

Um Algoritmo de Estabelecimento de LSPs para Comunicação Multicast em Redes WDM Baseadas no GMPLS

Rafael Pereira Esteves¹, Antônio Jorge Gomes Abelém¹, Ewerton da Costa Vaz²,
Michael A. Stanton³

¹Departamento de Informática (DI) – Universidade Federal do Pará (UFPA)
Rua Augusto Corrêa, 01 – 66075-110 – Belém, PA – Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PPGCC) – Universidade
Federal do Pará (UFPA)
Rua Augusto Corrêa, 01 – 66075-110 – Belém, PA – Brasil

³Instituto de Computação (IC) – Universidade Federal Fluminense (UFF)
Rua Passo da Pátria, 156, bloco E, sala 350 – 24210-240, Niterói – RJ, Brasil
{esteves,abelem,ewerton}@ufpa.br, michael@ic.uff.br

Abstract. *The adaptation of label switching to multicast communication in optical networks opens several opportunities for research, since most of the previous studies and definitions only considered the point-to-point communication (unicast) approach. In the specific case of the triggering problem for LSPs (Label Switched Paths), there is still no consensus about the best strategy for multicast communication. This paper proposes an algorithm for traffic-driven triggering of LSPs, based on MFCs (Multicast Forwarding Caches), and has the advantage of being a schema which is compatible with several multicast routing protocols. To illustrate the proposed algorithm we carry out simulation studies using the NS-2 (Network Simulator) simulation platform.*

Resumo. *Diversas perspectivas de pesquisa surgem no que se refere à adequação da comutação baseada em rótulos à comunicação multicast para redes ópticas uma vez que a maioria dos estudos e definições foi feita levando em consideração a abordagem de comunicação ponto a ponto (unicast). No que diz respeito à questão do disparo de LSPs (Label Switched Paths) ainda não há um consenso sobre qual é a melhor estratégia para a comunicação multicast. Este trabalho propõe e descreve um algoritmo para a abordagem de disparo de LSPs orientada ao tráfego, que é baseada em MFCs (Multicast Forwarding Caches) e possui a vantagem de ser um esquema compatível com diversas implementações de protocolos de roteamento multicast. Para ilustrar o algoritmo proposto, simulações foram realizadas utilizando a plataforma de simulação NS-2 (Network Simulator).*

1. Introdução

A crescente demanda por aplicações de rede sofisticadas, aliada ao aumento do tráfego da Internet tem conduzido grandes esforços na busca de aperfeiçoamentos nas tecnologias de transmissão de dados com o intuito de suprir a atual exigência por largura de banda.

No contexto das redes ópticas, a multiplexação por divisão de comprimento de onda (*WDM - Wavelength Division Multiplexing*) apresenta-se como o principal avanço nessa área na medida em que permite taxas de transmissão que se aproximam do limite teórico das fibras ópticas, que é da ordem de dezenas de terabits por segundo [1]. Uma questão essencial no projeto de redes ópticas consiste na definição de como a rede será controlada, isto é, que tipo de sinalização será responsável por reservar os recursos, definir rotas, tratar falhas, entre outras funções que constituem o plano de controle.

A comutação baseada em rótulos, que nas redes IP é representada pelo MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) [2] foi estendida, através do GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) [3] para operar com diversas tecnologias de rede, onde o rótulo pode ser representado de outras formas, por exemplo, como slots de tempo em uma rede que utiliza a técnica TDM, como portas físicas de comutadores e como comprimentos de onda (λ s) nas redes WDM.

O GMPLS aparece como uma das melhores alternativas para oferecer um plano de controle confiável e flexível às redes WDM, uma vez que o mesmo permite a integração do protocolo IP com a tecnologia WDM quando os λ s são associados aos rótulos, possui poderosos mecanismos de engenharia de tráfego, possui esquemas variados para prover tolerância à falhas, além de dar suporte a qualidade de serviço (*QoS*). Contudo, a grande maioria das definições e das padronizações sobre MPLS foi feita apenas para a comunicação ponto a ponto (*unicast*), deixando o contexto da comunicação multicast para trabalhos futuros.

No multicast baseado em comutação por rótulos, o estabelecimento de um caminho comutado por rótulo (LSP) pode ser disparado de três formas [4]: orientado por requisição, orientado por topologia ou orientado pelo tráfego. No entanto, existem muitas discussões sobre qual é a melhor alternativa, uma vez que todas apresentam virtudes e desvantagens. Da mesma forma, existem controvérsias no tipo de controle a ser adotado na comunicação multicast (independente ou ordenado) e na maneira de atribuir rótulos para uma determinada classe de equivalência de encaminhamento (*FEC - Forwarding Equivalence Class*), que pode ocorrer tanto a partir do LSR de saída do enlace, nas variações sob demanda ou não solicitada, como a partir do LSR de entrada do enlace, nas formas sob demanda, não solicitada ou implícita [4].

No caso do estabelecimento de caminhos comutados por rótulos, apesar de existirem propostas, não existe uma padronização que aprofunde e detalhe o funcionamento desses mecanismos, sendo que algumas dessas alternativas não são compatíveis com todos os protocolos de roteamento multicast existentes.

O objetivo deste trabalho é propor um algoritmo para estabelecimento de LSPs baseado na abordagem orientada ao tráfego, detalhando um conjunto de passos para se construir caminhos comutados por rótulo de forma controlada. A opção pela abordagem orientada ao tráfego se deve em virtude desta ser baseada em caches de

encaminhamento multicast (*MFC – Multicast Forwarding Caches*), derivados das tabelas de roteamento multicast implementadas no protocolo IP multicast de sistemas UNIX-like, como o DVMRP (*Distance Vector Multicast Routing Protocol*) e o PIM (*Protocol Independent Multicast*), o que permite a obtenção de um esquema compatível com diversas implementações de protocolos de roteamento multicast. Basicamente, nesse esquema orientado ao tráfego, quando um nó necessita da criação de uma entrada no MFC para guardar informações de encaminhamento de transmissões multicast ativas, uma solicitação de estabelecimento de LSP é enviada e processada por todos os nós até chegar ao nó de origem dos dados. Para validar o esquema proposto, simulações foram realizadas utilizando a plataforma de simulação NS-2 (*Network Simulator*).

Como nossa proposta é relacionada à comutação por rótulos, a mesma pode ser associada, além do MPLS, aos aperfeiçoamentos que vêm sendo desenvolvidos para implementar a comutação por rótulos em redes de nova geração, como o GMPLS.

Além dessa seção introdutória, o artigo está organizado em mais 4 seções. A seção 2 realiza uma discussão sobre os esquemas de disparo de LSPs existentes e suas características. O algoritmo de estabelecimento de LSPs é descrito na seção 3. A seção 4 apresenta os experimentos de simulação utilizados para ilustrar o funcionamento do esquema proposto. A seção 5 finaliza o artigo com as considerações finais e os trabalhos futuros.

2. Estabelecimento de LSPs no contexto multicast

Um dos principais pontos de discussão no que diz respeito à adequação da comutação por rótulos à comunicação multicast refere-se a que método será utilizado para estabelecer os caminhos comutados por rótulo (*LSPs – Label Switched Paths*).

Ooms et.al. [4] define três estratégias para esse fim, disparo de LSPs orientado à requisição, orientado à topologia e orientado ao tráfego. Na estratégia orientada por requisição, as mensagens de estabelecimento de caminhos rotulados são encapsuladas em mensagens de controle do protocolo de roteamento multicast, como por exemplo, mensagens *Join* que permitem a entrada em um grupo multicast, ou mensagens do protocolo RSVP (*Resource Reservation Protocol*). Esse método aproveita características de protocolos de roteamento existentes, mas pode exigir que os mesmos suportem sinalização de controle explícita, como o PIM-SM (*Protocol Independent Multicast – Sparse Mode*), restringindo sua aplicabilidade a essa classe de protocolos.

O uso de mensagens de controle nativas do protocolo de roteamento multicast para encapsular mensagens de distribuição de rótulos é referido como “*piggy-backing*”[4]. Essa prática apresenta uma série de problemas, como o fato de excluir protocolos de modo denso, já que estes não possuem mensagens de controle explícitas e modificações para adicioná-las seriam muito custosas. O *piggy-backing* também inviabiliza o uso de outros métodos de disparo de LSPs, bem como exige que o protocolo de roteamento seja estendido para suportar outras funções dos protocolos de distribuição de rótulos como a descoberta de pares, além de contribuir para o aumento do tráfego de controle.

A abordagem orientada à topologia mapeia uma árvore multicast existente em nível 3 para uma árvore em nível 2. A desvantagem desse método é que rótulos são consumidos mesmo que não exista tráfego para uma determinada árvore multicast.

O disparo orientado ao tráfego apresenta a vantagem de consumir menos rótulos que os outros métodos, uma vez que os LSPs só serão construídos se houver demanda de tráfego. Para isso essa técnica monitora estruturas denominadas MFCs (*Multicast Forwarding Caches*). Os MFCs são subconjuntos das tabelas de roteamento multicast que guardam informações somente dos grupos multicast que possuem tráfego [5]. Quando não existe uma entrada no MFC relacionada a um determinado pacote multicast que foi recebido, ocorre a solicitação e a criação de uma entrada nessa tabela. Se futuramente acontecerem mudanças nas rotas, o MFC é atualizado.

Os MFCs estão presentes na maioria das implementações de IP Multicast de sistemas UNIX e, como estão incorporadas ao núcleo do sistema operacional, o disparo de LSPs orientado ao tráfego pode ser utilizado em conjunto com diversos protocolos de roteamento multicast o que torna essa abordagem a mais atrativa dentre as demais. Apenas em casos onde as entradas no MFC são apagadas periodicamente pode ocorrer um aumento na quantidade de requisições de LSPs, possibilitando eventuais problemas de escalabilidade [6].

Como dito na Seção 1, apesar de existirem diferentes propostas, não existe uma padronização que aprofunde o funcionamento desses mecanismos. Além disso, algumas dessas alternativas não são compatíveis com todos os protocolos de roteamento multicast existentes. Este trabalho propõe e descreve um algoritmo para realizar o estabelecimento de LSPs baseado na estratégia de disparo orientada ao tráfego, uma vez que essa abordagem apresenta como principais atrativos o fato de ser compatível com vários protocolos de roteamento multicast, além de consumir uma quantidade menor de rótulos comparada aos outros mecanismos de disparo de LSPs em comunicação multicast.

3. Algoritmo de Estabelecimento de LSPs para Comunicação Multicast baseado em MFCs

3.1. Modelo de Referência

O modelo de referência adotado neste trabalho consiste de roteadores IP/MPLS¹ conectados via inter-redes ópticas, através de caminhos de luz comutados dinamicamente (Figura 1). As redes ópticas que compõem estas inter-redes são baseadas nos paradigmas OCS (*Optical Circuit Switching*) [7] e MPLS. A opção pela comutação de circuitos ópticos (OCS) deve-se pela sua baixa complexidade, e conseqüentemente, baixo custo de implementação comparada aos outros paradigmas de comutação óptica [1]. Já a adoção do MPLS, como mencionado na Seção 2, se justifica pela sua flexibilidade e capacidade de engenharia de tráfego, além da facilidade de adequação à tecnologia WDM, usando lambdas como rótulos.

¹ Daqui em diante usar-se-á o termo MPLS de forma genérica para indicar o uso de MPLS, ou de seus aperfeiçoamentos MPLS ou GMPLS

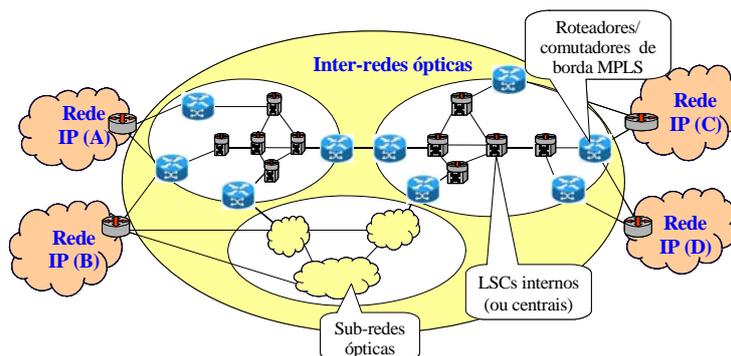


Figura 1. Modelo de rede adotado para a proposta, composto de múltiplos dispositivos de comutação óptica (LSC) interconectados através de uma malha óptica.

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 (*LSCs - Lambda Switching Crossconnects*) e interconectados por enlaces ópticos em uma topologia geral. Esses LSCs podem ser equipamentos de diferentes fabricantes. 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, 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. 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 necessário.

É assumido que todos os dispositivos são habilitados com IP Multicast e que os equipamentos ópticos possuem capacidade total de replicação de sinais de luz. Os dispositivos devem suportar roteamento em nível 2 (MPLS) e em nível 3.

3.2. Descrição do Algoritmo Proposto

Nesta seção descrevemos uma proposta de algoritmo para o estabelecimento de LSPs baseado na estratégia orientada ao tráfego. Nosso objetivo é detalhar um conjunto de passos para se construir caminhos comutados por rótulo de forma controlada e que procure utilizar a menor quantidade de recursos possível.

O algoritmo funciona da seguinte maneira: sempre que um nó recebe um pacote multicast este verifica se existe alguma informação do mesmo no cache de encaminhamento multicast (MFC). Se essa informação não é encontrada esse nó solicita a criação de uma entrada nessa estrutura.

Quando um nó-folha² realiza essa solicitação ele atribui rótulos³ para si e propaga essas informações para o nó seguinte da rota em direção à origem. As informações que são enviadas para os nós seguintes consistem do rótulo a ser utilizado e da classe de equivalência de encaminhamento do LSP que está sendo construído e serão utilizadas na criação de entradas na Base de Informações de Rótulos (*LIB – Label Information Base*) do nó. A estrutura LIB existente em cada LSR (*Label Switched Router*) serve para armazenar dados que serão posteriormente utilizados no processamento dos rótulos, normalmente esses dados são: FEC, rótulo de entrada, nó de entrada, rótulo de saída e nó de saída [8].

O valor do rótulo enviado servirá para o nó predecessor (no sentido do tráfego) realizar a troca de rótulos, ou seja, trocar o valor do seu rótulo de entrada para o valor do rótulo de saída (que é o rótulo de entrada do próximo salto em direção aos nós-folhas).

Os nós intermediários por sua vez também definem rótulos, criam entradas na LIB e repassam essas informações adiante em direção à origem da mesma forma como os nós-folhas.

O nó de origem (ou de entrada da rede) não realiza nenhuma solicitação de rótulos, pois contará com as informações fornecidas por outros nós da árvore multicast.

Quando um nó precisa replicar pacotes espera-se que ele receba vários rótulos da mesma classe de equivalência de encaminhamento provenientes de seus nós de saída do tráfego multicast. Caso isso aconteça, o mesmo cria várias entradas na sua LIB para a mesma FEC com o mesmo rótulo de entrada. A Figura 2 ilustra melhor o processo.

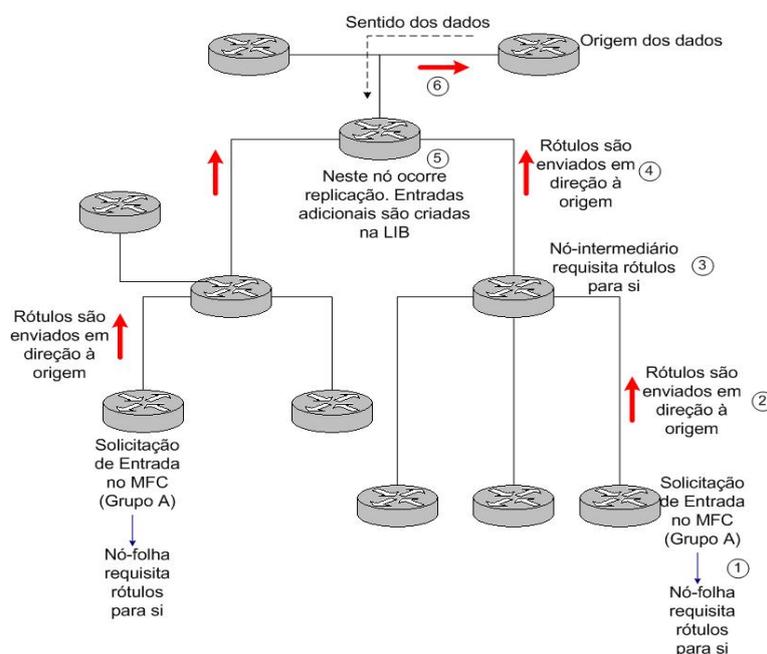


Figura 2. Funcionamento do algoritmo proposto para o disparo de LSPs.

² Nó-folha refere-se a um nó de saída (no sentido do fluxo) de redes que suportem tráfego multicast baseado em comutação por rótulo.

³ Deste ponto em diante o termo rótulo será utilizado como sinônimo de comprimento de onda (lambda).

Esta abordagem de sinalização em direção à origem foi definida para se obter garantias de que todos os nós ao longo das rotas possuem rótulos para uma determinada classe de equivalência de encaminhamento. As classes de equivalência de encaminhamento (FEC) estão associadas à origem dos dados nessa alternativa, ou seja, os pacotes que são originados em um determinado nó e que fazem parte de um mesmo grupo multicast pertencem a uma única classe de equivalência de encaminhamento. Vale ressaltar que no contexto multicast adotado, uma FEC está associada a vários LSPs que possuem origem comum.

Para que o processo de estabelecimento de LSPs seja iniciado, pacotes de dados endereçados a um determinado grupo multicast devem chegar a um nó-folha que faça parte do deste grupo e que ainda não possua uma entrada no seu MFC para aquele tráfego multicast. Esses dados devem ser encaminhados em nível 3, uma vez que ainda não existe um LSP que permita que os mesmos sejam roteados em nível 2, portanto, os equipamentos devem oferecer suporte à essa funcionalidade.

Caso aconteça algum problema em algum momento desse processo, como, por exemplo, a não-disponibilidade de rótulos (comprimentos de onda), faz-se necessária uma sinalização partindo do nó onde ocorreu a falha até os nós-folhas do grupo, sendo que esta sinalização deve possuir a informação da classe de equivalência de encaminhamento do LSP que não pôde ser estabelecido. Isso é feito para permitir a remoção das entradas nas tabelas LIB criadas anteriormente para essa FEC. A Figura 3 ilustra esse processo.

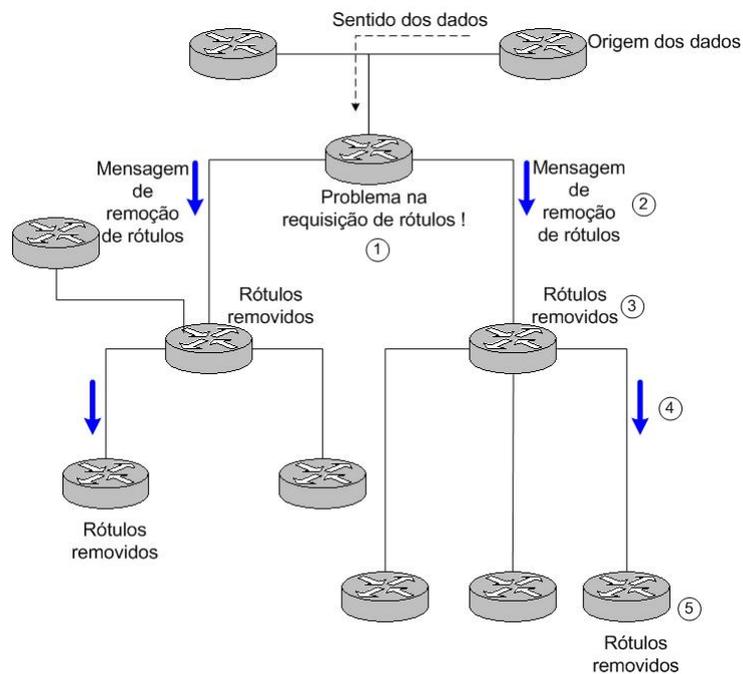


Figura 3. Procedimento adotado em caso de problemas na requisição de rótulos

O esquema proposto assemelha-se à variação de distribuição de rótulos não solicitada [2], tendo a vantagem de eliminar o retardo de sinalização imposto se o estabelecimento dos LSPs fosse iniciado da origem dos dados, isso sem comprometer a integridade dos LSPs estabelecidos e sem o desperdício de recursos, uma vez que o disparo acontecerá somente quando houver tráfego na árvore multicast.

A seguir mostramos o formato das bases de informação de rótulos geradas pelo algoritmo para cada tipo de nó (folha, intermediário e origem).

No primeiro momento (o disparo do LSP) cria-se uma entrada do nó folha no formato:

Tabela 1. Entrada na tabela LIB para um nó folha

FEC	Nó de entrada	Rótulo de entrada	Nó de saída	Rótulo de Saída
Identificador do nó origem	Próximo nó da rota em direção à origem	Requisitado nessa etapa	-1	-1

Onde:

FEC: Representa a classe de equivalência de encaminhamento que neste caso está associada ao identificador do nó origem dos dados.

Nó de entrada: Define de onde os dados chegam a esse nó, que no caso é o próximo nó em direção à origem dos dados.

Rótulo de entrada: O rótulo de entrada consiste no rótulo que é submetido a esse nó. Ele é requisitado nesse momento pois este parâmetro será indicado para o próximo nó em direção à origem para garantir a criação de um LSP consistente entre o nó folha e a origem dos dados.

Nó de saída: Representa o próximo salto dos pacotes. Aqui é definido o valor -1 pois trata-se de um nó folha, não existe nenhum outro nó após este.

Rótulo de saída: Representa o novo valor do rótulo. Aqui é definido o valor -1 pois trata-se de um nó folha.

À medida que a sinalização vai percorrendo os nós seguintes, entradas vão sendo criadas nas LIBs de cada um deles na forma:

Tabela 2. Entrada na tabela LIB para os nós intermediários

FEC	Nó de entrada	Rótulo de entrada	Nó de saída	Rótulo de Saída
Identificador do nó origem	Próximo nó da rota em direção à origem	Requisitado nessa etapa	Identificador do próximo nó da rota em direção aos nós-folhas	Rótulo de entrada do próximo nó da rota em direção aos nós-folhas

Onde:

FEC, *Nó de entrada* e *Rótulo de entrada* são interpretados e definidos de maneira semelhante à que acontece no nó-folha.

Nó de saída: É definida com sendo um nó da rota em direção a um determinado nó-folha, onde o LSP já foi disparado.

Rótulo de saída: Definido com o rótulo de entrada do nó representado pelo nó de saída estabelecido anteriormente.

Se este nó atuar como replicador de dados, novas entradas semelhantes deverão ser criadas na LIB com o mesmo valor de rótulo e nó de entrada, mas com diferentes nós e rótulos de saída.

Quando a mensagem chega ao nó de origem, uma ou mais entradas na LIB do mesmo são criadas com o seguinte formato:

Tabela 3. Entrada na tabela LIB para o nó de origem

FEC	Nó de entrada	Rótulo de entrada	Nó de saída	Rótulo de Saída
Identificador do nó origem	-1	-1	Identificador do próximo nó da rota em direção aos nós-folhas	Rótulo de entrada do próximo nó da rota em direção aos nós-folhas

Onde:

FEC, *Nó de saída* e *Rótulo de saída* são interpretados e definidos de maneira semelhante à que acontece na Tabela 2.

Nó de entrada: Aqui é definido o valor -1 pois trata-se do nó origem, não existe nenhum outro nó antes deste.

Rótulo de entrada: Aqui é definido o valor -1 pois trata-se do nó origem.

4. Análise do Mecanismo Proposto

4.1. Ferramentas Utilizadas

Para efetuar a análise da sinalização proposta e verificar a aplicabilidade da mesma, simulações foram realizadas no ambiente de simulação NS-2 (*Network Simulator*). O NS-2 [9] é um simulador de redes de computadores orientado a eventos discretos bastante utilizado pela comunidade científica para análise e validação de propostas, possuindo como principal atrativo uma arquitetura extensível onde pode-se adicionar novas funcionalidades de acordo com a necessidade dos pesquisadores.

O NS-2 possui módulos para comutação por rótulos: o MNS (“*MPLS Network Simulator*”) [10], para simulação de redes ópticas WDM baseadas em comutação de lambdas (circuitos); e o OWNS (“*Optical WDM Network Simulator*”) [11], além de contar com suporte à comunicação multicast através da implementação de protocolos de modo denso, como o PIM-DM e o DVMRP, modo esparso, como o PIM-SM, protocolos de árvore compartilhada, entre outros.

O OWNS é um módulo estendido ao NS-2 que permite simulação de redes WDM que utilizam comutação de circuitos, também conhecida como comutação de lambdas. Também apresenta componentes como nós de comutação óptica, enlaces com vários comprimentos de onda, algoritmos de roteamento e alocação de comprimentos de onda.

O MNS adiciona capacidades de simulação de redes MPLS ao NS-2, incluindo características como comutação por rótulos, suporte aos protocolos LDP (*Label Distribution Protocol*) e CR-LDP (*Constraint-based Routed Label Distribution Protocol*), agregação de fluxos, roteamento baseado em restrições e permite o uso de técnicas de proteção e restauração de LSPs.

A versão do NS-2 utilizada neste trabalho foi a 2.1b6, pois a mesma apresenta melhor compatibilidade com as extensões do NS-2 OWNS e MNS que são fundamentais para o contexto de simulação desejado.

Contudo, não existe interoperabilidade entre esse módulos, além dos mesmos não terem suporte à comunicação multicast. Portanto, a simulação do mecanismo de estabelecimento de LSPs proposto exige as seguintes condições preliminares:

- A integração dos módulos OWNS e MNS, descrita em detalhes em [12] [13], com o intuito de caracterizar a arquitetura GMPLS onde os rótulos são associados aos comprimentos de onda (lambdas). Vale ressaltar que a arquitetura GMPLS incorpora novas funções adicionadas às existentes no MPLS, porém em nosso caso, as demais características do GMPLS não foram implementadas, sendo suficiente o mapeamento entre rótulos e lambdas e o uso das funcionalidades já definidas no módulo MNS.
- Modificações e adaptações necessárias para se utilizar a estrutura combinada desenvolvida anteriormente no contexto da comunicação multicast, que inclui o desenvolvimento de replicadores aptos a realizar comutação por rótulos e a implementação da estratégia de sinalização propostas. Boudani e Cousin [14] propuseram uma ferramenta de simulação baseada no NS-2 que implementa a comunicação multicast em redes MPLS. Contudo, esta proposta limita-se ao uso do protocolo de roteamento multicast PIM-SM, onde a distribuição dos rótulos é realizada através de sinalização explícita, com mensagens *Join*, enquanto a proposta apresentada nesse trabalho é compatível com uma variedade maior de protocolos uma vez que implementa o disparo de LSPs orientado ao tráfego.

A Figura 4 mostra a estrutura de nó do NS-2 desenvolvida para suportar a comunicação multicast na comutação por rótulos.

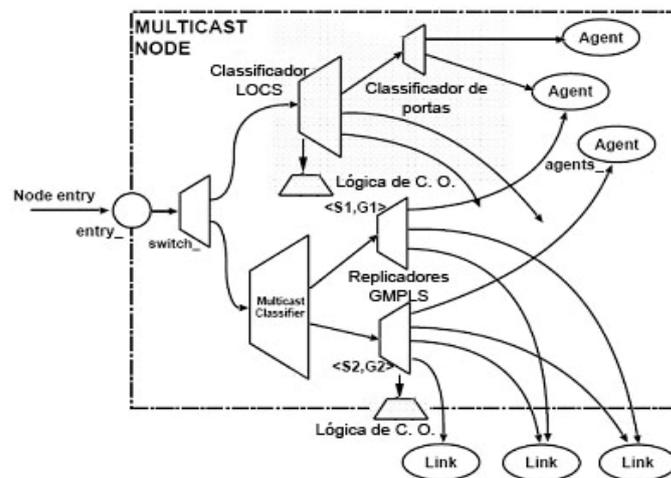


Figura 4. Estrutura do nó desenvolvido para as simulações

O classificador LOCS é a união dos classificadores do nó MPLS e do nó WDM pertencentes ao MNS e ao OWNS respectivamente. O classificador é responsável por encaminhar a informação para o objeto de simulação apropriado, como, por exemplo, um agente que simula um protocolo de transporte. A partir desse novo classificador constrói-se uma estrutura (lógica de comprimentos de onda) que guarda as informações dos comprimentos de onda alocados em cada enlace com base nos LSPs estabelecidos, utilizando para isso a base de informação de rótulos do MPLS, a tabela LIB.

Na parte do nó que trata de comunicação multicast adicionou-se um novo replicador, o replicador GMPLS que tem como função produzir várias cópias da informação que chega ao mesmo e as envia para os seus nós de saída. O objeto replicador é essencial para a implementação da comunicação multicast.

As ações tomadas por esse nó ao receber um pacote estão descritas a seguir:

1. No momento em que um pacote chega ao ponto de entrada do nó, o mesmo é analisado para verificar se está destinado a um endereço multicast ou não.
2. Em caso afirmativo, o pacote é repassado para o Classificador Multicast que, por sua vez, envia o pacote para o replicador GMPLS adequado. Caso contrário, a informação é encaminhada para o Classificador LOCS.
3. Se o próximo salto do pacote for o próprio nó, ele é repassado para o classificador de portas que define qual agente será responsável por tratar a informação recebida.
4. Caso contrário, o pacote é repassado para os próximos nós através dos enlaces ópticos realizando comutação baseada em rótulos.

O mecanismo de comutação por rótulos no novo nó é descrito a seguir:

1. Quando um pacote chega ao replicador GMPLS ou classificador LOCS, o mesmo é analisado para verificar se está rotulado ou não.
2. Se o pacote estiver rotulado, a troca de rótulos é processada (o valor do rótulo de entrada pode ser diferente do valor de rótulo de saída ou não) e a informação é repassada para o correspondente nó de saída. Caso o valor do rótulo de entrada for diferente do valor referente ao rótulo de saída, a conversão de lambdas é caracterizada. Quando o pacote chega ao seu destino, não ocorre a troca de rótulos.
3. Se o pacote não estiver rotulado, no entanto, existir uma classe de equivalência de encaminhamento (que define um conjunto de pacotes roteado da maneira semelhante) para o mesmo, um rótulo é inserido e a lógica de comprimentos de onda atualizada.
4. Caso não exista uma classe de equivalência de encaminhamento para o pacote ele é roteado de forma convencional, em nível 3.

Uma vez finalizada essa integração, pode-se adaptar as funcionalidades existentes no MNS, como comutação por rótulos, engenharia de tráfego, proteção e restauração, entre outros, para o contexto de redes ópticas, oferecido pelo OWNS.

Em seguida, foi implementada a estratégia de disparo de LSPs definida no artigo, que foi incorporada ao protocolo LDP existente no MNS e associada ao evento de criação de entradas no MFC.

4.2. Estudo de Caso

Nesta seção, será apresentado um estudo de caso com o objetivo de ilustrar o funcionamento do algoritmo proposto em um possível backbone multicast interligando as futuras redes metropolitanas das capitais da Amazônia Legal, incluindo também Brasília, usando fibras ópticas. Essa rede poderia ser implementada através dos cabos OCTL (Cabos Ópticos em Linhas de Transmissão) da Eletronorte que utilizam a tecnologia OPGW.

Essa proposta de backbone está representada na Figura 5 e será utilizada nas simulações.

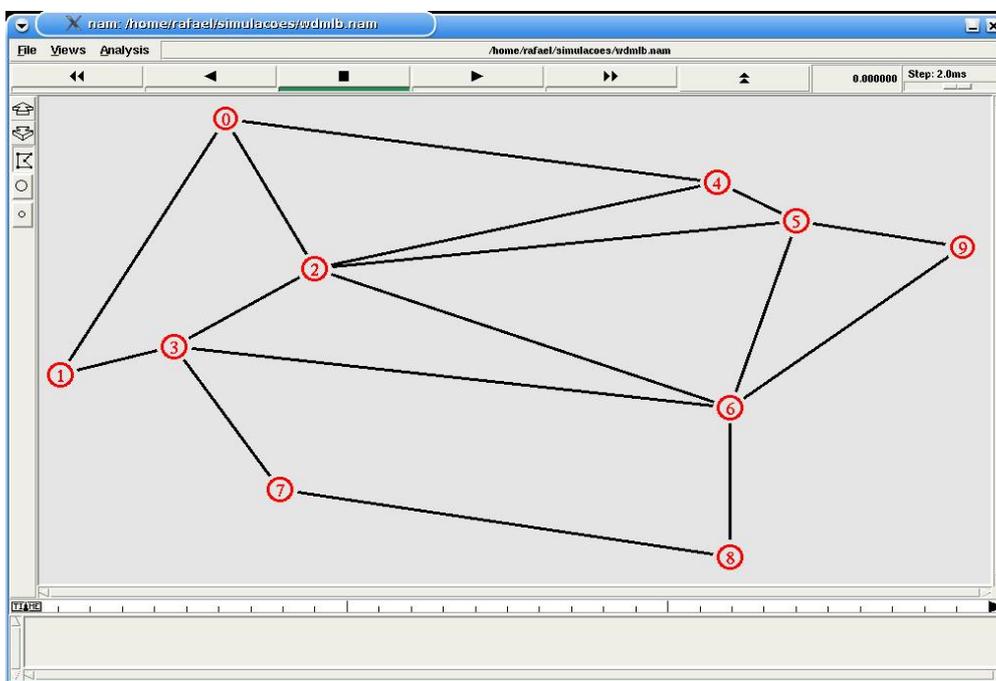


Figura 5. Topologia utilizada nas simulações

A rede é composta de 10 nós cada um dos quais representando uma capital:

Nó 0 – Boa Vista	Nó 1 – Rio Branco
Nó 2 – Manaus	Nó 3 – Porto Velho
Nó 4 – Macapá	Nó 5 – Belém
Nó 6 – Palmas	Nó 7 – Cuiabá
Nó 8 – Brasília	Nó 9 – São Luís

Os enlaces possuem capacidade para 10Gbps e seus retardos de propagação em milissegundos estão listados a seguir. Esses retardos de propagação são baseados nas distâncias reais entre as cidades.

Boa Vista – Rio Branco: 11ms	Boa Vista – Manaus: 4ms
Boa Vista – Macapá: 30ms	Rio Branco – Porto Velho: 3ms
Manaus – Porto Velho: 5ms	Manaus – Macapá: 25ms
Manaus – Belém: 26ms	Manaus – Palmas: 20ms
Porto Velho – Cuiabá: 7ms	Porto Velho – Palmas: 16ms
Macapá – Belém: 2ms	Belém – Palmas: 6ms
Belém – São Luís: 4ms	Palmas – São Luís: 7ms
Palmas – Brasília: 5ms	Cuiabá – Brasília: 6ms

O tipo de tráfego utilizado é o CBR (Constant Bit Rate) com taxa de 4Mbps. Essa taxa pode ser associada à transmissão de conteúdo multimídia no formato MPEG-2. Foi definido que o nó de Brasília (número 8) envia os dados para um grupo multicast composto pelos nós de Belém (número 5), Boa Vista (número 0) e São Luís (número 9). O protocolo de roteamento multicast utilizado é o PIM-SM (no NS-2 este protocolo é referenciado pelo termo multicast centralizado) com ponto de encontro representado pelo nó 6 (Palmas). A escolha do PIM-SM deve-se a ampla adoção deste na Internet e ao fato da densidade esparsa do grupo multicast utilizado.

4.3. Resultados

A seguir apresentamos algumas das tabelas LIB resultantes da aplicação do esquema de disparo de LSPs proposto utilizando o cenário descrito na seção anterior. O objetivo é ilustrar o funcionamento do algoritmo sugerido para criação dos caminhos comutados por rótulos.

```

--)_PFT dump_ [LSR 8] (--)
-----
FEC      Fid      PRio     LIBptr    SLIBptr  AlternativePath
 8        -1        0        0         -1        -1

__LIB dump__ [LSR 8]
-----
#        iIface  iLabel  oIface  oLabel  LIBptr  Linkerror?
0:       -1      -1      6       1       -1      -1

```

Figura 6. Tabelas PFT e LIB para o nó 8 (origem)

Nossa plataforma de simulação herda do módulo MNS uma estrutura denominada PFT (*Partial Forwarding Table*) que serve principalmente para relacionar classes de equivalência de encaminhamento com entradas na tabela LIB. Na Figura 6, o valor de FEC 8 refere-se à todos os pacotes multicast que possuem como origem esse nó. Se houvessem outras fontes de dados, seriam criadas novas entradas para as classes de equivalência de encaminhamento adicionais nas tabelas LIB pertencentes aos nós que recebem ou encaminham os tráfegos originados por essas fontes.

```
--) __PFT dump__ [LSR 6] (--
```

FEC	Fid	PRio	LIBptr	SLIBptr	AlternativePath
8	-1	0	0	-1	-1
8	-1	0	1	-1	-1
8	-1	0	2	-1	-1


```
__LIB dump__ [LSR 6]
```

#	iIface	iLabel	oIface	oLabel	LIBptr	Linkerror?
0:	8	1	2	1	-1	-1
1:	8	1	5	1	-1	-1
2:	8	1	9	1	-1	-1

Figura. 7. Tabelas PFT e LIB para o nó 6 (intermediário)

Na Figura 7, como o nó 6 realiza replicação de pacotes, observa-se a criação de três entradas na LIB para a mesma FEC, uma que serve para o envio de pacotes ao nó 0 (entrada 0) através do nó de saída 2, outra para encaminhar tráfego ao nó 5 (entrada 1) e a última entrada para os dados destinados ao nó 9 (entrada 2). Todas as entradas possuem o mesmo rótulo de entrada. Os rótulos de saída podem ou não ser iguais.

```
--) __PFT dump__ [LSR 5] (--
```

FEC	Fid	PRio	LIBptr	SLIBptr	AlternativePath
8	-1	0	0	-1	-1


```
__LIB dump__ [LSR 5]
```

#	iIface	iLabel	oIface	oLabel	LIBptr	Linkerror?
0:	6	1	-1	-1	-1	-1

Figura 8. Tabela LIB do nó 5 (nó-folha)

No caso da Figura 8, o nó 5 é um dos receptores do grupo. A partir deste e dos outros receptores do grupo é que se inicia o processo de estabelecimento de LSPs proposto. Das tabelas LIBs geradas conclui-se que essa parte do LSP referente à FEC 8 (grupo que recebe os pacotes originados no nó 8) corresponde ao caminho formado pelos nós 8, 6 e 5, sucessivamente. O restante do LSP é construído a partir dos nós 0 e 9 que são os outros receptores do grupo.

Vale ressaltar que o estabelecimento do LSP ocorre de forma ordenada. Inicialmente a sinalização parte dos nós 0, 5 e 9 que solicitam recursos para si próprios. Nós intermediários como o 2 e o 6 somente participam do processo de estabelecimento do LSP no momento em que recebem as informações oriundas dos nós 0, 5 e 9. O processo segue até que a sinalização chegue ao nó de origem do tráfego multicast desse grupo, no caso o nó 8. Essa característica evita que ocorram inconsistências na construção do LSP.

Cada mensagem de sinalização que se origina em um nó folha do grupo multicast em direção à origem possui um tempo de retardo igual à metade do valor do atraso que normalmente ocorre na sinalização MPLS quando se deseja criar caminhos

comutados por rótulo utilizando o controle ordenado, já que em nossa proposta não é necessário que os dados de controle sejam enviados da origem para os nós folhas e destes de volta para a origem, que é o que tradicionalmente acontece.

Os resultados também permitem verificações sobre a utilização dos recursos da rede. Nota-se a utilização de apenas um comprimento de onda para efetuar a comunicação multicast estudada. Em outros esquemas de disparos de LSPs, como o mecanismo orientado à topologia, esse número pode ser maior, uma vez que essa estratégia aloca recursos considerando todas as possibilidades de transmissão multicast possíveis, e não apenas aquelas que efetivamente transmitem dados.

5. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Diversas questões referentes à adequação da comutação baseada em rótulos ao contexto da comunicação multicast em redes ópticas estão sendo discutidas e definidas. Este trabalho apresentou uma contribuição efetiva para o estabelecimento de caminhos rotulados utilizando a abordagem orientada ao tráfego, que foi a que se mostrou mais atrativa, pelo fato de não depender do uso de protocolos de roteamento multicast específicos e, na maioria dos casos, consumir menos rótulos.

Simulações foram realizadas para ilustrar o funcionamento do algoritmo sugerido que cumpre sua função de criação de caminhos comutados por rótulo no cenário proposto, além de poder contribuir para a minimização da probabilidade de bloqueio de conexões uma vez que a alocação de comprimentos de onda ocorre de modo controlado desde o nó destino até a origem dos dados e pelo fato da quantidade de requisições de comprimento de onda ser menor em um esquema guiado por tráfego, portanto, a possibilidade de um comprimento de onda já estar ocupado diminui bastante.

Trabalhos futuros envolvem o estudo detalhado do impacto do algoritmo proposto na probabilidade de bloqueio de conexões comparado a outras alternativas e uma especificação formal do algoritmo para validar possíveis implementações reais do mesmo. Questões relacionadas à escalabilidade, também devem ser melhor investigadas principalmente levando em consideração as particularidades dos diversos protocolos de roteamento multicast. A análise de mecanismos de engenharia de tráfego na comunicação multicast dentro do contexto de redes ópticas é outro tópico para pesquisas posteriores.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, da FINEP/RNP e da Eletronorte.

Referências

- [1] Abelém, A.; Stanton, M. A. Inter-Redes IP Baseadas em Redes Ópticas. Livro texto dos Minicursos, 20º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2002), Cap. 2, pp. 63-123, Búzios, RJ, Brasil. Maio, 2002.
- [2] Rosen, E. et al. Multiprotocol Label Switching Architecture. RFC3031. Janeiro, 2001.

- [3] Mannie E. (Editor). Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture. Internet Draft, draft-ietf-ccamp-gmpls-architecture-04.txt. Fevereiro, 2003.
- [4] Ooms, D. et al. Overview of IP Multicast in a Multi-Protocol Label Switching (MPLS) Environment. RFC 3353. Agosto, 2002.
- [5] Boddapati, S. et al. P2MP LSP Setup using PIM-SSM and LDP. Internet Draft, draft-boddapati-mpls-pim-ldp-p2mp-00.txt. Novembro, 2005.
- [6] Dumortier, P.; Ooms, D.; Livens, W.; Girard, I.; Ramalho, M. IP Multicast Shortcut over ATM: A Winner Combination. IEEE Globecom 1998, Nov. 1998.
- [7] Murthy, C.; Gurusamy, M. WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms, Prentice Hall PTR, Nov. 2001.
- [8] Magalhães, M.; Cardozo, E. Introdução à comutação IP por rótulos através de MPLS. Livro texto dos Minicursos, 19º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2002), Cap. 3, Florianópolis, SC, Brasil. Maio, 2001.
- [9] Fall, K.; Varadhan, V. The *ns* Manual. Url: <http://www.isi.edu/nsnam/ns> . Acessado em: Julho de 2005.
- [10] Ahn, G; Chun, W. Design and Implementation of MPLS Network Simulator. Url: <http://flower.ce.cnu.ac.kr/~fog1/mns/>. Acessado em: Julho de 2005.
- [11] Wen, B; Bhide, N. M.; Shenai, R. K.; Sivalingam, K. M. Optical Wavelength Division Multiplexing (WDM) Network Simulator (OWNs): Architecture and Performance Studies. Em: SPIE Optical Networks Magazine Special Issue on "Simulation, CAD, and Measurement of Optical Networks", Março, 2001.
- [12] Esteves, R.; Nagahama, F.; Abelém, A.; Stanton, M. A Proposal to Adjust the GMPLS Control and Signaling Mechanisms for Optical Burst Switched Networks. In: Anais do 3rd International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS2004). Dezembro, 2004.
- [13] Viana, J.; Esteves, R; Abelém, A; Costa, J. C.; Stanton, M. Análise de Mecanismos de Recuperação de Falhas em Redes Ópticas de Nova Geração com Plano de Controle Baseado no GMPLS. In: IV Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação-WPERFORMANCE (inserido no SBC2005), São Leopoldo, RS, Brasil. Julho, 2005.
- [14] Boudani, A.; Cousin, B. Multicast Routing Simulator over MPLS Networks. 36th Annual Simulation Symposium, Orlando, Florida, USA, Março 2003.