

Introdução a Redes Ópticas

Carlos H. M. S. Timóteo, Diego A. Albuquerque, Elliackin M. N. Figueiredo, Rafael P. Gomes

Departamento de Sistemas e Computação
Universidade de Pernambuco (UPE) – Recife, PE – Brasil

{chmst, daa, emnf, rpg}@dsc.upe.br

Resumo. *Este relatório descreve os tópicos introdutórios sobre redes ópticas. A abordagem analítica é feita com o objetivo de mostrar a evolução de redes ópticas indo desde as mais simples como a rede X.25 até as atuais redes WDM e suas variações. São descritos alguns dos principais dispositivos ópticos, a arquitetura e topologias dessas redes e os algoritmos de roteamento como o RWA. Concluímos que a evolução das tecnologias de transmissão de dados baseadas em fibra óptica está permitindo dar um salto significativo na vazão e eficiência das redes*

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.

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

A primeira rede de longa distância 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, porém não eram adequadas para a transmissão de dados devido à característica do tráfego de dado ser em rajada, o que tornava a utilização do meio não otimizado. Na década de 70 vieram as redes de comutação de pacotes, também conhecidas como redes X.25, que 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 tem como principal objetivo garantir a transmissão confiável sobre o enlace físico, implementando também controles de erro e fluxo sobre o enlace. Por último, a camada física realiza a codificação/decodificação e a função de timing. A sinalização nessas redes é realizada in-band.

Na década de 80, com o advento da fibra ótica, 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 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.

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 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.

Na 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 Multiplexing). Neste caso, fala-se de taxas de transmissão da ordem de dezenas de Tbps.

As redes totalmente ópticas tiveram, também, sua evolução. Em um primeiro estágio, tinha-se o chamado “serviço de lighthpath”. 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. 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.

2. Dispositivos Ópticos

Nas arquiteturas de redes ópticas, a fonte, o meio de transmissão e o detector óptico são os dispositivos sempre presentes, sendo assim classificados com dispositivos ópticos básicos. Devido a problemas como interferência, atenuação do sinal no meio de transmissão e a dispersão intermodal e intramodal, a rede óptica torna-se inoperável. Para torná-la operável, precisava-se de dispositivos que desempenhassem funções semelhantes aos dos presentes em redes eletrônicas convencionais.

A primeira idéia que se teve foi utilizar os mesmos dispositivos eletrônicos nas redes ópticas e criar dispositivos específicos que fizessem a transformação do sinal no domínio óptico para elétrico.

Nesse caminho, foram desenvolvidos outros dispositivos ópticos como Repetidor, Amplificador, Switch, OADM (*Optical Add and Drop Multiplexer*), OTM (*Optical Terminal Multiplexer*), OXC (*Optical Cross-Connect*), Multiplexador e Demultiplexador, Filtros Ópticos, SHG (*Second Harmonic Generation*), Splitter e Coupler, Controlador de Polarização, Moduladores e outros.

2.1 Fontes Ópticas

Fontes ópticas ou transmissores ópticos são os dispositivos que irão transformar o sinal elétrico a ser transmitido em sinal óptico. Hoje em dia, a maioria dos transmissores é feito de semicondutores.

2.1.1 LED (*Light Emitting Diodes*)

LEDs são diodos semicondutores que tem uma junção p-n e quando elétrons livres da banda de condução se recombinam com “buracos” eles entram na banda de valência que tem uma energia mais baixa e assim uma onda eletromagnética é emitida.

As principais características do LED são baixo custo, baixa energia de saída, incoerente (relações de fases indefinidas), relativo amplo espectro produzido e baixa modulação.

2.1.2 LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)

LASERs produzem os melhores tipos de ondas eletromagnéticas para redes ópticas. No LASER um elétron é estimulado e ao ir para um estado de repouso libera um fóton, o fóton entra em ressonância com o material excitado que vai liberando mais fótons. O comprimento de onda depende do material que emite luz e da forma de energizá-lo.

As principais características dos LASERs são mais caros que LEDs, emissão coerente, com largura espectral estreita, capacidade de emissão de alta potência, foco, pequeno espalhamento angular permitindo melhor acoplamento em fibras ópticas mono-modo.

2.2 Meio de Transmissão

Os principais meios de transmissão são as fibras ópticas e o espaço. No espaço, feixes de onda são direcionados no meio físico.

2.2.1 Fibras Ópticas

Uma fibra óptica é um guia de onda eletromagnética, um meio totalmente isolado que fornece propriedades particulares a fim de aumentar a eficiência da transmissão do sinal. As grandes dificuldades no uso de fibras são o acoplamento da onda eletromagnética à fibra e a ligação de fibras separadas.

Com LASER fica mais fácil acoplar o feixe de luz dentro da fibra e para a ligação delas existem técnicas eficientes e conectores que fazem com que as perdas nesses pontos sejam as mínimas possíveis.

2.3 Detectores Ópticos

Nos detectores ou receptores o sinal óptico é transformado em elétrico. Os tipos predominantes de detectores de luz estão baseados nos princípios de ionização num semicondutor. As quatro importantes

características dos receptores são responsividade, largura espectral da resposta, tempo de resposta e ruído produzido.

2.3.1 Foto-Diodo P-I-N

O funcionamento do foto-diodo é o inverso do LED. A adição de um material intrínseco faz com que diminua a capacitância na junção, aumente a probabilidade da entrada de fóton, pois o volume do material aumenta e favorece a transmissão da corrente por *drift*.

2.3.2 Foto-Diodo Avalanche (Avalanche PhotoDiode)

APDs amplificam o sinal durante o processo de detecção. Um fóton atinge o receptor e libera um elétron que é acelerado num campo elétrico e atinge outra camada de material na qual pela ionização do choque no material, outros elétrons são liberados e assim por diante até atingir o material coletor. Dessa forma, aumentando a sensibilidade do receptor.

2.4 Outros Dispositivos

2.4.1 Amplificador e Repetidor

Um amplificador óptico amplifica o sinal diretamente sem transformar esse sinal em elétrico. Amplificadores são confiáveis, flexíveis, usado com WDM e mais baratos que Repetidores. O repetidor é capaz de recompor o sinal e eliminar o ruído, no entanto, eles precisam transformar o sinal óptico em elétrico.

Alguns podem ser construídos a partir do íon Érbio (+3) que ao receber um fóton é estimulado e libera energia ao ir para um nível mais estável. O Érbio pode ter diferentes estados energéticos.

2.4.2 Switch

Um modulador digital é um switch muito rápido. Ele fornece um meio de trocar de um caminho para outro. Por exemplo, um DOS (*Digital Optical Switch*) faz a troca com a mudança do índice de refração sob influência de um campo magnético produzido pelo *Switch*.

2.4.3 OADM (Optical Add and Drop Multiplexer)

Esses dispositivos são responsáveis pela adição e remoção de sinais num determinado comprimento de onda que são processados por transmissores e receptores, respectivamente. Ele é composto por amplificadores, demultiplexador e multiplexador. Os sinais de entrada são amplificados e os sinais de saída são separados por comprimentos de onda. Dessa forma, nós configuramos o tráfego local da rede.

2.4.4 OTM (Optical Terminal Multiplexer)

Ele está posicionado nas extremidades das ligações ponto-a-ponto para multiplexação e demultiplexação de diferentes comprimentos de onda. O OTM é composto por um *transponder*, que é um dispositivo que faz a interface e a ligação de duas redes distintas e que define o funcionamento da rede ao qual ele está associado, um multiplexador WDM e um amplificador óptico.

2.4.5 OXC (*Optical Crossconnect*)

Um OXC é um switch mais versátil, ele tem duas saídas e duas entradas. No estado “bar” a entrada passa diretamente para sua saída padrão. No estado “cross” as entradas se cruzam e são repassadas nas outras saídas. Assim nós podemos ter quatro tipos diferentes de arranjo. Além disso, ele oferece funcionalidades de provisão de serviços, proteção, monitoramento e processamento de cabeçalhos.

3. Arquitetura e Topologias de Redes Óticas

3.1 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.

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 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.

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. 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.

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.
4. Demultiplexação dos sinais: nesta etapa são utilizados demultiplexadores para separar os sinais transmitidos com uma perda e crosstalk mínimos, direcionando-os ao receptor.
5. Recepção dos sinais: os sinais separados são recebidos por um foto detetor que executa a função inversa da fonte de luz, entregando o sinal original.

3.2 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 e receptores ópticos fixos ou ajustáveis e sintonizáveis, respectivamente. 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.

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.

Uma vantagem deste tipo de rede é sua capacidade de fazer multicast. No entanto existem várias limitações, como por exemplo:

- 1 - 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.
- 2 - Devido ao broadcast do sinal transmitido, este sinal não apresenta potência 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.

3.3 Redes com Topologias Arbitrárias

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 potência 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 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.

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.

3.4 Redes Opticamente Lineares

As redes chamadas de opticamente 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 1. 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. Isso 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.

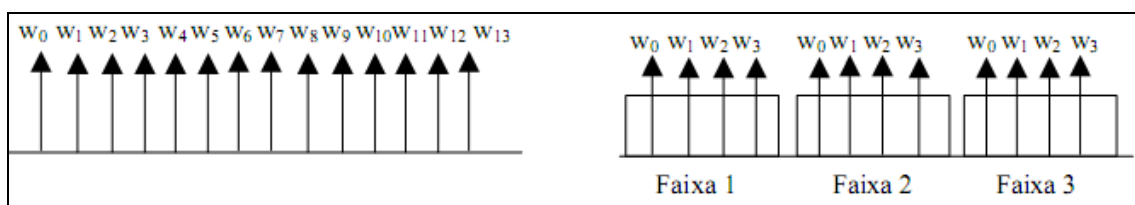


Figura 1. Divisão por comprimento de onda e por faixas de comprimentos de onda.

4. 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 2. 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. 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.

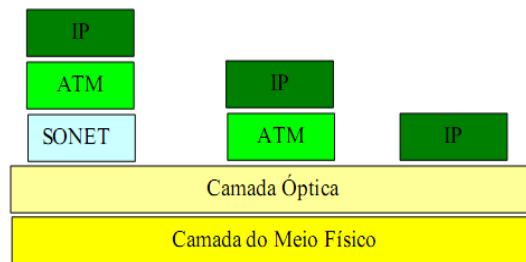


Figura 2. Arquitetura de Camadas da Tecnologia WDM.

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. 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. 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.

4.1 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.

4.2 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.

4.3 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”.

5. Conclusão

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 instalada.

6. Bibliografia

- 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 Ópticas"; 20º Simposio Brasileiro de Redes de Computadores; Buzios - RJ, maio de 2001.
- E. Mannie; "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture", 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.
- 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.
- U. Black; Optical Networks. Prentice Hall, 2002.
- W. Goralski; "Optical Networking & WDM"; Osborne/McGraw-Hill, 2001.