

1 Introdução

A transmissão por fibra óptica tem representado uma das funções chave no crescimento das redes de telecomunicações, uma vez que a fibra oferece uma banda muito mais elevada (aproximadamente 50 Tbps) que a dos cabos metálicos e, além disso, é menos susceptível a vários tipos de interferências eletromagnéticas e a outros efeitos indesejáveis.

As redes ópticas de telecomunicações têm sido utilizadas com grande intensidade ao longo dos últimos 10 anos. Novas soluções de redes de telecomunicações incorporando à rede óptica na camada 1 e sua interação com as camadas 2 e 3 tem sido estudadas.

A migração de funcionalidades das camadas superiores (camadas 2 e 3) dos *switches* e roteadores para a camada óptica eliminará ou reduzirá a utilização de ferramentas computacionais complexas nestas camadas. O modelo de camadas OSI (*Open System Interconnection*), definido há décadas será utilizado com muito maior eficácia.

Até alguns anos atrás, os roteadores IP (*Internet Protocol*) eram interconectados por circuitos virtuais fornecidos por *switches* ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). A rede ATM, por sua vez, utilizava circuitos multiplexados no tempo (TDM - *Time Division Multiplexing*) de uma rede SONET/SDH. A evolução das redes fez com que se reduzisse significativamente a camada ATM e, assim, os roteadores IP são instalados diretamente com o equipamento SONET/SDH (*Synchronous Optical Network / Synchronous Digital Hierarchy*). O aumento da taxa de operação das portas dos roteadores e de sua capacidade agregada vem tornando atrativa a ligação direta de roteadores IP, utilizando MPLS (*Multiprotocol Label Switching*), com canais WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), que passam a ser roteados por OXCs (*Optical Cross-Connect*).

Tudo indica que o próximo passo nesta evolução será a utilização de redes OPS (*Optical Packet Switched*). Estas redes serão transparentes aos protocolos e

facilitarão a integração com a camada WDM, tornando-se assim soluções atraentes para as operadoras de telecomunicações. A Figura 1.1 ilustra esta evolução da pilha de protocolos descrita anteriormente.

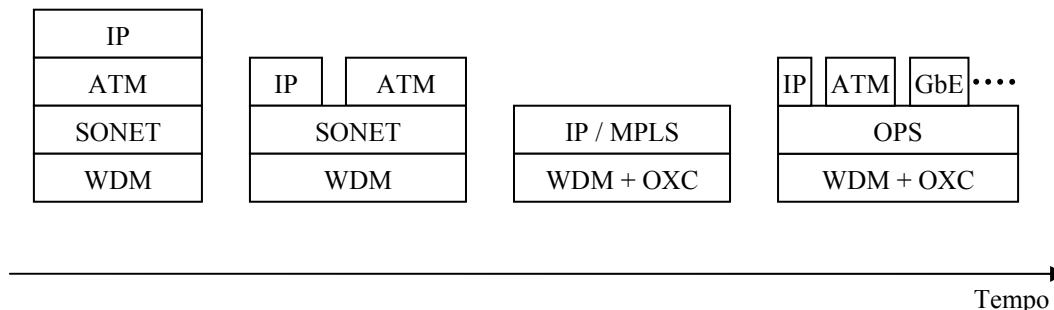


Figura 1.1: Evolução da pilha de protocolos das redes de dados.

No início das comunicações ópticas, as aplicações utilizavam somente fibras, fontes de luz e fotodetetores para a formação de enlaces ponto-a-ponto. Com o desenvolvimento de dispositivos ópticos de nova geração (ativos e passivos), um conjunto de novas aplicações passou a ser pesquisado. Atualmente, estuda-se a utilização de novas arquiteturas ópticas, capazes de implementar funções complexas na camada física.

Redes ópticas de última geração deverão utilizar chaveamento fotônico em redes metropolitanas e de longa distância. Um pacote óptico poderá, então, movimentar-se ao longo destas redes, roteado por funcionalidades adicionadas à camada física e as conversões O/E e E/O ocorrerão somente nos nós origem/destino.

1.1. Histórico da Topologia *Manhattan Street*

A rede *Manhattan Street* (rede MS) foi proposta por Maxemchuk em 1985 [1], [2] como uma alternativa para uma rede *backbone* de área metropolitana. Estas redes podem ser descritas como um arranjo linear, bidimensional, de nós, semelhante à configuração de ruas e avenidas de Manhattan. Desde esta época então, as redes MS tornaram-se uma alternativa atraente, não apenas para redes ópticas de chaveamento de pacotes, como também para a própria estrutura (*fabric*) de *switches* totalmente ópticos.

Muitos trabalhos envolvendo as redes MS têm sido feitos desde que esta topologia foi proposta. Em 1989, Khasnabish publicou um trabalho onde se obteve a mínima distância média entre nós da rede [3]. Neste mesmo ano, Chung apresentou um esquema de roteamento para redes MS que suportavam simultaneamente datagramas e circuitos virtuais [4]. Ainda em 1989, Maxemchuck publicou um trabalho onde era comparado o desempenho das técnicas de deflexão e *store-and-forward* em redes MS síncronas com pacotes de tamanhos fixos [5]. Obteve-se neste trabalho que a vazão máxima de redes sem filas é de 30% a 45% menor do que a vazão máxima de redes com filas infinitas. Quando se utilizou um *loop* do tamanho unitário ligando a saída de cada nó com sua entrada, a vazão aumentou de 20% a 25%. Ao adicionar mais um *loop* em cada nó, a vazão aumenta de 4% a 7% e inserindo-se mais *loops*, a vazão vai aumentando de quantidades cada vez menores.

Em 1991, Albertengo publicou um trabalho onde foi analisado o desempenho do roteamento por deflexão em redes MS submetidas a tráfego de rajadas [6]. Provou-se que a vazão é praticamente independente do padrão de rajada do tráfego (*traffic burstiness*).

Em 1993, foram apresentados trabalhos propondo modelos analíticos para analisar o desempenho do roteamento por deflexão [7] e [8]. Ainda neste ano, Chlamtac propôs um *switch* óptico controlado eletronicamente que implementa o roteamento por deflexão de pacotes [9].

Um ano mais tarde, Chung apresentou um trabalho comparando o custo e o desempenho das redes MS com redes de topologia *2-D Torus* [10]. Chegou-se à conclusão que as redes MS e redes *2-D Torus* possuem desempenhos semelhantes, no entanto as redes MS possuem custo inferior.

Em 1995, Wei-Tsong Lee propôs um esquema binário de endereçamento [11]. Este esquema de endereçamento permite que novos nós sejam inseridos na rede sem que se torne necessário alterar os endereços dos nós já existentes. Além disto, este esquema também reduz o processamento necessário para se fazer o roteamento, apresentando uma regra simples de roteamento distribuído que pode ser facilmente implementada em *hardware*.

Nos anos de 1995 e 1996, MirFakhraei apresentou diversos trabalhos analisando o desempenho do protocolo ATM quando utilizado em redes MS [1], [13], [14].

Em 1999, Bononi publicou um trabalho analisando o desempenho de redes MS com roteamento por comprimento de onda. Neste trabalho, chegou-se à conclusão que, quando os nós da rede são providos de $n \lambda$'s, onde n é igual ao número de receptores/transmissores, o roteamento por deflexão sem filas, em conjunto com conversores de comprimento de onda, torna-se uma opção interessante para solucionar o problema de contenção em redes de pacotes [15].

Em 2003, Kitani apresentou um algoritmo para designar comprimentos de onda em redes MS [16].

Em 2004, o autor desta dissertação, apresentou um trabalho expondo alguns dos resultados que serão apresentados nos capítulos a seguir [17].

1.2.

Redes *Manhattan Street* e Roteamento por Deflexão de Pacotes

Roteamento por deflexão de pacotes é, essencialmente, um esquema de controle de congestionamento que tenta evitar a perda de pacotes. Os pacotes defletidos podem ter que percorrer um caminho mais longo até chegar a seu destino final. Quando não são utilizadas filas, o roteamento por deflexão também é conhecido como *Hot Potato Routing*, já que nenhum nó da rede retém o pacote [15].

A tecnologia WDM proporcionou a oportunidade de multiplicar a capacidade das redes de fibras instaladas. A funcionalidade das redes MS, por ser associada a aplicações do tipo roteamento de pacotes totalmente ópticos (*all-optical packet switching*), apresentam grandes vantagens, tais como: alta velocidade, transparência e facilidade de configuração. Estas vantagens tornam a tecnologia muito promissora [9].

A facilidade proporcionada pela estratégia do roteamento por deflexão das redes MS torna estas redes bastante atraentes, pois possibilitam grande economia nos procedimentos associados a seu gerenciamento [10].

1.3.

Motivação

Pode-se então destacar como principais elementos motivadores desta dissertação os seguintes itens.

- A utilização de redes totalmente ópticas em futuro próximo e distante;
- O desenvolvimento de ferramentas computacionais capazes de descrever e analisar o comportamento das redes MS, dado que a simulação deve preceder um teste de bancada, cuja realização é complexa e dispendiosa;
- A simulação deverá também preceder o teste de infra-estrutura de redes com vários nós, pois, neste caso, a realização e avaliação será sempre extremamente dispendiosa e complexa;
- A pesquisa e o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que permita a simulação de uma rede MS com roteamento por deflexão, capaz de avaliar o desempenho de redes totalmente ópticas antes de testes práticos envolvendo uma infra-estrutura multinós.

1.4. Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são, dentre outros:

- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para simulação de redes ópticas com nós quase totalmente ópticos;
- Utilização da ferramenta desenvolvida para avaliação do desempenho de redes totalmente ópticas de topologia *Manhattan Street* com 9 nós;
- Análise dos resultados para redes que utilizam protocolos IP e UDP/TCP aplicados diretamente sobre o meio óptico;
- Avaliação da performance de latência das redes em taxas elevadas e distâncias superiores a 1000 km;
- Avaliação de redes metropolitanas totalmente ópticas;
- Simulação de configurações que estão sendo desenvolvidas no laboratório do CETUC;
- Avaliação integrada dos resultados obtidos.