

Arquitetura, Topologia e Roteamento em Redes Ópticas

**Regina Melo Silveira, Stephan Kovach,
Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho e Wilson V. Ruggiero**

Laboratório de Arquitetura e Redes de Computadores
Departamento de Computação e Sistemas Digitais
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, trav. 3, nº 158, sala C1-46
Cidade Universitária - São Paulo - SP
Fone: 3091-5261
{regina, skovach, carvalho, wilson}@larc.usp.br

1. Introdução

As tecnologias de redes têm evoluído muito rápido tanto nos aspectos de capacidade de transmissão como no que diz respeito a confiabilidade, distâncias alcançadas, métodos de compartilhamento do meio e tipos de aplicações suportadas.

Todo este desenvolvimento têm tido como principais forças motoras a evolução dos meios físicos, em particular, das fibras ópticas, o aprimoramento de técnicas de transmissão, a integração crescente de recursos multimídia às aplicações e o desenvolvimento da microeletrônica. Dentro do contexto deste curso, daremos ênfase à evolução das fibras ópticas e as técnicas de transmissão neste meio físico, enfocando as arquiteturas e mecanismos de roteamento utilizados nas redes ópticas.

1.1. Visão Geral sobre o Estado da Arte de Redes Ópticas

A evolução das fibras ópticas têm tido um impacto na própria classificação das redes em locais, metropolitanas e de longa distância. Tal classificação baseia-se, tradicionalmente, em parâmetros como a área geográfica alcançada, capacidade de transmissão, atraso de transmissão e taxa de erros. O advento da fibra e sua evolução constante têm mudado o paradigma desta classificação de redes e a tornado totalmente dinâmica.

Tomando como base o que classificamos tradicionalmente de rede de longa distância, a primeira rede deste tipo que conhecemos foi a rede de telefonia, do início da década de 70, baseada na técnica de comutação de circuitos. As principais vantagens deste tipo de rede eram os baixos atraso e variação de atraso, o que a tornava ideal para transmissão de voz. Essas redes, contudo, não eram adequadas para transmissão de dados, devido à característica do tráfego de dados ser em rajada, o que tornava a utilização do meio não otimizada. Para resolver esse tipo de restrição, foram concebidas as redes de comutação de pacotes ainda na década de 70.

As redes de comutação de pacotes, também conhecidas como redes X.25, são implementadas em três camadas. A camada de rede realiza comutação e roteamento, controle de erro e fluxo fim-a-fim. A camada de enlace, por sua vez, tem como principal objetivo garantir a transmissão confiável sobre o enlace físico, implementando também controles de erro e fluxo sobre o enlace. Além disso, executa as funções de delimitação de quadro. Por último, a camada física realiza a codificação/decodificação e a função de timing. A sinalização nessas redes é realizada *in-band*, isto é, há compartilhamento da banda de transmissão entre pacotes de sinalização e dados. Devido aos atrasos não-determinísticos, as redes X.25 são adequadas só para dados.

Na década de 80, com o advento da fibra óptica, sua disseminação e conseqüente queda de custo, não fazia mais sentido empregar a tecnologia X.25, baseada na técnica de comutação de pacotes, que implementava mecanismos de controle de erro e fluxo nas camadas de rede e enlace. A fibra óptica trazia como diferencial uma maior capacidade de transmissão e baixa taxa de erros (BER (Bit Error Rate) igual a 10^{-12}).

Neste cenário, foi criada a tecnologia Frame Relay, cuja operação baseia-se na existência de dois planos: plano de controle e de usuário. No plano de controle, são exercidas as funções de sinalização *out-of-band*, isto é, não há compartilhamento de banda de transmissão entre o tráfego de sinalização e dados, utilizando-se canais separados para esses fins. Na fase de sinalização são empregadas as três camadas: rede, enlace e física, pois nesta fase é realizado o roteamento referente aos circuitos virtuais estabelecidos. No plano de usuário, por sua vez, utilizam-se somente as camadas de enlace e física. Na camada de enlace, são realizadas as funções de comutação de quadros, controle de congestionamento, detecção de erro e delimitação de quadro. Não são suportadas as funções de controle de fluxo e recuperação de erro devido à alta taxa de transmissão e confiabilidade do meio físico, baseado em fibras ópticas. Na camada física, são exercidas funções equivalentes à camada física das redes X.25. As Redes Frame Relay foram concebidas para suportar aplicações de dados, mais especificamente, para suportar a interconexão de redes locais de modo mais eficiente que as redes X.25. Posteriormente, com a utilização dos FRADs (*Frame Relay Access Devices*) passou a ser possível empregá-las para transportar também voz e vídeo.

Em seguida, tivemos o advento das redes ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). Nesse caso, foram especificados três planos: controle, usuário e gerenciamento. De modo semelhante às redes Frame Relay, no plano de controle é efetuada a sinalização *out-of-band*. Neste caso, contudo, é introduzido o conceito de metasinalização, ou seja, os canais de sinalização são alocados dinamicamente. Neste plano, são empregadas também, as três camadas de rede, enlace e física, com o roteamento dos circuitos virtuais sendo efetuado na camada de rede. No plano de usuário, as funções da camada de enlace são realizadas por duas subcamadas a ATM e AAL (*ATM Adaption Layer*). Na subcamada ATM são realizadas as funções de comutação de células e controle de congestionamento. Na camada física são implementadas as funções de detecção e correção de erro de bit de cabeçalho e de delineamento de célula.

Analisando as tecnologias de rede até aqui apresentadas, evoluiu-se da técnica de comutação de circuitos para variantes da técnica de comutação de pacotes, incluindo comutação de pacotes propriamente ditos, de quadros e, finalmente, de células. A função de comutação foi se deslocando da camada de rede para a camada de enlace. De maneira análoga, esse deslocamento de funções deu-se no caso de detecção e correção de erro antes realizadas nas camadas de rede e enlace e indo em direção à camada física nas redes ATM e, também, no caso de delimitação de quadro/célula e controle de fluxo versus controle de congestionamento. Mas, até então não se utilizavam as fibras ópticas em toda a sua potencialidade.

Nesta primeira geração de redes ópticas, a fibra óptica era usada puramente como meio de transmissão em substituição ao cabo de cobre. Todas as funções de amplificação/repetição, comutação e roteamento eram realizadas eletronicamente. A tecnologia predominante de rede física era o SDH/SONET (*Synchronous Digital Hierarchy*)/*Synchronous Optical NETwork*) e a taxa de transmissão máxima obtida atingiu 40 Gbps. Em uma segunda geração das redes ópticas, objetivando o aumento da capacidade de transmissão da fibra óptica utilizada, passou-se a ter redes totalmente ópticas, baseadas na multiplexação do comprimento de onda do sinal óptico, i.é, nas redes WDM (*Wavelength Division Muktiplexing*). Neste caso, fala-se de taxas de transmissão da ordem de dezenas de Tbps.

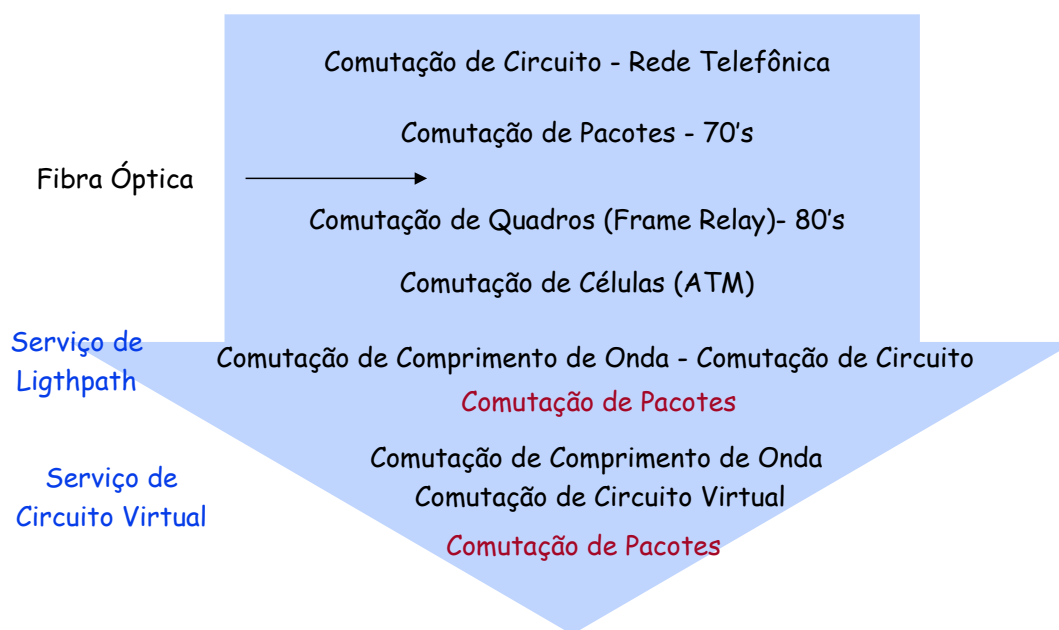


Figura 1: Evolução das Tecnologias de Redes.

As redes totalmente ópticas tiveram, também, sua evolução. Em um primeiro estágio, tinha-se o chamado “serviço de *ligthpath*”. Assim, eram criados circuitos físicos sobre a rede óptica baseada na comutação de comprimentos de onda nos diferentes comutadores que

faziam parte de cada circuito. As funções de amplificação/repetição e comutação são realizadas opticamente. Uma vez estabelecido um circuito físico, nas camadas superiores, tipicamente, na camada de rede, é realizada a comutação de pacotes. Temos, por exemplo, redes IP sobre DWDM. Em um segundo estágio, passou-se a ter o “serviço de circuito virtual”. Neste caso, não existem circuitos físicos pré-estabelecidos sobre os quais se estabeleciam circuitos virtuais em nível de pacotes. A comutação de comprimento de onda é associada à comutação de um circuito virtual que deve dar suporte à comutação de pacotes realizada na camada de rede. Neste último estágio de evolução, também o roteamento é realizado em nível óptico.

A Figura 1 ilustra como ocorreu a evolução da utilização das redes ópticas. Neste curso, temos, como objetivo, discutir as características da arquitetura mais promissora de redes ópticas dando ênfase às questões de roteamento.

1.2. Apresentação da Organização do Curso

Este curso está organizado em seis seções. Na próxima sessão, serão apresentadas as arquiteturas de redes ópticas, ressaltando-se a evolução das redes WDM/DWDM/CWDM e as arquiteturas de estágio único e de múltiplos estágios com transmissores e receptores fixos ou ajustáveis. Na sessão 3, é explicado como é realizado o roteamento por comprimento de onda, mostrando-se as possibilidades dos esquemas de roteamento com tráfego estático ou dinâmico, com controle centralizado ou distribuído e os métodos de roteamento e seleção de comprimento de onda dando ênfase, principalmente, ao algoritmo RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) dinâmico e ao roteamento *Multicast*. Prossegue-se na sessão 4, descrevendo-se como é realizada a integração entre o domínio IP e o domínio óptico e quais os protocolos e algoritmos de roteamento são empregados neste caso. Finalmente, na seção 5 serão apresentados alguns estudos de casos de redes ópticas já implantadas e em fase de planejamento dentro do escopo de Internet Avançada.

2. Arquitetura e topologia das redes ópticas

Como já foi mencionada anteriormente, a fibra óptica tem tido um papel importante no desenvolvimento das redes de transmissão de dados, e em especial, as redes de alta velocidade. Várias redes têm feito uso dela para garantir alta banda de transmissão, baixa taxa de erro e baixa latência. Dentre as tecnologias de rede que utilizam fibra óptica podemos citar FDDI, ATM, Gigabit Ethernet, SONET/SDH entre outras. Mas um ponto muito importante nesta evolução é como o sinal de luz é tratado pela tecnologia. Neste sentido, a tecnologia WDM fez avanços ao fazer multiplexação por comprimento de onda, o que permite expandir a capacidade de transmissão da fibra. Portanto, é nesta tecnologia que estamos interessados aqui e vamos explorá-la daqui para frente.

2.1 Redes WDM/DWDM/CWDM

O WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) é uma tecnologia que permite a transmissão de vários sinais ao mesmo tempo, através da utilização da fibra óptica, multiplexando sinais na entrada desta fibra e transmitindo estes sinais simultaneamente, com comprimentos de onda distintos. Na recepção, estes sinais são demultiplexados e transformados para o seu estado inicial.

Existem variações do WDM que é o DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) e o CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*). Basicamente, a diferença entre o WDM e suas variações (DWDM e CWDM) é a densidade de canais, ou seja, o espaçamento entre os comprimentos de onda que são transmitidos juntos. O resultado desta operação é o grande acréscimo da capacidade de transmissão em uma mesma fibra óptica, porém há uma característica muito importante que é a habilidade de carregar cada sinal de forma independente dos demais.

Desta maneira, com esta tecnologia, cada sinal pode ser transmitido com velocidades distintas e também com tipos de transmissão distintos, ou seja, podem ser transmitidos vários protocolos, de forma transparente na fibra. Portanto, características importantes desta tecnologia são a independência de protocolos e alta taxa de bits de transmissão. Outra característica importante é a capacidade de eliminar os regeneradores de sinais ópticos que devem ser utilizados em um enlace de fibra óptica entre 60km e 100km para cada fibra em um sistema de transmissão SDH, por exemplo. Com o WDM e DWDM, podemos utilizar um amplificador óptico que vai reamplificar todos os sinais simultaneamente sem a necessidade de demultiplexar os sinais e processá-los individualmente.

O primeiro sistema WDM foi desenvolvido no início da década de 80, utilizando dois comprimentos de onda nas faixas de 850nm e 1310nm, e era chamado de *wideband* WDM. Neste sistema, eram utilizados dois pares de fibras onde um deles era para a transmissão e o outro para a recepção. No começo da década de 90 a segunda geração WDM foi desenvolvida com a utilização de 02 a 08 canais distintos, onde estes canais tinham um espaçamento de 400Ghz na janela de 1550nm e eram chamados de *narrowband* WDM.

Na metade da última década, surgiu o WDM denso (DWDM) com a utilização de 16 a 40 canais com um espaçamento de 100 a 200Ghz. Esta tecnologia foi evoluindo para o final dos anos 90 com 64 a 160 canais espaçados em intervalos de 50 até 25Ghz. Atualmente os sistemas DWDM podem possuir até 400 canais em intervalos de até 10Ghz (0,1nm). O CWDM apareceu como uma alternativa de menor custo em relação ao DWDM onde a principal diferença é a utilização de 08 canais com um espaçamento de 20nm eles, muito diferente do espaçamento de 0,1 nm do DWDM descrito anteriormente. Desta maneira o sistema CWDM não requer lasers tão precisos quanto o DWDM, pois seus canais não estão tão próximos entre si.

Enquanto os sistemas WDM foram evoluindo em sua capacidade de transmissão de canais de forma simultânea eles também evoluíram em termos de flexibilidade de configuração com funções de manipulação de comprimentos de onda, como a retirada e o acréscimo de comprimentos de onda em uma rede, e também com capacidade de gerenciamento deste sistema.

A tecnologia WDM pode ser descrita através de cinco principais funções:

1. Formação do sinal: através de uma fonte é gerado um comprimento de onda estável e muito preciso, com um espectro muito estreito, para carregar o dado digital que entra no sistema, modulado como um sinal analógico. Exemplo: Um sinal chega ao sistema e é modulado de acordo com os padrões ITU-T para um valor dentro da janela especificada do sistema DWDM, como 1547,718nm (193,700Thz) por exemplo.
2. Multiplexação dos sinais: normalmente são utilizados multiplexadores para executar a combinação dos sinais para serem transmitidos dentro da mesma fibra.
3. Transmissão dos sinais: devem ser utilizadas fibras ópticas dentro dos padrões ITU-T para proporcionar baixas perdas nos comprimentos de onda escolhidos, bem como amplificadores ópticos ao longo do enlace para garantir que o sinal transmitido alcance o receptor. Existem efeitos de *crosstalk* e degradação dos sinais devido a perdas que devem ser calculados nesta transmissão, porém estes efeitos podem ser minimizados através do controle de variáveis como o espaçamento entre os canais e seu nível de potência. Na transmissão dos sinais podem ser utilizados componentes de gerenciamento e de manipulação dos comprimentos de onda com os *add-drops* e *cross-connects*.
4. Demultiplexação dos sinais: nesta etapa são utilizados demultiplexadores para separar os sinais transmitidos com uma perda e *crosstalk* mínimos, direcionando-os ao receptor. Aparentemente simples, esta é uma das tarefas tecnicamente mais difíceis de um sistema WDM.
5. Recepção dos sinais: os sinais separados são, enfim, recebidos por um foto detector que executa a função inversa da fonte de luz, entregando o sinal original.

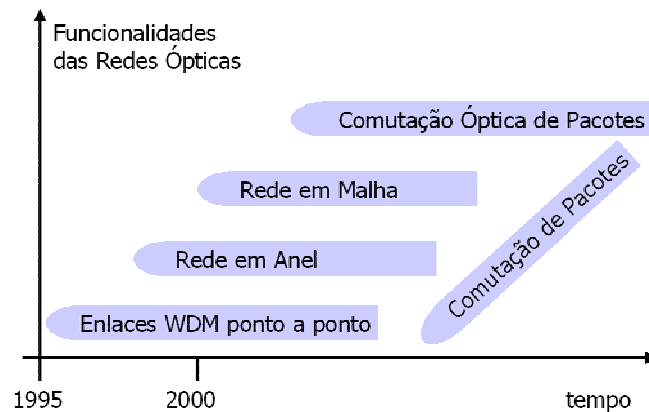


Figura 2: Evolução das topologias WDM.

Existem três classes de topologias para redes ópticas WDM: redes de broadcast e seleção, redes roteadas pelo comprimento de onda e rede ópticamente linear. A Figura 2 ilustra como estas topologias evoluíram ao longo do tempo. Vamos ver cada uma destas topologias em detalhe.

2.1.1. Redes de Broadcast e Seleção

Estas redes consistem de uma estrela dupla passiva conectando os nós da rede. Cada nó é equipado com um ou mais transmissores ópticos fixos ou ajustáveis e um ou mais receptores ópticos fixos ou sintonizáveis. Diferentes nós transmitem mensagens em diferentes comprimentos de onda simultaneamente. A estrela dupla combina mensagens de todos os nós. Um nó seleciona um comprimento de onda para receber uma mensagem desejada, sintonizando seu receptor para aquele comprimento de onda. Note que um sistema óptico em estrela dupla é equivalente a um sistema de rádio: cada transmissor emite seu sinal em um determinado comprimento de onda e os receptores são sintonizados para receber o sinal desejado. Uma estrela $N \times N$ pode ser implementada utilizando-se uma rede de interconexão multiestágio que tem $\log_2 N$ estágios de 2×2 pares com $N/2$ pares por estágio (assumindo que N é múltiplo de 2). Para que estas redes possam suportar chaveamento de pacotes, são necessários transmissores e receptores ópticos que possam ser sintonizados rapidamente. Em uma rede de chaveamento de pacotes, um nó deve ser capaz de transmitir ou receber sucessivos pacotes de ou para diferentes nós com diferentes comprimentos de onda. Podemos representar a topologia física e lógica desta rede utilizando grafos. O principal desafio deste tipo de rede é coordenar a transmissão entre vários nós. Na ausência de um mecanismo de coordenação ou de um protocolo eficiente de controle de acesso ao meio, devem ocorrer colisões quando dois ou mais nós fizerem transmissões utilizando o mesmo comprimento de onda ao mesmo tempo. Podem também ocorrer problemas de conflitos quando dois nós transmitirem ao mesmo tempo para um terceiro nó, que só possui um único receptor óptico sintonizável. Além disso, o destinatário

deve saber quando e qual comprimento de onda sintonizar para receber uma mensagem. Muitos protocolos de acesso têm sido propostos para prevenir as colisões e conflitos em redes do tipo Broadcast e seleção de um único salto, assumindo a disponibilidade de transmissores e receptores sintonizáveis.

Para uma topologia de rede em broadcast e seleção com múltiplos saltos, é necessário evitar que todos os nós precisem sintonizar rapidamente. Neste caso, cada nó tem um pequeno número de transmissores e receptores ópticos fixos, cada um para um comprimento de onda diferente. Uma vantagem deste tipo de rede é sua capacidade de fazer *multicast*. No entanto existem várias limitações:

- esta topologia requer um grande número de comprimentos de onda, tipicamente o mesmo número de nós existentes na rede, pois não há como reutilizar comprimentos de onda.
- Devido ao *broadcast* do sinal transmitido, este sinal não apresenta potencia suficiente para percorrer grandes distâncias e o sinal tende a sofrer perdas com o aumento dos nós intermediários pelo qual passa.

Por estas razões, o uso das redes de *broadcast* e seleção é limitado a redes locais de alta velocidade ou redes metropolitanas.

2.1.2. Redes com Topologias Arbitrarias

Criar uma topologia que permite que a rede WDM trabalhe com roteamento por comprimento de onda evita três problemas: a impossibilidade de reutilização de comprimentos de onda, a perda de potencia devido à divisão do sinal e escalabilidade para redes de longa distância. A rede roteada pelo comprimento de onda consiste de nós roteadores (WXC – *Wavelength selective crossconnect*) interconectados por fibra óptica em uma topologia arbitrária. Cada nó final (*end user*) é conectado a um WXC através de um enlace de fibra óptica. Cada nó é equipado com um conjunto de transmissores e receptores, onde ambos podem ser sintonizáveis. A Figura 3 ilustra uma rede (de três nós), onde não é utilizado *crossconnect* e outro esquema onde é utilizado *crossconnect*, permitindo conversão de comprimento de onda e, conseqüente, reutilização de comprimentos de onda.

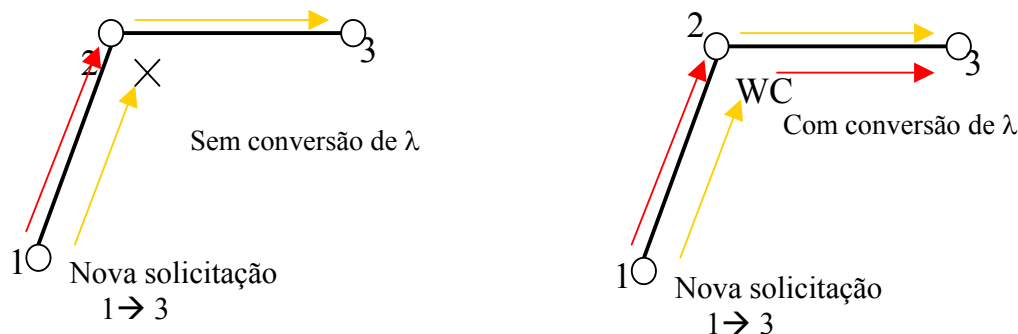


Figura 3: Esquema sem e com utilização de *crossconnect*.

Em uma rede roteada por comprimento de onda, a mensagem é enviada de um nó para outro utilizando uma rota de comprimento de onda contínuo denominado “*lightpath*”, sem precisar para isso de nenhum mecanismo de conversão óptico-eletrônico-óptico e “*buffers*” intermediários. Este processo é conhecido por roteamento por comprimento de onda. Nos nós intermediários, teremos WXCs, e nos nós finais, o sinal será captado por um receptor sintonizado para o comprimento de onda de operação naquele “*lightpath*”. Para que seja efetuado um roteamento por comprimento de onda é necessário estabelecer os “*lightpaths*” e, para isso, é necessário fazer a alocação de comprimentos de onda. Portanto, dois “*lightpaths*” não podem utilizar um mesmo comprimento de onda em um mesmo caminho físico. No entanto, dois “*lightpaths*” podem usar o mesmo comprimento de onda se estes não forem utilizados em enlaces coincidentes durante a rota. Esta propriedade é conhecida como reutilização de comprimentos de onda e permite que a rede roteada por comprimento de onda tenha maior escalabilidade do que as redes por broadcast e seleção. Dada uma rede WDM, o problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda para os “*lightpaths*” é de muita relevância para um bom desempenho desta rede. O algoritmo que desempenha esta tarefa deve ser bastante inteligente para garantir que isto seja feito, utilizando-se a menor quantidade possível de comprimentos de onda e otimizando-se sua operação. As redes ópticas trabalham atualmente com 4 ou 32 comprimentos de onda, mas já existem estudos para redes que utilizam até 100 comprimentos de onda em seu roteamento.

2.1.3. Redes Ópticamente Lineares

As redes chamadas de ópticamente lineares permitem multiplexar os comprimentos de onda em dois níveis. Uma parte do espectro óptico pode ser utilizada, não apenas pela divisão dos comprimentos de onda, mas por faixas de comprimento de onda. Cada faixa de comprimento de onda é constituída de um conjunto de comprimentos de onda, como mostra a figura 4. É necessário deixar um espaçamento entre uma faixa de comprimento de onda e outra para evitar problemas da imprecisão na sintonia dos lasers de transmissão e, ao mesmo tempo, para garantir que os receptores consigam separar comprimentos de onda

adjacentes. Nestas redes, várias faixas de comprimento de onda são multiplexadas na mesma fibra e vários comprimentos de onda são multiplexados na mesma faixa de comprimento de onda.

Nas redes opticamente lineares, os multiplexadores, chaveadores e demultiplexadores trabalham com faixas de comprimento de onda e não com comprimento de onda. Isto faz com que tais redes sejam bem mais simples e de menor custo, já que o número de chaveadores ópticos necessários em cada nó deve ser igual ao número de faixas de comprimento de onda. Sendo assim, nesta implementação os nós intermediários só operam com as faixas de comprimentos de onda, cabendo ao nó final (o receptor óptico) fazer a separação dos comprimentos de onda.

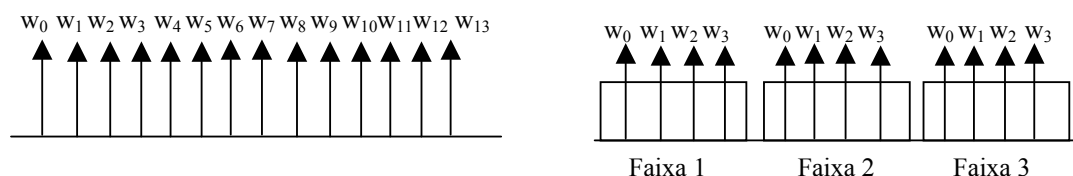


Figura 4: Divisão por comprimento de onda e por faixas de comprimentos de onda.

As mesmas questões referentes a continuidade e alocação de comprimentos de onda apontados na rede roteada por comprimento de onda aplicam-se as redes opticamente lineares. No entanto, duas condições são específicas deste tipo de implementação: inseparabilidade e combinação de fontes distintas. A violação da inseparabilidade pode ocorrer quando canais provenientes da mesma faixa de comprimento de onda têm destinos distintos. Ao dividir o sinal para que ele chegue em destinos diferentes, além da perda da potência do sinal, este procedimento gera resíduos indesejáveis na fibra. A condição da combinação de fontes distintas é violada quando um sinal é dividido em um nó da rede, e devido à rota traçada, é necessário reagrupá-lo em outro nó subsequente, o que causaria seria degradação do sinal. É possível implementar algoritmos que evitem estas duas violações permitindo que esta rede opere satisfatoriamente.

2.1.4. Redes em Anel

As redes WDM em anel têm inúmeras vantagens sobre as redes em malha, tal como fácil planejamento e gerenciamento, simplicidade no mecanismo de controle, rápida restauração das falhas e baixo custo. Estas redes são bastante atrativas para implementação de redes metropolitanas de pequena área geográfica, que podem ser construídas com WADM (*Wavelength Add/Drop Multiplexer*) que são mais baratos que os WXCs. Além disso, estas redes são mais baratas por não necessitarem de repetidores ou amplificadores.

As redes WDM em anel, similarmente às redes SONET, podem ser classificadas em: anel com duas fibras unidirecionais (UR-2); anel com duas fibras bidirecionais (BR-2); e anel com quatro fibras bidirecionais. Na implementação UR-2, existem dois anéis unidirecionais que operam em direções opostas. Um dos anéis trabalha durante a operação normal e o

outro é usado para serviços de proteção contra falhas. Nas redes BR-2, os dois anéis são utilizados para o transporte do tráfego normal, porém eles só utilizam metade dos comprimentos de onda existentes, os demais comprimentos de onda são utilizados para situações de recuperação e proteção. Nas redes BR-4, um par de anéis é utilizado para o tráfego normal, enquanto o outro par é utilizado para proteção à falhas.

As redes em anel normalmente são multifibras, utilizando um número de fibras múltiplo de dois. Em anéis multifibras, os WXC's devem ser usados ao invés dos WADM para garantir flexibilidade no chaveamento dos comprimentos de onda. Outra topologia bastante comum em *backbones* é aquela que emprega anéis interconectados. Neste esquema, são utilizados WADM nos nós internos dos anéis e WXC's como pontes de conexão entre os anéis.

Os anéis WDM são utilizados para satisfazer demandas de tráfegos estáticos. Neste esquema, o objetivo é minimizar o número de comprimentos de onda utilizados ou o número de fibras utilizadas quando o número de comprimentos de onda é fixo. Em algumas implementações, onde atender o máximo da demanda de tráfego é importante, o anel pode suportar tráfego dinâmico ao se utilizar WADMs configuráveis.

É fácil observar que a questão de alocação de comprimentos de onda é muito mais relevante nesta topologia do que o problema da definição da rota mais adequada. A escolha da rota recai sobre a escolha entre dois nós, o que normalmente não ocorre nas redes em malha. No caso das redes unidirecionais, só existirá uma rota entre dois nós. Já no caso das redes bidirecionais, o caminho mais curto deve prevalecer. Nas redes multifibras tanto a escolha do comprimento de onda como da rota tornam-se relevantes, porque o mesmo comprimento de onda pode estar disponível em mais de uma fibra, mas a rota pode ser otimizada em uma ou outra opção, e isto deve ser avaliado dinamicamente.

3. Roteamento por Comprimento de onda em WDM/ DWDM /CWDM

A rede WDM pode ser descrita, como muitas outras, através de um modelo de três camadas: a camada do meio físico, a camada óptica, e a camada cliente, como ilustra a Figura 5. Cliente aqui é considerado qualquer tecnologia que possa utilizar-se do WDM como a tecnologia de transmissão. O conjunto de "*lightpaths*" constitui a camada óptica (topologia virtual). A camada óptica fornece independência ao cliente ou transparência do protocolo no serviço de chaveamento de circuito para uma variedade de clientes que constituem a camada cliente.

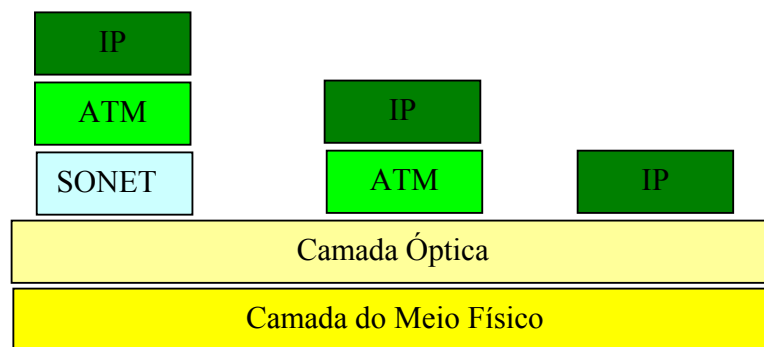


Figura 5: Arquitetura de Camadas da Tecnologia WDM.

Uma das principais tarefas da camada de adaptação óptica é providenciar canais de comprimento de onda para protocolos da camada superior. Requisições de “*lightpaths*” são geralmente geradas por vários protocolos/aplicações de camadas superiores. A camada de adaptação manipula estas requisições definindo as rotas e reservando os comprimentos de onda através de redes WDM, e configurando apropriadamente os estados de todos os dispositivos ópticos configuráveis envolvidos. Neste sentido, o algoritmo de roteamento e alocação de comprimentos de onda é extremamente relevante para o bom desempenho das redes WDM.

O algoritmo RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) é necessário para gerenciar eficientemente os recursos da rede WDM, mas explicitamente os enlaces, os comprimentos de onda e a capacidade de chaveamento do nó, de tal forma a otimizar vários critérios de desempenho como vazão e probabilidade de bloqueio. Contudo muitas restrições complicam o processo RWA, tais como: requisito de continuidade de comprimento de onda, capacidade de conversão de comprimento de onda, efeitos de atenuação e limitações de potência. O problema pode então ser dividido em duas partes: seleção de rota e atribuição de comprimento de onda. Muitos autores propõem esquemas de otimização para formular o problema de roteamento, com o objetivo de minimizar custos. Em muitas formulações RWA relatadas, um completo conjunto de requisições origem-destino é fornecido, e decisões de roteamento são feitas para todos os pares (origem-destino) para encontrar uma solução ótima. Para isso, o tempo gasto em processamento computacional pode ser significativo e ser crescente com a dimensão da rede. Por isso, estas soluções são mais sensíveis a perfis de demanda relativamente estáticos e, geralmente, menos aplicáveis na maioria dos casos, onde requisições de canal podem chegar de maneira randômica e em frequências arbitrárias. Atualmente, nenhum RWA padronizado existe e esta função pode ser abstraída por esquemas proprietários, ou seja, são padronizadas apenas as interfaces e a arquitetura.

Para estabelecer rotas de “*lightpaths*” na rede WDM entre dois nós ópticos, um esquema de endereçamento é requerido para a camada de rede ótica. É evidente que o endereçamento

óptico deve ser independente daqueles utilizados nos protocolos das camadas superiores. Para assegurar transparência em redes WDM relativamente pequenas, apenas alguns esquemas de endereçamento planos são suficientes. No entanto, para redes de maiores dimensões, deve ser implementados um esquema de endereçamento hierárquico, em geral um esquema de endereçamento com dois níveis é suficiente. Endereçamentos de camadas óticas independentes requerem também resolução através de sub-redes óticas para identificação do canal; ou seja, para protocolos de camadas superiores comunicarem-se através de domínios WDM, a entrada e saída de nós da rede ótica devem ser conhecidos.

Vamos ver a seguir algumas opções de implementação das redes WDM.

3.1 Tráfego Estático ou Dinâmico

A demanda de tráfego em uma rede WDM pode se apresentar de duas formas: estática ou dinâmica. No caso da demanda de tráfego estático, as requisições de conexões são conhecidas *a priori*. A demanda de tráfego pode ser especificada em termos do par origem-destino. Estes pares são escolhidos baseados na estimativa de requisitos de tráfego entre um nó e outro. O objetivo é fazer as alocações de rotas e de comprimentos de onda da demanda existente de tal forma que seja minimizado o número de comprimentos de onda utilizados. O grande desafio é maximizar o número de solicitações satisfeitas, mantendo-se um número de comprimentos de onda fixo. Este problema é conhecido como o problema do estabelecimento dos “*lightpaths*” estáticos (*Static Lightpath Establishment* – SLE). Tem-se mostrado que o problema SLE é intratável, ou seja, o único algoritmo conhecido que encontra uma solução otimizada requer um tempo exponencial não factível para uma situação de alocação de comprimentos de onda em uma rede de alta velocidade. Portanto, tem sido preferido utilizar um algoritmo polinomial que produza soluções próximas da ótima.

No caso da demanda de tráfego dinâmico, as conexões requisitadas à rede surgem de forma randômica. Este tipo de tráfego gera os mais variados modelos de situações em uma rede de transporte. Durante a operação da rede pode ser necessário retirar algum “*lightpath*” já existente e estabelecer novos “*lightpaths*” em resposta à mudança do padrão de tráfego da rede ou falha de algum componente. Diferentemente do problema colocado no caso do RWA estático, as soluções para o problema do RWA dinâmico devem ser computacionalmente simples, já que a requisição deve ser processada em tempo real. Quando surge uma nova requisição, a rota e o comprimento de onda devem ser alocados de tal forma que seja maximizado o número de requisições atendidas. Para discutir tais questões, esquemas de computação de rotas dinâmicas baseadas em abordagens de grafos podem ser empregadas, tais como DLE (*Dynamic Lightpath Establishment*). Em geral, os esquemas de roteamento dinâmico acarretam em maiores probabilidades de bloqueio, no entanto, existem diferentes métodos de otimização que roteiam um conjunto completo de canais específicos para minimizar os bloqueios. O algoritmo RWA dinâmico é bem menos sofisticado que o algoritmo do RWA estático, já que o RWA dinâmico não tem conhecimento das requisições futuras, enquanto que no RWA estático todas as conexões são conhecidas *a priori*.

3.2 Controle Centralizado ou Distribuído

Os algoritmos RWA podem fazer o controle da seleção de rotas e comprimentos de onda de forma centralizada ou distribuída. No caso do controle centralizado, assume-se que o controlador central está disponível. O controlador faz um acompanhamento do estado da rede e é responsável por selecionar as rotas e comprimentos de onda das requisições e enviar sinais de controle para os nós envolvidos nos processos de estabelecimento e liberação dos “*lightpaths*”. Nenhum dos nós da rede sabe qual é o estado atual de toda a rede em um determinado momento. Um nó pode usar um esquema distribuído de busca rápida na seleção da rota e do comprimento de onda para atender uma requisição. Podem ser usadas também, rotas pré-definidas e realizada a busca de comprimentos de onda livres nos enlaces da rota selecionada. Os nós enviam mensagens de controle aos seus vizinhos, solicitando reserva de comprimento de onda dos enlaces diretamente conectados a eles. Estando a rota definida e o comprimento de onda reservado, um sinal de controle é enviado a vários nós para configurar o chaveamento nos nós de roteamento para o estabelecimento dos “*lightpaths*”. Da mesma forma, para liberar um “*lightpath*”, um sinal de controle é enviado do nó origem para os demais. Os algoritmos centralizados normalmente são, utilizados em pequenas redes, não sendo escaláveis para redes maiores. Os protocolos de controle distribuído são utilizados com o propósito de se obter simplicidade e escalabilidade.

Outro problema importante em se tratando de redes roteadas por comprimento de onda é a falta de justiça entre conexões com diferentes números de saltos envolvidos na conexão. Requisições de conexões com grandes saltos demoram mais para ser atendidas. Isso ocorre principalmente quando o controle distribuído é usado, devido a maior possibilidade de haver conflito na reserva de comprimentos de onda.

3.3 Métodos de Roteamento e Seleção do Comprimento de Onda (RAW)

Os mais importantes métodos de roteamento considerados na literatura são: o de rota fixa, rotas fixas alternadas, e o roteamento por exaustão. No método de rotas fixas, apenas uma rota é fornecida para cada par de nós. Frequentemente a rota mais curta é a escolhida. Quando uma solicitação de conexão chega a um par de nós, este procura em sua rota pré-definida qual o comprimento de onda está disponível. No método de roteamento alternado, duas ou mais rotas são fornecidas para cada par de nós. Ao haver uma solicitação de conexão a um par de nós, é feita uma verificação da disponibilidade de cada uma dessas rotas, em uma ordem pré-definida. No método de roteamento por exaustão, todas as rotas possíveis são verificadas para o par de nós. O estado da rede é representado por meio de grafos e o algoritmo do caminho-mais-curto é utilizado para encontrar a melhor rota. O método por exaustão apresenta melhor desempenho que os outros dois, mas apresenta uma complexidade bem maior.

Baseado na ordem utilizada para procurar um comprimento de onda livre, o método de alocação recebe uma classificação, que é definida como: mais utilizado, menos utilizado, ordem fixa, e ordem randômica. Pelo método “mais utilizado”, o comprimento de onda livre é definido fazendo uma busca do mais utilizado para o menos utilizado. De forma contrária, o método “menos utilizado” busca encontrar o comprimento de onda livre começando a busca pelo menos utilizado, aumentando assim a chance de rapidamente encerrar a busca. No método de ordem fixa, os comprimentos de onda podem receber índices e a busca obedecer a ordem deste índice. No método de ordem randômica, é feita uma busca em todas as fibras livres de forma aleatória.

Os dois primeiros métodos são preferidos quando se trata de uma rede de controle centralizado. Os dois outros métodos são utilizados em redes com controle distribuído. O método que apresenta melhor desempenho é o “mais utilizado”.

4. Pacotes IP sobre Redes Ópticas

Nos últimos anos, a implantação das redes ópticas tem sido feita utilizando-se várias tecnologias na camada cliente (veja Figura 5) sobrepondo, por exemplo, IP / ATM /SONET e WDM. Esta arquitetura trás varias desvantagens, dentre elas “*overheads*” indesejáveis para uma rede de grande vazão e altos custos de implantação. Por este motivo, a proposta mais atraente é a de subtrair as camadas intermediárias, sobrepondo a camada IP diretamente sobre o WDM. Para isso é necessário criar um mecanismo de controle que, até então, era suportado pelas camadas intermediárias. Um mecanismo de controle bastante eficiente e que possibilitaria fazer esta integração IP/camada óptica, é a que foi definida na tecnologia MPLS (*Multiprotocol Label Switching*), e está servindo de inspiração para a ultima geração das redes ópticas.

MPLS é uma forma de comutação na qual um rótulo (*label*) de formato fixo inserido no início de cada pacote é utilizado para determinar o próximo nó. Em cada nó, o valor do rótulo de chegada é substituído por um outro rótulo que é utilizado pelo próximo nó (*Label swapping*). O caminho percorrido pelo pacote ao longo destes nós é denominado LSP (*Label Switched Path*).

Ao ingressar numa rede MPLS, cada pacote é examinado para determinar qual LSP ele deve utilizar e, portanto, o valor do rótulo que será assinalado a ele. Esta decisão é baseada em diversos fatores como, endereço de destino, requisitos de qualidade de serviço e do estado atual da rede, entre outros. Esta flexibilidade é um dos principais elementos que tornam o MPLS uma ferramenta de grande utilidade. O conjunto de todos os pacotes, que são enviados da mesma forma tem uma representação denominada FEC (*Forward Equivalence Class*). Cada FEC é mapeado em um LSP.

Um dispositivo que pode determinar o FEC de cada pacote que chega e então, adicionar o rótulo correspondente ao pacote, é denominado LER (*Label Edge Router*). Os dispositivos que comutam os pacotes baseando-se apenas nos rótulos (e portas) de chegada são denominado LSRs (*Label Switched Routers*). Os LER pode classificar os pacotes, de forma

que o tráfego de mais alta prioridade seja enviado através de um circuito especial, enquanto que os demais sejam enviados por outro caminho.

Baseado nestes mesmos princípios, está sendo proposto e padronizado uma extensão do MPLS para redes ópticas. Esta tecnologia é denominada GMPLS (*Generalized MPLS*). A seguir veremos qual é esta proposta e como esta tecnologia pode ser utilizada para melhorar a integração do protocolo IP com a camada de multiplexação de comprimentos de onda.

4.1. A proposta do GMPLS

Uma das principais áreas de estudo em redes ópticas tem sido o seu plano de controle. O objetivo do plano de controle de uma rede óptica é fornecer meios para estabelecer e manter “*lightpaths*”, e gerenciar os recursos da rede. *Lightpath* ou caminho de luz é um caminho entre dois pontos de acesso criado dentro uma rede óptica através da qual os dados podem ser transmitidos. É equivalente a um circuito criado numa rede comutada de circuitos.

Historicamente, utilizava-se uma abordagem centralizada para gerenciar o estabelecimento de conexões ópticas. O problema do controle centralizado consiste no fato de exigir um sistema complexo de suporte operacional. O processo de integrar equipamentos de diversos fabricantes em um único sistema pode tornar-se lento e de custo elevado. Uma outra abordagem utilizada por alguns fabricantes, tem sido o desenvolvimento de seus próprios planos de controle. O problema neste caso é a interoperabilidade. Portanto, tornou-se importante o desenvolvimento de um padrão comum para o plano de controle.

GMPLS é uma extensão do protocolo MPLS que dá suporte a outras tecnologias de transporte incluindo redes ópticas. Uma das principais diferenças entre MPLS original e GMPLS está no enfoque de cada um deles. O MPLS original enfoca o plano de dados, isto é, no seu tráfego de dados, enquanto que GMPLS enfoca o plano de controle, isto é, na parte que efetua o gerenciamento de conexões no plano de dados.

4.1.1. Rótulos generalizados

O requisito básico na arquitetura MPLS é que os dois LSRs (*Label Swicthing Routers*) localizados nas pontas de um enlace concordem na forma como eles irão identificar um fluxo de dados. Para este fim, eles usam um rótulo (*label*) que é assinalado por um dos LSRs e distribuído ao outro LSR usando um protocolo de sinalização.

A premissa utilizada pelo GMPLS é que a idéia de que um rótulo pode ser generalizado para qualquer coisa que pode identificar um fluxo de dados. Por exemplo, numa fibra óptica, cuja banda é dividida em comprimento de ondas (*lambdas*), um *lambda* inteiro poderia ser alocada para um fluxo solicitado. Os LSRs nas duas pontas da fibra têm apenas que concordar com o *lambda* a ser utilizado. Ao contrário de MPLS original, os dados

dentro do fluxo não precisam ser marcados com um rótulo. O valor do rótulo está implícito no *lambda* utilizado para transportar os dados.

O GMPLS generaliza a representação do rótulo de 32 bits definido no MPLS, estendendo para um *array* de bytes de tamanho arbitrário.

4.1.2 Exemplos de rótulos GMPLS

No GMPLS podem ser utilizados vários parâmetros da conexão como rótulos. Os rótulos especificados são:

i) Rótulos para fibra toda

Um enlace entre dois LSRs pode ser constituído por um conjunto de fibras ópticas. LSRs podem alocar uma fibra inteira para um fluxo de dados. O valor do rótulo neste caso é o número da fibra selecionada dentro do conjunto. A interpretação do número correspondente à fibra/porta é uma questão local aos LSRs deste enlace. Quando os dois LSRs utilizarem esquemas diferentes de numeração, o protocolo LMP (*Link Management Protocol*) fornece um mecanismo para LSRs correlacionarem as informações de numeração.

ii) Rótulos para comprimentos de onda (*lambda*)

Quando a banda de uma fibra óptica for subdividida utilizando WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), um LSR óptico pode alocar um *lambda* ao fluxo de dados solicitado. Neste caso, o valor do rótulo corresponde ao comprimento de onda selecionado.

iii) Rótulos para banda de onda (*Waveband*)

Quando comprimentos de onda consecutivos são agrupados, formando uma faixa de comprimentos de onda, de forma que todos eles são comutados conjuntamente, o rótulo será um “identificador da faixa de comprimento de onda” e um par de números (“identificadores de canal”), indicando os comprimentos de onda inferior e superior.

iv) Rótulos para *timeslots*

Quando a largura de banda de uma fibra óptica for dividida em *timeslots* utilizando TDM, um *switch* óptico pode alocar um ou mais *timeslots* para o fluxo de dados solicitado. O valor do rótulo, neste caso deverá ser um que possa especificar o (os) *timeslot(s)* alocados(s).

v) Rótulos para SONET/SDH

Um rótulo para SONET/SDH é representado por uma seqüência de cinco números, que seleciona um dos ramos da hierarquia SONET/SDH com alto nível de refinamento.

4.1.3. Solicitação de rótulos GMPLS

Vale lembrar que, para todos os tipos de rótulos de GMPLS apresentados acima, o valor do rótulo implica diretamente na largura de banda que é disponibilizado para o fluxo de dados.

O GMPLS utiliza os mesmos protocolos de sinalização utilizados no MPLS para solicitar rótulos, isto é, CR-LDP e RSVP-TE. Entretanto, o GMPLS generaliza as mensagens de solicitação, permitindo que ele carregue parâmetros adicionais que especificam a solicitação com mais detalhes. No RSVP, isto é feito usando o *Generalized Label Object* no lugar de LABEL_REQUEST, e no CR-LDP utilizando *Generalized Label LTV*.

i) Sinalização fora de banda

Os protocolos de sinalização de MPLS original assumem que o tráfego de dados em um LSP (*Label Switched Path*) percorre o mesmo caminho que as mensagens de sinalização. Em redes ópticas, entretanto, a largura de banda dos enlaces ópticos é muito alta, e portanto, seria um desperdício utilizar uma banda inteira como um canal de sinalização. Portanto, existe uma forte razão para que a sinalização seja fora de banda (*out-of-band*) transportando as mensagens de sinalização em um canal de controle fisicamente separado do canal de dados. Isto, também, simplifica a implementação do plano de dados de um *switch* óptico, pois o plano de dados não teria mais que entender os protocolos utilizados para transportar mensagens de sinalização.

Isto significa que, em redes ópticas, os planos de dados e de controle não precisam estar fortemente acoplados e nem precisam, necessariamente, compartilhar a mesma topologia. O OXC é um elemento de *comutação de caminho* utilizado para estabelecer “*lightpaths*” comutados dentro de uma rede óptica. É importante notar que um OXC não comuta pacotes. A unidade de transferência é um *lambda* (comprimento de onda) ou uma fibra.

A comutação de um OXC é controlada através da configuração apropriada da matriz de comutação. Como exemplo da falta de necessidade de forte acoplamento, as mensagens de controle entre OXCs (*Optical Cross Connects*) podem ser enviadas fora de banda, através de um comprimento de onda dedicado em uma fibra que conecta dois nós, ou mesmo uma rede física separada. Para estabelecer um LSP, neste contexto, o LSR deve calcular duas rotas para o próximo nó: uma através do caminho de dados e uma outra através do caminho de sinalização. O caminho de dados deve ser calculado primeiro e, então, deve ser procurado um caminho de sinalização que alcance o próximo nó do caminho de dados.

Pode-se observar, portanto, que o roteamento neste tipo de ambiente é complicado. Extensões de OSPF para redes ópticas foram criadas para distribuir informações sobre as topologias tanto do plano de dados, como do plano de controle. A Figura 6 ilustra a separação lógica entre as topologias dos planos de dados e de controle. O bloco CTRL representa um processador que implementa as funções do plano de controle de um *switch* dentro da arquitetura GMPLS.

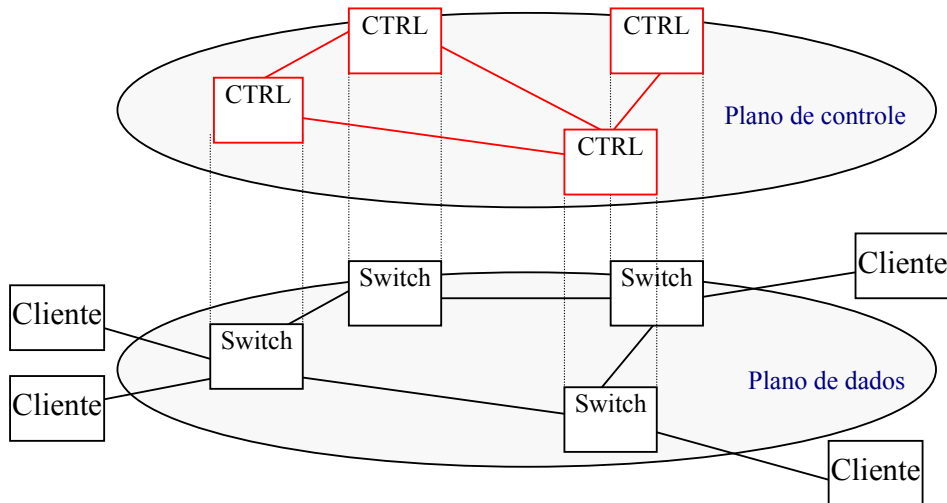


Figura 6: Arquitetura GMPLS e a separação dos planos de controle e de dados.

ii) Funções do plano de controle da arquitetura GMPLS

As principais funções do plano de controle GMPLS são:

1. **Descobrir vizinhos** - O roteamento dentro de uma rede óptica baseia-se no conhecimento de topologia da rede e na disponibilidade de recursos. Para isso, cada nó deve descobrir o estado dos seus enlaces com todos os seus vizinhos. Isto é, cada nó deve determinar se os enlaces estão funcionando, a banda disponível de cada enlace, a identidade da porta remota de cada enlace e outros parâmetros. Isto é feito utilizando-se o protocolo LMP rodando nos dois nós vizinhos.
2. **Descobrir a topologia de rede** - É o procedimento através da qual as informações dos estados dos enlaces de uma rede são disseminadas. Este procedimento é feito utilizando-se os protocolos de roteamento OSPF-TE ou ISIS-TE com extensões para GMPLS. Como as topologias do plano de controle e de dados não precisam ser congruentes, os protocolos de roteamento são responsáveis pela disseminação das duas topologias, de forma que cada nó possa manter uma visão consistente das duas topologias. A topologia do plano de dados é usada para selecionar o caminho durante o estabelecimento de conexões, enquanto que a topologia do plano de controle é usada para construir a tabela de roteamento IP das mensagens de controle. As informações dos estados dos enlaces são mantidas em cada nó em uma base de dados denominada *Base de Dados de TE (TE Database)*;

3. **Calcular rotas** - Consiste em calcular as rotas para os “*lightpaths*”, utilizando-se um algoritmo de roteamento baseado em condições de contorno. Basicamente, a condição de contorno é a largura de banda requerida para o “*lightpath*”. Existem diversos algoritmos sendo propostos, incluindo aqueles que calculam rotas alternativas junto com a rota primária. O algoritmo utilizado para cálculo destes caminhos é conhecido genericamente como CSPF (*Constrained Shortest Path First*).
4. **Gerenciar conexões** – Consiste em criar, manter, restaurar e terminar conexões ópticas (“*lightpaths*”) utilizando protocolos de sinalização. Uma vez determinada a rota para um “*lightpath*”, cada nó do caminho deve configurar a sua matriz de comutação (*forwarding table*) de forma coordenada. Esta coordenação é semelhante a seleção dos rótulos de entrada e de saída num ambiente MPLS. Os protocolos utilizados para estabelecer “*lightpaths*” são CR-LDP (*Constraint-based Routing-Label Distribution*) e RSVP-TE (*Resource reSerVation Protocol – Traffic Engineering Extension*) com extensões para GMPLS.

A Figura 7 ilustra a divisão lógica de um *switch* em planos de controle e de dados com as funções de cada um dos planos.

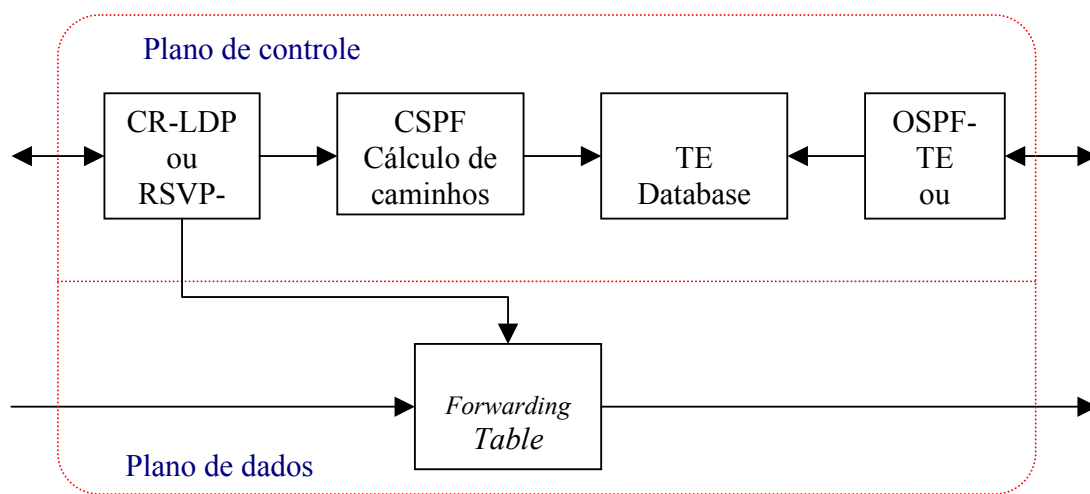


Figura 7: Plano e dados e de controle de um *switch*.

4.2. Roteamento no domínio IP integrado ao domínio óptico

Conceitualmente, a configuração da matriz de comutação é feita através de uma tabela (“*cross-connect table*”), cujas entradas são da forma $\langle \text{porta de entrada } i, \text{ porta de saída } k \rangle$, se a unidade de transferência for uma fibra. Isto é, os dados recebidos pela fibra da porta de entrada i devem ser comutados para a fibra da porta k . Se a unidade de transferência for um comprimento de onda, as entradas da tabela serão da forma $\langle \text{porta de entrada } i, \text{ } \lambda \rangle$.

(j), [porta de saída k , $Lambda(l)$]. Neste caso, os dados recebidos pela porta de entrada i através do comprimento de onda j , devem ser comutados para a porta k usando o comprimento de onda l .

A comutação dentro de um OXC pode ser realizada no domínio elétrico ou no domínio óptico. Se a comutação for efetuada no domínio elétrico, deverá haver uma conversão opto - elétrico na porta de entrada e uma conversão eletro-óptico na porta de saída.

Aqui, o termo OXC será utilizado para referir um nó híbrido constituído de um plano de dados e de um plano de controle baseado na arquitetura GMPLS, como mostra a Figura 8. O plano de controle inclui toda a parte de processamento dos protocolos de sinalização e de roteamento para estabelecer e manter “*lighpaths*” através da rede óptica. O plano de dados contém a matriz de comutação.

O plano de controle comunica-se com o plano de dados através de uma interface, que define um conjunto básico de primitivas para configurar a matriz de comutação, como por exemplo, *conectar* um canal de um enlace de entrada com um canal de enlace de saída.

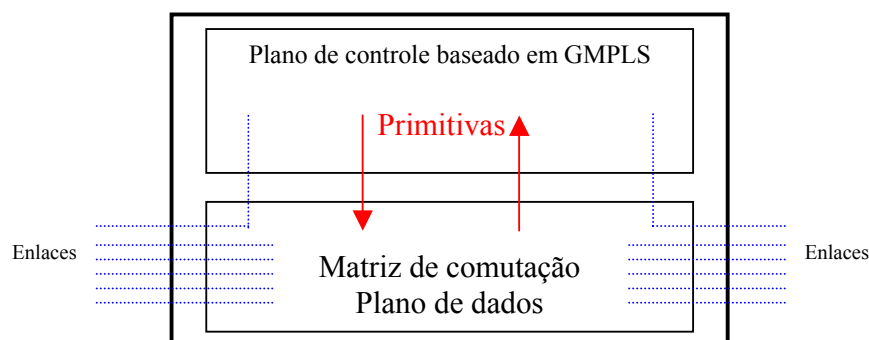


Figura 8: Arquitetura de um OXC.

4.2.1. O modelo de rede

O modelo de rede considerado no estudo de roteamento é constituído de uma *rede óptica*, que permite aos seus *clientes* se comunicarem entre si por meio de “*lighpaths*” comutados e estabelecidos dinamicamente. São considerados clientes de uma rede óptica, as redes de roteadores IP, as redes ATM, as redes SDH/SONET, entre outras.

A rede óptica consiste de *sub-redes ópticas* interconectadas por meio de fibras ópticas numa topologia genérica. Sub-rede óptica é uma rede de OXCs conectados por meio de fibras, que dão suporte a criação de canais de luz fim-a- fim.

Um roteador que tem conectividade física direta com a rede óptica é denominado roteador de borda (*edge router*). Dentro deste modelo de rede, um “*lighthpath*” comutado deve ser estabelecido entre os dois roteadores de borda antes que eles possam se comunicar. O estabelecimento de um “*lighthpath*” consiste em preencher as tabela de comutação de todos os OXCs envolvidos no caminho. A Figura 9 ilustra o modelo de rede.

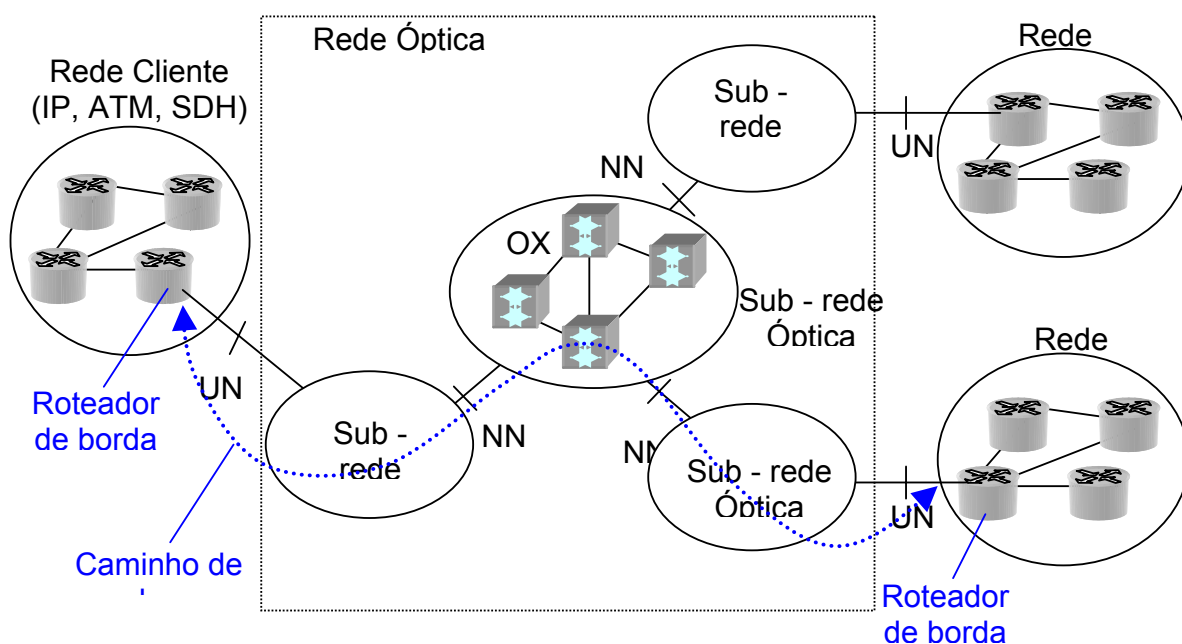


Figura 9: Modelo de rede.

Na maioria dos casos, os caminhos ópticos tendem a ser bidirecionais, isto é, o caminho de retorno desde a porta de saída até a porta de entrada é roteado através do mesmo conjunto de portas intermediárias do caminho de ida.

4.2.2. Modelo de interconexão de redes ópticas

A *Interconexão de redes ópticas* consiste de múltiplas redes ópticas interconectadas, onde cada rede óptica é administrada por uma entidade diferente. A Figura 10 ilustra este modelo. Neste modelo, um caminho de luz estabelecido entre pares de roteadores IP pode atravessar diversas redes ópticas sujeitos a diferentes procedimentos de estabelecimento e restauração de conexões ópticas. Esta questão ainda está aberta, sujeita à padronização.

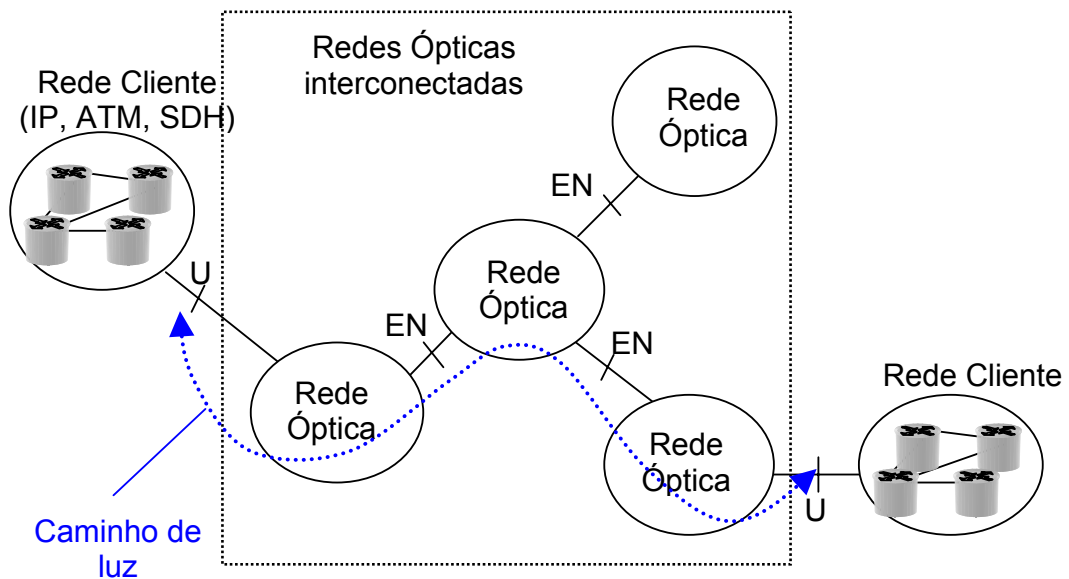


Figura 10: Interconexão de redes ópticas.

4.2.3. Interfaces Lógicas de Controle

Existem três interfaces que podem ser identificadas nas Figuras 9 e 10:

- *UNI (User-Network Interface)* – representa a fronteira de serviço entre um cliente e a rede óptica. O cliente solicita um serviço de conexão a um servidor e o servidor estabelece a conexão desde que as condições do controle de admissão sejam satisfeitas.
- *NNI (Network-Network Interface)* - representa a fronteira entre OXCs pertencentes a redes ópticas diferentes. Essa interface utiliza um controle independente de fabricante. Pode ser Interna (INNI) e Externa (ENNI).
- *INNI (Internal Network-Network Interface)* - representa uma interface entre redes ópticas sob mesma administração.
- *ENNI(External Network-Network)* - representa uma interface entre redes ópticas sob administração independente. A segurança, a escalabilidade e a seleção de informações são considerações importantes na especificação da ENNI.

4.2.4. Transporte de IP através de redes ópticas

No estudo de alternativas de arquitetura para transportar pacotes IP através de redes ópticas, o plano de dados e o plano de controle na interface UNI devem ser separadas. As redes ópticas são *redes comutadas de circuito*, isto é, fornece um serviço de transporte para entidades externas na forma de dutos (“*lighthpaths*”) com taxas de transmissão constante. A rede IP, por outro lado, é uma rede de pacotes não orientada a conexão. Os roteadores

(clientes da rede óptica) para se comunicarem através da rede óptica devem estabelecer estes “*ligthpaths*” antes de transmitir os pacotes. Portanto, o plano de dados de IP na rede óptica pode ser visto como uma rede virtual de “*ligthpaths*”. Não existem muitas discussões com relação ao plano de dados. Entretanto, com relação ao plano de controle, existem vários debates sobre como os planos de controle da rede IP e óptica devem ser integrados.

Pode-se dizer que a arquitetura de uma rede óptica para transporte de IP é definida essencialmente pela organização do seu plano de controle. A principal arquitetura sendo cogitada para a integração dos planos de controle das redes IP e óptica é a arquitetura GMPLS. Os planos de controle das redes IP e óptica podem ser leve ou fortemente acoplados. Este acoplamento depende:

- Dos detalhes das informações de topologia e de roteamento divulgados pela rede óptica para a rede IP através da interface;
- Do nível de controle que os roteadores IP podem exercer na seleção de “*ligthpaths*” através da rede óptica;
- Das políticas impostas para a construção dinâmica de “*ligthpaths*” entre roteadores, incluindo controle de acesso, contabilização e segurança.

Existem três modelos possíveis de interconexão em IP e redes ópticas:

- *Modelo overlay*: Neste modelo, as redes ópticas são transparentes para IP, isto é, os protocolos de roteamento e sinalização IP são independentes dos protocolos de roteamento e sinalização do domínio óptico. Este modelo é semelhante ao modelo *Classical IP over ATM*.
- *Modelo peer*: Neste modelo, os OXCs são tratados como qualquer outro roteador em termos do plano de controle. Isto é, existe uma única instância do plano de controle nos domínios IP e óptico. Existem dois casos no modelo *peer* que devem ser considerados:
 - Quando as redes envolvidas (IP e/ou óptico) pertencerem à mesma entidade administrativa. Neste caso, um protocolo de roteamento interno (IGP) com extensões apropriadas é utilizado para distribuir informações através da rede integrada IP-óptica.
 - Quando as redes envolvidas (IP e/ou óptico) pertencerem a entidades administrativas independentes. Neste caso, utilizar uma única instância do protocolo de roteamento IGP não é adequado. Utilizam-se, normalmente, protocolos de roteamento entre domínios. O protocolo de roteamento externo (EGP), como BGP com extensões adequadas está sendo proposta para esta finalidade.
- *Modelo augmented*: Neste modelo, ao contrário do modelo *peer*, utilizam-se instâncias separadas de domínios IP e óptico. As informações das redes ópticas são

passadas seletivamente para a rede IP, empregando-se um protocolo de roteamento entre domínios.

4.2.5. Abordagens de roteamento

Vamos agora fazer algumas considerações sobre as propostas de esquemas de roteamento existentes:

i) Roteamento integrado

É a abordagem utilizada no modelo *peer* dentro de um domínio administrativo, isto é, as redes IP e óptica executam a mesma instância de um protocolo de roteamento interno. Para determinar rotas com condição de contorno (utilizando, por exemplo, o algoritmo CSPF), os nós que estabelecem LSPs precisam de mais informações sobre os enlaces da rede, além daquelas fornecidas normalmente pelo IGP padrão. Os protocolos de roteamento como OSPF-TE e ISIS-TE são utilizados para distribuir atributos de TE (Engenharia de Tráfego), assim como os parâmetros de enlaces ópticos. As informações sobre a topologia e dos estados dos enlaces são mantidos em todos os nós (OXCs e roteadores).

Nesta abordagem, cada roteador de borda calcula um caminho fim-a-fim (LSP) até outro roteador de borda através da rede óptica. Este caminho pode ser visto como um túnel através da rede óptica e que pode ter uma capacidade muito maior que a largura de banda requerida para suportar o LSP. Os outros roteadores da rede podem utilizar o excesso de banda deste “*lightpath*” para novos LSPs, em vez de instanciar um novo “*lightpath*”. Para que isso seja possível, este LSP deve ser anunciado pelo protocolo de roteamento como um enlace virtual a todos os roteadores.

A noção de FA (*Forwarding Adjacency*) é utilizado na disseminação de LSPs existentes aos roteadores da rede. Um FA pode ser visto como um enlace virtual anunciado pelo protocolo de roteamento *link state*, utilizando os mesmos parâmetros que descrevem os recursos de um enlace comum. Outro aspecto que deve ser levado em conta ao se utilizar um protocolo de roteamento numa rede óptica, é o emprego de tecnologias como DWDM que implicam num grande número de enlaces paralelos entre dois nós adjacentes diretos.

O modelo de roteamento tradicional assume o estabelecimento de uma adjacência para cada enlace conectando dois nós adjacentes. Considerando que o estado da cada enlace precisa ser distribuído através da rede e ser mantido nas bases de dados, tem-se um problema de escalabilidade. Para resolver este problema, foi criado um mecanismo denominado “*link bundling*” para representar um grupo de enlaces paralelos.

Os protocolos de roteamento e de sinalização baseados em IP requerem no mínimo um canal de controle bi-direcional entre dois nós de roteamento adjacentes. O GMPLS não

especifica como estes canais de controle devem ser implementados. Podem ser *in-band* ou *out-of-band*.

ii) Roteamento entre domínios

Esta abordagem suporta os modelos *augmented* e *inter-domain* onde o roteamento dentro dos domínios ópticos e IP são independentes, e o roteamento entre domínios é feito usando protocolos de roteamento padrão.

Existem duas abordagens para roteamento entre domínios em redes ópticas:

- BGP/GMPLS que estende o protocolo BGP para divulgar rotas e calcular caminhos de luz fim-a-fim. Os protocolos de sinalização GMPLS são estendidos para estabelecer caminhos de luz entre domínios.
- OBGp é uma proposta que utiliza BGP com extensões tanto para divulgar como para estabelecer conexões.

4.2.5. OSPF com extensão para Rede Óptica

O OSPF (*Open Shortest Path First*) é um protocolo de roteamento *link-state*, definido pela IETF para atender às exigências de roteamento de grandes redes. O seu objetivo é conhecer a topologia de toda a rede. Extensões foram criadas para incorporar atributos que possam descrever informações associadas a engenharia de tráfego e parâmetros de redes ópticas, como os recursos disponíveis na rede, incluindo largura de banda e restrições administrativas. Esse protocolo é genericamente conhecido como OSPF-TE.

No protocolo OSPF, cada nó possui uma base de dados de roteamento. A base de dados descreve a topologia de roteamento da rede, isto é, a coleção de nós dentro de um domínio de roteamento e como eles estão interconectados. A base de dados é a mesma para todos os nós participantes. Cada nó dentro de um domínio de roteamento é responsável pela descrição de sua topologia de roteamento. Esta descrição é contida numa estrutura de dados denominada *LSA*. *LSA (Link State Advertisement)* é uma estrutura de dados que descreve as informações sobre os estados dos enlaces entre um nó e os nós vizinhos. Cada nó deve gerar a sua LSA e distribuir esta informação aos demais nós da rede. A coleção de todas as LSAs geradas por todos os nós é denominada *base de dados de link-state*. O algoritmo de *flooding* do protocolo OSPF assegura que todos os nós tenham a mesma base de dados. Usando a base de dados de *link-state*, cada nó tem condições de calcular rotas utilizando o algoritmo SPF.

Numa rede óptica, que implementa o plano de controle baseado em GMPLS, cada nó deve gerar mais de um tipo de LSA: um, para descrever a topologia da rede, e os outros, para descrever os recursos disponíveis na rede óptica. Estas LSAs são denominadas *LSA opacas*

i) Roteamento hierárquico e áreas

Para lidar com escalabilidade em termos de nós de rede, o protocolo de roteamento deve ser capaz de dar suporte ao roteamento hierárquico através de sumarização de endereços e de topologia. O protocolo de roteamento OSPF dá suporte a um esquema de roteamento hierárquico de dois níveis baseado em áreas. Uma área consiste de uma coleção de nós interconectados, que possuem a mesma base de dados de *link-state*, isto é, a propagação de LSAs, que descreve o estado dos enlaces, só ocorre dentro de uma área. Cada área é identificada por um número de 32 bits. Uma das áreas é definida como sendo o *backbone* e tem a identidade 0.0.0.0. Todas as demais áreas devem ser interconectadas diretamente ao *backbone*.

A interconexão entre áreas é feita por meio de um nó denominado *nó de borda entre áreas* (*area border node*). Os nós de borda participam do roteamento das duas áreas e, portanto, possuem duas bases de dados. Com isso, os nós de borda são capazes de resumir (*sumarizar*) rotas da área não *backbone* e disseminar esta informação para todos os nós do *backbone* através do protocolo OSPF. Os nós de borda possuem, portanto, informação da topologia do *backbone* e o sumário das rotas das demais áreas. Os nós de borda são também, responsáveis pela geração de LSAs opacas, contendo o sumário óptico, e pela sua distribuição entre as áreas (Figura 11).

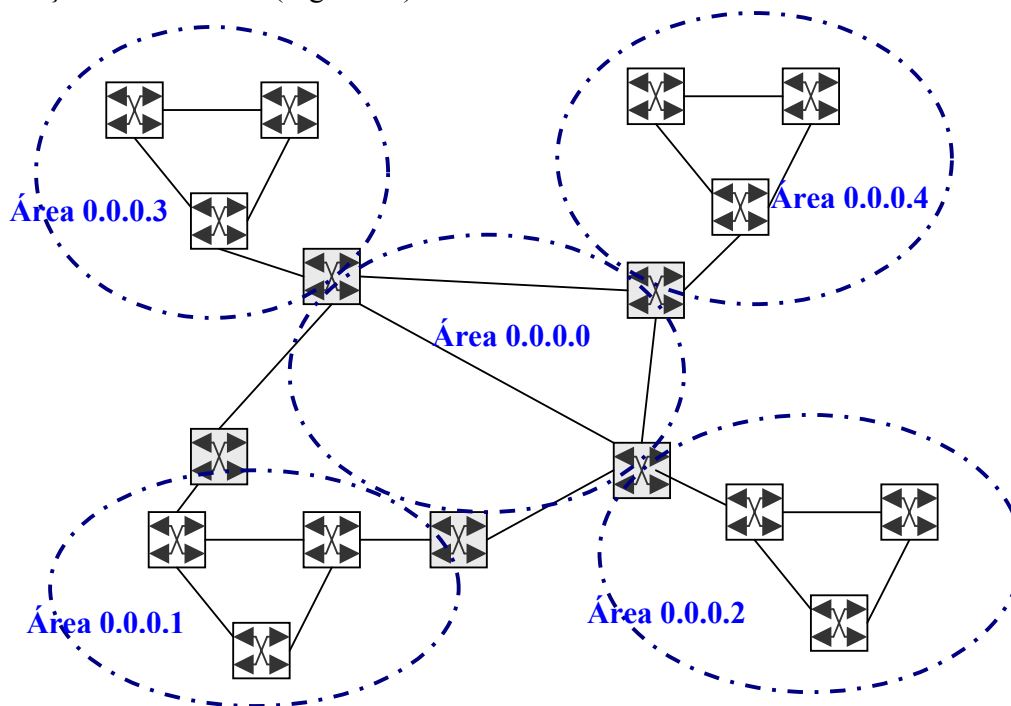


Figura 11: Roteamento hierárquico de OSPF.

iii) Operação básica do protocolo OSPF

Periodicamente, os nós enviam pacotes OSPF, tipo *Hello*, para descobrir vizinhos que participam do roteamento. Ao descobrir um vizinho, o nó passa para a sincronização da sua base de dados com a do vizinho utilizando pacotes OSPF do tipo *Database Description*. Estas duas fases constituem a fase da descoberta da topologia da rede. Após descobrir a topologia da rede, o nó passa a enviar, periodicamente ou quando ocorrer alguma alteração, as informações referentes aos seus enlaces, através de *flooding* de LSAs, aos demais nós da rede. A Figura 12 abaixo ilustra esta troca de mensagens.

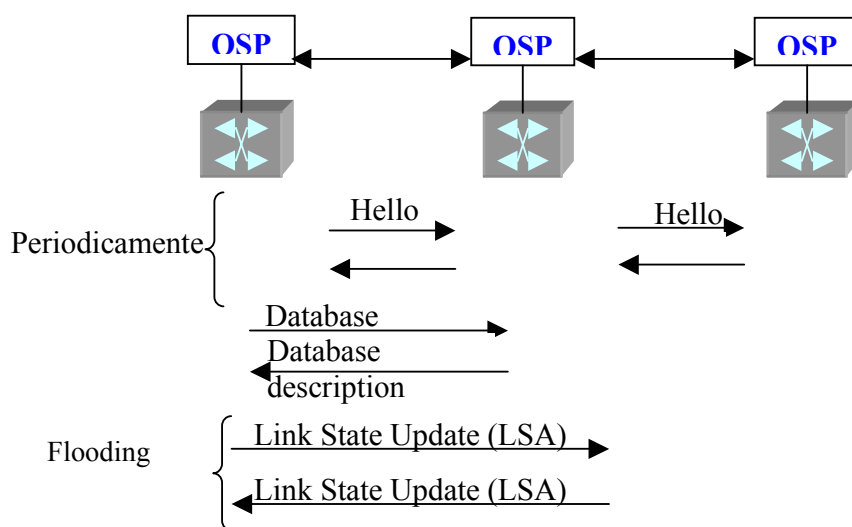


Figura 12: Protocolo OSPF.

iv) Formato dos pacotes OSPF

Os pacotes OSP utilizam diretamente o IP como meio de transporte, com identificação de protocolo 89, sem passar por UDP ou TCP. A Figura 13 ilustra o cabeçalho de um pacote OSPF encapsulado pelo cabeçalho do protocolo IP.

O campo ***Tipo de Pacote*** diz o tipo de informação que este pacote carrega. Os tipos são:

- Tipo 1: Pacote Hello
- Tipo 2: Database Description
- Tipo 3: Link State Request Packet
- Tipo 4: Link State Update
- Tipo 5: Link State Acknowledgement

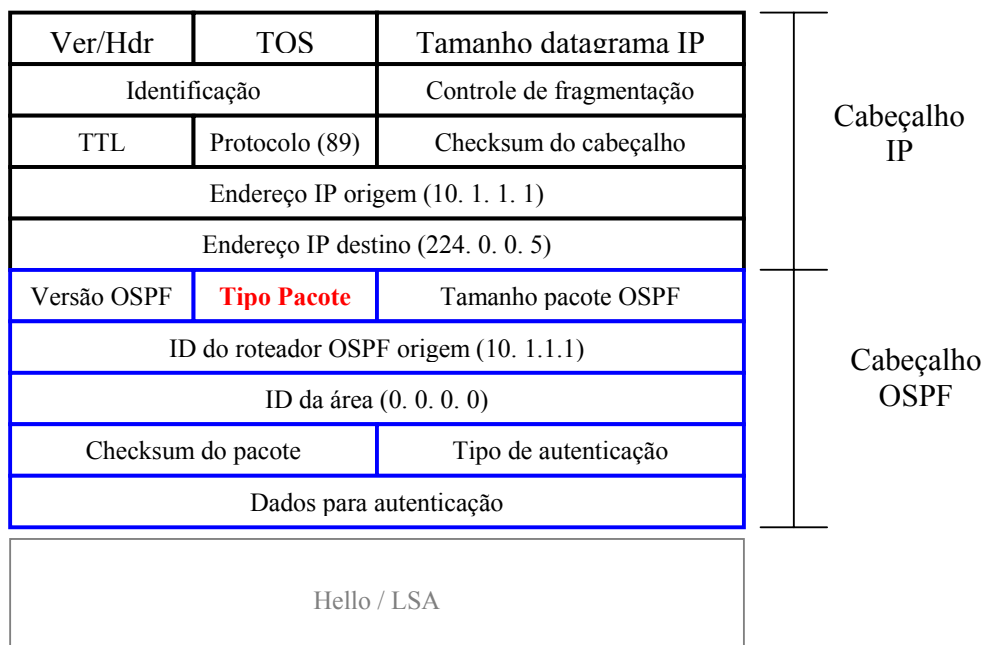


Figura 13: Formato do cabeçalho de um pacote OSPF encapsulado pelo cabeçalho do protocolo IP.

v) Formato do pacote OSPF carregando LSA

Na Figura 14, é mostrado o cabeçalho de um pacote OSPF carregando LSA.

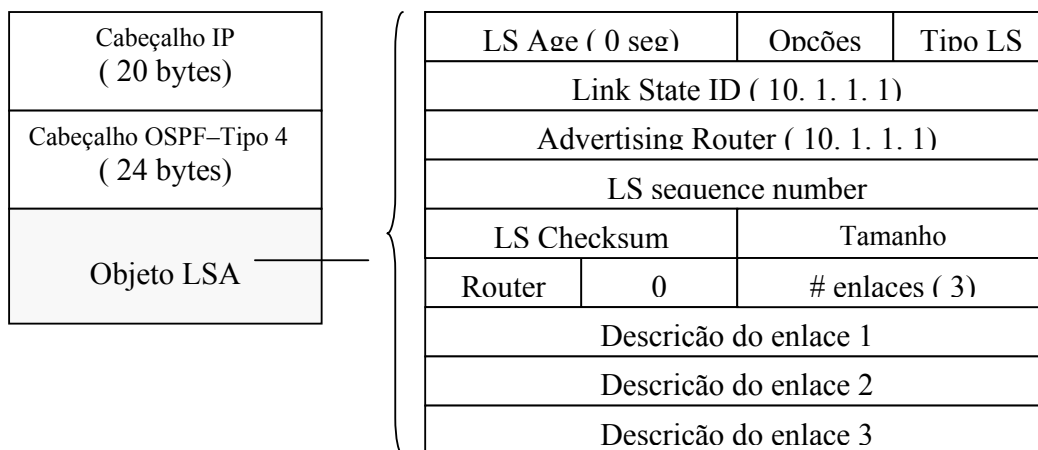


Figura 14: Formato do cabeçalho de um pacote OSPF carregando LSA.

Os tipos de LSAs são os seguintes:

Tipo 1 : Router LSA
Tipo 2 : Network LSA
Tipo 3: Summary LSA
Tipo 4 : ASBR Summary LSA
Tipo 5 : AS-External LSA
Tipos 9, 10 e 11 : LSAs opacas

vi) LSAs opacas (LSAs para extensões de OSPF)

As LSAs opacas são identificadas pelo campo Tipo LS do objeto LSA, se este campo for igual a 9, 10 ou 11 conforme o escopo do *flooding*:

Se Tipo LS = 9 – dentro de uma área;
Se Tipo LS = 10 – entre uma área e a outra;
Se Tipo LS = 11 – atravessa todo o Sistema Autônomo, isto é, todas áreas.

Os tipos de LSAs opacas são identificadas pelo campo ***Opaque type***. Basicamente existem dois tipos definidos:

Opaque type 1: Indica LSA de extensão para TE (Engenharia de Tráfego);
Opaque type 2: Indica LSA de extensão para roteamento óptico.

LS Age		Opções	9, 10 ou 11
<i>Opaque Type</i>	Opaque ID		
Advertising Router			
LS sequence number			
LS Checksum		Tamanho	
Opaque Information (conforme o campo Opaque Type)			

Figura 15: Formato de LSA opacas.

vii) LSA de extensão para TE (Engenharia de Tráfego) e extensão para roteamento óptico

O LSA de extensão transporta informações relacionadas com engenharia de tráfego, como largura de banda e tipo de enlace, no formato TLV (Type/Length/Value).

LS Age	Opções	9, 10 ou 11
1 (TE)	Opaque ID	
Advertising Router		
LS sequence number		
LS Checksum	Tamanho	
Informações de TE no formato TLV		

LS Age	Opções	9, 10 ou 11
2 (Óptico)	Opaque ID	
Advertising Router		
LS sequence number		
LS Checksum	Tamanho	
Informações para roteamento óptico no formato TLV		

Figura 16: Formato do pacote LSA com extensão TE e TLV para extensão ótica.

No caso do LSA estendido para roteamento óptica, a LSA opaca é utilizada como extensão OSPF para GMPLS, isto é, para transportar informações relacionadas com a rede óptica, como endereço de nó origem, e informações relacionadas com os seus enlaces ópticos.

A Tabela 1 mostra os valores e tamanhos para os diferentes tipos de Sub-TLVs.

Lista de sub-TLVs do TLV para enlace

Tipo Sub-TLV	Tamanho	Nome	
1	1	Link type	Extensão para TE
2	4	Link ID	
3	variável	Local interface IP address	
4	variável	Remote interface IP address	
5	4	Traffic engineering metric	
6	4	Maximum bandwidth	
7	4	Maximum reservable bandwidth	
8	32	Unreservable bandwidth	
9	4	Resource class/color	
11	4	Link Local Identifier	Extensão para GMPLS
12	4	Link Remote Identifier	
14	4	Link protection Type	
15	variável	Interface Switching Capability Descriptor	
16	variável	Shared Risk Link Group (SRLG)	

Tabela 1: Lista de sub-TLVs.

4.2.2. BGP com extensão para Rede Óptica

Os objetivos de um roteamento entre domínios são bem diferentes dos objetivos de um protocolo intra-domínio. O problema de escalabilidade é muito mais sério nos roteadores externos, que devem ser capazes de enviar pacotes para qualquer lugar da Internet, versus roteadores internos em uma sub-rede pequena. Roteadores externos são roteadores que interconectam dois Sistemas Autônomos (SAs), isto é, dois domínios de roteamento administrados independentemente.

A natureza autônoma dos domínios significa que é muito difícil calcular um caminho ótimo que cruza vários domínios. Portanto, o protocolo de roteamento entre domínios divulga apenas o alcance das redes. O protocolo de roteamento padrão utilizado atualmente na Internet entre SAs é o BGP (*Border Gateway Protocol*).

OBGP (*Optical Border Gateway Protocol*) é uma extensão para o BGP que permite controlar OXCs para serem utilizados como dispositivos BGP.

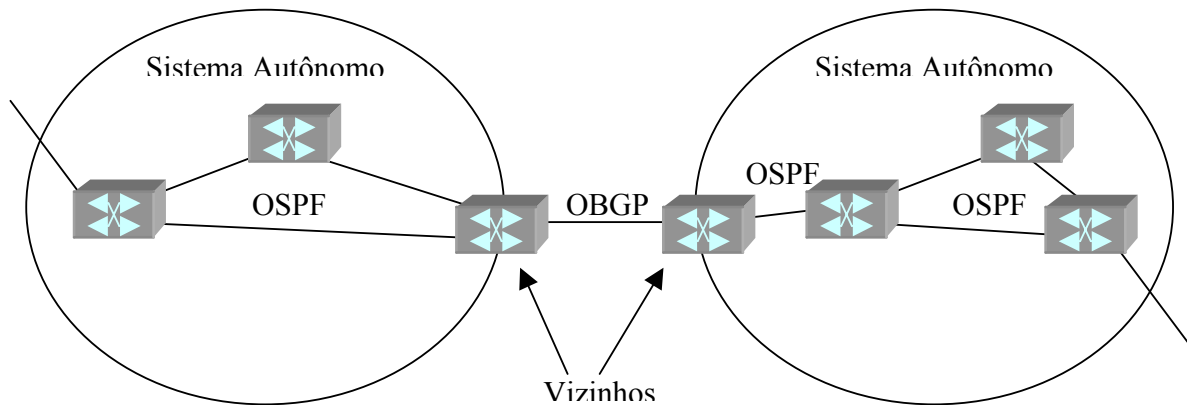


Figura 17: Interconexão de dois Sistemas.

i) Operação básica do protocolo OBGP (*Optical Border Gateway Protocol*)

O protocolo OBGP exige que uma relação de vizinhança BGP seja estabelecida entre os nós participantes do protocolo, através de um caminho qualquer (não necessariamente óptico). Os dois nós devem estabelecer uma conexão TCP na porta 179 para a troca de mensagens do protocolo. A relação de vizinhança numa rede óptica é feita, normalmente, entre um OXC e um roteador, ou entre dois OXCs.

O protocolo OBGP propõe duas fases. *A primeira fase* é para o descobrimento dos “*lightpaths*”. Nesta fase, os sites divulgam a disponibilidade de “*lightpaths*” a outros sites, utilizando mensagens *Update* com extensão de “*discovery*”. Esta mensagem contém as seguintes informações:

- O endereço IP do OXC de saída do site;
- O número do Sistema Autônomo de origem;
- Os prefixos IP que podem ser alcançados;
- Uma identificação dos “*lightpaths*”.

Os endereços IP contidos na mensagem e o endereço IP do OXC de saída do site podem ser alcançados pelo caminho de luz identificado.

Quando um *site* recebe uma mensagem *discovery*, o dispositivo OBGP não deve enviar esta mensagem ao seu vizinho a menos que exista pelo menos um “*lightpath*” disponível para o seu vizinho. Isto assegura que os *Updates* de *discovery* sejam recebidos apenas se for possível existir um “*lightpath*” até o site que originou a mensagem de *Update*. No exemplo da Figura 18, o nó B envia mensagem *discovery* ao seu vizinho BGP Z. Se Z tiver um “*lightpath*” disponível para Y e não para U, Z enviará esta mensagem apenas para Y.

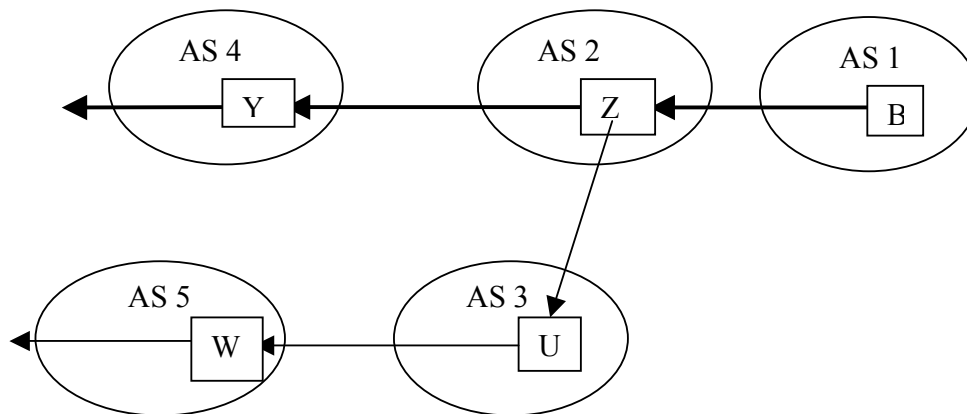


Figura 18: Descobrimento de caminho de luz.

Ao receber uma mensagem de *discovery*, o nó sabe que existe um “*lightpath*” disponível até as redes do site definidas na mensagem. O atributo *AS_PATH* da mensagem *Update* construído ao longo do “*lightpath*” contém o número de SA dos sites ópticos que o “*lightpath*” vai atravessar, caso seja estabelecido.

A segunda fase é a fase de estabelecimento do “*lightpath*”. Esta fase usa as informações recebidas da primeira fase junto com as extensões para estabelecer “*lightpath*” através de OXCs. O objetivo da proposta de OBGp consiste em utilizar apenas o protocolo BGP com extensões, tanto para roteamento como para sinalização. Entretanto, existe a possibilidade de se utilizar outros protocolos de sinalização como CR-LDP e RSVP-TE com extensões apropriadas. Esta fase do protocolo ainda está em aberto.

4.2.3 Sinalização e roteamento com condições de contorno

A sinalização numa rede óptica consiste em estabelecer um LSP (“*lightpath*”) entre dois roteadores através da rede óptica. Um LSP pode estar sujeito a condições de contorno por meio de vários requisitos que são determinados no roteador de entrada.

Um exemplo de rota com condição de contorno é a rota explícita onde a condição de contorno é a ordem com que os nós intermediários devem ser percorridos. Outras condições de contorno podem ser impostas, como por exemplo, a largura de banda e afinidade. Este tipo de roteamento é denominado *Constraint-based Routing* (CBR). No cálculo de rotas, o CBR considera outros fatores além da topologia de rede. Por isso, ele pode encontrar caminhos mais longos e menos carregados, em vez de caminhos mais curtos e congestionados. Um IGP padrão calcula apenas rotas mais curtas.

Por exemplo, na Figura 19 o caminho mais curto entre os roteadores A e C é através do enlace A-C utilizando IGP padrão ($m=1$). Entretanto, se for utilizado CBR para encontrar um caminho para LSP de 40 Mbps, ele selecionará o caminho A-B-C, pois a banda disponível no enlace A-C é de apenas 20 Mbps.

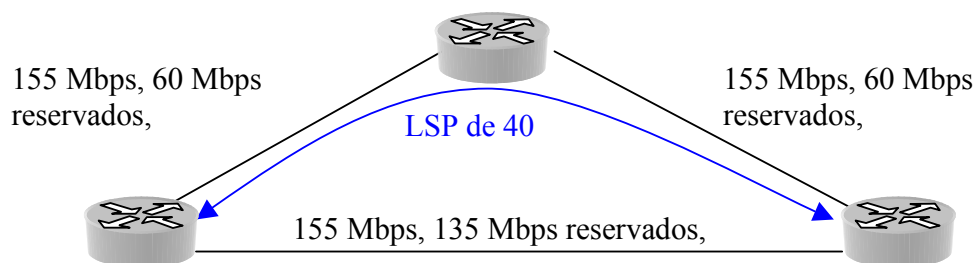


Figura 19: *Constraint-based Routing.*

Existem duas abordagens para calcular e estabelecer rotas com condições de contorno:

- Uma é calcular a rota toda no roteador de entrada, baseando-se nos requisitos e nas informações sobre o estado da rede. Neste caso, obtém-se uma rota explícita que satisfaz a condição de contorno.
- Outra abordagem é uma variação de roteamento “hop by hop”, onde o próximo nó é calculado em cada nó, utilizando-se as informações sobre os recursos disponíveis que são mantidas neste nó.

Os protocolos utilizados para estabelecer rotas de LSPs sujeitas a condições de contorno na arquitetura GMPLS são CR-LDP (*Constraint-based Routing-Label Distribution*) e RSVP-TE (*Resource reSerVation Protocol – Traffic Engineering Extension*).

4.2.4 Blocos funcionais da arquitetura GMPLS de uma rede óptica baseada em IP

A Figura 20 ilustra os principais blocos funcionais do plano de controle da arquitetura GMPL, para roteamento e sinalização de uma rede óptica baseada em IP.

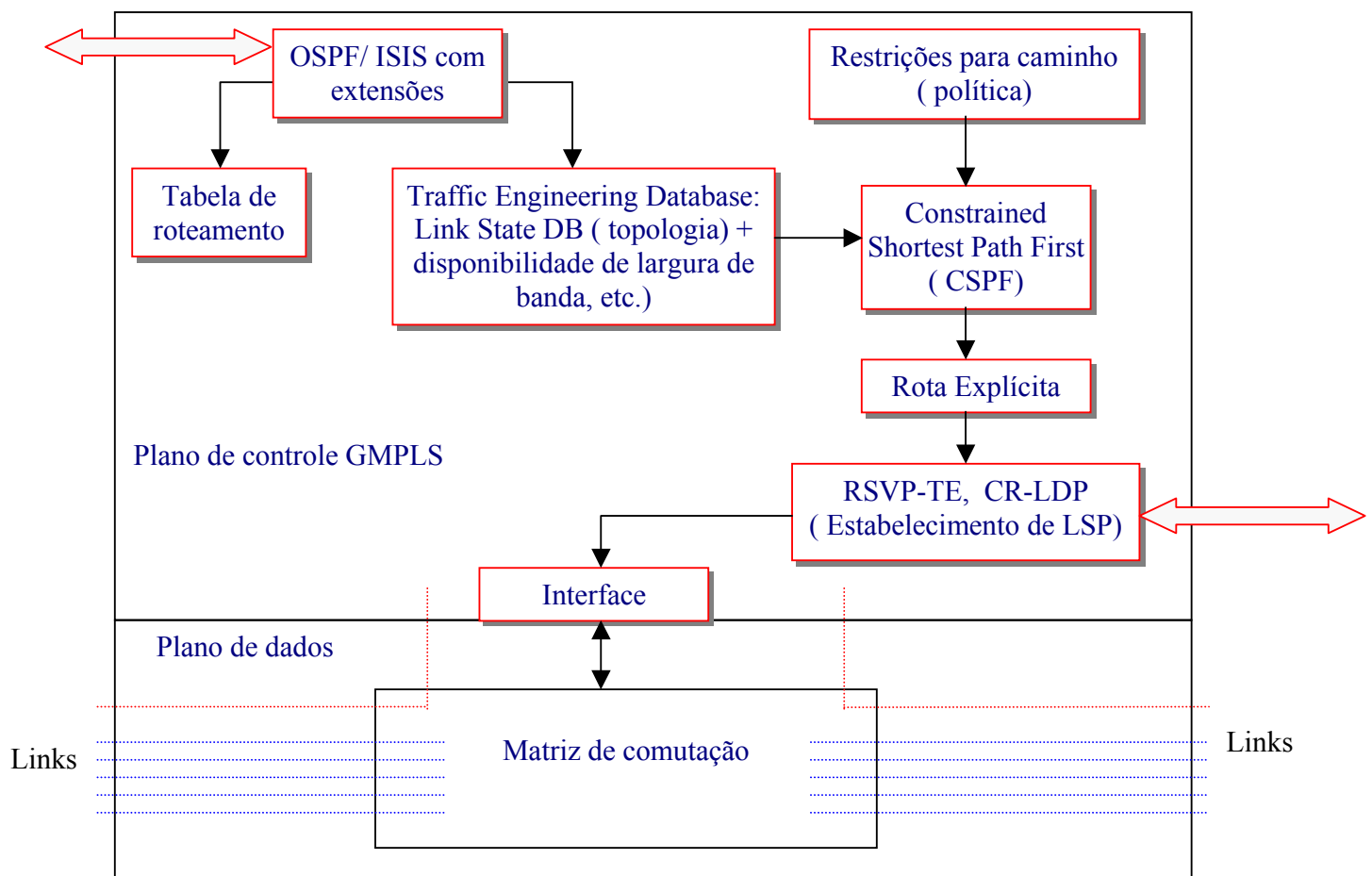


Figura 20: Blocos funcionais da arquitetura GMPLS de uma rede óptica baseada em IP.

5. Caso de Estudo

Atualmente, vários grupos de pesquisa têm implementado redes ópticas com o intuito de fazer um teste de prova dos conceitos mostrados neste documento. Um desses projetos, já em uma fase bastante avançada, foi implementado no Canadá.

5.1. Projeto Piloto no Exterior: Rede Canarie

Hoje, quando se fala de Internet Avançada pressupõem-se a existência de várias gerações da Internet. A Internet 1, como todos sabem, é a rede de produção, que envolve tanto o mundo acadêmico como industrial. A Internet 2 é uma rede acadêmica, baseada em tecnologias de banda larga com suporte à qualidade de serviço requerida por aplicações avançadas com integração de recursos multimídia, incluindo as áreas de Tele-educação, Telemedicina e quaisquer aplicações colaborativas com requisitos de interação em tempo real. Tais tecnologias de redes de banda larga são, normalmente, redes ATM ou IP sobre

SDH/SONET, ou seja, redes ópticas de primeira geração onde as funções de amplificação/repetição, comutação e roteamento são realizadas eletronicamente.

Em um outro estágio de evolução, fala-se da Internet 3, que deve ser baseada em redes totalmente ópticas. Hoje, existem núcleos de Internet 3 que proveêm o serviço de lighpath, sendo as funções de amplificação/repetição e comutação realizadas opticamente, mas não o roteamento. Núcleos menores da Internet 3 pesquisam técnicas, algoritmos e protocolos de roteamento ópticos, sem que haja uma solução universal e padronizada. Esses últimos núcleos enquadram-se na categoria chamada de “*optical testbeds*”.

A evolução da Internet em direção às redes totalmente ópticas tem sido realizadas ao redor do mundo todo. O país que se destaca é o Canadá com a rede do Canarie, denominada CA*Net 4. A CA*Net4 interconecta redes de pesquisa de universidades, centros de pesquisa e laboratórios de pesquisa do governo entre si e com parceiros internacionais. A maioria dos enlaces são OC-192 (10 Gbps) totalizando uma capacidade de transmissão de 4 a oito vezes maior que sua predecessora CA*Net 3.

A CA*Net 4 incorpora o conceito de “rede controlada pelo cliente”, que permite a alocação dinâmica de recursos de rede realizada pelos próprios usuários que desenvolvem as aplicações. Toda a sinalização e estabelecimento de circuitos físicos é realizada pelo GMPLS (*Generalized Multi-protocol de Label Switching*). A rede é baseada na utilização de enlaces metropolitanos de fibra escura e enlaces de longa distância com comutação de comprimento de onda.



Figura 21: Mapa com a indicação dos enlaces de fibra ópticas implementados na fase 4 do CA Net.

5.2 Iniciativas no Brasil

No Brasil, temos algumas iniciativas no sentido de criar um *testbed* óptico. Como exemplo, pode-se citar o projeto Giga em desenvolvimento pela RNP2 em parceria com o CPqD. Este projeto inclui além da infra-estrutura de rede óptica, o planejamento e desenvolvimento de aplicações avançadas para esta rede. Em especial, no estado de São Paulo, a FAPESP (Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo) está apoiando o projeto TIDIA (Tecnologia de Informação no Desenvolvimento da Internet Avançada) que está organizado em três subgrupos: grupo de ensino à distância, *testbed* óptico e incubadora de conteúdo. O objetivo desse projeto é criar uma infra-estrutura de rede óptica de 2a. geração que deve suportar aplicações avançadas, como a de TeleEducação.

6. Considerações Finais

Como pudemos ver, a evolução das tecnologias de transmissão de dados baseadas em fibra óptica está permitindo dar um salto significativo na vazão e eficiência das redes. Observando o histórico das tecnologias de rede, podemos ver que o meio físico influenciou em muito as formas de tratamento de erro e recuperação de dados ao longo destas últimas décadas. A derivação das tecnologias de comutação de circuito para as de comutação de pacotes ofereceu um novo panorama para diferentes aplicações que necessitavam maior flexibilidade da rede. No momento, a comutação de circuito volta à tona, permitindo atribuir qualidade de serviço as aplicações e possibilitando a utilização de aplicações que envolvem dados com características bastante diversas. A comutação de circuito associado à multiplexação de comprimento de onda, permite multiplicar em muitas vezes a capacidade de transmissão, garantindo ainda baixa latência e baixa variação de atraso. Os sofisticados equipamentos OXC e WADM dão ainda melhor desempenho a rede, permitindo eliminar o gargalo da conversão eletro-óptico. Todo este panorama mostra-nos que a tecnologia WDM e suas variantes são bastante promissoras, permitindo ampliar em muito a utilização do meio físico de fibra óptica já instaladas.

Vimos aqui quais são as topologias possíveis na implantação de redes WDM, a arquitetura em camada desta tecnologia e os mecanismos de roteamento utilizados na expectativa de otimizar cada vez mais sua operação. Discutimos, também, as possibilidades da utilização conjunta do protocolo de rede mais usado atualmente, o IP, e da camada física de maior poder potencial de provisão de banda, o WDM, sem a necessidade da implementação de camadas intermediárias. Com isto é possível obter melhores desempenhos a menores custos. Para que seja possível fazer tal integração é necessário criar novos mecanismos de alocação de recursos e de roteamento. A proposta do GMPLS propõe um plano de controle adequado a operação conjunta destas duas tecnologias. Além disso, estão sendo propostas extensões dos mesmos algoritmos de roteamento utilizados nas redes baseadas no protocolo IP de forma que esta integração seja feita com um único plano de controle.

Bibliografia

- A. Banerjee et al.; "Generalized Multiprotocol Label Switching: An Overview of Routing and Management Enhancements"; IEEE Communications Magazine, January 2001.
- A.E. Ozdaglar and D.P. Bertsekas; "Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks"; LIDS Report P-2535, December 2001.
- A.J.G. Abelem e M. Stanton; "Inter-redes IP baseadas em Redes Opticas"; 20º Simposio Brasileiro de Redes de Computadores; Buzios - RJ, maio de 2001.
- B. Rajagopalan et al.; "IP Over Optical Networks: Architectural Aspects"; IEEE Communications Magazine, Sept. 2000.
- B. Rajagopalan, et. al.; "IP over Optical networks: A Framework"; Internet Draft, Work in progress.
- C. Siva Ram Murthy and Mohan Gurusamy; "WDM Optical Networks - Concepts, Design, and Algorithms", Printice Hall PTR, 2002.
- D. Awduche, et. al.; "Multiprotocol Lambda Switching: Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Crossconnects"; IEEE Communications Magazine, March 2001.
- E. Mannie; "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture", Internet Draft, Work in progress.
- G. Li, et. al.; "Control Plane Design for Reliable Optical Networks" ; AT&T Labs - Research
- J. Moy; "OSPF: Anatomy of an Internet Routing Protocol"; Addison-Wesley, May 2000.
- J. P. Lang, et. al.; "Link Management Protocol"; Internet Draft, Work in progress.
- K. Kompella and Y. Rekhter, "LSP Hierarchy with MPLS TE"; Internet Draft, Work in progress.
- K. Kompella, "OSPF Extensions in Support of Generalized MPLS"; Internet Draft, Work in progress.
- K. Kompella, et. al.; "Routing Extensions in Support of Generalized MPLS" ; Internet Draft. Work in Progress.
- M. Blanchet, et., al.; "Optical BGP (OBGP): InterAS lightpath provisioning"; Internet Draft. Work in Progress.
- M. Listanti et al.; "Architectural and Technological Issues for Future Optical Internet Networks"; IEEE Communications Magazine, Sept. 2000.
- M. Medard and S. Lumetta; "A Network management architecture for robust packet routing in optical access network", Internal Report, MIT, March 2001.
- M.J. O'Mahony et al.; "The Application of Optical Packet Switching in Future

Communication Network"; IEEE Communications Magazine, March 2001.

M. Joseph Francisco, et. al.; "Interdomain Routing In Optical Networks"; Proceedings of SPIE Opticomm, 2001.

N. Jerram; "MPLS in Optical Networks"; White Paper, Data Connection, October 2001.

P. Bonenfant et al.; "Framing Techniques for IP over Fibre"; IEEE Network, July/August 2001.

P. Brittain and A. Farrel; "MPLS Traffic Engineering: A choice of Signaling Protocol"; White Paper, Data Connection, January 2000.

R. Ramaswami; K. N. Sivarajan. Optical Networks: a practical perspective. Morgan Kaufman, 1998. S. Jeong et al.; "Optical BGP Routing Convergence in Lightpath Failure of Optical Internet"; ETRI Journal, vol. 24, n. 2, April 2002.

T. W. Um, et. al.; "Signaling and Control Procedures Using Generalized MPLS Protocol for IP over an Optical Network"; ETRI Journal, Vol 24, Number 2, April 2002.

U. Black; Optical Networks. Prentice Hall, 2002.

W. Goralski; "Optical Networking & WDM"; Osborne/McGraw-Hill, 2001.

Xiao, X. Hanna, A., Bailey, B. and Ni, L.M.: "Traffic Engineering with MPLS in the Internet", IEEE Network, Vol. 14 No. 2 Mar-Apr 2000.

Y. Rekhter, T. Li; "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)"; rfc1771.

Y. Xu, et. al.; "A BGP/GMPLS Solution for Inter-Domain Optical Networking"; Internet Draft. Work in Progress.