

6

Conclusão e Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões Gerais

O objetivo principal desta tese foi 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. Este conjunto de modificações denominou-se MIRROR (“Multicast IP para Redes baseada em Rajadas Ópticas Rotuladas”).

O conjunto de adaptações incluídas na proposta MIRROR procurou utilizar a experiência adquirida pela comunidade de redes ao longo desses quase quinze anos de difusão seletiva na Internet, aliada à flexibilidade e à versatilidade de paradigmas recentes, como a comutação de rajadas ópticas(OBS) e a comutação baseada em rótulos gerais (GMPLS).

Para melhorar a escalabilidade do modelo em relação ao número de grupos ativos simultaneamente, a MIRROR propôs restringir os pontos onde as informações de estado relativas ao grupo eram armazenadas ao longo da árvore de distribuição multiponto apenas aos roteadores de borda dos domínios. Para que os nós internos fossem capazes de replicar as informações corretamente, a MIRROR aproveitou as características dos paradigmas OBS e GMPLS e empregou um esquema de encapsulamento para transportar tais informações para os nós internos. Desta forma, as informações sobre a árvore multiponto passaram a ser encapsuladas e enviadas através de reservas antecipadas, durante o estabelecimento de caminhos comutados por rótulos. A partir disso, as rajadas ópticas passaram a ser comutadas por rótulos ao longo de uma árvore de distribuição pré-estabelecida. Tal esquema, além de melhorar a escalabilidade do modelo, também se mostrou mais apropriado para o contexto da comutação baseada em rótulos, pois transfere para as bordas a inteligência e as funções mais “pesadas” da rede, deixando os nós internos apenas com as tarefas de encaminhamento através de rótulos.

O risco que se corre em reduzir as informações de estado relativas ao grupo, armazenadas ao longo da árvore multiponto, é aumentar o custo com informações de controle e comprometer a escalabilidade do modelo de outra forma. Na MIRROR, apesar de ter ocorrido um aumento do custo com informações de controle, o que é inevitável, tal aumento não comprometeu a escalabilidade da proposta. Na MIRROR, como visto no Capítulo 5, as informações relativas à árvore crescem a medida que aumenta o número de nós internos que fazem parte da árvore de distribuição. Ou seja, para a MIRROR, no pior caso, o custo será limitado pelo número de nós internos do domínio. Além disso, deve-se ressaltar que a proposta MIRROR emprega o paradigma baseado na comutação de rajadas ópticas rotuladas, o que implica que apenas as primeiras mensagens de controle precisam conter tais informações adicionais. Por fim, não podemos esquecer que o pacote de controle irá trafegar em um canal dedicado, o que atenua os custos adicionais causados pelo esquema de encapsulamento.

Por outro lado, a MIRROR manteve, com algumas adaptações, as funcionalidades de endereçamento de grupo e dos protocolos de sinalização e de roteamento multiponto. Através da análise de algumas importantes propostas ao IP Multicast, relatada no Capítulo 5, foi possível constatar que quando tais funcionalidades são eliminadas, aumenta de forma considerável o custo com encaminhamento dos pacotes. Em função disso, optou-se na MIRROR por adaptá-las ao invés de excluí-las. Uma das adaptações adotadas foi o esquema de canal, onde existe apenas um emissor por grupo e somente árvores originadas no emissor são empregadas. Com esta abordagem pôde-se adotar um esquema de endereçamento de grupo mais robusto, baseado na dupla $\langle S, G \rangle$, onde 'S' indica o endereço IP do emissor e 'G' o endereço IP classe D do grupo. Ao mesmo tempo, com apenas uma fonte por grupo elimina-se também a necessidade do uso de árvores compartilhadas, da forma como são construídas no IP Multicast. Como ressaltado no Capítulo 3, além de excessiva complexidade de gerenciamento, as árvores compartilhadas são inadequadas ao domínio óptico e ao contexto da comutação baseada em rótulos, principalmente quando lambdas são adotados como rótulos.

Outro característica da MIRROR é a sugestão de adoção de protocolos de roteamento baseado em estados de enlaces, com as devidas extensões ao contexto óptico e com os aprimoramentos sugeridos no Capítulo 4 (Seção 4.3). A adoção

de protocolo deste tipo facilita a utilização de mecanismos baseados em engenharia de tráfego para a geração de árvores de distribuição multiponto. Tais protocolos vêm se mostrando uma alternativa bastante interessante no contexto de redes ópticas em virtude das diversas possíveis restrições com os dispositivos internos das redes, como apresentado no Capítulo 3 (Seção 3.4.2).

No que diz respeito a adoção da comutação baseada em rótulos gerais (GMPLS) e da comutação de rajadas ópticas (OBS), a primeira vem sendo considerada a melhor estrutura de integração entre IP e WDM, pois se adequa facilmente à tecnologia WDM quando comprimentos de ondas são usados como rótulos, além de funcionar como poderosa ferramenta de engenharia de tráfego. O paradigma OBS, por sua vez, quando comparado com a comutação de lambdas e a comutação de pacotes ópticos, possui vantagens em diferentes quesitos. Por exemplo, o paradigma OBS exibe melhor utilização de largura de banda, menor latência no estabelecimento dos canais e maior adaptabilidade em relação à comutação de lambdas, ao mesmo tempo que apresenta menor complexidade de implementação que a comutação de pacotes ópticos, conforme apresentado no Capítulo 5 (Seção 5.3). Como ponto negativo, existe o fato do paradigma OBS ainda carecer de maiores avaliações sobre o impacto no desempenho de redes reais do seu esquema de sinalização não confiável.

Para avaliar o conjunto de adaptações sugeridas na proposta MIRROR optou-se por trabalhar em duas frentes. A primeira consistiu em realizar uma análise comparativa entre a MIRROR e as principais alternativas propostas ao IP Multicast, e a segunda no desenvolvimento de um protótipo da proposta no simulador NS, objetivando consolidar os resultados da análise comparativa.

Na análise comparativa avaliou-se a MIRROR e as demais propostas através do cálculo de parâmetros consagrados na literatura na investigação de propostas relacionadas à difusão seletiva. Os resultados da análise, apresentados no Capítulo 5, demonstraram que a MIRROR é uma proposta equilibrada, propondo melhorias em determinados aspectos do modelo, sem eliminar funcionalidades que podem comprometer a aplicabilidade da proposta, como mencionado nos parágrafos anteriores.

A análise comparativa também demonstrou que a proposta MIRROR é adequada ao contexto das futuras inter-redes ópticas baseadas no GMPLS, uma vez que suas características facilitam o emprego da comutação de rótulos, assim

como minimizam, tanto o processamento dos nós internos no encaminhamento dos dados, como a necessidade de armazenamentos temporários desses nós, os quais são dificuldades conhecidas da comutação óptica.

Quanto ao desenvolvimento do protótipo da MIRROR no simulador NS, primeiramente foi preciso criar uma nova estrutura de nó, estendendo a atual. Em seguida, foram necessárias alterações em módulos já existentes (OBS e MPLS), para tornar possível a simulação de redes comutadas por rajadas ópticas rotuladas. Só depois foi possível a implementação de algumas das funcionalidades que simulassem o comportamento da proposta. Os resultados obtidos na simulação atenderam ao objetivo de referendar os resultados encontrados na análise crítica, como pôde ser observado na Seção 5.5.2. Entretanto, apesar das funcionalidades acrescentadas, o protótipo da proposta ainda oferece apenas condições limitadas para simular e analisar o comportamento de redes LOBS. Alguns aspectos, como, por exemplo, o retardo nos roteadores de borda e as reservas antecipadas, ainda precisam da adição de outras funcionalidades para poderem ser avaliados de maneira apropriada.

6.2. Contribuições Secundárias

Além do conjunto de adaptações sugeridas na proposta MIRROR, este trabalho também apresentou uma série de contribuições menores para o tema difusão seletiva em inter-redes IP baseadas em redes ópticas. Entre elas, pode-se destacar inicialmente a apresentação e análise das principais questões sobre os modelos teóricos e sobre as tecnologias nas quais deverão ser inspiradas as futuras gerações de inter-redes IP baseadas em redes ópticas, mais especificamente em redes WDM. Neste contexto, ressalta-se o exame mais detalhado sobre o paradigma OBS e suas diferentes variações de implementação. A evolução na comutação baseada em rótulos e em especial as principais inovações propostas no GMPLS também foram destacadas.

Outras contribuições consistem no sumário das principais propostas apresentadas ao IP Multicast, como também na investigação e análise dos principais desafios para a adequação da difusão seletiva, em especial do IP Multicast, tanto ao contexto da comutação baseada em rótulos como às futuras redes ópticas. Neste último tópico, foi dada atenção especial às questões relacionadas à construção de árvores multiponto.

6.3.Considerações Adicionais e Trabalhos Futuros

Neste trabalho buscamos investigar e desenvolver da forma mais completa possível alguns dos principais aspectos relacionados ao conjunto de adaptações sugeridas na proposta MIRROR. Contudo, algumas questões ainda merecem investigações mais detalhadas. Uma dessas questões diz respeito ao paradigma OBS, que, por ser uma proposta relativamente recente, ainda possui características que necessitam de melhor avaliação. Diversas avaliações vêm sendo realizadas e divulgadas nos últimos anos com resultados satisfatórios, tanto no contexto da comunicação ponto a ponto (Yoo et al, 2000; Dueser et al., 2001), como no âmbito da difusão seletiva (Qiao et al., 1999; Baldine et al., 2002). Porém, alguns temas ainda merecem maiores análises, como por exemplo, o comportamento de protocolos inter-domínios, como o BGP, no contexto do paradigma OBS, e o suporte de redes OBS a serviços diferenciados (diffserv) e a técnicas para oferecer qualidade de serviço de um modo geral. Outro ponto que também merece maior atenção é a adaptação dos mecanismos de proteção e recuperação para redes OBS.

A proposta MIRROR, por ser uma proposta nova, também possui pontos que podem ser melhorados. Por exemplo, o uso de mecanismos de engenharia de tráfego na construção da árvores multiponto. Como mencionado no Capítulo 3, a utilização de mecanismos baseados em engenharia de tráfego para a geração de árvores de distribuição multiponto está sendo bastante incentivada e investigada no contexto de redes ópticas. A realização de testes e simulações do uso destes mecanismos para a construção de árvores multiponto na proposta MIRROR forneceria informações para avaliar o aproveitamento dos recursos da rede em relação ao esquemas tradicionais.

O compartilhamento das árvores de distribuição multiponto, como sugerido no Capítulo 4 (Seção 4.3.1), também é uma questão merecedora de maior atenção, pois os benefícios provenientes deste compartilhamento podem ser consideráveis, em termos de melhor aproveitamento dos recursos.

Outra frente que merece maior desenvolvimento é o protótipo da proposta MIRROR desenvolvido no NS. Apesar de todo o trabalho já empenhado, o protótipo, como mencionado anteriormente, ainda tem funcionalidade limitada. Grande parte do trabalho desenvolvido até agora era devido à adequação e preparação do ambiente para simular o comportamento básico de redes baseadas

no paradigma de rajadas ópticas rotuladas. Contudo, novas funcionalidades ainda precisam ser acrescentadas para que consigamos avaliar questões como o impacto do retardo nos roteadores de borda em virtude da montagem das rajadas e o uso de reservas antecipadas na utilização das redes.

A comutação baseada em rótulos, como o MPLS e seus aperfeiçoamentos, já é um paradigma com eficiência comprovada na literatura (Awduche & Rekhter, 2001; Zagari et al., 2002). Entretanto, testes e simulações com as modificações para o estabelecimento de LSPs sugeridas na proposta MIRROR permitiriam avaliar melhor o impacto dessas alterações no contexto da proposta e da difusão seletiva de um modo geral.

Por fim, não podemos esquecer que são possíveis e desejáveis otimizações no esquema de encapsulamento proposto na MIRROR. Da mesma forma, também seria interessante a realização de investigações da viabilidade de utilização do conjunto de adaptações para a difusão seletiva sugeridas na proposta MIRROR em outros contextos, como o de redes móveis.