

## 1.

### INTRODUÇÃO

A indústria das comunicações tem passado, nos últimos anos, mundialmente, por profundas transformações. A liberação, desregulamentação, expansão global tornaram-se características de todos os mercados, e paralelamente, são exigidos cada vez mais avanços em termos de tecnologia e do desenvolvimento de novos produtos e serviços. Com o avanço de novas tecnologias, novos problemas também surgiram.

O advento da *Internet*, por exemplo, modificou as características dos tráfegos que eram transmitidos nas redes de comunicação antigamente. O perfil dos usuários também foi modificado. Os usuários passaram a exigir uma maior demanda de banda para tráfego de dados com altas taxas. Entretanto esses dados não poderiam ficar estagnados nos nós das redes. Eles precisavam ser processados e transmitidos em tempo quase que real. O conceito de rede totalmente óptica surge para tentar suprir essas necessidades. Mas, ainda existiam os problemas de roteamento dos pacotes ópticos. As redes de comunicação hoje em dia ainda possuem muitos dispositivos eletrônicos, o que significa que um pacote óptico precisa ser convertido para elétrico para ser ampliado e roteado para depois serem reconvertidos para óptico. Isso causa um gargalo nos nós das redes ópticas, gerando atraso na transmissão dos dados. A solução foi a criação e implementação de um novo método de roteamento de tráfego, uma nova tecnologia que aliasse custo-benefício com segurança das redes e eficiência na transmissão de dados. Ou seja, a arquitetura dos roteadores precisava ser revista e adequada aos novos padrões. As múltiplas plataformas de roteadores existentes nas redes centrais (do inglês *backbones*) precisavam se transformar em uma plataforma única de roteadores. Essa plataforma deveria ser escalonável e segura.

Entretanto, implementar uma nova tecnologia não é uma das tarefas mais fáceis. Há sempre um período de adaptação entre a teoria e a realidade. E, com a tecnologia de roteamento óptico, não poderia ser diferente. É claro que os primeiros roteadores ópticos não eram perfeitos e acabavam sempre em dois extremos: ou eles suportavam rotear dados de altas taxas, mas para isso levavam

bastante tempo de processamento ou eles processavam os dados de forma rápida, porém não suportavam tráfegos de altas taxas. Hoje a tecnologia de roteadores ópticos avançou e tem-se no mercado roteadores rápidos, eficazes e pequenos.

Mas ainda existem alguns obstáculos. O maior deles é de roteamento e atribuição de comprimento de onda. Rotear e atribuir comprimentos de ondas nos percursos de uma rede totalmente óptica, sem que haja perda de sinal óptico nem gargalos nos nós de roteamento, é uma tarefa difícil. Existem várias maneiras de se tratar o problema e vários algoritmos foram desenvolvidos para minimizarem os problemas de roteamento óptico.

Apegando-se a tais fatos, o objetivo deste estudo é apresentar um algoritmo heurístico que trate do problema de alocação e roteamento de comprimentos de onda em uma rede totalmente óptica, visando minimizar os custos de transmissão de dados entre os seus nós.

Conforme mencionado anteriormente, existem vários algoritmos que tratam de alocação e roteamento de comprimentos de onda. Um deles se adequou perfeitamente a situação descrita para o nosso problema e nos forneceu a solução ótima para o mesmo. Isso permitiu a comparação dos resultados obtidos em ambos os programas, através de simulações, como será vista no capítulo 4. A descrição do problema e suas soluções serão vistos no capítulo 3.

O capítulo 1 faz um *overview* sobre o mercado de telecomunicações, suas limitações e desenvolvimentos tecnológicos.

O capítulo 2 nos fornecerá uma breve descrição dos conceitos básicos das redes ópticas. Esses conceitos auxiliou e foram empregados na descrição do problema e nas soluções encontradas para o mesmo.

E, finalmente, no capítulo 5 tem-se as conclusões e comentários pertinentes.

## 1.1

### Importância das redes ópticas

Sem dúvida nenhuma, estamos na era da informação e na economia globalizada. É impossível fazer negócios, com um elevado nível de competitividade, sem dispor de redes de comunicação extremamente velozes e capazes de suportar o tráfego de dados, voz e imagens simultaneamente e com elevada confiabilidade [14].

Assim, cada vez mais necessita-se de redes com maior capacidade, a preços baixos. Esta demanda é alimentada por diferentes fatores. O incrível avanço da *Internet* e o mundo virtual, trouxe usuários que consomem grandes quantidades de largura de banda devido a transferência de dados que envolvem vídeo e imagens. Acrescenta-se o fato de que uma chamada telefônica de um usuário conectado à *Internet* dura muito mais tempo de que uma chamada telefônica comum de voz, resultando em um significativo aumento da carga das redes telefônicas. Paralelamente, os negócios fundamentam-se, crescentemente, nas *intranets* e *extranets* – essencialmente redes de alta velocidade – para suas operações cotidianas. Além disso, as informações devem ser acessíveis a qualquer pessoa como se estas estivessem armazenadas localmente. Assim, pode-se prever a necessidade de redes com gigantesca capacidade para prover a infra-estrutura necessária em muito pouco tempo [3].

Para suprir esta demanda por largura de banda e para dispor de novos serviços, os operadores de rede foram buscar uma nova tecnologia. As redes ópticas surgiram para suprir essa necessidade.

As redes de comunicação facilitam a troca de informações e de outros recursos em uma comunidade de usuários geograficamente distribuída. As tradicionais redes de telefonia (comutação de circuitos) e de dados (comutação de pacotes) são especialmente planejadas para a alocação e o compartilhamento de serviços de voz e dados respectivamente. Redes com comutadores ATM e roteadores IP fornecem uma capacidade similar para uma grande variedade de serviços faixa-larga e de multimídia.

A maior parte destas redes de telecomunicações atualmente em uso ( incluindo várias redes especializadas como, por exemplo, a TV a cabo) possuem fibras ópticas como infra-estrutura. Mas só isto não classifica as mesmas como redes ópticas. Atualmente, na prática, nos casos em que a fibra óptica é usada como infra-estrutura, ela assume apenas o papel de meio de transmissão, substituindo, diretamente, o cobre. Suas propriedades – extraordinária largura de banda, baixa perda, baixo custo, compactabilidade, flexibilidade, imunidade a ruído e a interferências eletromagnéticas, segurança, privacidade e resistência a corrosão [4] - superam em muito as de outros meios e embora a tornem uma tecnologia fantástica, as mesmas não se encontram interligadas em rede até o momento em que são interconectadas numa arquitetura estruturada apropriada.

Uma rede óptica é uma rede de telecomunicações com enlaces de transmissão que são fibras ópticas e com uma arquitetura projetada para explorar suas características únicas, descritas no parágrafo anterior. Uma arquitetura para as redes ópticas de alto desempenho envolve combinações complexas de dispositivos ópticos e eletrônicos. O termo redes ópticas não necessariamente refere-se a redes puramente ópticas, mas envolve algo mais do que um conjunto de fibras terminadas por comutadores eletrônicos [23].

Redes totalmente ópticas são aquelas nas quais o caminho entre os nós inicial e final permanece inteiramente óptico do início ao fim. Tais caminhos são chamados de caminhos de luz (do inglês *lightpath*). Cada caminho de luz pode ser opticamente amplificado ou ter seu comprimento de onda alterado em algum ponto, sendo porém, um caminho puramente óptico [14].

As motivações para se pensar em redes totalmente ópticas refletem uma particular promessa das fibras em satisfazer a grande demanda por:

- largura de banda;
- alta confiabilidade;
- transparência de protocolo, ou seja qualquer tipo de dado tem acesso a rede, não sendo necessário o cumprimento de protocolos para trafegar na rede;
- simplicidade de operação e gerência [5].

### 1.1.1

#### **Largura de Banda**

A crescente demanda por largura de banda pelos usuários apresenta-se, historicamente, sob vários aspectos, mas, particularmente, um novo foco está causando mudanças de significado profundo e de permanência: a *Internet*. Essa demanda por largura de banda tem gerado uma grande aceleração no mercado.

A cada ano o fator anual de crescimento em taxa de bits requerida por cada usuário da *Internet* é alto e bastante assustadora, pois os usuários da web buscam por resposta cada vez mais rápido, da ordem de milissegundos ou segundos.

Difícil é saber o quanto a próxima inovação tecnológica exigirá em termos de largura de banda por usuário – fala-se e já se estão fazendo testes para transmissão de HDTV via *Internet* [30].

Para resolver o problema de necessidade de maior banda para tráfego de dados, via rede, surgiu a multiplexação no domínio do comprimento de onda (WDM – Wavelength Division Multiplex). Entretanto, isso criou um outro problema: o roteamento dos pacotes de informações.

Os pacotes normalmente eram detidos nos roteadores das redes de transmissão, causando atrasos na transmissão dos mesmos. Com isso, surgiu a necessidade de desenvolvimento de comutadores ( do inglês, *switches*) ópticos de pacotes. Uma rede óptica de pacotes consiste de comutadores ópticos de pacotes interligados com fibras que multiplexam comprimentos de onda. Cada cadeia de informação da origem ao destino é dividida em pequenos pacotes, que são individualmente roteados. O pacote contém um cabeçalho e uma carga útil (do inglês, *payload*). No cabeçalho estão contidas todas as informações de roteamento e a carga útil é a própria informação que está sendo transmitida. Em cada nó da rede, o cabeçalho do roteador procura em uma tabela de roteamento seu novo destino e, assim, encaminha o pacote para o próximo nó, até seu destino final [6].

### 1.1.2

#### **Desempenho de Erro**

Contrariamente à transmissão por rádio ou por fio de cobre, a fibra possui a intrínseca capacidade de levar as taxas de erros a níveis arbitrariamente baixos usando apenas o cálculo de desempenho (do inglês, *budget*) do enlace ao invés dos métodos tradicionais de codificação da fonte e canal, formatos exóticos de modulação, e outros. Com as redes ópticas é suficiente o uso de uma chave *on-off* com o uso, se necessário, de uma amplificação. Existem duas razões para isso: a grande largura de banda disponível e, o fato de que os fótons não interagem, como os elétrons em movimento, gerando, por exemplo, linha cruzada, ruído e produzindo erros. Por causa da grande largura de banda, a compressão de dados não é empregada com frequência e a codificação do canal é substituída pela melhora de desempenho do cálculo do enlace.

### 1.1.3

#### **Transparência de Protocolo**

A transparência de protocolo é alcançada quando o caminho, inteiramente óptico ou não, oferece a flexibilidade aos usuários finais de se entenderem mutuamente sem a necessidade de se estabelecer às regras ditadas pelo protocolo da rede.

Em redes não ópticas, como no caso das redes SDH (Synchronous Digital Hierarchy), um dado para trafegar na mesma precisa atender alguns pré-requisitos de padronização, se a padronização dos dados não atenderem às normas das redes SDH, os mesmos não serão processados por esta rede.

Historicamente, observa-se que a grande transparência do sistema de telefonia foi um dos motivos de sua popularidade e a base para uma quantidade de serviços.

### 1.1.4

#### **Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenção**

Redes ópticas são estruturalmente muito simples. Não possuem lógica ou memória ao longo do caminho sendo basicamente constituídas de componentes passivos. Os poucos possíveis pontos de falhas se devem tipicamente a perdas de potência. Tais redes são bem mais confiáveis do que tradicionais LANs (Local Area Network), MANs (Metropolitan Area Network) e WANs (Wide Area Network) baseadas em potentes componentes eletrônicos de multiplexação por divisão do tempo, TDM (Time Division Multiplex).

Alguns problemas de gerenciamento são encontrados nas redes ópticas, principalmente no que diz respeito ao acesso as informações de *status* dos componentes que compõem as redes ópticas. As operações nas redes totalmente ópticas apresentam problemas para acesso remoto da informação de diagnóstico. Como exemplo, é desejável que os amplificadores ópticos – os mais utilizados são os EDFAs (Erbium Doped Fiber Amplifier) - presentes tenham seus vários parâmetros monitorados constantemente. Outros componentes, porém, provavelmente nunca necessitarão de monitoração.

## 1.2

### **Papel das redes ópticas no mercado atual**

A enorme quantidade de largura de banda disponível em uma única fibra (dezenas de tera Hertz) é ao mesmo tempo uma grande conquista e um desafio muito grande. É tecnologicamente impossível explorar toda a largura de banda disponível em um único canal de alta capacidade. Assim, para tornar eficiente o uso da fibra é essencial canalizar esta largura de banda. Isto é mais facilmente conseguido superpondo-se vários sinais concorrentes em uma única fibra [7], cada um em um comprimento de onda diferente; ou seja usando a tecnologia WDM. A relativa facilidade com que o sinal pode ser manipulado em divisão de comprimentos de onda, contrapondo-se a multiplexação por divisão do tempo, sugere que a tecnologia óptica WDM seja particularmente apropriada para atender as novas necessidades do mercado. Nessas redes cada transmissor e/ou receptor

óptico está sintonizado para transmitir e/ou receber um comprimento de onda específico, e vários sinais em diferentes comprimentos de onda compartilham uma mesma fibra.

A tecnologia óptica oferece uma nova dimensão, o comprimento de onda, para executar as funções de multiplexação, roteamento e comutação. Em essência e em geral, é esta nova dimensão que distingue as redes totalmente ópticas das demais redes.

É comum classificar as redes WDM indicando a escala de comprimento de onda de interesse e o grau de complexidade exigido na seleção e controle dos mesmos. Assim, temos dois tipos de classificação de redes WDM:

- Nas chamadas redes de WDM denso, o espaçamento entre os diferentes comprimentos de onda é da ordem de 1nm.
- Para as redes de múltiplo acesso por divisão de frequência óptica, o espaçamento dos comprimentos de onda é da ordem da largura de banda do sinal ou da taxa de bits.

As estruturas totalmente ópticas baseiam-se nas topologias genéricas existentes podendo, assim, serem divididas em três classes: o enlace ponto-a-ponto, a rede estrela tipo *broadcast and select* ( mais usada em LAN's e MAN's) e a rede em malha (do inglês, *mesh*) de roteamento de comprimento de onda. A figura 1.1 ilustra os casos [8 e 9].

O enlace ponto-a-ponto não é uma rede propriamente dita, mas as questões como confiabilidade e o uso de fibras bidirecionais, além das elevadas taxas de transmissão entre os pontos, fazem com que a configuração de um enlace ponto a ponto em tecnologia óptica se torne uma importante ferramenta para as redes de comunicação nos dias de hoje, principalmente para fazerem a interligação entre os usuários finais e os nós centrais da rede de transmissão de dados. Ou para interligarem um centro comercial às redes centrais (*backbone*). Um exemplo desse enlace é apresentado no primeiro desenho da figura 1.1.

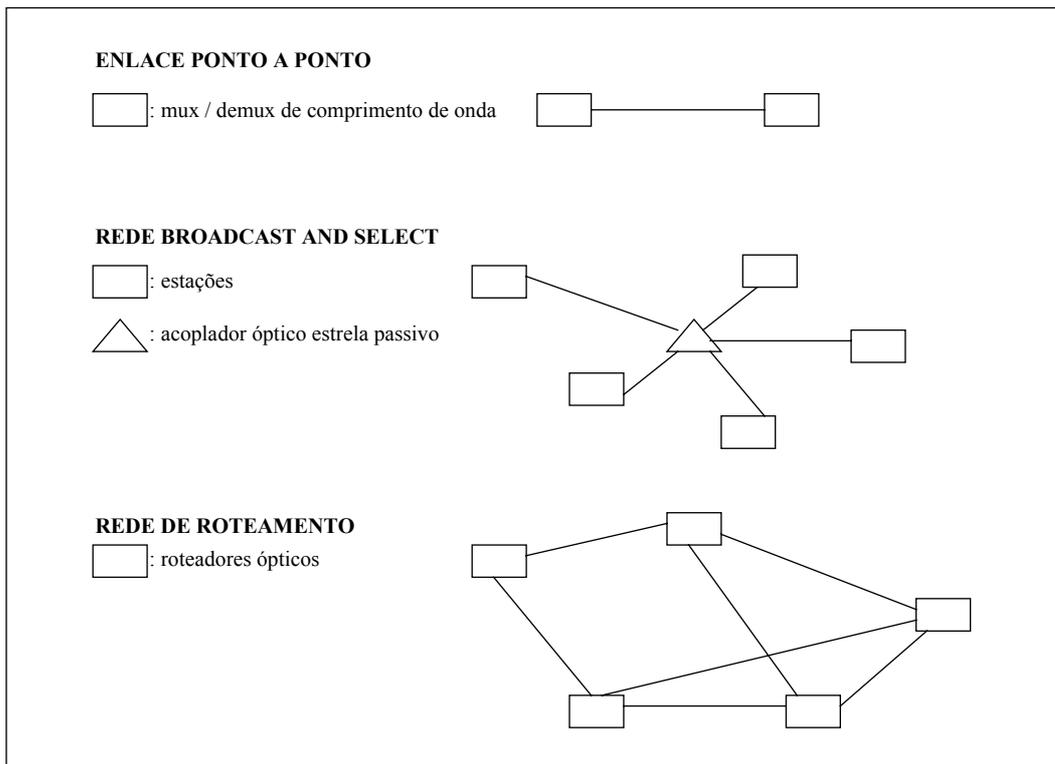


Figura 1.1: Tipos de redes WDM

As redes estrela do tipo *broadcast and select* (redes onde todos os nós se comunicam entre si e os dados que entram em um determinado nó é enviado simultaneamente para todos os outros) operam através de atribuição de uma única frequência óptica para o lado transmissor de cada porta da rede, combinando todos os sinais transmitidos no centro da rede em um acoplador estrela e, então espalhando a mistura para o lado receptor de todas as portas. A princípio, pode-se dotar de sintonia, requerida para o acesso dinâmico, todos os receptores ou os receptores e os transmissores. As principais questões a serem abordadas nestas redes incluem não apenas o protocolo de acesso, mas também a tecnologia para a sintonia. Além dos altos custos, surgem outros problemas. Primeiro, a potência de cada transmissor é desperdiçada. Segundo, o máximo número de nós da rede corresponde ao conjunto de comprimentos de onda disponíveis ( capacidade de resolução ).

Para resolver os problemas de disponibilidade e de custo das redes acima mencionadas, surgiram as redes de roteamento de comprimento de onda. Esse tipo de rede permite uma centena de nós, provê maior número de comprimentos de onda e garante a escalonabilidade através do uso do mesmo comprimento de onda em diversos locais. Além disso, evita o desperdício de energia através da canalização de rotas específicas. Como o nome já diz, em cada nó intermediário e entre os nós finais, a luz que chega em uma porta num dado comprimento de onda é roteada por uma e apenas uma única porta de saída pelo roteador de comprimento de onda composto única e exclusivamente por caminhos ópticos. Este componente, em princípio, pode ser fixo ou comutável, e pode gerar mudanças ou não no comprimento de onda do sinal em questão [10 e 11].

### 1.3

#### **Roteamento em redes ópticas**

A função de roteamento em uma rede de comunicação é o de alocar recursos - como meios de transmissão, repetidores, sistemas intermediários, entre outros - para transmissão de dados entre os nós origem e destino em uma rede. A alocação desses recursos está intimamente ligada à forma de multiplexação dos meios de transmissão.

No nosso caso, as redes de roteadores precisam estar preparadas para a transmissão de comprimentos de onda. Essas redes consistem de roteadores de comprimentos de onda conectados a múltiplos enlaces ópticos em diferentes comprimentos de onda. Os roteadores ópticos são utilizados para opticamente comutarem os sinais / pacotes entrantes em um nó da rede para o nó de saída determinado. Esses roteadores podem ter a facilidade de conversão de comprimentos de onda, ou seja, podem comutar o comprimento de onda entrante no nó para outro diferente na saída deste mesmo nó[29].

As vantagens em se trabalhar com redes de roteadores ópticos são grandes. As redes de roteadores de pacotes ópticos não necessitam que seus nós de comutação sejam capazes de rotar grandes quantidades de pacotes. Além disso, seus procedimentos de recuperação de erros são mais eficientes do que das redes de

roteadores não ópticos, já que se podem retransmitir somente aqueles pacotes ópticos onde foram detectados erros e, não, a mensagem inteira.

O maior problema encontrado em redes de roteadores não ópticos de pacotes ópticos é o tempo de processamento dos mesmos nos nós de roteamento intermediários da rede, devido ao fato de que os pacotes ópticos necessitam ser convertidos em elétricos para serem processados e tratados para depois serem reconvertidos em ópticos. Isso acaba gerando altos atrasos na transmissão das informações entre os nós origem - destino. Isso para as aplicações da *Internet* é muito ruim.

O roteador óptico de pacotes consiste em quatro partes: a interface de entrada, módulo de chaveamento, interface de saída e a unidade de controle. A interface de entrada é principalmente utilizada para delimitação e alinhamento de pacotes, extração de informação do cabeçalho do pacote e retirada do cabeçalho do pacote. O módulo de chaveamento é o coração do switch e é usado para o roteamento óptico dos pacotes. A interface de saída é usada para regenerar os sinais ópticos e inserir o cabeçalho. A unidade de controle, como o nome já diz, controla o roteamento dos pacotes, baseada nas informações de cabeçalho dos pacotes.

Quando um pacote chega a um roteador óptico de pacotes, ele primeiro é processado pela interface de entrada. O cabeçalho e a carga útil (*payload*) são separados e o cabeçalho é convertido para o domínio elétrico e é processado eletricamente pela unidade de controle. A carga útil permanece como um sinal óptico durante todo o processo. Depois que o payload passa pelo módulo de roteamento, o cabeçalho é reinserido. Neste momento, o cabeçalho já foi reconvertido em óptico pela interface de saída.

## 1.4

### **Vantagens e Desvantagens do roteamento óptico**

A maior parte das redes de comunicação hoje em dia ainda possui muitos sinais eletrônicos o que significa que os sinais ópticos precisam ser convertidos em elétricos para serem ampliados, regenerados ou roteados e, depois reconvertidos

para ópticos. Isso gera atrasos na transmissão dos sinais. Muitas informações trafegando nas redes ópticas precisam ser roteadas em muitos nós antes de chegar ao seu destino final. Nestes nós encontram-se os roteadores que farão com que o sinal seja encaminhado para o seu destino final via o melhor caminho, levando-se em consideração uma série de fatores como custo, menor caminho, confiabilidade, entre outros.

A maior vantagem em se utilizar roteadores ópticos nos nós das redes ópticas é que não existe a necessidade de se converter o sinal de óptico para elétrico e depois para óptico. Com isso, além de eliminarmos o problema de atraso de na transmissão dos dados / pacotes ópticos, ainda conseguimos baratear os custos dos roteadores. Outra importante característica dos roteadores ópticos é que com a diminuição da eletrônica de conversão, os roteadores se tornaram equipamentos fisicamente menores.

As aplicações dos roteadores ópticos nas redes são inúmeras. As principais delas são:

- Comutadores ópticos: São usados como nós de redes para garantir o roteamento óptico de circuitos e pacotes. O tempo de roteamento é da ordem de milisegundos (ms). No caso das aplicações da *Internet*, esse tempo deixa a desejar, já que exigem um roteamento da ordem de nanosegundos (ns). Mas para a comutação de circuitos, o mesmo é ótimo.
- Multiplexadores add-drop ópticos: São usados para adicionar ou retirar específicos comprimentos de onda de um sinal formado por múltiplos comprimentos de onda e, com isso, evitar o processamento eletrônico. Para isso, é necessário o uso de switches de comprimento de onda seletivos. O roteamento é feito na ordem de milisegundos (ms).
- Switches de restauração e proteção da fibra: São usados pequenos switches para a restauração das fibras no caso de falha. Para essa aplicação servem os switches de 2x2 de matriz e eles trabalham com tempo de roteamento da ordem de milisegundos.
- Monitoração do sinal: Para gerenciar as redes de comunicação. Os comutadores de comprimento de onda seletivo são mais usados para esse tipo de aplicação.

O ideal seria que a tecnologia de roteadores ópticos tivessem as seguintes características:

- Alta velocidade: velocidade de roteamento da ordem de nanosegundos (ns);
- Portas capazes de suportar tráfego de até 40 Gbps;
- Escalonabilidade: crescimento flexível de 10 portas até 100 portas;
- Independência de banda: habilidade para suportar maiores taxas de dados em cada porta [14].

Os pesquisadores vêm desenvolvendo uma série de roteadores ópticos com características distintas, mas que eliminam a necessidade de conversão óptica-elétrica e vice-versa. Os roteadores mais promissores são: MEMS (**M**icro-**E**lectro-**M**echanical Systems), acústico – ópticos, termo-ópticos, holográficos, lasers sintonizáveis [15].

Esses roteadores surgiram há pouco tempo no mercado e ainda estão em período experimental. Algumas dificuldades ainda não foram resolvidas e muitos pesquisadores ainda não estão plenamente satisfeitos com seus roteadores ópticos, mas estão cada vez mais se aproximando de uma solução que alie qualidade, com eficiência e custo-benefício.

## 1.5

### **Roteamento óptico x roteamento elétrico**

Os comutadores ópticos, conforme já dito anteriormente, possuem uma capacidade de banda muito maior para transmissão de dados do que os comutadores elétricos. Com o crescimento do tráfego de dados nos meios de transmissão, devido ao advento da *Internet*, o comutador elétrico passou a ser um gargalo nas redes de transmissão. O surgimento dos comutadores ópticos ocorreu para eliminar esse problema. Além de mais rápidos e de suportarem tráfego de até 10Gbit/s (maior banda de transmissão), os comutadores ópticos tratam os mesmos de forma transparente, o que facilita o transporte de dados via a rede. Quanto

menos protocolos coexistentes em rede, mais flexível será a rede e menos atrasos ela gerará nos pacotes.

Os comutadores elétricos são mais robustos e não possuem um bom alcance, por isso são necessários muitos deles em uma rede de transmissão. Em cada nó de comutação, o pacote é desmontado e montado novamente, ou seja, ele é processado, por isso os comutadores devem ser robustos. Como eles também não possuem um bom alcance, um maior número de comutadores é necessário. Cada um destes comutadores na rede aumenta o atraso na entrega dos pacotes em seu destino final. Desta forma, os pacotes possuem atrasos se comparados com pacotes enviados em redes com comutação óptica. Essa é mais uma das vantagens dos comutadores ópticos.

A principal desvantagem dos roteadores ópticos em relação aos roteadores elétricos é que os roteadores ópticos ainda são de difícil implementação. Como esses roteadores estão sendo estudados recentemente, muitos problemas ainda estão sem solução, o que muitas vezes impossibilita a comercialização dos mesmos. Problemas como contenção e falta de sincronismo precisam ser melhor combatidos para permitirem o seu desenvolvimento.

Além disso, os roteadores ópticos, por serem de uma tecnologia mais nova, são bem mais caros que os seus equivalentes elétricos.

Mas, a principal diferença entre os dois comutadores é que o elétrico utiliza buffers eletrônicos que são compostos de memórias randômicas (RAM - **R**andom **A**ccess **M**emory), enquanto que o comutador óptico utiliza buffers ópticos que são compostos de múltiplas linhas de atraso (ODLs – **O**ptical **D**elay **L**ines). O tamanho dos buffers ópticos é limitado pelo comprimento das linhas de atraso, e normalmente são pequenos e não expansíveis [12 e 13].

Hoje em dia o que é usado no mercado das telecomunicações é um modelo híbrido de roteadores, onde seu interior é eletrônico, mas suas entradas e saídas são ópticas. Com isso, o cabeçalho, em cada nó da rede, é transformado em um sinal elétrico e tratado à parte. Depois de lido, ele é reconvertido em um sinal

óptico. Enquanto isso a carga útil continua intacta no domínio óptico. Isso garante a integridade da carga útil e, conseqüentemente, do pacote, diminuindo riscos de perda de pacote e a taxa de erros de pacotes (PER – **P**acket **E**rror **R**ate) e aumentando, desta forma, a qualidade de serviço.