Ópticas

Como a comutação de lambdas é uma variação da comutação de circuitos, suas maiores desvantagens residem no alto custo (“overhead”) do processo de estabelecimento dos canais, o qual é com confirmação, e na necessidade de que os canais fiquem dedicados, uma vez que eles tenham sido estabelecidos, mesmo quando não houver tráfego através deles. Uma forma de minimizar este último problema é utilizar o canal apenas durante a transmissão dos dados, o que se assemelha ao caso das redes de pacotes que oferecem serviços de circuito virtual (por exemplo, X.25, ATM). Contudo, o processo de estabelecimento dos canais continua gerando desperdício, devido à quantidade de tempo gasta pela sinalização com confirmação de que o canal foi realmente reservado.

A comutação de rajadas ópticas (“Optical Burst Switching” – OBS) (Qiao & Yoo, 1999), diferentemente da comutação de lambdas, aloca os canais dinamicamente, de acordo com a demanda de tráfego. O processo de reserva do canal é rápido, simples e feito sem confirmação, através do envio de um pacote de controle da rajada (“BCP – Burst Control Packet”), o qual é processado eletronicamente por todos os nós intermediários e, em geral, transita fora da banda, em um canal de sinalização separado (ver Figura 2.7). A rajada de dados, a qual é mantida no domínio óptico ao longo dos nós intermediários, é enviada em

seguida ao envio do BCP sem esperar por qualquer tipo de confirmação no estabelecimento da conexão ou da reserva dos recursos. Caso o canal não tenha sido definido por qualquer motivo, a rajada será descartada. No caso do canal ter sido estabelecido com sucesso, depois da rajada ter sido completamente enviada o canal é liberado.

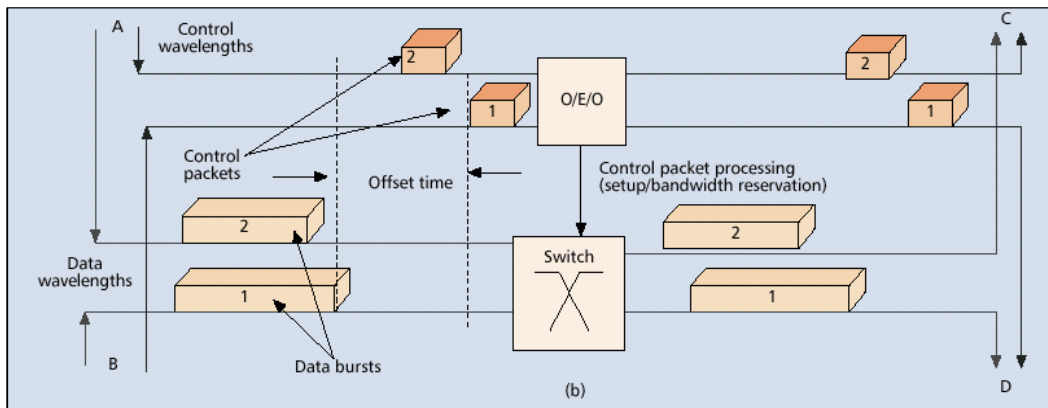


Figura 2.7- Rede óptica baseada em comutação de rajadas ópticas (Qiao, 2000).

Opcionalmente, o paradigma OBS suporta transmissões confiáveis através do processo de confirmação negativa. Neste caso, uma solicitação de retransmissão é enviada de volta sempre que uma rajada não for recebida. Contudo, sugere-se que este esquema de retransmissão só seja empregado quando OBS estiver suportando algum protocolo de aplicação diretamente, mas não quando estiver trabalhando com um protocolo na camada superior, como o TCP, que eventualmente retransmite os dados perdidos.

A sinalização no paradigma OBS, em geral, usa um lambda dedicado previamente definido em uma fibra qualquer, desde que o canal de sinalização percorra o mesmo caminho do canal de dados. Além disso, esse lambda de sinalização pode operar em velocidades mais lentas usadas por redes comerciais (e.g. Gigabit Ethernet), evitando a necessidade de leitura/processamento de bits de controle em velocidades muito altas.

No que diz respeito ao armazenamento temporário, no paradigma OBS a rajada é mantida no roteador de borda da rede OBS enquanto o canal é estabelecido, o que permite que ela seja enviada sem a necessidade de armazenamento temporário entre os nós intermediários. Além disso, como na comutação de lambdas, OBS utiliza o envio imediato (“cut-through”) ao invés do armazenamento e encaminhamento (“store and forward”) adotado na comutação

eletrônica de pacotes. Ou seja, o nó pode enviar a parte recebida antes mesmo do fim de rajada ter chegado.

Como mencionado nos parágrafos acima, o canal usado em um enlace para transmitir a rajada será liberado tão logo esta termine. Essa liberação pode ocorrer tanto automática como explicitamente. Estas diferentes forma de liberação dos recursos após a transmissão da rajadas diferenciam as principais abordagens de comutação de rajadas existentes, como será apresentado na subseção seguinte.

2.2.3.1. As Abordagens de Comutação de Rajadas

As principais variações de comutação de rajadas são: TAG (“tell-and-go”), IBT (“in-band-terminator”) e RFD (“Reserve-a-Fixed-Duration”) (Qiao, 2000). O aspecto que essencialmente as diferencia é a forma de liberação dos recursos.

No esquema TAG, a fonte de transmissão primeiramente envia um BCP em um canal de controle separado (similar como na comutação de circuito) para reservar os recursos ao longo do caminho por onde os dados serão encaminhados. Contudo, diferentemente da comutação de circuito e como mencionado na seção 2.2, os dados serão enviados sem o recebimento de nenhum tipo de confirmação. Isto implica que o tempo de ajuste (“offset time”) T^l poderá ser bem menor que no caso de comutação de circuito. Após o envio da rajada de dados, um outro sinal de controle é enviado liberando os recursos.

No caso da abordagem IBT, as informações de controle podem ser enviadas, tanto juntamente com cada rajada (na forma de um cabeçalho) como por um canal de controle separado. Cada rajada de dados contém um delimitador especial (chamado terminador) para indicar o fim da rajada. Tal característica faz com que a IBT e a comutação de pacotes sejam bastante semelhantes, principalmente no que diz respeito ao disparo da alocação e liberação dos recursos. Contudo, a IBT, como uma variação do paradigma OBS, utiliza o envio imediato (“cut-through”) ao invés do armazenamento e encaminhamento (“store-and-forward”) adotado na comutação de pacotes. Com isso, a rajada, em geral, encontrará menos retardo e, conseqüentemente, menos necessidade de armazenamento temporário em cada nó.

¹- Intervalo de tempo entre a solicitação de estabelecimento de um circuito ou caminho e o envio dos dados.

Na terceira variação da comutação de rajadas, a RFD, um pacote de controle é enviado antes por um canal separado para reservar os recursos, como na TAG. A rajada de dados é enviada em seguida, após um tempo de ajuste T . A diferença na RFD é que a reserva é feita por um tempo específico indicado no pacote de controle, o qual, como um cabeçalho de um pacote de comprimento variável, indica o comprimento (provável) da rajada. Isto implica, por outro lado, que a rajada passará a ter um tamanho máximo limitado.

2.2.3.2. Comparação entre as Abordagens de Comutação de Rajadas

Apesar das três abordagens usarem diferentes formas de disparos para liberação de recursos, uma dada rajada, independente de qual variação esteja sendo adotada, irá consumir praticamente a mesma quantidade de largura de banda em uma situação ideal (Qiao & Yoo, 2000). Todavia, a abordagem RFD vem sendo considerada a mais atraente, uma vez que ela pode tirar vantagens do uso adequado do tempo de ajuste, ao mesmo tempo que minimiza suas potenciais desvantagens de forma mais efetiva que as outras abordagens.

Uma das maiores vantagens em usar o tempo de ajuste, T , é que uma vez que os dados já são armazenados (ou retardados) no emissor, eles não precisam esperar nos nós intermediários enquanto seu correspondente pacote de controle está sendo processado. Desta forma, a priori, nenhum armazenamento temporário dos dados é necessário nos nós intermediários. As potenciais desvantagens no uso do tempo de ajuste incluem aumento da latência e desperdício de largura de banda. Ambas podem ser observadas na comutação por pacotes e na comutação por circuito, porém na comutação de rajadas, especialmente com RFD, essa relação custo versus benefício pode ser otimizada.

Observe o seguinte: na comutação de circuitos o intervalo de tempo(T) entre a solicitação de estabelecimento de um circuito e o envio dos dados será no mínimo $2P+\Delta$, onde P é o tempo de propagação fim a fim e Δ é o retardo de processamento total encontrado pela requisição de estabelecimento de circuito ao longo do caminho. Isso elimina a necessidade de armazenamento temporário pelos nós intermediários ao longo do caminho. Na comutação de rajadas, os dados podem ser enviados antes dos últimos segmentos dos caminhos estarem reservados, o que implica que $T < P+\Delta$. Ao mesmo tempo, como a solicitação do estabelecimento do canal pode ser feita antes do envio dos dados, a princípio,

também não há a necessidade de armazenamento temporário pelos nós intermediários. Obviamente que se T é estabelecido muito pequeno (e.g. $T=0$ como na variação IBT ou na TAG) pode não haver tempo hábil para a reserva de largura de banda, implicando que a rajada de dados tenha que ser descartada ou retardada.

No caso das variações TAG e IBT, estabelecer $T > 0$ pode não ser aconselhável, pois os recursos reservados serão desperdiçados até a chegada da rajada de dados. Mesmo empregando um processo de reserva antecipada para as variações TAG e IBT, a utilização da largura de banda não será melhor que no caso de $T=0$, pois, como os pacotes de controle não contêm informações sobre a duração da rajadas, os fragmentos tempo com largura de banda livre não terão como ser utilizados de forma eficiente pelas outras rajadas.

O caso da variação RFD é diferente, pois nesta os pacotes de controle possuem informações sobre a duração da rajadas. Desta forma, é possível estabelecer $T > 0$ e utilizar reservas antecipadas para maximizar a utilização dos recursos. Em outras palavras, na abordagem RFD pode-se solicitar a reserva de um canal antecipadamente, de modo que este só seja alocado próximo da chegada da rajada de dados. Ao mesmo tempo, os nós intermediários, com conhecimento sobre a duração das rajadas, têm a possibilidade de alocar o canal para outras rajadas antes do período já reservado. Maiores detalhes dessa discussão podem ser encontrados em (Abelém & Stanton, 2002a).

2.2.3.3. Um Protocolo OBS Eficiente

Apesar da comutação de rajadas ópticas poder ser baseada em qualquer uma das três abordagens descritas na subseção anterior, a RFD é a mais atraente porque, como discutido anteriormente, permite uma utilização mais eficiente dos recursos da rede, como largura de banda e FDLs. Em função disso, Qiao e Yoo (2000) propuseram um protocolo chamado JET (“Just-Enough-Time”) para redes OBS, baseado na abordagem RFD.

O JET possui duas funções principais, utilizar reservas antecipadas e poder integrar tais reservas com multiplexadores de rajadas baseados em FDLs. A idéia básica do JET é mostrada na Figura 2.8. Um emissor, tendo uma rajada de dados para transmitir, envia primeiro um BCP. Baseados nas informações transportadas pelo BCP, cada nó escolhe o λ apropriado no enlace de saída, reserva a

respectiva largura de banda e ajusta o comutador óptico. Enquanto isso, a rajada de dados espera no emissor, no domínio eletrônico, para ser enviada. Após um tempo de ajuste $T \geq \Delta$, cujo o valor será determinado a seguir, a rajada é enviada através de um sinal óptico no lambda especificado.

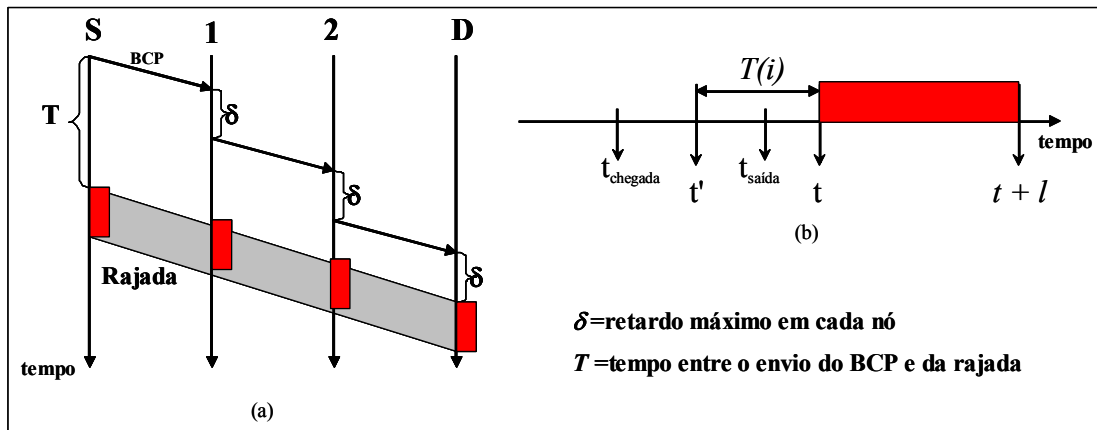


Figura 2.8– Funcionamento básico do protocolo JET.

Por simplicidade, supõe-se que seja conhecida pelo emissor a informação sobre o caminho a ser percorrido pelo pacote de controle e pela correspondente rajada de dados, através de algum plano de controle baseado em MPLS, como será visto nas próximas subseções. Na Figura 2.8(a) supõe-se que o número de saltos (nós) seja igual a 3 e que em cada nó o retardo encontrado não seja maior que δ . Logo, o retardo total, Δ , encontrado pelo BCP ao longo do caminho será no máximo $\Delta = 3\delta$. Como a rajada já é retardada no emissor, nenhuma FDL é necessária ao longo dos nós intermediários. Os recursos de cada nó (e.g. 1 e 2) são reservados a partir de t , o tempo no qual espera-se que a rajada chegará, ao invés de t' , o tempo no qual o processamento do BCP terminou.

A discussão acima implica que no protocolo JET, o BCP terá que conter não apenas o comprimento l da rajada, mas também o valor do tempo de ajuste T , sendo que inicialmente $T_{ajuste} = T$. Para lidar com o retardo de processamento variável, bem como qualquer retardo de recepção/transmissão encontrado pelo BCP em cada nó ao longo do caminho, o BCP pode receber um selo de tempo indicando o tempo de chegada $t_{chegada}$ e o tempo que ele foi escalonado para ser transmitido t_{saida} , onde $t_{chegada} < t' < t_{saida}$. Desta forma, a largura de banda será reservada a partir de $t = T_{ajuste} + t_{chegada}$ (o que implica que na Figura 2.8(b) $T(i) = T_{ajuste} - (t' - t_{chegada})$) e o BCP irá transportar um valor de atualização para o tempo de ajuste para o próximo nó, que é $T_{ajuste} - (t_{saida} - t_{chegada})$.

Caso os recursos requisitados não estejam disponíveis, a rajada é dita “bloqueada” e irá ser descartada se não puder ser armazenada temporariamente. Com o uso de reservas prévias o descarte de rajadas pode ser reduzido e, conseqüentemente, a utilização de recursos da rede pode ser melhorada, mesmo sem o uso de qualquer esquema de armazenamento temporário.

2.3. Rótulos Gerais (Generalized MPLS)

Dentro do contexto de IP sobre WDM, o MPLS e seus aperfeiçoamentos, MPLS e GMPLS, vêm sendo considerados as melhores estruturas de integração entre as duas tecnologias. Primeiro porque eles podem ser usados como poderoso instrumento para engenharia de tráfego. Segundo porque eles são facilmente adequados à tecnologia WDM quando lambdas são usados como rótulos.

Em linhas gerais, o MPLS (Magalhães & Cardozo, 2001; Rosen et al., 2001) fornece um maneira eficiente para se estabelecer conexões lógicas sobre redes baseadas em comutação de pacotes. O MPLS usa uma técnica conhecida como comutação de rótulos para encaminhar os dados através da rede, inserindo um rótulo pequeno e de tamanho fixo (32 bits) em cada pacote na entrada da rede MPLS (Figura 2.9). A partir daí, em cada nó através da rede, denominado roteador comutado por rótulos (“Label-Switched Routers - LSR”), o pacote é roteado baseado nas informações do rótulo e da interface por onde o pacote chegou e encaminhado para uma interface de saída com um novo rótulo. O caminho que os pacotes seguem através da rede é definido pela transição dos valores dos rótulos, os quais são trocados em cada LSR. Uma vez que o mapeamento entre os rótulos é constante em cada LSR, o caminho completo, chamado LSP (“Label Switched Path”), é determinado pelo valor inicial do rótulo. Um conjunto de pacotes que é rotulado com o mesmo rótulo na entrada da rede MPLS é dito ter a mesma classe de equivalência (“FEC – Forwarding Equivalence Class”). É importante mencionar que o MPLS não substitui o roteamento IP, mas trabalha conjuntamente com este último para fornecer um encaminhamento mais rápido dos pacotes através dos LSRs.

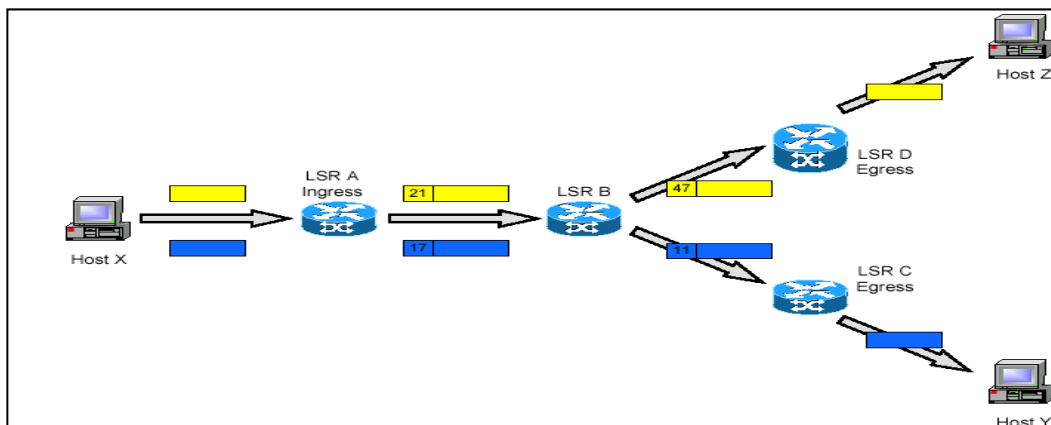


Figura 2.9 - Funcionamento básico do MPLS.

O GMPLS (Mannie, 2003) estende o plano de controle do MPLS para englobar comutação por divisão de tempo (e.g. ADMs SONET), comutação por comprimento de onda (lambdas ópticos) e comutação por divisão de espaço (e.g. porta dos comutadores). Além disso, enquanto o MPLS tradicional é unidirecional, o GMPLS suporta o estabelecimento de caminhos bidirecionais.

O GMPLS estende a arquitetura MPLS para incluir também LSRs nos quais o plano de encaminhamento não reconheça nem limites de pacotes, nem de células e, em função disso, não sejam capazes de encaminhar dados baseados em informações transportadas tanto no cabeçalho de pacotes como no de células. Especificamente, tais LSRs incluem dispositivos onde a decisão de encaminhamento é baseada em fatias de tempo, lambdas, ou portas físicas. Da mesma forma, o plano de controle do MPLS é estendido para suportar cada uma dessas cinco classes de interfaces: pacotes, células, fatias de tempo, lambdas ou portas físicas. Um caminho pode ser estabelecido apenas entre, ou através de, interfaces do mesmo tipo. Dependendo da tecnologia que está sendo usada pelas interfaces, o caminho pode ter nomes diferentes, e.g. circuito SDH, caminho óptico, ou caminho de luz. No contexto de GMPLS, todos são chamados de caminhos comutados por rótulos, LSPs.

O GMPLS é essencialmente baseado em extensões de engenharia de tráfego ao MPLS, pois muitas das tecnologias que podem ser usadas nas camadas inferiores necessitam de alguma forma de engenharia de tráfego. O GMPLS estende dois protocolos de sinalização definidos para o MPLS-TE, o RSVP-TE (Berger, 2003b) e o CR-LDP (Ashwood-Smith & Berger, 2003). As especificações do GMPLS não definem qual deles deve ser usado, deixando essa tarefa a cargo dos fabricantes e usuários. Contudo, recentemente a IETF publicou

documento sugerindo o desuso do protocolo CR-LDP em prol do RSVP-TE (Andersson & Swallow, 2002).

Além disso, para atender a ampliação de escopo para o domínio óptico e para o domínio do tempo, o GMPLS estendeu a representação do rótulo de um simples número de 32 bits para novas formas de rótulos consistindo de um conjunto de bytes de comprimento arbitrário. Essas novas formas de rótulos são referenciadas coletivamente como rótulos gerais (“generalized labels”) e contêm informações suficientes para permitir ao nó receptor programar seus dispositivos de comutação. Atualmente, os principais formatos de rótulos suportados pelo GMPLS são: o rótulo geral (“generalized label”), o rótulo comutado por ‘banda de onda’ (“waveband switching label”), o rótulo sugerido (“suggested label”) e o conjunto de rótulos (“label set”).

O rótulo geral estende o rótulo tradicional, permitindo a representação não apenas de rótulos que trafegam dentro da banda (“in-band”) associados com pacotes de dados, mas também rótulos que identificam fatias de tempo, comprimentos de onda, ou posições multiplexadas por divisões espaciais.

Os rótulos comutados por ‘banda de onda’ são um caso especial de comutação baseada em lambdas, onde um conjunto contíguo de comprimentos de onda são representados por uma banda de onda e podem ser comutados juntos para uma nova banda de onda.

Os rótulos sugeridos são usados para fornecer aos próximos nós preferências de rótulos. Enquanto o conjunto de rótulos é usado para limitar apenas ao conjunto fornecido as escolhas de rótulos do próximo nó.

O rótulo sugerido, muito mais que apenas uma nova alternativa de rótulo, foi proposto com o intuito de reduzir a latência no estabelecimento dos LSPs no GMPLS. Como os comutadores em questão (e.g. comutadores ópticos) podem ser programados rapidamente, mas podem levar um tempo relativamente grande para se configurarem de forma estável (em torno de milisegundos), a configuração antecipada destes pode proporcionar ganhos expressivos de tempo no estabelecimento dos LSPs. Desta forma, os equipamentos são configurados imediatamente após o envio da mensagem de requisição com a sugestão de rótulo para o nó de saída do enlace (“downstream”). Caso o rótulo sugerido não seja aceito, o comutador deverá ser reprogramado. Mesmo nestes casos, o custo não

será maior que o caso original, onde nenhum rótulo é sugerido e os LSRs só são programados quando recebem a mensagem de resposta com o rótulo a ser usado.

Por fim, outra funcionalidade interessante acrescentada no GMPLS é a possibilidade de estabelecer LSPs bidirecionais. Na especificação original do MPLS, conexões bidirecionais exigem o estabelecimento de dois LSPs unidirecionais independentes. Algumas melhorias foram sugeridas depois tentando automatizar este processo. Nelas propôs-se que o nó de saída da rede MPLS enviasse juntamente com a mensagem de resposta à solicitação de LSP uma nova mensagem de requisição para estabelecer o LSP em sentido contrário. Porém, dois pares de mensagens de sinalização ainda seriam necessárias.

O GMPLS propõe extensões que permitem o estabelecimento de LSPs bidirecionais utilizando apenas um par de mensagens de sinalização. Para tanto introduz um novo objeto nas mensagens de estabelecimento de LSPs, chamado rótulo de sentido contrário “upstream label” (Berger, 2003a). Este permite que o nó de entrada do enlace indique qual o rótulo que o nó de saída do enlace deve usar para enviar dados no sentido contrário. Tais rótulos são transportados nas mensagens de solicitação de LSP (e.g. PATH no RSVP). Caso o rótulo de sentido contrário indicado não seja adequado, a mensagem de requisição deve ser rejeitada e um conjunto de opções de rótulos aceitáveis deve ser incluído na mensagem de erro.

2.4. Alternativas de Integração entre IP e WDM

Diversas propostas de arquitetura para enviar tráfego IP sobre redes WDM têm sido apresentadas nos últimos anos (Bonenfant et al., 2001). Uma das primeiras alternativas é baseada em uma arquitetura com IP sobre ATM sobre SONET/SDH sobre WDM (Figura 2.10(a)). Esta arquitetura, no entanto, implica em quatro camadas de gerenciamento, cada uma com equipamentos próprios e os custos de operação e configuração associados a esses. Da mesma forma, uma arquitetura com três camadas (IP sobre SONET/SDH sobre WDM) também é possível (Fig. 2.10(b)).

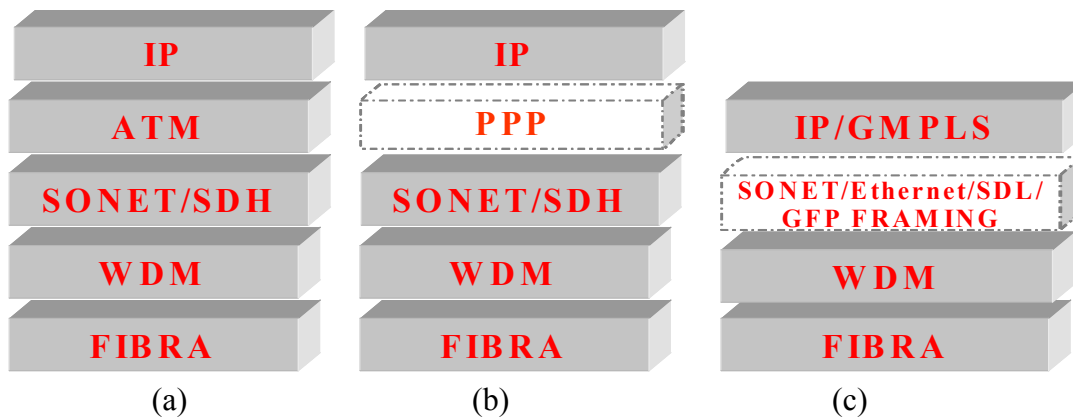


Figura 2.10 - Alternativas de Arquiteturas para as redes IP sobre WDM.

Porém, como discutido em (Abelém & Stanton, 2002a), apesar de possíveis virtudes, essas arquiteturas multicamadas trazem um aumento considerável no custo de gerenciamento, como também no oferecimento dos serviços, entre outros problemas. Em função disso, o modelo de duas camadas, IP/GMPLS diretamente sobre WDM (Figura 2.10(c)), vem sendo considerado como a arquitetura mais atraente. Os benefícios incluem maior flexibilidade, melhor escalabilidade, mais eficiência de operação e melhor capacidade para engenharia de tráfego. É interessante ressaltar no entanto, que o termo “IP diretamente sobre WDM” refere-se à interconexão dos equipamentos (i.e. conexão direta entre roteadores IP e dispositivos WDM), mas não a um mapeamento direto do protocolo IP sobre WDM. Existem várias propostas para este mapeamento e as principais, de uma forma geral, são baseadas em enquadramentos SONET/SDH ou Gigabit Ethernet ou SDL ou, mais recentemente, no procedimento de enquadramento genérico (“GFP – Generic Framing Procedure”) (ITU, 2002).

Redes ópticas podem necessitar de regeneração do sinal se as distâncias cobertas por estas forem maior ou da ordem de algumas centenas de quilômetros. Muitos dos equipamentos de regenerações atuais são projetados para trabalhar com a tecnologia SONET/SDH. Se tais equipamentos (“transponders”) forem usados nas futuras redes IP, então os datagramas IP terão que ser enquadrados em quadros SONET/SDH. A padronização do mapeamento dos datagramas IP em quadros SONET/SDH foi definida pela IETF (Malis & Simpson, 1999) usando PPP/HDLC e recentemente complementada na ANSI (2000) e no ITU-T (2000).

Outra alternativa é encapsular os pacotes IP em quadros SDL (Doshi et al., 1999). Quando comparada com a alternativa anterior, o quadro SDL utiliza um campo indicador de comprimento e CRC, ao invés de flags, para delimitar os

quadros. Tal fato faz com que os custos (“overhead”) com transmissão sejam constantes para diferentes tamanhos de “carga”, enquanto o esquema usando flags como delimitadores gera um custo variável de acordo com o tamanho da carga.

Outra abordagem baseia-se no uso de equipamentos Gigabit Ethernet para regeneração (Bonenfant et al., 2001). Esta abordagem é mais apropriada para redes municipais e metropolitanas, uma vez que o padrão Ethernet é originalmente proposto para redes locais. Contudo, tais implementações não são padronizadas, já que o padrão IEEE 802.3 (1999) define que comutadores Ethernet devem ser interconectados por fibras ópticas a distâncias de no máximo 5 Km, apesar de muitos fornecedores garantirem distâncias bem maiores, em torno de 80Km. Com o objetivo de melhor adequar alguns aspectos do padrão ao contexto de redes ópticas baseadas em WDM, ao mesmo tempo que mantém a compatibilidade com versões anteriores, vêm sendo proposto pelo IEEE o padrão 10 Gigabit Ethernet (IEEE-802.3ae, 2000), que possibilita entre outras melhorias, o uso de um esquema de bloco de codificação mais eficiente (i.e. 64B/66B) do que o padrão Gigabit atual (8B/10B) (Bonenfant et al., 2001).

Recentemente o GFP (“Generic Framing Procedure”) foi padronizado pelo ITU (2002). O GFP é um protocolo de adaptação de tráfego para transporte de aplicações em banda larga, com uma série de melhorias e otimizações em relação aos padrões anteriores. Entre as melhorias pode-se citar o suporte a estruturas de quadros de comprimentos fixos e variáveis, assim como a implementação de diferentes modos de transporte, otimizados para comutação de pacotes ou não, em um mesmo canal de transporte (Hernandez-Valencia et al., 2002).

Enquadramento Características	PPP/HDLC	SDL	ETHERNET	GFP
Custo de transmissão	Variável/médio	Fixo/baixo	Fixo/alto	Fixo/baixo
Delimitação de quadros baseada em:	Flags	Comprimento	codificação dados/controlado	Comprimento
Uso de protocolo da camada de enlace	Sim	Sim	Não	Não
Adaptável a diferentes tipos de tráfego	Não	Não	Não	Sim

Tabela 2.1 – Comparação entre os esquemas de enquadramento para IP sobre WDM

2.5. Inter-Redes IP Baseadas em Comutação Óptica

Como mencionado no Capítulo 1, existe um consenso geral da indústria, dos profissionais da área e da comunidade acadêmica que as futuras redes ópticas devem ser baseadas no protocolo IP (Jourdan et al. 2001; Jain, 2002). Além das justificativas de maior flexibilidade e inteligência na utilização de recursos da rede, destaca-se a questão que a sinalização e os mecanismos de roteamento desenvolvidos para as aplicações de engenharia de tráfego podem ser reusados nas redes ópticas. Entretanto, questões e requisitos que são específicos de redes ópticas precisam ser melhor entendidos para que se possa realizar uma correta adequação dos protocolos IP a estas.

Com o objetivo de elucidar e de padronizar as principais questões relacionadas à interação de IP com redes ópticas, grupos de trabalhos foram criados em diferentes institutos de padronização e regulamentação internacionais, mais especificamente na IETF (2002), no ITU (2002) e na OIF (“Optical Internetworking Forum”) (2002). Além de se preocupar com a especificação e padronização das interfaces entre os dois domínios, óptico e não óptico (IP), esses grupos também procuraram delinear como deveria ser a interação, a evolução dos modelos de serviços e os principais aspectos relacionados à sinalização e roteamento entre os dois domínios. Neste contexto, vem se destacando o grupo de trabalho da IETF, denominado IP sobre redes ópticas (“IP over Optical – IPO”), propondo dois modelos de serviços, ambos baseados no GMPLS (Rajagopalan et al., 2003).

É interessante ressaltar que, apesar dos modelos sugeridos pelo IPO terem sido propostos no contexto da comutação de lambdas, eles são adequados a qualquer um dos paradigmas de comutação óptica discutidos nas seções anteriores. Obviamente que os protocolos envolvidos precisam de ajustes finos para adequá-los aos diferentes paradigmas de comutação. Contudo, os modelos conceituais de serviços e as formas de interação entre os dois domínios são válidas independentemente do paradigma de comutação adotado.

Esta seção analisa os modelos de integração de IP sobre WDM, propostos pelo grupo de trabalho IPO da IETF, ressaltando questões de roteamento, sinalização e recuperação de enlaces. São apresentadas também considerações

sobre os ajustes necessários em cada um dos quesitos acima para adequá-los à comutação de pacotes ópticos (OPS) e à comutação de rajadas ópticas (OBS).

2.5.1. Modelos de Serviços

A idéia de definir modelos conceituais de serviços que estabeleçam as regras gerais de como deve ser a interação entre diferentes tipos de redes não é nova (Magalhães & Cardozo, 2001). Em geral, tal procedimento consiste em subdividir a rede em dois planos funcionais: plano de controle e plano de encaminhamento (ver Figura 2.11). O primeiro fica responsável pelas funções de controle tais como sinalização, roteamento, conversão de endereços, policiamento de tráfego, dentre outras. No segundo, o qual tem seu comportamento ditado pelo plano de controle, ficam as funções relacionadas com a propagação do tráfego propriamente dito, como encapsulamento, segmentação, remontagem e rotulação.

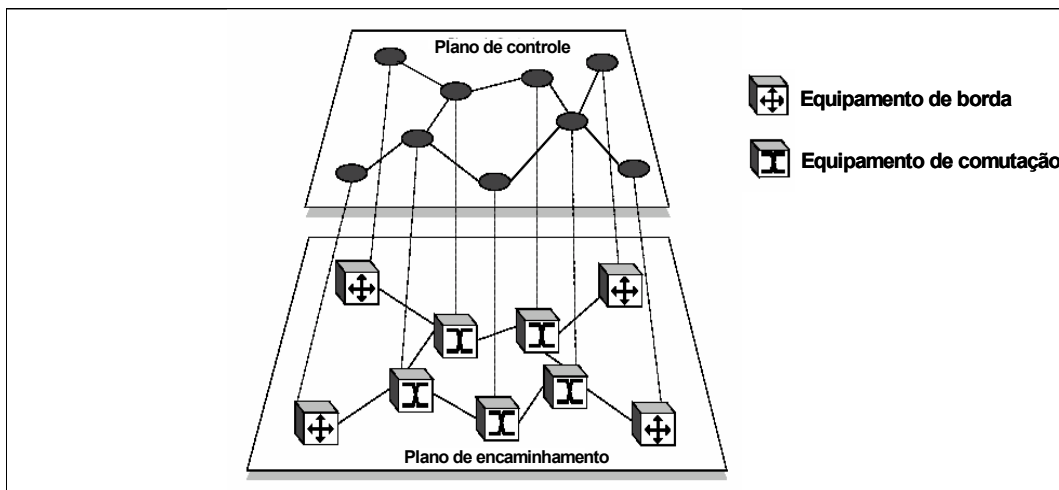


Figura 2.11 – Planos de controle e de encaminhamento (Magalhães & Cardozo, 2001).

Como mencionado na seção anterior, o grupo de trabalho de IP sobre redes ópticas da IETF, baseado na interação entre os dois domínios, óptico e não óptico (IP), vem propondo dois modelos de ofertas de serviços, com a adoção do GMPLS no plano de controle (Rajagopalan et al., 2003): o modelo cliente-servidor (por domínio) e o modelo integrado (unificado).

No modelo cliente-servidor, as rede ópticas essencialmente oferecem serviços de conectividade de alta largura de banda na forma de caminhos de luz, de acordo com as requisições dos clientes. Desta forma, sinalização padronizada pode ser usada, através da interface usuário-rede UNI (“User-Network Interface”), para solicitar serviços como criação, remoção, ou modificação de caminhos de luz, verificação de status dos caminhos de luz, entre outras. Além disso, para

permitir que os clientes registrem, cancelem registros e questionem outros clientes através dos endereços administrados pelas redes ópticas, extensões à sinalização terão que ser oferecidas de modo que caminhos de luz possam ser estabelecidos entre tais clientes. A interação dentro da inter-rede óptica também será padronizada através da interface rede-rede (“Network-Network Interface – NNI”), sendo que a interface NNI dentro do domínio pode ser diferente da interface NNI entre domínios (Rajagopalan et al., 2003). Os protocolos de roteamento dentro das redes ópticas são exclusivos destas e apenas um conjunto mínimo de mensagens são trocados entre estas e o domínio IP.

No modelo integrado, as redes IP e ópticas são tratadas como uma única rede do ponto de vista de controle, sem distinção, tanto quanto possível, entre os comutadores ópticos e os roteadores IP. O método de controle deverá ser baseado no GMPLS e não deverá haver distinções entre UNI e NNI. Neste modelo, os roteadores de borda podem realizar a criação e alteração dos caminhos comutados por rótulos dentro das redes ópticas. O protocolo de roteamento deverá ser unificado. Desta forma, os serviços das redes ópticas seriam obtidos implicitamente durante a sinalização GMPLS fim a fim.

As primeiras discussões a respeito do modelo integrado foram propostas no contexto de um único domínio administrativo (i.e. um único sistema autônomo). Todavia, o plano de controle integrado também é possível entre ASs distintos, apenas com algumas possíveis restrições de roteamento.

As virtudes e deficiências dos dois modelos discutidos acima podem ser longamente debatidas, porém a recomendação feita por Rajagopalan et al. (2003) é que definam-se mecanismos de sinalização e roteamento para dar suporte a ambos. Por exemplo, a sinalização para requisição de serviços poderia ser unificada para atender a ambos. A diferença ficaria nos protocolos de roteamento.

2.5.2. Modelos de interação entre IP e as Redes Ópticas

Como mencionado na subseção anterior, as inter-redes ópticas fornecem para as entidades externas um serviço na forma de caminhos ópticos de largura de banda fixa. Em outras palavras, pode-se dizer que o plano de dados sobre redes ópticas é realizado sobre uma topologia virtual de caminhos ópticos. Desta forma, a arquitetura IP sobre WDM é definida essencialmente pela organização do plano de controle. Como o plano de controle é baseado no GMPLS, dependendo do

modelo de serviço adotado (cliente-servidor ou integrado), a interação entre o plano de controle das redes IP e das redes ópticas poderá ser mais, ou menos estreita. Rajagopalan et al. (2003) definiram as seguintes alternativas de interação: modelo de sobreposição (“overlay”), modelo de pares (“peer”) e o modelo aumentado (“augmented”).

No modelo de sobreposição (“overlay”), o qual seria baseado no modelo conceitual cliente-servidor, o domínio IP age como um cliente do domínio óptico e as redes ópticas fornecem “conexões” para o domínio IP. O roteamento IP/MPLS, a topologia de distribuição e os protocolos de sinalização IP são independentes dos esquemas de roteamento, topologia de distribuição e sinalização na camada óptica (ver Figura 2.12). Na verdade, este modelo é conceitualmente similar ao IP sobre ATM clássico, só que aplicado diretamente sobre inter-redes ópticas. Este modelo pode ser fornecido estaticamente usando um sistema de gerenciamento de rede ou pode ser fornecido dinamicamente.

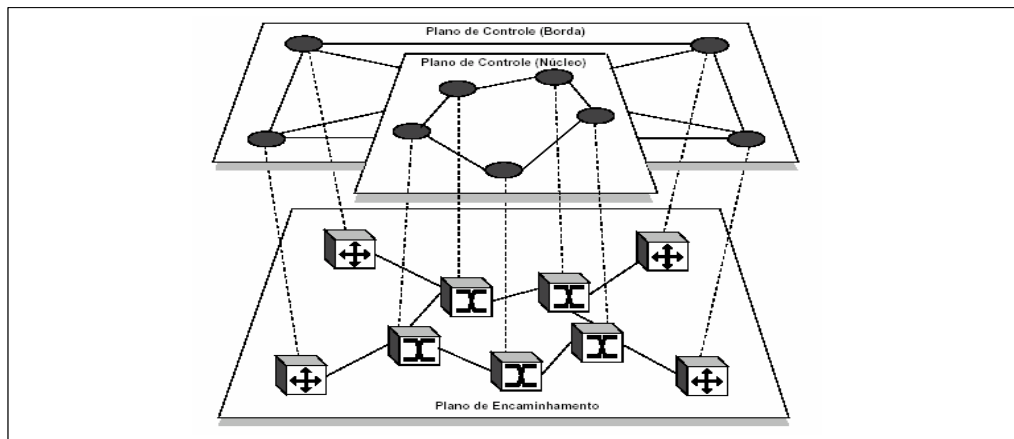


Figura 2.12 – Modelo de sobreposição (“overlay”) (Magalhães & Cardozo, 2001).

No modelo de pares (Figura 2.13), os dois domínios são integrados para serem gerenciados de forma unificada. Os roteadores IP e os comutadores ópticos agem como pares de modo que apenas uma instância de protocolo de roteamento e um plano de controle existem para os dois domínios. Quando existe apenas um domínio administrativo envolvido, um único protocolo intra-domínio (“Interior Gateway Protocol-IGP”), como OSPF ou IS-IS, com as extensões apropriadas, pode ser usado para trocar informações topológicas. Quando diversos ASs estão envolvidos, protocolos de roteamento e sinalização inter-domínio são necessários. Supõe-se, logicamente, que no modelo de pares os comutadores ópticos e os roteadores possuam um esquema de endereçamento comum (e.g. endereços IP).

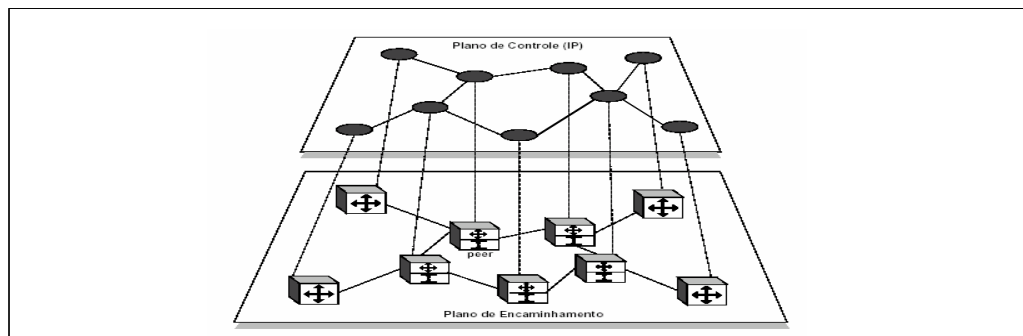


Figura 2.13 – Modelo de pares (“peer”) (Magalhães & Cardozo, 2001).

O modelo aumentado é o meio termo entre os dois modelos anteriores. Nele existem instâncias separadas de protocolos de roteamento sendo executadas nos domínios ópticos e IP. Contudo, neste caso, informações de rotas são trocadas entre as duas instâncias através de um protocolo padrão. Por exemplo, os endereços IP poderiam ser atribuídos aos dispositivos ópticos, bem como transportados pelos protocolos de roteamento óptico para permitir que informações de alcançabilidade fossem compartilhadas.

De uma forma geral, o que se pode observar a partir dos modelos de interação propostos é que o modelo de pares é a melhor alternativa para o futuro, oferecendo escalabilidade e fácil interoperabilidade. Contudo, ele atualmente ainda é inviável. Para este início de transição o modelo viável é o de sobreposição, enquanto o modelo aumentado atenderia a uma etapa intermediária, antes de ser possível implementar o modelo de pares. É interessante observar que o plano de controle do GMPLS suporta o modelo de sobreposição, o modelo de pares, assim como o modelo aumentado. Na verdade, o GMPLS é apropriado, tanto para controlar cada camada independentemente em futuro próximo como oferece uma solução elegante que facilitará o desenvolvimento de futuros modelos.

2.5.3. Roteamento

A abordagem de roteamento adotada em cada um dos modelos de interconexão anteriores deve ser diferente. No caso do modelo de pares, supõe-se que as inter-redes IP e ópticas estarão executando a mesma instância do protocolo de roteamento IP, como por exemplo o OSPF com extensões para redes ópticas. Tais extensões devem capturar os parâmetros relativos aos enlaces ópticos e qualquer restrição que seja específica para redes ópticas. As informações topológicas e sobre os estado dos enlaces mantidas por todos os nós (OXCs e roteadores) devem ser idênticas. Isto permite a um roteador computar o caminho

fim a fim até outro roteador através da rede óptica. Suponha, por exemplo, que o cálculo para esse caminho é disparado pela necessidade de se rotear um LSP. Tal LSP pode ser estabelecido usando a sinalização GMPLS (e.g. RSVP-TE ou CR-LDP). Quando o LSP é roteado através da rede óptica, um caminho de luz deve ser estabelecido entre os dois roteadores em questão. Esse caminho de luz nada mais é que um túnel através da rede óptica e pode ter capacidade muito maior que a requerida pelo LSP. Desta forma, é essencial que os roteadores informem a disponibilidade de recursos no caminho de luz em questão para outros roteadores poderem utilizá-los. O caminho de luz pode, por exemplo, ser anunciado como um enlace virtual na topologia (Kompella, 2002).

No modelo aumentado de interconexão, o roteamento dentro dos domínios ópticos e IP são separados e um protocolo padrão faz a interação entre os domínios. Este esquema é similar ao modelo de roteamento IP interdomínios. O protocolo IP de roteamento interdomínio, o BGP, pode ser adaptado para trocar informações de roteamento entre domínios IP e ópticos. Isto permitiria que roteadores anunciassem prefixos de endereços IP para inter-redes ópticas, bem como recebessem prefixos de endereços IP anunciados pelas redes ópticas. As inter-redes ópticas, por sua vez, transportariam as informações de alcançabilidade de uma rede para outra também através de um protocolo interdomínios adaptado, só que diferente do citado anteriormente.

A abordagem de roteamento para o modelo de interconexão baseado em sobreposição baseia-se em um esquema que permite que roteadores de borda registrem-se e solicitem endereços externos. Este esquema é conceitualmente similar ao mecanismo de resolução de endereços usado no caso de IP sobre ATM. Desta forma, as redes ópticas podem implementar um registro que permita que os roteadores de borda registrem endereços IP e identificadores de VPN, por exemplo. Uma solicitação bem sucedida retornaria o endereço da porta óptica de saída através da qual o destino seria alcançado.

2.5.3.1. Possíveis Adaptações no Roteamento para Redes OPS e OBS

Uma vez que há escassez ou falta de esquemas de armazenamento óptico temporário (como as FDLs), assim como de nós com capacidade de conversão de lambdas na rede, o roteamento adaptativo ou baseado em algum esquema de engenharia de tráfego é uma alternativa interessante para melhorar o desempenho

de redes OPS ou OBS. No entanto, até o momento o roteamento em redes OPS e OBS tem recebido pouca atenção. Um bom ponto de partida seria os esquemas de roteamento existentes, desenvolvidos para redes comutadas por lambdas, especialmente aquelas baseadas em controle distribuído e que utilizam apenas informação sobre lambdas em uso em cada nó para melhorar a escalabilidade (Qiao, 2000).

A infra-estrutura baseada em MPLS e seus sucessores também oferece um bom potencial para futuros trabalhos nessa área. Em particular, dado que o roteamento explícito (RE) (Rosen et al., 2001) foi desenvolvido para incrementar a engenharia de tráfego, ele pode ser usado no esquema de roteamento de redes OPS ou OBS. Na verdade, o RE pode ser usado não apenas para determinar a rota para um LSP, mas também para selecionar lambdas. Contudo, para empregar o RE em redes OPS e OBS, assim como outros protocolos de roteamento baseados em restrições, deve-se endereçar questões específicas dessas, como por exemplo a quantidade de FDL já reservada e a disponível, entre outras.

2.5.4. Sinalização & Controle

Como mencionado na seção 2.3, os protocolos de sinalização do GMPLS podem ser usados para encaminhar requisições de caminhos de luz. No caso do modelo cliente-servidor, esses protocolos podem ser adaptados para sinalização entre as UNIs. No caso do modelo integrado, o estabelecimento de caminhos de luz ocorre como parte do estabelecimento LSPs fim a fim, usando tais protocolos com as devidas extensões incorporadas.

No modelo cliente-servidor, a sinalização do plano de controle nas redes IP e nas redes ópticas é completamente separada. Essa separação também implica na separação do espaço de endereçamento IP e óptico. Apesar dos protocolos baseados em engenharia de tráfego usados no GMPLS poderem ser usados na sinalização UNI, a funcionalidade total desses protocolos não poderá ser empregada. Por exemplo, a sinalização UNI não requer a especificação de rotas explícitas. Por outro lado, baseado nos atributos dos serviços, novos objetos precisam ser sinalizados usando esses protocolos como descritos em Berger (2003a).

Dentro do modelo integrado, o endereçamento é comum para inter-redes IP e inter-redes ópticas e a respectiva sinalização também. Nestes casos a sinalização

GMPLS é implementada tanto no domínio IP como no domínio óptico, usando-se, obviamente, as extensões necessárias aos protocolos. Entretanto, a semântica dos serviços dentro das inter-redes ópticas pode ser diferente daqueles adotados nas inter-redes IP. Por exemplo, enquanto as inter-redes IP podem oferecer largura de banda de forma contínua, as inter-redes ópticas irão oferecer apenas largura de banda de forma discreta. Desta forma, os atributos de sinalização e os serviços devem ser definidos de modo independente para os domínios IP e óptico. Os roteadores na borda das inter-redes ópticas devem identificar os limites dos serviços e realizar as adaptações apropriadas nas mensagens de sinalização que irão atravessar o limite IP-óptico. Desta forma, a sinalização nos serviços integrados será multicamada. Tais camadas serão baseadas na tecnologia e na funcionalidade. Como exemplo, pode-se citar as adaptações específicas da sinalização GMPLS para a camada SONET (Mannie & Papadimitriou, 2003).

2.5.4.1. Possíveis Adaptações na Sinalização para Redes OPS e OBS

Como o GMPLS estende o plano de controle e os protocolos associados ao MPLS para trabalhar, entre outras, com redes ópticas, as adaptações necessárias para redes OPS e OBS na questão de sinalização e controle seriam pequenas. Os protocolos associados ao GMPLS é que, eventualmente, necessitariam de alguns ajustes para trabalhar com OPS e OBS.

Através do GMPLS seria possível estabelecer LSPs bidirecionais e transmitir os pacotes de controle e os dados. Os pacotes/cabeçalhos de controle teriam que conter não apenas as informações relacionadas aos dados, mas também informações relacionadas aos rótulos. No caso do OBS, tais informações de controle poderiam ser enviadas, tanto via extensão das mensagens de controle “keepalive/hello” do MPLS como através de mensagens novas a serem definidas, as quais conteriam qualquer informação pertinente necessária ao ajuste dos comutadores, bem como informações adicionais como o tempo de ajuste e o comprimento da rajada.

No GMPLS, vários atributos incluindo prioridade podem ser associados com um LSP. Explorando esses atributos (e possivelmente definindo alguns novos), novos aspectos poderiam ser adicionados ao provisionamento de LSPs. Por exemplo, a habilidade de GMPLS para suportar serviços diferenciados (Diffserv) poderia ser estendida às redes OPS e OBS, implementando a

priorização dos pacotes de controle através do campo classe de serviço. No caso do OBS, este campo poderia ser usado em conjunção com o esquema de tempo de ajuste descrito na Seção 2.2.3.3 para diferenciar os pacotes de controle e as correspondentes rajadas de dados na camada IP, bem como na camada WDM, o que permitiria a definição de uma série de serviços avançados.

2.5.5. Proteção e Recuperação

As redes de telecomunicações tradicionais baseiam seus esquemas de recuperação de falhas ou no uso de recursos reservas dedicados (e.g. esquema 1+1) ou através da recuperação dinâmica, com os recursos reservas sendo compartilhados (Ramaswami & Sivarajan, 2002). Com a introdução de IP nessas redes, tais funções de recuperação passam a poder ser fornecidas também nesta camada, principalmente porque as camadas superiores podem oferecer esquemas de recuperação mais inteligentes, enquanto as camadas inferiores proporcionam maior rapidez na proteção. Entretanto, as funções de recuperação realizadas em uma camada precisam ser bem entendidas pelas outras para que se evite ao máximo a duplicação de funções entre as camadas, o que implica na necessidade de padronização dos mecanismos de sinalização, roteamento e recuperação. A IETF, através do grupo de trabalho de IP sobre redes óticas (Rajagopalan et al. 2003), vem propondo que a proteção a ser oferecida na camada IP através de um serviço coordenado entre as camadas IP e óptica possa ser feita de duas maneiras: a primeira chamada proteção de modo segmentado (“segment-wise”) e a segunda denominada proteção em camada única (“single layer”).

Suponha que um LSP primário seja estabelecido na Figura 2.14, a partir de um roteador de entrada (A) até um roteador de saída (F), a partir de uma rede IP de entrada, passando por uma rede óptica trânsito, até uma rede IP de saída. Na primeira opção, o serviço de proteção na camada IP pode utilizar os serviços de proteção da camada óptica para o segmento do LSP que atravessa a rede óptica. Desta forma, o LSP fim a fim é tratado como a concatenação de cinco segmentos: o segmento da rede IP de entrada (A-B) o segmento da rede óptica (C-D), o segmento da rede IP de saída (E-F) e os segmentos que são limites entre os dois domínios (B-C e D-E). Na inter-rede óptica, o serviço de proteção na camada IP deverá ser mapeado para o serviço de proteção oferecido pela rede óptica.

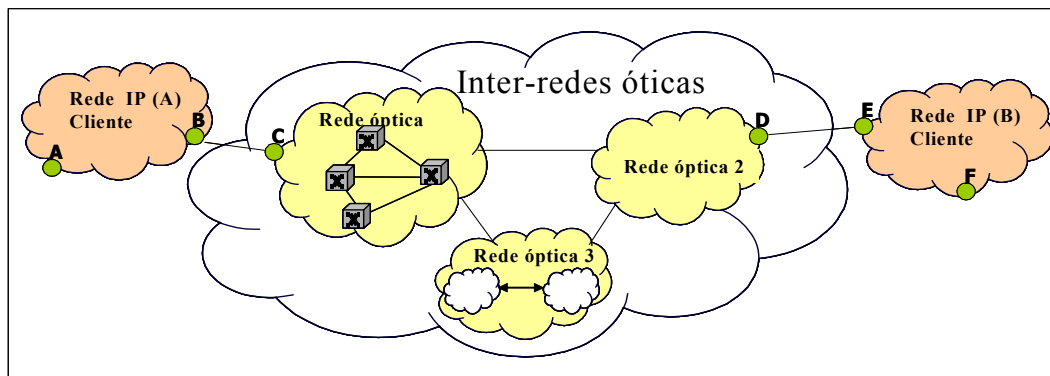


Figura 2.14 – Ilustração dos esquemas de proteção para rede IP sobre WDM.

No modelo de camada única o serviço de proteção na camada IP não se baseia em nenhum serviço de proteção oferecido pela rede óptica. Neste caso, a proteção será feita através do estabelecimento de dois LSPs fim a fim disjuntos. Os segmentos correspondentes na rede óptica são tratados como caminhos de luz independentes, os quais podem ou não ter proteção na rede óptica.

De uma maneira geral, a diferença entre as duas opções é que no primeiro caso a rede óptica é ativamente envolvida na proteção fim a fim, enquanto no segundo caso qualquer serviço de proteção oferecido pela rede óptica não é utilizado diretamente pelo cliente IP. Outra diferença é que no esquema de modo segmentado a proteção na rede óptica pode ser aplicada coletivamente para um grupo de LSPs, enquanto no esquema de camada única cada LSP deve ser protegido separadamente. Uma última diferença é que o primeiro caso permite que seja implementada diferentes esquemas de sinalização de recuperação na camada IP e na rede óptica. Já na segunda escolha a sinalização de recuperação é sempre fim a fim entre os roteadores IP, passando através da rede óptica, o que pode acarretar uma latência maior.

2.5.5.1. Possíveis Adaptações na Proteção para Redes OPS e OBS

A maioria dos esquemas para proteção e recuperação de falhas propostos para redes comutadas por lambdas (Ramaswami & Sivarajan, 2002), pode ser adaptado para redes OPS e OBS. Os caminhos de reserva podem ser dedicados e definidos previamente, ou compartilhados e solicitados sob demanda. O primeiro esquema fornece um serviço mais rápido que o segundo, porém aloca uma quantidade maior de recursos da rede. No segundo caso, só após uma falha que caminhos alternativos são procurados e os recursos reservados. Ambas as técnicas podem trabalhar com granularidade de caminhos ou enlaces. Na primeira, o

tráfego é roteado entre os nós das extremidades do caminho onde houve a falha. Já na segunda o tráfego é roteado entre os nós do enlace onde a falha ocorreu.

Deve-se observar, contudo, que em função das características desses paradigmas e do protocolo IP, as opções baseadas em recuperação dinâmica e no compartilhamento dos enlaces reservas, tendem a ser as mais promissoras do que aquelas que utilizam caminhos reservas dedicados. Além disso, os métodos que empregam recuperação local (“link-based”) também se mostram mais adequados do que aqueles que se baseiam em esquemas fim a fim (“path-based”).

Outro assunto relevante é a detecção e localização de falhas, as quais são pré-requisitos dos esquemas de proteção e recuperação mencionados acima. Nas redes SONET/SDH, o enquadramento rígido possui octetos de monitoramento reservados para essas funções. Entretanto, o perfil das redes OPS e OBS torna inadequado o uso direto dessas técnicas de monitoramento, especialmente nos canais de dados. Como solução intermediária, alguma forma de monitoramento eletrônico pode ser usada em canais de controle embutidos na própria fibra, pois estes são terminados eletronicamente em cada salto. Se o monitoramento for feito em cada nó, nenhum protocolo complexo é necessário, já que os nós iriam simplesmente detectar e localizar as falhas enquanto um esquema de sinalização simples restabeleceria o serviço. Claramente o monitoramento do canal de controle serve apenas para ruptura ou problemas de fibras, mas não para detectar problemas por canais. Atualmente, propostas para realizar monitoramento óptico por canal são baseadas na observação de parâmetros como níveis de potência dos sinais transmitidos e recebidos e a relação sinal-ruído óptica. Porém, tais propostas são de uma área relativamente nova, que demanda maiores estudos.