

Análise da Proposta MIRROR: Conjunto de Adaptação ao IP Multicast para Redes Baseadas em Comutação Óptica

Antônio Jorge G. Abelém¹

Departamento de Informática – DI
Universidade Federal do Pará - UFPA
Rua Augusto Corrêa, 01
66075-110 Belém – PA, Brasil
e-mail : antonio@ufpa.br ou
abelem@inf.puc-rio.br

Michael A. Stanton²

Instituto de Computação – IC
Universidade Federal Fluminense – UFF
Rua Passo da Pátria, 156, bloco E, sala 350
24210-240 Niterói – RJ, Brasil
e-mail : michael@ic.uff.br

- ¹ - Trabalho realizado como bolsista do Programa PICDT da CAPES, no Departamento de Informática da PUC-Rio.
- ² - Atualmente cedido pela UFF para a Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP-OS), onde ocupa o cargo de Diretor de Inovação.

Resumo

As novas perspectivas de pesquisa que estão surgindo da interseção de IP com redes WDM, oferecem uma grande oportunidade para se reformular alguns aspectos da difusão seletiva e melhor adequá-la as futuras gerações de inter-redes IP. Este artigo analisa a proposta MIRROR, a qual sugere adaptações ao IP Multicast para torná-lo mais escalável em termos de número de grupos ativos simultaneamente, bem como para melhor adequá-lo às inter-redes IP baseada em redes ópticas. Na análise, compara-se a MIRROR com as principais alternativas propostas ao IP Multicast, confrontando parâmetros como: requisitos de informações de estado, custo com informações de controle, custo de encaminhamento dos pacotes e custo da árvore de multiponto.

Palavras-Chave: redes de alta velocidade, difusão seletiva em redes ópticas, IP sobre WDM, comutação de rajadas ópticas (OBS), MPLS Generalizado (GMPLS).

Abstract

New research perspectives opened up by the combination of IP and WDM technologies present an excellent opportunity for reformulating certain aspects of multicast transmission, bringing them more in line with the needs of future generations of IP internetworking. This paper analyses MIRROR, which proposes modifications to traditional IP Multicast in order to improve its scalability as a function of the number of simultaneously active groups, as well as making it more appropriate for use in optically switched networks. In this analysis, MIRROR is compared with other major multicast alternatives, using such parameters as: information state requirements and the costs of control information, packet-forwarding and storing the distribution tree topology.

Keywords: high-speed networks, multicast in optical networks, IP over WDM, optical burst switching (OBS), Generalised MPLS (GMPLS).

1. Introdução

Os recentes avanços na multiplexação por comprimento de onda (“Wavelength Division Multiplexing-WDM”) [MUR02], a qual possibilita uma melhor utilização dos enlaces de fibras ópticas, aliados à consolidação do IP como protocolo dominante das redes convergentes [VEE01], vêm fazendo com que IP sobre WDM seja visto como a base para as futuras gerações de inter-redes. Dentro deste cenário, diversos tópicos de pesquisas têm sido considerados primordiais para o bom desenvolvimento do tema de uma forma geral [MUK00]. Entre eles a difusão seletiva (“multicast”) tem sido identificada como fundamental em virtude de sua melhor adequação às aplicações multimídia de grupo e por sua capacidade de melhor utilização dos recursos de rede.

Para explorar a capacidade total dos enlaces de fibras ópticas (~50 Tbps) com o uso de WDM, as tecnologias de comutação atuais, baseadas em comutação eletrônica com interfaces ópticas, chamadas OEO (interface óptica - comutador eletrônico - interface óptica), precisam ser incrementadas. Os equipamentos OEO 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). Para comutar fluxos de mensagens em taxas mais altas é necessário o uso de comutação óptica (equipamentos OOO), potencialmente mais rápida pois dispensa a conversão para o domínio eletrônico, embora não tenha a mesma capacidade de processamento ou escalonamento. As dificuldades de se construir comutadores de pacotes OOO estão relacionadas a dois desafios básicos: ler e processar (bits de controle) em velocidades bem altas; e armazenar “fotons”, ou durante o processamento dos bits de controle, ou para fazer multiplexação estatística nas interfaces de saída. Há três abordagens para lidar com estas questões, amplamente discutidas em [ABE02a], que são: a comutação de lambdas (comutação de circuitos no contexto óptico), a comutação de rajadas ópticas (“OBS – Optical Burst Switching”) [QIA99a], e a comutação de pacotes ópticos (“OPS – Optical Packet Switching”) [GUI98].

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 [ABE02a]. No paradigma OBS, diferentemente da comutação de lambdas, os canais são alocados dinamicamente, de acordo com a demanda de transmissão. O processo de reserva do canal é rápido, simples e feito sem confirmação, através do envio de um pacote de controle (“BCP – Burst Control Packet”). O BCP é processado eletronicamente por todos os nós intermediários e transita fora da banda, em um canal de sinalização separado. As rajadas de dados (grupo de pacotes) de comprimento variável são mantidas no domínio óptico ao longo dos nós intermediários e enviadas em seguida ao envio do pacote de controle. Caso o BCP falhe no processo de reserva dos recursos em um nó intermediário qualquer, a rajada terá que ser descartada.

O modelo de difusão seletiva adotado na Internet, denominado IP Multicast, após quase quinze anos desde sua proposição, continua sendo intensamente investigado [COS01] [HOL03] e ainda sujeito a muitos questionamentos [DIO00] [BAR01]. O modelo proposto por Deering [DEE89] 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 é a 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 [QIA99b]. 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. Por fim, a difusão seletiva na camada WDM oferece um maior grau de transparência, em termos de taxa de sinalização 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 o comprimento de onda desses.

Diante do exposto acima, fica evidente 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. Nesse sentido, os autores apresentaram em [ABE02b] a proposta MIRROR (“Multicast IP para Redes baseada em Rajadas Ópticas Rotuladas”), a qual sugere adaptações ao IP Multicast para torná-lo mais escalável, em relação ao número de grupos ativos simultaneamente, e melhor adequá-lo às redes baseadas em comutação óptica. A MIRROR explora as virtudes de novas e promissoras abordagens como a comutação de rajadas ópticas (OBS) e o GMPLS (“Generalized Multi-Protocol Label Switching”) [MAN02]. Basicamente, a proposta 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 baseadas em rótulos na difusão seletiva.

Este artigo apresenta uma análise das adaptações propostas em [ABE02b]. Faz-se uma avaliação dos benefícios e possíveis problemas do uso do OBS como paradigma de comutação. Realiza-se também comparações com as principais alternativas propostas ao IP Multicast, confrontando parâmetros como: requisitos de informações de estado, custo com informações de controle, custo de encaminhamento dos pacotes e custo da árvore multiponto.

Além desta seção introdutória, o artigo é composto de mais 4 seções. A seção 2 apresenta os principais trabalhos relacionados. A seção 3 resume a proposta MIRROR, destacando as principais modificações sugeridas no modelo tradicional do IP Multicast. A seção 4 analisa a proposta MIRROR avaliando, tanto as questões relacionadas ao uso dos paradigmas OBS como a eficiência das adaptações propostas ao IP Multicast. A seção 5 apresenta as conclusões gerais e sugere possíveis trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Como mencionado na seção 1, o modelo do IP Multicast continua recebendo muitas críticas [DIO00] [BAR01] e, conseqüentemente, sendo bastante investigado. Entre as propostas mais discutidas recentemente estão aquelas que procuram reduzir a complexidade do modelo e melhorar a sua escalabilidade em termos de número de grupos ativos simultaneamente. Neste contexto, destacam-se: o EXPRESS [HOL99] e seu sucessor SSM (“SSM-Single Source Multicast”) [HOL03], o REUNITE (“REcursive UNIcast TrEes”) [STO00] e seus aprimoramentos [COS01], assim como o XCAST (“eXplicit multiCAST”) [BOI02].

A proposta EXPRESS consiste na adoção de um modelo baseado em canal, no qual cada grupo multiponto tem apenas um emissor e passa a ser identificado unicamente pela dupla (S, G), onde ‘S’ indica o endereço IP do emissor e ‘G’ o endereço IP classe D do grupo. Com apenas uma fonte por grupo, o EXPRESS torna desnecessário o uso de árvores compartilhadas (*,G), da forma como são empregadas no IP Multicast padrão [FEN03]. Essas árvores possuem gerenciamento bastante complexo, principalmente no quesito inter-domínios. Como apresenta soluções simples e eficientes para questões importantes, a proposta EXPRESS passou a receber grande atenção de pesquisadores e profissionais da área, tendo sido criado pela IETF, inclusive, um grupo de trabalho específico sobre o tema, denominado SSM [SSM02]. Contudo, esta abordagem continua mantendo informações de estado por grupo multiponto em todos os roteadores pertencentes à árvore de distribuição, o que compromete bastante a escalabilidade do modelo em termos do número de grupos ativos simultaneamente.

Com o propósito de apresentar uma solução para essa questão de escalabilidade, alguns grupos de pesquisa vêm propondo abordagens que baseiam-se na idéia de que as informações de estado relativas a um grupo multiponto devem ser mantidas apenas nos nós responsáveis pela ramificação na árvore de distribuição (além do nó raiz e dos nós folha) [STO00] [COS01]. Neste contexto, REUNITE foi uma das propostas que ganhou maior visibilidade por implementar a distribuição multiponto baseada na infra-estrutura ponto a ponto (“unicast”). O REUNITE também trabalha apenas com um emissor por grupo, porém não utiliza endereços IP classe D. Ao invés disso, a identificação do grupo e o encaminhamento dos dados são baseados em endereços IP ponto a ponto. Os roteadores que funcionam como pontos de ramificação da árvore de distribuição de um determinado grupo são responsáveis por criar cópias dos pacotes de dados. Nestas cópias os endereços de destino são modificados, de modo que todos os membros do grupo recebam uma cópia da informação. O REUNITE, porém, apresenta problemas na construção de árvores de distribuição multiponto quando tem que lidar com caminhos assimétricos [COS01]. O HBH mantém a idéia base do REUNITE e sugere modificações para corrigir os problemas com roteamento assimétrico.

Uma outra alternativa voltada para a melhoria da escalabilidade, no que diz respeito ao número de grupos ativos simultaneamente, é a XCAST e vem sendo bastante debatida nos últimos anos [BOI02]. Esta proposta elimina todo o esquema tradicional de sinalização por sessão e de manutenção das informações de estado relativas ao grupo nos roteadores multiponto. O XCAST não trabalha nem com um esquema de gerenciamento de grupo, nem utiliza qualquer protocolo de roteamento multiponto. A distribuição dos pacotes para os respectivos receptores é feita somente por comunicação ponto a ponto. Os endereços IP dos receptores de uma sessão XCAST são mantidos apenas pelo emissor desta. Quando este emissor for transmitir ele encapsula os endereços IP de todos os destinatários em cabeçalhos XCAST de cada pacote. Cada roteador no caminho checa esse cabeçalho e encaminha os pacotes com novos cabeçalhos apropriados.

3. Resumo da Proposta MIRROR

Como destacado na seção 1, a interação do IP com WDM está oferecendo uma grande oportunidade para se analisar e reformular alguns aspectos do modelo de difusão seletiva adotado na Internet. Com esse intuito, apresentou-se em [ABE02b] a proposta MIRROR, sugerindo adaptações ao IP Multicast, com o objetivo de torná-lo mais escalável, em termos do número de grupos ativos simultaneamente, e mais adequado as redes ópticas.

A MIRROR trata também, tanto de questões relacionadas à sinalização e controle como de aspectos de proteção e recuperação. Em ambos os casos, sugere-se adaptações

aos esquemas existentes de forma a melhor adequá-los à nossa proposta. Neste artigo, porém, serão descritas em detalhes apenas as sugestões de adaptações ao IP Multicast, já que estas serão avaliadas aqui. As análises específicas, tanto sobre as modificações na parte de sinalização e controle como sobre as questões de proteção e recuperação serão tratadas em trabalhos futuros. Observa-se que o termo MPLS será usado no restante deste artigo de forma genérica, para indicar o uso de MPLS [ROS01], ou de seus aperfeiçoamentos MPλS [AWD01], ou GMPLS [MAN02].

3.1. Modelo de Referência Adotado

O modelo de referência adotado em [ABE02b] consiste de roteadores IP/MPLS conectados via inter-redes ópticas, aptas a realizar difusão seletiva, através de caminhos de luz comutados dinamicamente (Figura 1). As redes ópticas que compõem esta inter-redes são baseadas nos paradigmas OBS e MPLS. A opção pela comutação de rajadas ópticas (OBS), deve-se tanto pela maior eficiência desta, já que ela não necessita que lambdas fiquem dedicados a cada ramo da árvore multiponto, como pela maior adequação desta em um ambiente IP sobre WDM, uma vez que ela minimiza as redundâncias, aumentando a eficiência desses tipos de redes. Já a adoção do MPLS se justifica pela sua flexibilidade e capacidade de engenharia de tráfego, além da facilidade de adequação à tecnologia WDM, usando lambdas como rótulos.

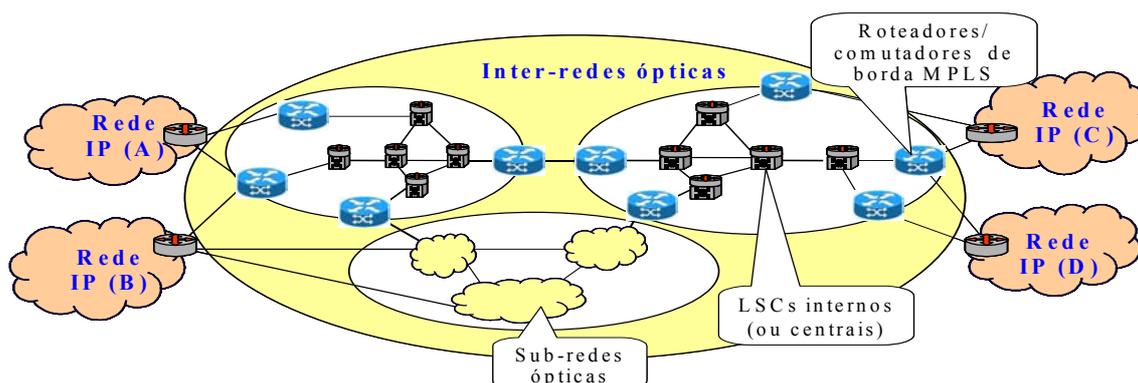


Figura 1 – Modelo de rede adotado na proposta MIRROR.

Supõe-se que as inter-redes ópticas consistam de múltiplas redes ópticas, que possam ser administradas por diferentes entidades. Cada rede óptica pode ser formada por sub-redes compostas de múltiplos dispositivos de comutação óptica, aptos a realizar comutação por rótulos (“Lambda Switching Crossconnects-LSCs”) e interconectados por enlaces ópticos em uma topologia geral, chamada de malha óptica. Esses LSCs podem ser equipamentos de diferentes fabricantes e apenas alguns possuem capacidade de difusão seletiva e de conversão de comprimento de onda. Por questões de simplicidade, supõe-se também que existe um mapeamento um para um entre os controladores IP e os comutadores WDM.

A sinalização nas inter-redes ópticas é realizada fora de banda (“out of band”), existindo apenas um canal/lambda para sinalização de alta capacidade por fibra. As mensagens de sinalização são processadas eletronicamente por todos os nós inclusive os internos. Enquanto os dados não sofrem qualquer tipo de processamento nos nós intermediários, assim como nenhuma suposição precisa ser feita sobre qual a taxa de transmissão dos dados. A inteligência da rede fica concentrada essencialmente nas bordas e nenhum tipo de sincronização global é necessária.

Considera-se ainda que seja integrado o modelo de controle, conforme sugerido em [RAJ03], onde tanto o domínio óptico como o domínio IP são gerenciados de forma

unificada. Para estes dois domínios existe apenas uma instância de protocolo de roteamento e um plano de controle baseado no MPLS. No caso de haver só um AS (“Autonomous System”) envolvido, será considerado um único protocolo intra-domínio. Quando diversos ASs estiverem envolvidos, um protocolo de roteamento inter-domínio também deve ser usado, ambos, com as devidas extensões para tecnologias ópticas.

Nesta estrutura OBS rotulada (“LOBS-Labeled OBS”) os nós da rede são classificados em dois grupos: nós internos e nós de borda. Os nós internos realizam a comutação de rajadas baseadas em rótulos e possuem funcionalidades semelhantes aos nós centrais LSR (roteadores eletrônicos comutados por rótulos) da arquitetura MPLS, os quais essencialmente realizam operações de comutação por rótulos. Apenas cada pacote de controle das rajadas pode ser considerado um “rótulo jumbo”, já que este deve conter não apenas informações de rótulos, mas também outras, como o tempo de ajuste entre o pacote de controle e a rajada de dados e o tamanho da rajada.

Os nós de borda, por sua vez, possuem as funcionalidades eletrônicas pertinentes dos roteadores IP e são os responsáveis pelo processo de montagem das rajadas, o qual pode envolver a definição de classes de equivalência (FEC) do MPLS, o empilhamento de rótulos e a agregação de caminhos comutados por rótulos (“LSP – Label Switched Path”). Durante a operação de montagem das rajadas, múltiplos pacotes IP são juntados em uma única rajada e o correspondente pacote de controle é construído. Além disso, diversos LSPs podem ser aglutinados em caminhos LOBSs de maior capacidade, desde que seja respeitada a capacidade máxima do canal.

Em relação às características de difusão seletiva, em nosso modelo de referência poderá existir apenas um emissor por grupo e as árvores multiponto geradas pelos protocolos de roteamento multiponto são apenas do tipo originadas no emissor. A identificação dos grupos será feita unicamente pela dupla $\langle S, G \rangle$, onde ‘S’ representa o endereço IP do emissor e ‘G’ o endereço IP classe D de grupo, como no EXPRESS.

3.2. Árvore de Distribuição e Roteamento Multiponto

Como apresentado na seção 1, a difusão seletiva no contexto de IP sobre WDM, apresenta antigos problemas oriundos de questões mal resolvidas do IP Multicast, como a falta de escalabilidade, assim como possui novos desafios típicos de redes WDM, como a possibilidade de nem todos os nós internos serem aptos a realizar a difusão seletiva. A proposta MIRROR sugere um abordagem alternativa para solucionar tais questões, com o bônus de ser mais adequada às redes ópticas.

Ao invés de manter as informações de estado referentes aos grupos em todos os nós pertencentes à árvore multiponto, como ocorre no IP Multicast atual, propõe-se a manutenção dessas informações de estado apenas nos roteadores de borda que fazem parte da árvore multiponto dentro de cada domínio. Como nosso modelo de referência utiliza o paradigma OBS, as informações sobre a árvore multiponto passam a ser encapsuladas nos pacotes de controle (BCP) das rajadas, os quais já são processados eletronicamente em cada nó da rede. Além disso, como a proposta também faz uso de MPLS, os BCPs passam a ser incorporados em novas mensagens dos protocolos de controle do MPLS (e.g. CR-LDP ou RSVP), as quais são enviadas durante o processo de estabelecimento dos LSPs. A partir disso, as rajadas ópticas passam a ser comutadas por rótulos ao longo de uma árvore de distribuição pré-estabelecida, atenuando eventuais custos adicionais causados pelo esquema de encapsulamento.

Para que as informações relativas à árvore multiponto possam ser inseridas nos BCPs, propõe-se organizar e “codificar” a árvore multiponto em uma árvore de busca binária (“BST-Binary Search Tree”), onde cada nó interno tem uma entrada com um

campo para identificação do nó, juntamente com campos para entradas de descendentes à direita e à esquerda, de acordo com a Figura 2. Enquanto o campo de identificação do nó tem que ser único, as entradas para os descendentes podem utilizar apenas um índice da lista da árvore multiponto [ABE02b]. Desta forma, para uma árvore multiponto com k ramos, cada entrada à esquerda e à direita precisa de $\log_2(k+1)$ bits para ser enumerada, sendo que o valor “+1” serve apenas para denotar o fim da BST de forma inequívoca. Cada entrada também usa um bit para representar cada uma de suas interfaces por onde os dados devem ou não ser replicados. O número total de bits para este campo é igual ao número máximo (grau máximo) de interfaces por onde o tráfego pode ser ramificado, em qualquer roteador interno da rede.

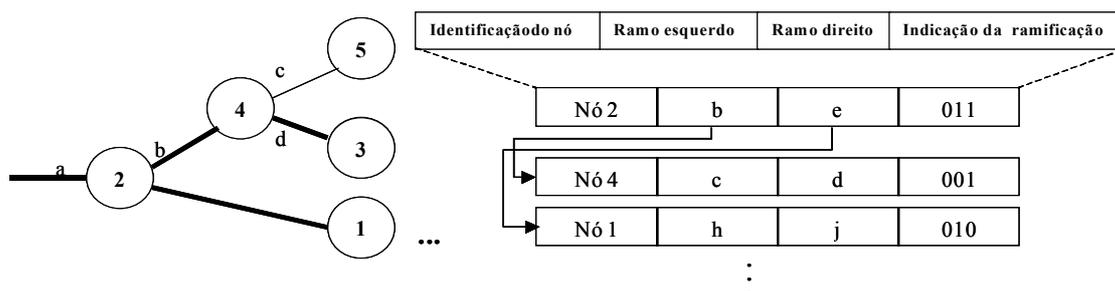


Figura 2 – Visão geral sobre o esquema de encapsulamento.

A opção pelo uso de BSTs se deve, entre outros motivos, ao fato destas serem uma solução tradicional de fácil implementação e com um custo de busca razoavelmente baixo, proporcional a $\log_2 H$ quando balanceadas, onde H é a altura da árvore. Outros esquemas mais otimizados poderiam ser empregados, envolvendo inclusive variações de BSTs. Contudo, este trabalho não tem o objetivo principal de investigar técnicas de otimização, deixando tal questão para possíveis trabalhos futuros.

Pelo descrito nos parágrafos anteriores, fica claro que o protocolo de roteamento adotado no IP Multicast atual, conhecido como PIM-SM [FEN03], não é a melhor alternativa. O mais adequado é um esquema de roteamento baseado no conhecimento da topologia da rede, da capacidade e da disponibilidade dos recursos. Tais informações podem ser armazenadas e usadas por um esquema centralizado ou por um esquema distribuído, como é o caso dos protocolos de estado de enlaces, como o MOSPF [MOY94]. A nossa sugestão, que inclusive está de acordo com a proposta da IETF [RAJ03], é a adoção de protocolos de estado de enlace, com as devidas adaptações e extensões ao contexto óptico. As referidas extensões devem incorporar os parâmetros relativos aos enlaces ópticos e também restrições que sejam específicas de redes ópticas como, por exemplo, as informações de quais nós são aptos a ramificar os feixes de luz.

No protocolo MOSPF, cada roteador que possui membros pertencentes a um determinado grupo multiponto deve comunicar tal fato para todos os outros roteadores do domínio. Esta divulgação é feita através de anúncios de informações de estado de enlace, denominadas “group-membership-LSAs”, as quais indicam quais os vértices de trânsito (i.e. o roteador propriamente dito e/ou qualquer rede de trânsito diretamente conectada) que não devem ser podados quando da construção da árvore de menor custo, chamada árvore SPT (“Shortest Path Tree”) [MOY94]. A necessidade de divulgar estas informações para todos os roteadores do domínio, independente destes fazerem ou não parte da árvore, deve-se, principalmente, ao modelo de difusão seletiva adotado no IP Multicast atual, onde os grupos podem ter diversos emissores. Desta forma, qualquer roteador multiponto no domínio, quando receber pacotes de dados para transmitir para o respectivo grupo, deve estar apto a construir a árvore SPT.

Na proposta MIRROR porém, restringiu-se o modelo de difusão seletiva, adotando um esquema de canal (ver seção 3.1), onde existe apenas um emissor por grupo e o endereço IP deste é explicitamente indicado no endereço de grupo. Como já se sabe a priori quem será o emissor do grupo, elimina-se a necessidade de divulgar as informações de estado de enlace referentes aos vértices de trânsito que não devem ser podados quando da construção da árvore para todos os roteadores do domínio. A princípio, estas LSAs devem ser divulgadas apenas para os roteadores de borda que oferecem conectividade direta ou indireta com o emissor ou com o domínio deste, ou seja aqueles roteadores de borda mais próximos do emissor e que poderão atuar como raiz da árvore no domínio. Isto é possível porque, os roteadores de borda, através do BGP, recebem e divulgam para seus pares no domínio informações de alcançabilidade oriundas de outros domínios, como por exemplo qual a melhor rota (melhor roteador de borda) para encaminhar informações para a rede onde está o emissor.

É possível que, em situações particulares, o tráfego para um determinado grupo chegue a roteadores de borda que não mantenham informações de estado sobre este grupo. Neste caso, estes roteadores devem solicitar informações sobre o grupo aos outros roteadores de borda do domínio [ABE02b].

4. Análise da Proposta

A análise será dividida em duas partes. Na primeira será avaliada a utilização do paradigma OBS como esquema de comutação. Na segunda parte da análise será avaliada efetivamente a eficiência das adaptações sugeridas na MIRROR. Para tanto, realiza-se comparações com as principais alternativas propostas ao IP Multicast, destacadas na seção 2, confrontando parâmetros como: requisitos de informações de estado, custo com informações de controle, custo de encaminhamento dos pacotes e custo da árvore de distribuição multiponto.

4.1. Avaliação do uso de OBS

O paradigma OBS vem sendo investigado e testado por pesquisadores e profissionais da área de redes nos últimos anos pois, como mencionado na seção 1, quando comparado com a comutação de lambdas e a comutação de pacotes ópticos, possui características e funcionalidades que lhe proporcionam vantagens em diferentes quesitos (ver Tabela 1). Entre suas principais virtudes, o paradigma OBS exhibe 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 [ABE02a]. O maior problema do OBS é ser uma proposta relativamente recente, onde ainda não está totalmente claro o impacto no desempenho da rede do seu esquema de sinalização não confiável. Contudo, diversas avaliações vêm sendo feitas e divulgadas recentemente com resultados animadores, tanto no contexto da comunicação ponto a ponto [DUS01] [BAL02] quanto no âmbito da difusão seletiva [QIA99b] [BAL02].

Tabela 1 - Comparação entre os paradigmas de comutação óptica.

Paradigmas de Comutação Óptica	Utilização da Largura de Banda	Latência de "setup"	Dificuldade de Implementação	Adaptabilidade (tráfego e falhas)
Lambda	Baixa	Alta	Baixa	Baixa
Rajada (OBS)	Alta	Baixa	Média	Alta
Pacotes/Célula	Alta	Baixa	Alta	Alta

Para obter resultados quantitativos que possam melhor demonstrar os benefícios que uma rede comutada por rajada pode oferecer, investigou-se como a utilização de largura de banda pode ser afetada pelo uso do paradigma OBS. Para tanto, a partir de [KES97] e de [DUS01] definiu-se o retardo total nas redes comutadas por rajadas, sem considerar o retardo nas redes de acesso, como sendo:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{borda}} + R_{(\text{sinaliz} + \text{propag})} + (\text{Tam}_{\text{rajada}} / \text{Txbit}_{\text{core}}), \quad (1)$$

onde R_{borda} é o retardo na borda da rede e corresponde ao tempo que a rajada fica armazenada até um canal (λ) livre ser atribuído a ela. Desta forma, o retardo de enfileiramento dos pacotes chegantes será limitado por R_{borda} . Além disso, $R_{(\text{sinaliz} + \text{propag})}$ é o retardo de sinalização para estabelecimento do canal, incluindo o retardo de propagação, $\text{Txbit}_{\text{core}}$ indica a taxa de bits (capacidade do canal) na rede óptica e $\text{Tam}_{\text{rajada}}$ representa o tamanho da rajada.

Com a finalidade de modelar a análise para uma situação limite, considerou-se que o tamanho da rajada ($\text{Tam}_{\text{rajada}}$) cresce linearmente com o retardo de borda (R_{borda}), o que corresponde ao comportamento de um tráfego CBR [KES97]. Em outras palavras:

$$\text{Tam}_{\text{rajada}} = R_{\text{borda}} \cdot \text{Txbit}_{\text{borda}}, \quad (2)$$

onde $\text{Txbit}_{\text{borda}}$ representa a taxa média de bits nas interfaces externas da rede óptica.

Um parâmetro útil para investigar a utilização da largura de banda é o tempo médio de ocupação dos canais (λ) [DUS01], denominado T_{ocup_λ} , e definido como:

$$T_{\text{ocup}_\lambda} = R_{(\text{sinaliz} + \text{propag})} + (\text{Tam}_{\text{rajada}} / \text{Txbit}_{\text{core}}). \quad (3)$$

Substituindo (2) em (3), tem-se:

$$T_{\text{ocup}_\lambda} = R_{(\text{sinaliz} + \text{propag})} + [R_{\text{borda}} \cdot (\text{Txbit}_{\text{borda}} / \text{Txbit}_{\text{core}})]. \quad (4)$$

Outro parâmetro que ilustra bem os benefícios da alocação dinâmica de λ s é a utilização (U) do canal [DUS01], que mostra a eficiência com que a largura de banda deste está sendo usada. A utilização ‘ U ’ do canal é definida como a razão entre largura de banda consumida por canal e o capacidade de transmissão dos nós centrais da rede:

$$U = (\text{LB}_{\text{por}_\lambda} / \text{Txbit}_{\text{core}}), \quad (5)$$

$$\text{onde:} \quad \text{LB}_{\text{por}_\lambda} = \text{Tam}_{\text{rajada}} / T_{\text{ocup}_\lambda}. \quad (6)$$

Substituindo-se (4) em (6) e o resultado desta substituição em (5) tem-se:

$$U = [R_{\text{borda}} / ((A_{\text{Txbit}} \cdot R_{(\text{sinaliz} + \text{propag})}) + R_{\text{borda}})], \quad (7)$$

com $A_{\text{Txbit}} = \text{Txbit}_{\text{core}} / \text{Txbit}_{\text{borda}}$. Mais que a relação entre as taxas de bit do núcleo e da interface externa da rede óptica, A_{Txbit} representa a “aceleração” da taxa de bits, quando migra-se do domínio da comutação eletrônica para o da comutação óptica.

Supondo-se um retardo de sinalização e de propagação ($R_{(\text{sinaliz} + \text{propag})}$) em torno de 5 milissegundos (considerando-se uma rede com 1000 Km de diâmetro), a Figura 3(a) mostra o tempo de ocupação do canal (T_{ocup_λ}), enquanto a Figura 3(b) ilustra a utilização do canal (U), em função do retardo de borda (R_{borda}), para diferentes valores de A_{Txbit} .

Pela Figura 3(a) percebe-se que, quanto maior for o valor de A_{Txbit} , menor será o tempo de ocupação do canal. Como para redes puramente ópticas a tendência é que $\text{Txbit}_{\text{core}} \gg \text{Txbit}_{\text{borda}}$, maiores serão os benefícios oferecidos por um paradigma como o OBS, que possibilita a realocação dinâmica dos canais, quando comparado com a comutação de λ s convencional. Apenas a título de ilustração, mesmo para retardos de borda bastante altos (igual a 50 ms) o tempo de ocupação do λ , no caso da Figura 3(a), fica em torno de 10 ms quando $A_{\text{Txbit}} = 10$.

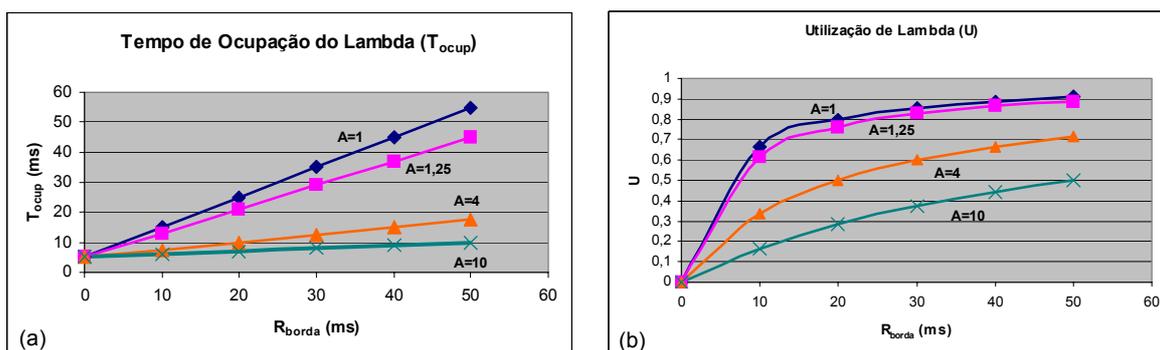


Figura 3 – Ocupação dos canais com paradigma OBS.

Da mesma forma, observa-se na Figura 3(b) que a utilização do canal cai bastante com o aumento da A_{Txbit} . O que implica que um esquema de alocação dinâmica dos canais, como o OBS, possibilita um melhor aproveitamento dos recursos da rede, pois permite a reutilização dos canais, tão logo termine a transmissão de uma rajada.

4.2. Análise Comparativa da Proposta MIRROR

Para avaliar as adaptações à difusão seletiva sugeridas na MIRROR, buscou-se realizar comparações com as principais alternativas ao IP Multicast propostas nos últimos anos, apresentadas na Seção 2. Como tais alternativas não foram propostas no contexto de redes ópticas, procurou-se utilizar parâmetros consagrados na literatura na análise de modelos de difusão seletiva e que não privilegiassem aspectos relacionados às rede ópticas. Desta forma, adotou-se os seguintes parâmetros na avaliação: requisito de informações de estado, custo com informações de controle, custo de encaminhamento dos pacotes e custo da árvore de distribuição multiponto.

O requisito de informações de estado ($Req_{inf_est}(T)$) permite avaliar a escalabilidade dos modelos de difusão seletiva, em termos do número de grupos ativos simultaneamente [TIA98]. É medido através da razão entre o número de nós (roteadores ou comutadores) na árvore T que mantêm informações de estado sobre o grupo ('Num_Rots_com_Inf_Est') e o número total de nós que compõem a árvore multiponto T ('Num_Tot_Rots_em_T'):

$$Req_{inf_est}(T) = \text{Num_Rots_com_Inf_Est} / \text{Num_Tot_Rots_em_T}. \quad (8)$$

O custo de encaminhamento dos pacotes mede o gasto que os nós ao longo da árvore de distribuição têm para encaminhar os pacotes de dados aos respectivos receptores [TIA98]. Para tanto, avalia-se o número de consultas a tabela de roteamento e a necessidade de alterações dos cabeçalhos e/ou construção de novos cabeçalhos pelos roteadores, quando do encaminhamento dos pacotes. Em outras palavras:

$$\text{Custo}_{enc_pacotes} = \text{Consultas_tab_rot} + \text{Alter\&Constr_cabeçalhos_pacotes}. \quad (9)$$

O custo com informações de controle avalia o consumo adicional de largura de banda gasto com informações de controle [STO00]. Tal gasto, como será visto nas seções seguintes, pode ser representado por diferentes expressões, dependendo do esquema analisado. Em função disso optou-se por representá-lo inicialmente de uma forma genérica:

$$\text{Custo}_{infs_contr} = \text{Consumo_Banda_com_inf_controle}. \quad (10)$$

O custo da árvore de distribuição multiponto costuma ser medido de duas formas diferentes na literatura. Uma delas é através do número de cópias do mesmo pacote

transmitidas nos diversos enlaces da árvore multiponto [COS01]. A outra maneira é baseada na soma dos custos dos enlaces individuais que formam as árvores multiponto, para verificar se tais árvores são ou não construídas através do caminho de menor custo entre o emissor e os receptores [TIA98]. Ressalta-se que neste segundo caso o menor custo pode ser avaliado em função de diferentes parâmetros, como caminho mais curto, menor retardo, maior largura de banda, entre outros. Logo, pode-se definir:

$$\text{Custo}_{\text{arv_mponto}} = \text{Num_copias_mesmo_pacote} \text{ ou } \text{Árvore_menor_custo}. \quad (11)$$

Neste trabalho emprega-se as duas formas de avaliar o custo da árvore multiponto.

4.2.1. Requisitos de Informações de Estado

Como ressaltado na seção 2, uma das alternativas ao IP Multicast atual é o esquema chamado SSM, que utiliza apenas árvores de distribuição multiponto iniciadas a partir do emissor (S,G), eliminando o uso de árvores de distribuição multiponto compartilhadas (*,G) e todas as complexidades de gerenciamento relacionadas com estas. Tal proposta, porém, mantém informações de estado relativas à árvore de distribuição multiponto em todos os roteadores pertencentes à árvore. Isso implica que o requisito de informações de estado para essa abordagem será sempre igual a 1, isto é:

$$\text{Req}_{\text{inf_est}}(T) = 1,$$

o que implica em uma escalabilidade baixa em relação ao número de grupos multiponto ativos simultaneamente.

No caso das propostas como REUNITE e o HBH, que, além do nó raiz e dos nós folhas, mantêm informações de estado apenas nos pontos de ramificação da árvore de distribuição, o requisito de informações de estado será o seguinte:

$$\text{Req}_{\text{inf_est}}(T) = (1 + \text{Nós}_{\text{Ramificação}} + \text{Nós}_{\text{Folha}}) / \text{Num_Tot_Rots_em_T},$$

onde '1' representa o nó (roteador/comutador) que atua como raiz da árvore de distribuição, $\text{Nós}_{\text{Ramificação}}$ indica o número de pontos onde ocorre ramificação do tráfego multiponto e $\text{Nós}_{\text{Folha}}$ aponta o número de nós na borda da árvore multiponto.

Analisando a expressão acima, percebe-se que na grande maioria dos casos o esquema representado pelo REUNITE vai apresentar $\text{Req}_{\text{inf_est}}(T) < 1$. Apenas em casos extremos, onde todos os nós internos da árvore de distribuição são também pontos de ramificação, $\text{Req}_{\text{inf_est}}(T) = 1$. Contudo, segundo Stoica et al. (2000) e Costa et al. (2001), são muito raras na prática árvores multiponto com as características destes casos extremos.

Para o caso da proposta representada pelo XCAST, onde apenas o emissor mantém as informações sobre os receptores, o requisito de informações de estado será:

$$\text{Req}_{\text{inf_est}}(T) = 1 / \text{Num_Tot_Rots_em_T}.$$

Observa-se que o XCAST apresenta grande resultado em termos de requisito de informações de estado, pois não armazena tais informações nos roteadores ao longo da árvore multiponto. Na verdade, nem trabalha com este conceito. Porém, como será visto nas seções seguintes, tal esquema lhe trará graves problemas nos parâmetros seguintes.

No caso da proposta MIRROR, as informações relativas ao grupo ficam armazenadas apenas nos roteadores de borda que fazem parte da árvore. Logo :

$$\text{Req}_{\text{inf_est}}(T) = (1 + \text{Nós}_{\text{Folha}}) / \text{No_Tot_Rots_em_T}.$$

Como percebe-se pela expressão acima, a MIRROR é bastante escalável em termos do número de grupos multiponto, apresentando um grande resultado em termos de requisito de informações de estado, sem abrir mão de utilizar os protocolos de

gerenciamento e de roteamento multiponto, o que lhe trará benefícios na análise dos próximos parâmetros.

4.2.2. Custo de Encaminhamento dos Pacotes

Na proposta SSM o encaminhamento dos pacotes é idêntico ao do IP Multicast tradicional, onde, em linhas gerais, os roteadores envolvidos realizam uma consulta às suas tabelas de rotas multiponto e, baseados no endereço IP do emissor e no endereço IP do grupo, duplicam os pacotes pelas interfaces apropriadas, sem nenhuma alteração no endereço IP de destino. Desta forma, o custo de encaminhamento dos pacotes será:

$$\text{Custo}_{\text{enc_pacotes}} = 1 \text{ consulta p/ pacote.}$$

Como a abordagem representada pelo REUNITE e pelo HBH não trabalha com endereços de grupo, o processo de encaminhamento dos pacotes nos roteadores responsáveis pela ramificação é um pouco mais custoso. Além da consulta à tabela de encaminhamento, os pacotes não serão meramente duplicados, mas será preciso construir um novo cabeçalho para estes pacotes com os novos endereços de destino apropriados. Logo o custo de encaminhamento neste caso será:

$$\text{Custo}_{\text{enc_pacotes}} = 1 . \text{ consulta p/ pacote} + N . \text{ alterações/construção cabeçalhos,}$$

onde N é o número de ramos da árvore multiponto nos pontos de ramificações.

No caso da proposta XCAST o custo de encaminhamento é uma questão mais crítica ainda, pois esta não trabalha nem com endereços de grupo, nem com qualquer tipo de sinalização de grupo, bem como não mantém nenhum tipo de informação de estado multiponto nos roteadores. Cada roteador terá que fazer várias consultas a sua tabela de rotas para poder encaminhar os novos pacotes. Além disso, os pacotes precisarão ter seus cabeçalhos XCAST reconstruídos, com uma nova lista de destinatários, caso tenham que ser encaminhados por diferentes ramos da árvore. Logo:

$$\text{Custo}_{\text{enc_pacotes}} = ND . \text{ consulta p/ pacote} + N . \text{ alterações/construção cabeçalhos,}$$

onde ND é o número de destinatários.

Na proposta MIRROR o encaminhamento não é crítico. Os nós internos da rede, apesar de não possuírem informações de estado multiponto, precisam fazer apenas uma consulta na árvore binária (ver seção 3.2) para que saibam por quais interfaces as informações devem ser encaminhadas. Descoberto isso, as informações serão duplicadas pelas interfaces apropriadas, sem nenhuma necessidade de alteração de cabeçalho. Logo:

$$\text{Custo}_{\text{enc_pacotes}} = 1 \text{ consulta p/ rajada.}$$

Observa-se que mesmo reduzindo a manutenção das informações de estado relativas aos grupos nos nós da árvore multiponto, a MIRROR não aumenta o custo de encaminhamento dos pacotes, como acontece com a proposta XCAST e com aquelas que armazenam informações de estado apenas nos pontos de ramificação. Isto ocorre porque a MIRROR mantém, com algumas melhorias em relação ao IP Multicast atual, funcionalidades importantes da difusão seletiva, como o endereçamento de grupo e o roteamento multiponto.

4.2.3. Custo com Informações de Controle

Como a proposta SSM mantém as informações relativas ao grupo em todos os roteadores pertencentes à árvore multiponto, o custo relevante com informações de controle é apenas aquele gasto com as mensagens de adesão ao grupo (“join”) e de saída do grupo (“prune”), as quais precisam ser enviadas periodicamente para refrescar as informações de estado nos roteadores [HOL03]. O tamanho de cada mensagem de

adesão/poda fica em torno de 30 bytes, enviadas, tipicamente, a cada 60 segundos [FEN03]. Em outras palavras:

$$\text{Custo}_{\text{infs_contr}} = \text{mensagens "join"} + \text{mensagens "prune"} = \text{Num_sub-redes} \times 30 \text{ bytes.}$$

Apesar destas mensagens não serem tão pequenas e de serem periódicas, elas não crescem linearmente com o número de receptores, uma vez que apenas uma mensagem de adesão por sub-rede é necessária, independente do número de receptores na sub-rede.

No caso de REUNITE e HBH os custos com informações de controle são determinados, basicamente, pelas mensagens de sinalização trocadas entre os roteadores. Contudo, além das mensagens de adesão (“join”), estas abordagens possuem duas outras mensagens, a “tree” e a “fusion” (esta última existe apenas no HBH) [COS01]. A primeira, enviada via difusão seletiva pelo emissor, contém as informações necessárias para manter e atualizar a estrutura da árvore multiponto nos pontos de ramificação que fazem parte da árvore, Enquanto as mensagens “fusion” são enviadas pelos nós de ramificação e participam da construção da árvore em conjunto com as mensagens “tree” [COS01]. Nem o REUNITE, nem o HBH, utiliza mensagens para sinalizar a saída do grupo (“prune”). Como os autores não mencionaram nas respectivas publicações os tamanhos das mensagens de sinalização, principalmente aqueles relativos às novas mensagens (“tree” e “fusion”), não foi possível precisar, neste caso, o gasto com informações de controle. Porém, considerando as observações acima, pode-se afirmar que tais gastos são maiores que para a proposta SSM. Em outras palavras:

$$\text{Custo}_{\text{infs_contr}} = \text{mensagens "join"} + \text{"tree"} + \text{"fusion"} > \text{Custo}_{\text{infs_contr}}(\text{SSM}).$$

Para o caso do XCAST, não existem custos com mensagens de sinalização multiponto, uma vez que, como mencionado na seção 2, o esquema não trabalha nem com endereços de grupo, nem com qualquer outra funcionalidade da difusão seletiva. Os custos relevantes com informações de controle, neste caso, estão embutidos nos cabeçalhos dos pacotes e consistem dos endereços IP dos receptores, inseridos pelo emissor em todos os pacotes quando do envio dos mesmo. Em outras palavras, o custo com informações de controle será:

$$\text{Custo}_{\text{infs_contr}} = \text{Num_Rec} \times 32 \text{ bits} = \text{Num_Rec} \times 4 \text{ Bytes,}$$

onde o Num_Rec representa o número de receptores participantes da sessão XCAST.

No caso da MIRROR, o custo preponderante com informações de controle também é relativo às informações que são encapsuladas nos cabeçalhos das rajadas, uma vez que os nós internos não armazenam informações de estado sobre o grupo multiponto. Mais especificamente, os custos com informações de controle correspondem à árvore binária usada para organizar e “codificar” a árvore multiponto. Desta forma, o custo será:

$$\text{Custo}_{\text{infs_contr}} = K \cdot (\lceil \log_2 I \rceil + \lceil \log_2(K+1) \rceil + \lceil \log_2(K+1) \rceil + G_m),$$

onde ‘I’ representa o número de nós internos no AS, dos quais ‘K’ fazem parte da árvore de distribuição multiponto e o grau máximo de replicação desses nós é igual a ‘Gm’.

Analisando a equação do custo com informações de controle da proposta MIRROR, percebe-se que esta tem uma tendência de crescimento maior que a do modelo XCAST. Contudo, na MIRROR as informações relativas à árvore crescem a medida que aumenta o número de nós internos que fazem parte da árvore de distribuição, enquanto no XCAST elas crescem com o número de receptores. Ou seja, para a MIRROR, no pior caso, o custo será limitado pelo número de nós internos do domínio, enquanto no XCAST o número máximo de receptores, potencialmente muito maior, é o fator limitante. Além disso, como na MIRROR a comutação será baseada em rótulos, apenas a

mensagem de controle enviada durante o estabelecimento dos LSPs precisará conter tais informações adicionais. Por fim, não devemos esquecer que o pacote de controle irá trafegar em um canal dedicado, o que minimiza ainda mais o possível desperdício de largura de banda.

4.2.4. Custo da Árvore Multiponto

Primeiramente, o custo da árvore multiponto será avaliado em função do número de cópias de um mesmo pacote transmitido nos diversos enlaces da rede. A partir da análise dos esquemas de construção da árvore multiponto das diferentes propostas, observa-se que SSM, XCAST e MIRROR vão transmitir no máximo uma cópia de um mesmo pacote nos diversos enlaces dessa árvore multiponto. A única abordagem avaliada que nem sempre garante tal comportamento é a REUNITE, pois esta constrói as árvores multiponto baseado em duas mensagens (“join” e “tree”), que são originadas por diferentes entidades da rede (a primeira é enviada pelos receptores e a segunda pelo emissor). Como o emissor endereça os pacotes de dados para o primeiro membro que aderiu a sessão, uma má escolha do nó de distribuição pode ocorrer quando existirem certos tipos de assimetrias nas rotas, o que produzirá cópias desnecessárias de pacotes em certos enlaces. Este comportamento incorreto é corrigido no HBH, acrescentando-se mais uma mensagem de sinalização (a “fusion”) e fazendo com que o emissor enderece os pacotes para o ponto de ramificação mais próximo [COS01].

Se, por outro lado, a avaliação do custo da árvore multiponto for feita em função da soma dos custos dos enlaces individuais que formam as árvores multiponto, então os resultados serão completamente diferentes. O modelo SSM, por exemplo, será o que fornecerá o pior resultado na grande maioria dos casos, pois este construirá uma árvore multiponto a partir dos receptores para o emissor através da técnica de RPF (“Reverse Path Forwarding”) [FEN03], que garante o menor caminho dos receptores para o emissor, mas não o contrário, caso os enlaces envolvidos tenham roteamento assimétrico.

Os outros três esquemas analisados aqui, em geral, irão fornecer resultados melhores que o modelo SSM, pois, diferente deste último, todos constroem suas árvores de distribuição multiponto baseados no caminho mais curto entre o emissor e os receptores. A diferença entre eles é que a MIRROR tem maior facilidade para trabalhar com árvores multiponto comutadas por rótulos. Tanto o XCAST como os esquemas que armazenam informações de estado apenas nos pontos de ramificações teriam problemas para construir árvores comutadas por rótulos, pois, em ambos, os nós de ramificação precisam fazer alterações nos cabeçalhos dos pacotes para encaminhá-los. Esta necessidade demanda que os nós internos tenham funcionalidades semelhantes aos nós de borda da rede, o que contraria o princípio básico do MPLS.

4.2.5. Análise Crítica dos Resultados

Os resultados da análise das diferentes propostas de adaptações ao IP Multicast realizada neste artigo, resumidos na Tabela 2, demonstram que existe um claro compromisso entre a manutenção das informações de estado relativas ao grupo e os custos de encaminhamento dos pacotes e com informações de controle. Percebe-se que, quando se excede no corte das informações de estado e de funcionalidades relacionadas à difusão seletiva, como no caso da proposta XCAST, aumenta-se os custos com informações de controle e com o encaminhamento dos pacotes. Por outro lado, eliminando-se apenas as informações de estado desnecessárias, mas mantendo-se outras funcionalidades como endereço de grupo e protocolos de sinalização de grupo, ganha-se em escalabilidade sem tornar proibitivo os custos com informações de controle e com o encaminhamento dos

pacotes. Tal fato pôde ser constatado na proposta MIRROR, a qual apresentou resultados bastante satisfatórios em três dos quatro quesitos avaliados. No único parâmetro que não apresentou resultados tão bons, as possíveis conseqüências negativas são minimizadas pelas características do modelo de rede referência adotado (vide Seção 4.2.3).

Tabela 2 – Análise comparativa entre as principais opções ao IP Multicast atual.

Parâmetros Propostas	Requisitos de informação de estado	Custo de Encaminhamento de Pacotes	Custo com Informações de Controle	Custo da Árvore Multiponto
SSM	Maior de todos	Baixo	Baixo	Mínimo no sentido reverso
REUNITE & HBH	Médio	Alto	Médio	Mínimo garantido só no caso do HBH
XCAST	Mínimo	Muito Alto	Muito Alto	Mínimo
MIRROR	Baixo	Baixo	Alto	Mínimo

Pode-se dizer que o maior mérito da proposta MIRROR foi justamente encontrar o equilíbrio mencionado no parágrafo anterior, propondo otimizações que melhoram a escalabilidade do modelo, sem eliminar funcionalidades que, com algumas melhorias, permitem que os custos com informações de controle e com o encaminhamento dos pacotes não comprometam a aplicabilidade da proposta. Desta forma, a MIRROR manteve as informações de estado relativas ao grupo apenas nos roteadores de borda, utilizando um esquema de encapsulamento para transportar tais informações para os nós internos, enquanto manteve, com alguns aperfeiçoamentos, o endereçamento de grupo e os protocolos de sinalização e de roteamento multiponto.

A proposta MIRROR também demonstrou ser a opção mais adequada para o contexto das futuras inter-redes baseadas em comutação óptica, 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 armazenamento temporário de pacotes nesses nós.

Por fim, deve-se mencionar que o modelo proposto faz uso de OBS e GMPLS, as quais são novas e promissoras abordagens para a implementação e gerenciamento de redes ópticas, caracterizadas como mais inteligentes e flexíveis na alocação de recursos.

5. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Este trabalho analisou a proposta MIRROR, a qual sugere adaptações ao IP Multicast para torná-lo mais escalável em termos de número de grupos ativos simultaneamente, menos complexo e mais adequado às inter-redes IP baseada em comutação óptica. Para avaliar o conjunto de adaptações sugeridas na proposta MIRROR realizou-se uma análise comparativa entre a MIRROR e as principais alternativas propostas ao IP Multicast.

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 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. A análise comparativa demonstrou também que a MIRROR é adequada ao contexto das futuras inter-redes ópticas baseadas no GMPLS, já suas características facilitam o emprego da comutação de rótulos, assim como minimizam o processamento dos nós internos no encaminhamento dos dados e a necessidade de armazenamentos temporários desses nós.

Os trabalhos futuros incluem a realização de simulações com um protótipo da proposta MIRROR no NS (“Network Simulator”), em fase final de desenvolvimento.

6. Referências Bibliográficas

- [ABE02a]-ABELÉM, A. e STANTON, M. “Inter-Redes IP Baseadas em Redes Ópticas”. In: *Minicursos, 20º Simpósio Brasileiro de Redes de Comput. (SBRC2002)*, Cap. 2, Búzios, RJ, Brasil. Maio, 2002.
- [ABE02b]-ABELÉM, A. e STANTON, M. “IP Multicast for Optically Switched Networks”. In: *Proceedings of 15º International Conference on Computer Communication (ICCC2002)*, Mumbai, India. Agosto, 2002, pp. 927-941.
- [AWD01]-AWDUCHE, D. e REKHTER, Y. “Multiprotocol Lambda Switching: Combining MPLS Traffic Engineering Control with Optical Crossconnects”. *IEEE Communic. Magazine*, Março, 2001.
- [BAL02]-BALDINE, I. et al. “JumpStart: A Just-in-Time Signaling Architecture for WDM Burst-Switched Networks”. *IEEE Communic. Magazine*. Fevereiro, 2002.
- [BAR01]-BARROS, F. e STANTON, M. “Modelo de Serviço de Difusão Seletiva: Aperfeiçoamentos ou Mudanças”. In: *Anais SBRC'2001, Florianópolis, SC. Maio, 2001*, pp. 464-479.
- [BOI02]-BOIVIE, R. et al. “Explicit Multicast (XCAST) Basic Specification”. *Internet Draft*, draft-ooms-xcast-basic-spec-03.txt. Junho, 2002.
- [COS01]-COSTA, L. H., FDIDA, S., e DUARTE, O. “Hop by Hop Routing Multicast Protocol”. In: *Proceedings of ACM SIGCOMM'2001*, San Diego, EUA. Agosto, 2001.
- [DEE89]-DEERING, S. E. “Host Extensions for IP Multicasting”. *RFC 1112*. Agosto, 1989.
- [DIO00]-DIOT, C., LEVINE, B., KASSEM H. e BALENSIEFEN, D. “Deployment Issues for the IP Multicast Service Architecture”. *IEEE Network*. vol. 14, no. 1, pp. 78-88, Janeiro, 2000.
- [DUS01]-DUESER, M. et al. “Bandwidth Utilisation and Wavelength Re-Use in WDM OBS Networks”. In: *Proc. IFIP/TC6 5th Conference on Optical Network Design and Modelling*. Fevereiro, 2001.
- [FEN03]-FENNER, B. et al. “Protocol Independent Multicast - Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification (Revised)”. *Internet Draft*, draft-ietf-pim-sm-v2-new-07.txt. Março, 2003.
- [GUI98]-GUILMOT, C. et al. “Transparent Optical Packet Switching: The European ACTS KEOPS project Approach”. *IEEE Journal Lightwave Tech.* Vol. 16, No. 12, pp. 2117-2134, Dez, 1998.
- [HOL99]-HOLBROOK, H. et al. “IP Multicast Channels: EXPRESS Support for Large-Scale Single-source Applications”. In: *Anais ACM SIGCOMM'99*. Setembro, 1999, pp. 65-78.
- [HOL03]-HOLBROOK, H. e CAIN, B. “Source-Specific Multicast for IP”. *Internet Draft*. draft-ietf-ssm-arch-02.txt. Março, 2003.
- [SSM02]-Source-Specific Multicast working group. <http://www.ietf.org/html.charters/ssm.html>. Nov, 2002.
- [KES97]-KESHAV, S. “*An Engineering Approach to Computer Networking*”. Addison-Wesley. EUA, 1997.
- [MAN02]-MANNIE E. (editor). “Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture”. *Internet Draft*, draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-03.txt. Agosto, 2002.
- [MOY94]-MOY, J. “Multicast Extensions to OSPF”. *IETF RFC 1584*. Março, 1994.
- [MUK00]-MUKHERJEE, B. “WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges”. *IEEE Journal on Selec. Areas in Comm.*, Vol. 18, No. 10, pp. 1810-1824. Outubro, 2000.
- [MUR02]-MURTHY, C. e GURUSAMY, M. “*WDM Optical Networks*”. Prentice Hall. EUA, 2002.
- [QIA99a]-QIAO, C. e YOO, M. “Optical Burst Switching (OBS) – A New Paradigm for an Optical Internet”. *Journal of High Speed Networks (JHSN)*. Vol. 8, No. 1, pp. 69-84, Agosto, 1999.
- [QIA99b]-QIAO, C. et al. “WDM Multicasting in IP over WDM Networks”. In: *IEEE ICNP'99 Proceedings*. Novembro, 1999, pp. 89-96.
- [RAJ03]-RAJAGOPALAN, B. et al., “IP over Optical Networks: A Framework”. *Internet Draft*, draft-ietf-ipo-framework-03.txt. Janeiro, 2003.
- [ROS01]-ROSEN, E. et al. “Multiprotocol Label Switching Architecture”. *RFC3031*. Janeiro, 2001.
- [STO00]-STOICA, I., Ng, T. e ZHANG, H. “REUNITE: A Recursive Unicast Approach to Multicast”. In: *Anais INFOCOM 2000*. Tel Aviv, Israel. Março, 2000.
- [TIA98]-TIAN, J. et al. “Forwarding State Reduction for Sparse Mode Multicast Communications”. In: *Proceedings of IEEE INFOCOM98*. Março, 1998.
- [VEE01]-VEERARAGHAVAN, M., et al. “Architectures and Protocols that Enable New Applications on Optical Networks”. *IEEE Communicat. Magazine*, vol. 39, no. 3, pp. 118-127, Março, 2001.