

1 Introdução

1.1. Difusão Seletiva e a Evolução nas Redes Ópticas

O rápido crescimento da Internet nos últimos anos, a conseqüente superação do tráfego de voz pelo tráfego de dados e a perspectiva de que, em um futuro breve, este último representará 90% do tráfego das operadoras (Jourdan et al., 2001; Listani & Eramo, 2000) têm levado pesquisadores e profissionais da área a investirem em soluções que otimizem toda a infra-estrutura de redes (centrais e metropolitanas) para aplicações baseadas no protocolo IP (Veeraraghavan et al., 2001). Aliado a isso, os recentes avanços na tecnologia de transmissão óptica, mais especificamente na multiplexação por comprimento de onda (“WDM – Wavelength Division Multiplexing”) (Murthy & Gurusamy, 2002; Mukherjee, 2000), vêm fazendo com que esta seja vista como a solução para a crescente demanda por serviços de banda larga e a conseqüente escassez de capacidade de transmissão de dados (comumente chamada de largura de banda pela comunidade de redes (Crowcroft et al., 1999)). Desta forma, uma das principais metas atuais é prover uma arquitetura de integração entre as duas tecnologias (IP e WDM), baseada em mecanismos de controle mais flexíveis e alinhados com a engenharia de tráfego, como o MPLS (“Multi-Protocol Label Switching”) (Awduche et al., 1999; Magalhães & Cardozo, 2001; Rosen et al., 2001) e seus aperfeiçoamentos, MPλS (“Multi-Protocol Lambda Switching”) (Awduche & Rekhter, 2001) e GMPLS (“Generalized MPLS”) (Mannie, 2003).

Neste cenário evolutivo, a difusão seletiva (“multicast”) tem sido identificada como fundamental para o bom desenvolvimento do tema de uma forma geral, entre outros motivos, em virtude de sua melhor adequação para as aplicações multimídia tipicamente de grupo e por sua capacidade de melhor utilização dos recursos de rede. No entanto, qualquer proposta para difusão seletiva neste contexto envolve tratar não apenas de aspectos diretamente

relacionados à esta, mas também de questões ligadas aos recentes avanços na tecnologia de transmissão óptica e à interação de IP com WDM.

Para explorar toda a capacidade dos enlaces de fibras ópticas (~50 Tbps) com o uso de WDM é preciso aprimorar as tecnologias de comutação atuais, essencialmente eletrônica com interfaces ópticas. Os equipamentos OEO (interface óptica - comutador eletrônico - interface óptica) limitam a capacidade das redes, já que hoje não são capazes de realizar a comutação em taxas superiores a algumas dezenas de Gigabits/s (10 Gbps para roteadores IP e 40 Gbps para comutadores SONET/SDH). A lei de Moore¹, que extrapola a futura capacidade de processadores eletrônicos, prevê a duplicação da capacidade destes a cada 18 meses, o que significa que levaria mais 15 anos para aumentar a capacidade atual dos equipamentos em 1000 vezes. Atualmente, a comutação de uma transmissão com WDM somente é possível tratando cada comprimento de onda (λ) individualmente com um comutador OEO (Figura 1.1).

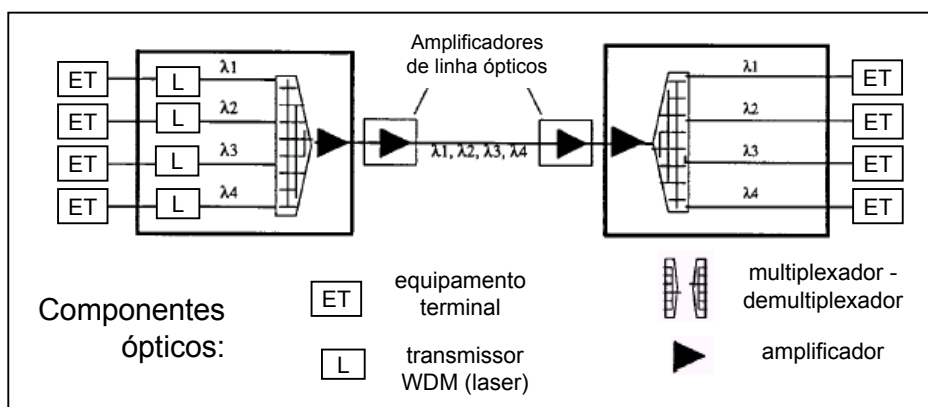


Figura 1.1 – Sistema WDM: multiplexação por comprimento de onda (Mukherjee, 2000).

Para comutar com um único equipamento o fluxo de tráfego possível com transmissão óptica, hoje é necessário o uso de comutadores puramente ópticos (equipamentos OOO), onde é dispensada a conversão dos sinais recebidos para o domínio eletrônico (Dobbelaere et al., 2002). Entretanto o processamento e armazenamento ópticos de informação não possuem a mesma flexibilidade da eletrônica, o que torna mais difícil a comutação óptica de pacotes. As dificuldades de se construir comutadores de pacotes OOO estão relacionadas a dois desafios básicos: ler e processar (bits de controle) em velocidades muito altas; e armazenar “fotons”, ou durante o processamento dos bits de controle, ou para fazer

¹ - Evolução da densidade de transistores em circuitos integrados, enunciado por Gordon Moore da Intel Corporation em 1965 (<http://www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm>).

multiplexação estatística nas interfaces de saída. Há três abordagens para lidar com estas questões, amplamente discutidas em (Abelém & Stanton, 2002a), que são: a comutação de lambdas (comutação de circuitos no contexto óptico), a comutação de rajadas ópticas (“OBS – Optical Burst Switching”) (Qiao e Yoo, 1999), e a comutação de pacotes ópticos (“OPS – Optical Packet Switching”) (Guilemot, 1998). Dentre elas, o paradigma OBS vem gradativamente recebendo maior atenção dos pesquisadores e profissionais da área, pois quando comparado com a comutação de lambdas e a comutação de pacotes ópticos, possui características que lhe proporcionam vantagens em diferentes quesitos. Entre elas, o paradigma OBS possui melhor utilização de largura de banda e menor latência no estabelecimento dos canais em relação à comutação de lambdas, ao mesmo tempo que apresenta menor complexidade de implementação que a comutação de pacotes ópticos.

No que diz respeito a difusão seletiva, o modelo atual adotado na Internet, denominado IP Multicast, após quase quinze anos desde sua proposição, continua sendo intensamente investigado (Rodrigues et al., 1999; Abelém & Stanton, 2000; Costa et al., 2001a; Holbrook & Cain, 2003) e ainda sujeito a muitos questionamentos (Diot et al., 2000; Barros & Stanton, 2001). A proposta de Deering, como definida na RFC1122 (Deering, 1989) e em publicações relacionadas (Deering et al., 1996; Estrin et al., 1998), apesar de procurar fornecer uma solução para todos os tipos de aplicações de grupos, acaba não atendendo plenamente nenhum tipo e ainda apresenta sérios problemas estruturais. O modelo de Deering não possui um gerenciamento de grupo efetivo, com controle sobre as adesões e transmissões a um grupo, assim como não oferece controle na alocação de endereços de grupos. Outro problema crítico está relacionado à manutenção de informações de estado por grupo nos roteadores que pertencem à árvore multiponto. Tal procedimento viola o princípio original da Internet de não manter informações de estado nos elementos centrais de rede, introduzindo maior complexidade e restrições de escalabilidade.

No contexto de IP sobre WDM, a difusão seletiva diretamente na camada WDM possui diversas vantagens em relação a difusão seletiva apenas na camada IP (Qiao et al., 1999). Primeiro, os pacotes de dados não precisarão sofrer conversão OEO (óptica-eletrônica-óptica) em cada roteador ao longo da árvore

multiponto, o que é altamente ineficiente. Segundo, com o conhecimento da topologia física, a qual pode ser diferente daquela vista pelas camadas superiores, pode-se construir árvores de distribuição multiponto mais eficientes. Terceiro, a difusão seletiva na camada WDM oferece um maior grau de transparência, em termos de taxa de transmissão e de formato de codificação. Por outro lado, a difusão seletiva na camada WDM terá pela frente novos desafios, entre os quais pode-se ressaltar o fato de nem todos os nós da rede estarem aptos a ramificar os feixes de luz, ou a alterar seus comprimentos de onda.

Diante do exposto acima, ficam evidentes as novas perspectivas de pesquisa que estão surgindo da interseção das redes ópticas, mais especificamente das redes WDM, com as inter-redes IP, oferecendo uma grande oportunidade para se analisar e reformular alguns aspectos da difusão seletiva adotada na Internet.

1.2. Objetivos

O objetivo desta tese é propor um conjunto de adaptações à difusão seletiva, em especial ao IP Multicast, para torná-lo menos complexo, mais escalável em relação ao número de grupos ativos simultaneamente e mais adequado às redes baseadas em comutação óptica. A este conjunto de modificações demos o nome MIRROR (“Multicast IP para Redes baseadas em Rajadas Ópticas Rotuladas”). Basicamente, a proposta MIRROR revê a necessidade de todos os roteadores ao longo da árvore de distribuição multiponto manterem informações de estado relacionadas a esta, bem como sugere adequações na forma como os caminhos multiponto são estabelecidos quando se emprega comutação baseada em rótulos na difusão seletiva. A MIRROR explora as virtudes da comutação de rajadas ópticas (OBS) e da comutação baseada em rótulos gerais (GMPLS), as quais são novas e promissoras abordagens que vêm se destacando neste cenário evolutivo na área de redes, por sinalizarem com soluções mais inteligentes e flexíveis na alocação de recursos.

Para alcançar o objetivo da tese, realizamos: uma avaliação dos principais desafios da difusão seletiva no contexto de IP sobre WDM; uma análise das alternativas propostas para integrar IP com redes WDM baseadas nos diferentes paradigmas de comutação óptica; e um exame detalhado, tanto de OBS como da proposta GMPLS. Além disso, investigamos as recentes experiências realizadas na Europa e na América do Norte para integrar IP com redes WDM.

1.3. Descrição do Trabalho

O desenvolvimento deste trabalho envolveu estudos e investigações sobre a evolução em três áreas principais: a difusão seletiva, as redes puramente ópticas e a comutação por rótulos. Na primeira produzimos um levantamento dos principais problemas e das adaptações de maior destaque propostas ao IP Multicast (Abelém & Stanton, 2000). Tal levantamento, além de procurar o embasamento teórico necessário ao desenvolvimento do trabalho, buscou a identificação das características que mais contribuíam para melhorar as funcionalidades ou para aumentar a complexidade de gerenciamento da difusão seletiva.

No que diz respeito às redes puramente ópticas, realizamos também um estudo onde analisamos os modelos teóricos e as tecnologias nas quais deverão ser baseadas as futuras gerações de inter-redes IP (Abelém & Stanton, 2002a). Para tanto, investigamos a evolução das tecnologias de transmissão óptica e os paradigmas de comutação óptica, enfatizando-se as perspectivas de integração dessas alternativas com o mundo IP. Neste contexto, uma atenção especial foi dada ao paradigma de comutação de rajadas ópticas (OBS), por este possuir características e funcionalidades que lhe proporcionam vantagens em diferentes quesitos quando comparado com a comutação de lambdas e a comutação de pacotes ópticos.

A comutação baseada em rótulos também foi objeto de nossos estudos em função das interseções importantes que ela possui com as duas áreas anteriores. Em relação à interação com difusão seletiva, a comutação baseada em rótulos, apesar de oferecer perspectivas de redução de complexidades em vários aspectos, ainda possui uma série de questões sem solução definitiva (Acharya, 1999; Ooms, et al., 2002). Quanto à interação com redes ópticas, a comutação baseada em rótulos vem sendo considerada a melhor estrutura de integração entre a tecnologia IP e a WDM, porque o MPLS, além de poder ser usado como um poderoso instrumento para engenharia de tráfego, é facilmente adequado à tecnologia WDM quando lambdas são usados como rótulos.

O conjunto de adaptações sugeridas na proposta MIRROR baseou-se nas investigações realizadas nas três áreas acima para identificar as melhorias que poderiam ser feitas no modelo de difusão seletiva adotado na Internet para melhor adequá-lo às redes baseadas em comutação óptica, sem que se comprometesse

suas principais funcionalidades. Desta forma, adotamos na MIRROR os paradigmas OBS e GMPLS, os quais são mais flexíveis e inteligentes na alocação dos recursos, ao mesmo tempo que mantivemos as informações de estado relativas aos grupos apenas nos roteadores de borda, utilizando um esquema de encapsulamento para transportar tais informações para os nós internos. Aliado a isto, mantivemos, com algumas adaptações em relação ao IP Multicast tradicional, o endereçamento de grupo e os protocolos de sinalização e de roteamento multiponto.

Para avaliar a nossa proposta, investiu-se em duas frentes distintas, uma baseada na análise comparativa entre a MIRROR e as principais propostas semelhantes apresentadas na literatura, e outra baseada no desenvolvimento de um protótipo da proposta no simulador NS (“Network Simulator”) (2003), com o intuito de referendar os resultados da análise comparativa. No que tange à análise comparativa, buscamos, entre as alternativas consagradas na literatura, aquelas que atacavam os mesmos problemas abordados neste trabalho. Paralelamente, identificamos os principais parâmetros adotados na avaliação de propostas relacionadas à difusão seletiva. Neste quesito destacaram-se: requisitos de informações de estado (Tian et al., 1998), custo com informações de controle (Dubray, 1998), custo de encaminhamento dos pacotes (Tian et al., 1998) e custo da árvore multiponto (Costa et al., 2001a).

O processo de desenvolvimento do protótipo envolveu uma série de etapas preliminares consistindo, tanto de estudos sobre o funcionamento, a composição interna e as metodologias para adicionar funcionalidades ao simulador (Abelém, 2001), como da operação e do desenvolvimento de novos módulos ao NS (Abelém et al., 2001). O desenvolvimento do protótipo propriamente dito demandou, além da inserção das funcionalidades que simulassem o comportamento da proposta, a criação de uma nova estrutura de nó e a alteração de módulos já existentes (OBS e MPLS), para tornar possível a simulação de redes comutadas por rajadas ópticas rotuladas.

1.4. Organização da Tese

No Capítulo 2 são apresentados e analisados os modelos teóricos e as tecnologias nas quais deverão ser baseadas as futuras gerações de inter-redes IP. Para tanto, primeiro investiga-se os diferentes paradigmas de comutação óptica,

enfatizando-se a comutação de rajadas ópticas (OBS). Em seguida, avalia-se a evolução na comutação baseada em rótulos, em especial o GMPLS. Por fim, analisa-se as diferentes arquiteturas para integrar IP e WDM, baseadas nos diferentes paradigmas de comutação óptica.

No Capítulo 3 são discutidas as principais questões para a adequação da difusão seletiva às futuras redes baseadas em comutação óptica. Primeiramente é feita uma avaliação do IP Multicast. Depois, são apresentadas as motivações e os principais desafios para a adequação da difusão seletiva, em especial do IP Multicast, às redes baseadas em comutação óptica, onde detalha-se as questões relacionadas à construção das árvores multiponto e à interação entre a difusão seletiva e o MPLS e seus sucessores.

O Capítulo 4 detalha a proposta MIRROR e as respectivas melhorias e adaptações ao IP Multicast. Inicia definindo o modelo referência de inter-redes adotado na tese. Em seguida, descreve os principais aspectos da proposta para a construção de árvores de distribuição multiponto no contexto de comutação óptica rotulada e as questões referentes ao compartilhamento dessas árvores. Depois trata dos aspectos de sinalização e controle no que tange a interação da difusão seletiva com GMPLS. Finaliza com algumas considerações sobre proteção e recuperação.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados das análises realizadas com a proposta MIRROR. Inicialmente é mostrada uma avaliação dos benefícios e possíveis problemas do uso de OBS como paradigma de comutação. Em seguida, é apresentada uma comparação entre a MIRROR e as principais alternativas propostas ao IP Multicast, comparando-se: requisitos de informações de estado, custo com informações de controle, custo de encaminhamento dos pacotes e custo da árvore multiponto. Depois são apresentados resultados de simulações com um protótipo da proposta MIRROR desenvolvido no NS (“Network Simulator”). Encerra-se o capítulo com uma análise crítica sobre os resultados obtidos.

O capítulo final faz uma avaliação geral da proposta MIRROR, resume as contribuições da tese e sugere possíveis trabalhos futuros.