

PROPOSTA DE UM ALGORITMO DE ATRIBUIÇÃO DE RÓTULOS BASEADO EM SRLG EM UM AMBIENTE GMPLS-WDM

Daniela Cunha, Graça Bressan

Resumo – O baixo desempenho das redes GMPLS-WDM com restrição de continuidade de comprimento de onda se deve principalmente ao subproblema de atribuição de comprimento de onda do RWA. Na tentativa de melhorar o desempenho dessas redes, propõe-se um algoritmo de atribuição de rótulos que faz uso dos conceitos conjunto de rótulos e SRLG já implementados pelo GMPLS.

Palavras Chave – redes ópticas, GMPLS, WDM, RWA, SRLG, conjunto de rótulos, atribuição de rótulos.

Abstract – The bad performance of the GMPLS-WDM networks with wavelength continuity constraint is mainly due the wavelength assignment problem of RWA. Trying to improve the performance of these networks, it is proposed a label assignment algorithm, which uses the concepts of label set and SRLG, already implemented by GMPLS.

Index Terms – optical networks, GMPLS, WDM, RWA, SRLG, label set, wavelength assignment.

I. INTRODUÇÃO

O avanço explosivo da Internet nos últimos anos tem provocado um aumento considerável na demanda de largura de banda nas redes de transporte que constituem os *backbones* dos provedores de serviços de telecomunicações. Com o objetivo de atender, de forma satisfatória, tal demanda de tráfego, tem sido desenvolvida uma nova geração de redes de transporte baseada em uma infra-estrutura óptica inteligente e de alta capacidade.

Nas redes ópticas transparentes não existe nenhum armazenamento nos nós intermediários da rede e as funções de roteamento, tal como a comutação de comprimentos de onda, são executadas no domínio óptico eliminando os conversores OEO (óptico-elétrico-óptico) e suas limitações (i.e., atraso de processamento, custo dos equipamentos, etc).

As redes ópticas transparentes com multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM) são uma das maiores candidatas para as futuras redes de comunicação de grande distância. As redes WDM transparentes são consideradas no restante deste estudo e citadas apenas como redes WDM.

Para se ter redes ópticas inteligentes, foi desenvolvido um ambiente óptico que utiliza um plano de controle e assim surgiu o GMPLS-WDM.

O GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*), avanço lógico do MPLS para redes ópticas, é um conjunto de protocolos do plano de controle que fornece uma semântica consistente e uniforme para sinalização, roteamento e gerenciamento de enlace. O GMPLS está sendo desenvolvido

com o objetivo de ser aplicável a todo tipo de tráfego de transporte e serviço. O GMPLS permite o interfaceamento com tecnologias baseadas na comutação de pacotes, na comutação no domínio do tempo, comprimento de onda e fibra [BERGER, 2003].

II. REDES ÓPTICAS

Com o objetivo de melhorar o aproveitamento da capacidade de transmissão das fibras ópticas, as redes ópticas passaram a usar o WDM. Com o WDM é possível estabelecer mais de uma conexão, simultaneamente, através de uma única fibra óptica, mostrando, portanto ser uma técnica promissora para satisfazer as altas demandas de largura de banda [ASSI, 2001], [CHAUDHURI, 2000].

Nas redes ópticas WDM, um caminho óptico entre duas estações é um sinal óptico que vai de um nó origem a um nó destino ao longo de uma rota estabelecida, utilizando um comprimento de onda nos enlaces que ligam esses nós (Figura 1). Cada comprimento de onda é sempre representado por uma cor, logo diferentes comprimentos de onda são representados por diversas cores distintas [KIM, 2003].

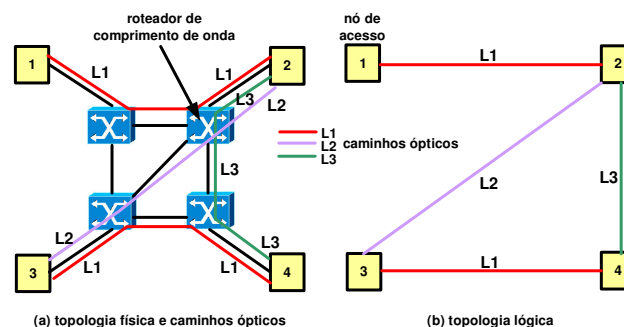


Figura 1 – Rede com roteamento de comprimento de onda.

Através de um caminho óptico uma conexão em uma rede óptica é estabelecida utilizando um determinado comprimento de onda. Em geral, seria desejável poder alocar um comprimento de onda diferente para cada pedido de conexão, porém, nas redes ópticas WDM, o número de comprimentos de onda disponíveis nos enlaces limita o número possível de conexões entre cada par de nós. Múltiplos caminhos podem usar o mesmo comprimento de onda, desde que eles não se sobreponham em uma mesma fibra. Esta capacidade espacial de reutilização permite à rede ter um número maior de caminhos utilizando um número limitado de comprimentos de onda.

III. ENCAMINHAMENTO DE TRÁFEGO

Dentro das redes ópticas, o tráfego em cada conexão estabelecida pode ser encaminhado pela rede de duas formas:

(i) sem conversão de comprimento de onda; (ii) com conversão de comprimento de onda.

Sem conversão de comprimentos de onda

Um caminho óptico usa o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces ópticos que o compõem, da origem até o destino. Essa propriedade é chamada de restrição de continuidade de comprimento de onda. Duas conexões que compartilham um enlace comum devem utilizar comprimentos de onda distintos [ZANG, 2000], [ROUSKAS, 2001]. A restrição de continuidade de comprimento de onda implica em uma utilização ineficiente dos comprimentos de onda e tem como resultado uma probabilidade de bloqueio de conexões mais alta se comparada com a probabilidade de bloqueio de conexões em redes ópticas com conversores. Um pedido de conexão pode ser bloqueado, mesmo que haja comprimentos de onda disponíveis ao longo do caminho que liga os nós origem e destino da conexão solicitada.

Com conversão de comprimentos de onda

Diferentes comprimentos de onda podem ser usados pelos enlaces das rotas de conexões ao longo do caminho óptico, ou seja, pode haver conversão de um comprimento de onda para outro comprimento de onda em um mesmo caminho óptico sem, contudo, interferir no sinal de informação que está sendo transmitido. Neste tipo de encaminhamento, é necessária a utilização de conversores nos roteadores para converter o comprimento de onda nos nós intermediários [KARASAN, 1998]. Esses dispositivos permitem uma melhor utilização dos comprimentos de onda, minimizando a probabilidade de bloqueio de conexões, pois pode melhorar a eficiência da rede ao resolver os conflitos de alocação de comprimentos de onda nos caminhos [ZANG, 2000], [ROUSKAS, 2001].

A tecnologia de conversores de comprimento de onda ainda não está amadurecida e competitiva e, os mesmos possuem um custo muito alto. Deste modo, o foco deste estudo é em redes ópticas transparentes que não possuem a capacidade de conversão de comprimento de onda.

IV. RWA

Um problema muito importante nas redes WDM é a configuração de caminhos ópticos para um conjunto de pedidos de conexões através de roteamento e atribuição de comprimentos de onda para cada uma dessas conexões, dada uma restrição no número de comprimentos de onda disponíveis. Este problema é denominado de problema de roteamento e atribuição de comprimento de onda - RWA (*Routing and Wavelength Assignment*). O objetivo do RWA é selecionar a melhor combinação de rotas e comprimentos de onda para cada conexão de forma a otimizar o atendimento da demanda dentro da rede, maximizando o número de conexões estabelecidas, minimizando a probabilidade de bloqueio de conexão e/ou minimizando o número de comprimentos de onda usados pela rede [ZHU, 2000], [ASSI, 2001], [STRAND, 2001], [ZANG, 2000], [OKI, 2004].

A. Subproblema de Roteamento

O subproblema de roteamento se restringe em encontrar uma rota ou caminho para um par origem-destino de um pedido de

conexão [ZANG, 2001], [MAIER, 2004], [TACHIBANA, 2002]. O problema é atualmente tratado com as seguintes técnicas: roteamento fixo, roteamento fixo alternativo, roteamento adaptativo.

B. Subproblema de Atribuição de Comprimento de Onda

No subproblema de atribuição de comprimento de onda, deve-se alocar um comprimento de onda para cada caminho óptico de tal forma que dois caminhos ópticos não compartilham um mesmo comprimento de onda em uma mesma fibra. Dado um conjunto de pedidos de caminhos ópticos e suas rotas, a atribuição de um comprimento de onda deve ser feita de forma a maximizar o número de conexões possíveis de serem estabelecidas futuramente minimizando assim a probabilidade de bloqueio de novas conexões [ZHU, 2000], [ASSI, 2001].

Os principais algoritmos de atribuição de comprimento de onda propostos na literatura são: *First-Fit* [CHLAMTAC, 1989], *Random Wavelength Assignment* [CHLAMTAC, 1989], *Most-Used* [SUBRAMANIAM, 1997], *Least-Used* [SUBRAMANIAM, 1997], *Max-Sum* [BARRY, 1997], *Relative Capacity Loss* [ZHANG, 1998], *Distributed Relative Capacity Loss* [ZANG, 2000].

V. REDES GMPLS-WDM

Atualmente, existe um grande interesse em automatizar o estabelecimento e liberação de caminhos ópticos em redes ópticas de transporte. Uma tendência emergente na indústria é utilizar um plano de controle da camada óptica, ao invés de um plano de gerenciamento como é feito tradicionalmente. Espera-se que um plano de controle de camada óptica inteligente ofereça vários benefícios incluindo: provisionamento de circuito rápido, flexibilidade de serviço tal como serviços de largura de banda sob demanda, melhor interoperabilidade dos elementos de rede de diferentes fabricantes, e aumento da capacidade de sobrevivência fornecendo habilidade de reroteamento dinâmico quando uma falha ocorre [OKI, 2004], [KIM, 2003].

Recentemente, tornou-se evidente que a indústria direcionou o GMPLS como a solução de plano de controle (i.e., roteamento e sinalização) para a próxima geração de redes ópticas. O plano de controle do GMPLS emprega o protocolo de roteamento para manter a informação de estado da rede e o protocolo de sinalização para fornecer a funcionalidade básica de mensagens para sinalização.

Quando há o fornecimento em uma rede GMPLS totalmente óptica para roteamento e seleção de comprimento de onda, um pedido de conexão pode falhar devido a um dos dois eventos de bloqueio denominados bloqueio de enlace *forward* e bloqueio de enlace *backward*. O bloqueio de enlace *forward* é devido a recursos de comprimento de onda insuficientes e algoritmos de roteamento de balanceamento não carregados. Bloqueio de enlace *backward* acontece devido ao conflito de reservas de rótulos (nas redes GMPLS-WDM, um rótulo particular é sinônimo de um comprimento de onda específico).

A. Estabelecimento de caminho óptico via GMPLS

A Figura 2 apresenta dois LSPs (caminhos ópticos) na rede óptica onde os comutadores (OXC – *optical crossconnects*) não são capazes de realizar a conversão de comprimento de onda. O LSP azul (L1) atravessa o comutador A em direção a B, D, E e F. O LSP vermelho (L2) atravessa os comutadores C, D, E e G. As cores representam os comprimentos de onda em uso pelos LSPs. Não existem conflitos no enlace D e E pois dois LSPs utilizam o mesmo enlace mas alocam comprimentos de onda diferentes [JERRAN, 2001].

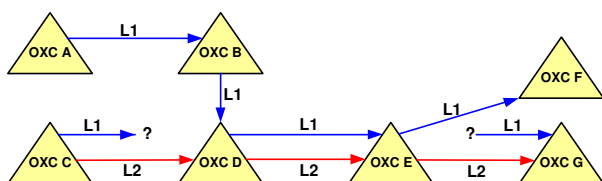


Figura 2 – Conflito de rótulos em comutadores ópticos.

No entanto, quando o LSR C precisa estabelecer um novo LSP através dos nós D e E para G, ele deve escolher um novo comprimento de onda. Se a escolha for realizada pelo LSR G o nó G poderia escolher o comprimento de onda azul (L1). Como o comprimento de onda azul (L1) já está sendo utilizado entre D e E, o mesmo não pode ser utilizado. Se a escolha for feita pelo LSR C, um problema similar pode ocorrer. Assim, há necessidade de permitir que todos OXCs ao longo do caminho a ser estabelecido restrinjam e/ou influenciem na escolha de rótulos para garantir que os rótulos apropriados sejam selecionados.

GMPLS introduz o conceito de conjunto de rótulos para restringir a faixa dos rótulos que podem ser usados por um LSP particular entre dois *peers*, ou seja, um LSR *upstream* inclui um conjunto de rótulos no seu pedido de sinalização para restringir a escolha de um rótulo pelo LSR *downstream* para o enlace entre eles. O receptor de um conjunto de rótulos (LSR *downstream*) limita sua escolha de rótulos para um rótulo pertencente ao conjunto de rótulos caso contrário o estabelecimento do LSP falha [JERRAN, 2001].

Figura 3 ilustra a seqüência de passos que leva ao estabelecimento de um caminho óptico com uso do conjunto de rótulos. No passo (a), a origem inclui um conjunto de rótulos $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6\}$ na sua mensagem *Path* (pedido de rótulo). Após o recebimento da mensagem *Path*, o primeiro roteador de comprimento de onda faz a interseção do conjunto de rótulos de entrada e o conjunto de rótulos disponíveis no seu enlace de saída, resultando em um conjunto de rótulos de saída $\{\lambda_1, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6\}$, que será encaminhado na mensagem *Path* ao próximo salto. Cada roteador de comprimento de onda realiza a mesma operação até que o conjunto de rótulos seja propagado ao destino, que então seleciona um dos rótulos aceitáveis. Depois que o destino selecionou um rótulo indicado no passo (b), rótulo λ_1 é atribuído a cada salto em direção a origem através da mensagem *Resv* (reserva de rótulo). Quando todos os rótulos ao longo do caminho forem atribuídos, um caminho óptico com comprimento de onda λ_1 entre origem e destino é estabelecido (passo (c)) [WIDJAJA, 2002], [OKI, 2004].

Se o nó é incapaz de escolher um rótulo do conjunto de rótulos ou se existe um problema em analisar o conjunto de rótulos ou se o conjunto de rótulos resultante é vazio, então o pedido é finalizado e uma mensagem *PathErr* é gerada.

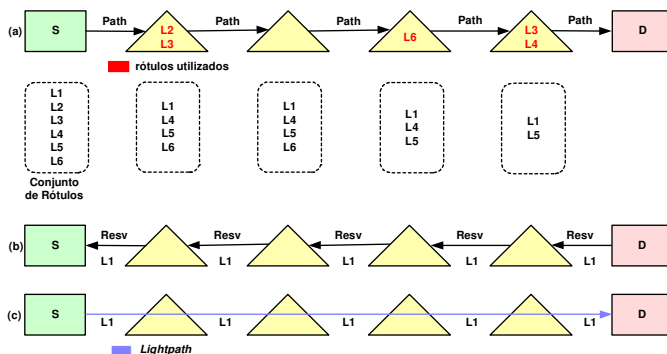


Figura 3 – Como estabelecer um caminho óptico com sinalização RSVP-TE.

Note que um rótulo pode ser sugerido por múltiplas mensagens *Path*, pois o rótulo não é realmente reservado até que a mensagem *Resv* seja recebida. Assim, múltiplas mensagens *Resv* podem tentar reservar os mesmos recursos, resultando em falha para pelo menos um pedido de conexão. Assim, o conjunto de rótulos não é suficiente para eliminar o bloqueio de enlace *backward* que ocorre quando dois ou mais nós de egresso selecionam o mesmo rótulo para conexões que compartilham os mesmos enlaces.

B. Grupo de Enlaces de Risco Compartilhado – SRLG

SRLG, no inglês *shared risk link group*, fornece parâmetros de entrada fundamentais para o gerenciamento de recursos no plano de controle GMPLS e necessários para planejar a confiabilidade nas redes de transporte. Um SRLG está associado com uma entidade em risco, tipicamente um segmento de fibra, ou seja, um SRLG é definido como um conjunto de enlaces que compartilham um risco em comum (por exemplo, um recurso físico comum tal como enlace de fibra) [STRAND, 2001], [OKI, 2004].

Um conjunto de enlaces pode constituir um grupo de enlaces de risco compartilhado (SRLG) se estes compartilham um recurso cuja falha pode afetar todos os enlaces no conjunto e, um enlace pode pertencer a múltiplos SRLGs. Assim, a informação SRLG descreve a lista de SRLGs que um enlace pertence [PAPADIMITRIOU, 2003].

O conceito SRLG é considerado como um dos critérios mais importantes com relação a comutação de caminhos baseados em restrições nas rotas de canal óptico. Aplicando o critério de disjunção SRLG na computação de caminhos baseados em restrições, pode-se selecionar uma rota levando em consideração a separação de estrutura lógica e de recursos. Isto implica em uma probabilidade mais baixa de falhas de canal óptico simultaneamente.

Se diferentes comprimentos de onda são atribuídos, em uma única fibra para um LSP primário e o seu LSP de *backup*, um simples corte na fibra resultaria na falha de ambos caminhos. Para evitar este problema, o conceito SRLG foi introduzido

para garantir a disjunção destes dois LSPs. Figura 4 apresenta uma rede com SRLG, onde o número associado com cada enlace identifica o SRLG [STRAND, 2001]. Na Figura 4(a), os enlaces 1-4 e 3-2 possuem o mesmo número SRLG, o que significa que estes enlaces ópticos compartilham a mesma fibra como apresentado na Figura 4(b). Isto é conhecido como problema de *traps* (emboscada) [PAPADIMITRIOU, 2003].

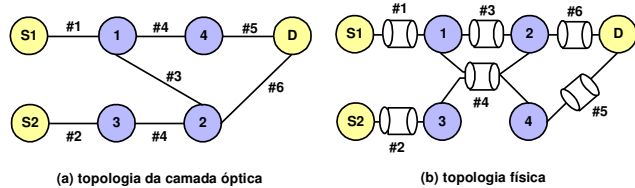


Figura 4 – SRLG - Exemplo de um modelo de rede.

As propriedades SRLG podem ser resumidas como segue:

- Um enlace pertence a mais de um SRLG se e somente se ele cruza (pelo menos) um dos recursos usados por cada um destes SRLGs.
- Dois enlaces pertencentes ao mesmo SRLG podem pertencer individualmente a (um ou mais) outros SRLGs.
- O conjunto de SRLGs S de um LSP é definido como a união dos SRLG s individuais dos enlaces individuais compondo este LSP.

VI. PROPOSTA – ALGORITMO DE ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA

A escolha de um bom algoritmo de atribuição de rota e comprimento de onda pode melhorar o desempenho da rede que assim passa a apresentar uma menor taxa de probabilidade de bloqueio de conexão.

Na tentativa de melhorar o desempenho das redes GMPLS-WDM com restrição de continuidade de comprimento de onda, pode-se expandir o conceito SRLG que passa a ser utilizado para o estabelecimento de todos os caminhos, especificamente na atribuição de comprimento de onda, juntamente com o conceito de conjunto de rótulos.

A. Proposta

A idéia para alocação de comprimentos de onda é que para conexões cujos caminhos ópticos compartilham pelo menos um enlace em comum na rede, deve-se atribuir diferentes comprimentos de onda para cada conexão, pois a propriedade de restrição de continuidade de comprimento de onda é considerada. Esta é a mesma idéia proposta pelo conceito SRLG para o estabelecimento de caminhos de proteção e que agora é usado para alocação de comprimento de onda, como proposta deste estudo. Com base na informação SRLG do caminho a ser estabelecido e dos caminhos já existentes tem como saber se estes compartilham ou não alguma entidade de risco (recurso) e assim decidir qual comprimento de onda deve ser atribuído.

Conexões que possuem o mesmo conjunto SRLG, ou pelo menos um dos enlaces desses caminhos ópticos dessas conexões possuem o mesmo SRLG-ID, significa que essas conexões compartilham entidades de risco. Caso a entidade de risco considerada seja apenas um segmento de fibra óptica,

durante o estabelecimento de um caminho óptico, se o mesmo cruzar com caminhos já existentes, ou seja, interseção do conjunto SRLG desses caminhos é diferente de vazio, conseqüentemente um comprimento de onda diferente do comprimento de onda dos caminhos cuja interseção do conjunto SRLG é diferente de vazio, deve ser atribuído ao novo caminho sendo estabelecido.

Assim, caminhos que compartilham enlaces (caminhos com pelo menos um SRLG-ID em comum) recebem diferentes comprimentos de onda e atendem a propriedade de restrição de continuidade de comprimento de onda.

O conceito conjunto de rótulos, quando aplicado sozinho, produz o mesmo resultado do conceito SRLG utilizado juntamente com o conjunto de rótulos. No entanto, o conceito de conjunto de rótulos usado isoladamente não consegue atender o problema *trap*. Por outro lado, SRLG mais conjunto de rótulos juntos conseguem produzir resultados corretos de possíveis comprimentos de ondas a serem escolhidos para atribuição, mesmo quando o problema de *trap* existe. Desta forma, consegue-se diminuir a probabilidade de bloqueio de conexões das redes GMPLS-WDM sem capacidade de conversão de comprimento de onda.

B. Algoritmo Proposto

Segue o algoritmo proposto.

```

1. SRLG-ID É DETERMINADO PARA CADA ENLACE NA REDE
2. Conexão é solicitada
3. ROTA É ESCOLHIDA
4. CONJUNTO SRLG DO CAMINHO É CONHECIDO
5. livre = conjunto_rótulos_livres (do nó de ingresso)
6. conjunto_rótulos = vazio
7. for i = 1 to comprimento(SRLG_caminho)
   linha = busca (SRLG_caminho(i))
   interseção = livre ∩ tabela SRLG_λ(linha,2)
   if interseção = vazio
     then conjunto_rótulos = livre
     else conjunto_rótulos = livre - interseção
     livre = conjunto_rótulos
   end for
8. Nó de egresso (destino) recebe o conjunto_rótulos
if conjunto_rótulos = vazio
  then passo 3 (escolher nova rota)
  if nova rota não existir
    then falha para o pedido de conexão
    rótulo não é escolhido
  else continuar algoritmo passo 4 ao passo 8
  else rótulo é escolhido
9. Tabelas SRLG_λ são atualizadas
10. Conjunto de rótulos livres é atualizado em cada nó
    If rótulo escolhido não for aceitável por algum nó
    then falha para o pedido de conexão
    
```

Onde:

- Conjunto-rótulos – conjunto de comprimentos de onda selecionados ao longo do caminho a ser estabelecido para possível escolha durante a atribuição de comprimento de onda
- Conjunto-rótulos-livres – conjunto de comprimentos de onda disponíveis para uso em um determinado nó da rede
- Livre – variável auxiliar
- Linha – contém o número de uma linha da tabela SRLG-λ
- Interseção – resultado da interseção entre os comprimentos de onda contidos na variável Livre e os comprimentos de

onda utilizados por uma entidade de risco específica representada por um SRLG-ID na tabela SRLG- λ

- SRLG-caminho – conjunto de SRLG-IDs de todos os enlaces que compõem um caminho
- SRLG- λ – tabela que contém cada SRLG-ID e os comprimentos de onda utilizados nas entidades de risco representadas pelo SRLG-ID. Esta tabela está presente em cada nó da rede e contém a informação relacionada com um nó específico, ou seja, contém apenas o SRLG-ID e respectivos comprimentos de onda utilizados nas entidades de risco que passam por aquele nó e não de todos os nós da rede. A Tabela 1 apresenta um esboço da tabela SRLG- λ .

Tabela 1 – Esboço da tabela SRLG- λ

Tabela SRLG- λ	
SRLG-ID	λ
1	—
2	$\lambda 1 \lambda 2$
3	$\lambda 1$

- Comprimento – função que determina o número de elementos de uma variável que representa um conjunto
- Busca – função que retorna a linha na tabela SRLG- λ onde se encontra um SRLG-ID particular

Segue o detalhamento do algoritmo:

Passo 1 – O SRLG-ID é estabelecido para cada enlace na rede antes desta ser colocada em funcionamento.

Passo 2 – Um pedido de caminho é solicitado, ou seja, uma requisição de conexão chega ao nó de ingresso da rede.

Passo 3 – Caminho de roteamento é determinado usando roteamento fixo alternativo ou roteamento adaptativo.

Passo 4 – SRLG-IDs dos enlaces do caminho a ser estabelecido são conhecidos e assim o SRLG-caminho é formado.

Passo 5 – Atribui-se todos os rótulos disponíveis do nó de ingresso à variável Livre.

Passo 6 – O Conjunto-Rótulos é inicializado como vazio.

Passo 7 – Em cada nó do caminho a ser estabelecido, é necessário fazer a interseção entre o conjunto-rótulos-livres e possíveis de serem utilizados e os comprimentos de onda em uso naquele enlace particular, representado por um SRLG-ID. Esta informação é mantida na tabela SRLG- λ e é obtida através do SRLG-ID do enlace em questão. Depois de feita a interseção, um novo conjunto de rótulos é construído retirando os comprimentos de onda que não mais podem ser utilizados para o caminho sendo estabelecido. Este procedimento (cada *loop* do FOR) é realizado em cada nó da rota ao longo do ambiente GMPLS-WDM.

Passo 8 – Quando o procedimento é finalizado, o nó de destino escolhe um dos rótulos (comprimentos de onda) já previamente selecionados no conjunto-rótulos. Pode-se utilizar uma das heurísticas de atribuição de rótulos apresentadas anteriormente. Se o conjunto-rótulos estiver vazio, tenta-se encontrar outro caminho. Se não existe outro caminho, então a falha ocorre.

Passo 9 e 10 – Com base no rótulo escolhido, as tabelas SRLG- λ de cada nó pertencente ao caminho são atualizadas através do envio da mensagem *Resv* que simultaneamente faz a atribuição do comprimento onda para aquele caminho específico através do ambiente GMPLS-WDM. Ao mesmo

tempo, o conjunto de rótulos livres e o conjunto de rótulos em uso mantido por cada nó da rede são atualizados nos nós que compõem o caminho estabelecido.

C. Sinalização e Análise Lógica

Segue a especificação mais detalhada do protocolo de sinalização durante a atribuição de comprimento de onda (Figura 6).

Estados definidos na especificação:

1. SRLG é estabelecido para todos os enlaces da rede antes da rede ser colocada em funcionamento
2. Conexão é solicitada ao nó de ingresso
3. Rota da conexão é determinada de acordo com nó de origem e destino
4. O SRLG-caminho é conhecido
5. Mensagem *Path* é enviada pelo nó *upstream* para o nó *downstream*
6. Nó *downstream* verifica se a codificação LSP utilizada e tipo de comutação são suportados
7. Cada nó gera um conjunto de rótulos de saída com base na informação SRLG
8. Verifica-se se o conjunto de rótulos de saída gerado é vazio ou não
9. Mensagem *Path* que transporta o conjunto de rótulos é recebida pelo nó de egresso
10. Verifica-se se o conjunto de rótulos final é vazio ou não
11. Tenta-se selecionar um rótulo a partir do conjunto de rótulos
12. Mensagem *Resv* é enviada do nó *downstream* para o nó *upstream*, até o nó de ingresso
13. Verifica-se se o valor do rótulo transportado pela mensagem *Resv* é aceitável ou não
14. Atribuição do comprimento de onda é realizada com sucesso e as tabelas de SRLG em cada nó são atualizadas
15. Alguma falha ocorreu e a conexão não foi estabelecida

Mensagens utilizadas na especificação:

- A. Todos os possíveis caminhos foram utilizados sem sucesso
- B. A atribuição de rótulos para o caminho atual fracassou. Um novo caminho é estabelecido na tentativa de atender ao pedido de conexão
- C. Mensagem *PathErr* é enviada com a indicação “Problema de roteamento/Codificação não suportada” ou “Problema de roteamento/Tipo de comutação”
- D. Mensagem *PathErr* é enviada com a indicação “Problema de roteamento/conjunto de rótulos”
- E. Se todas as opções de caminho foram testadas sem sucesso e o conjunto de rótulos continua vazio, uma mensagem *PathErr* é enviada com a indicação “Problema de roteamento/conjunto de rótulos”
- F. Nó é incapaz de escolher um rótulo ou existe um problema em analisar o conjunto de rótulos. Mensagem *PathErr* é enviada com a indicação “Problema de roteamento/conjunto de Rótulos”
- G. Se o valor do comprimento de onda não for aceitável por algum nó, uma mensagem *ResvErr* é enviada com a indicação “Problema de roteamento/Falha na alocação de rótulos”

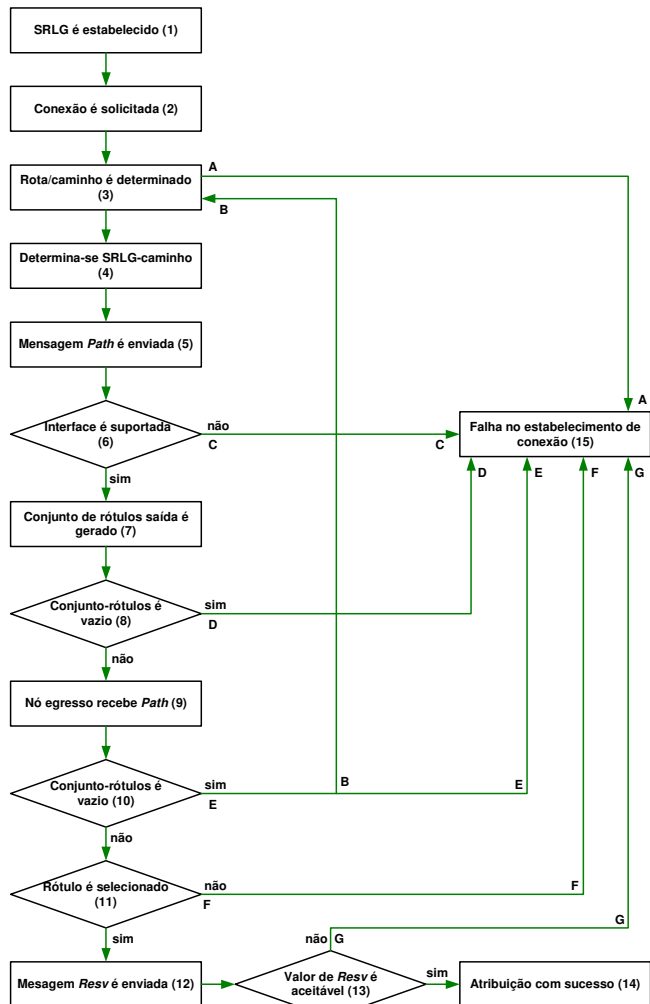


Figura 6 – Definição do protocolo de sinalização para atribuição de comprimento de onda.

Com base na especificação apresentada na Figura 6 é possível aplicar a técnica de análise lógica denominada análise com progresso justo, mais detalhada em [CUNHA, 2004] e verificar se a parte do protocolo de sinalização relacionada com atribuição de rótulos possui ou não erros de progresso.

Como resultado desta análise, verifica-se que a sinalização relacionada a atribuição de rótulos não apresenta *deadlocks*, recepções não especificadas nem mesmo, interações não-executadas, *livelocks* e *overflow*.

VII. CONCLUSÃO

O desenvolvimento de redes ópticas transparentes para compor a futura infra-estrutura de transporte dos *backbones* dos provedores de serviço de telecomunicações é uma tendência mundial. Os recursos básicos dessas redes são caminhos ópticos compostos de comprimentos de onda multiplexados em WDM. Esses recursos devem suportar a oferta de uma gama variada de serviços de telecomunicações com um provisionamento dinâmico sob demanda e otimizado para um volume de tráfego crescente.

O GMPLS é utilizado como plano de controle para estas redes ópticas e assim originaram-se os ambientes GMPLS-WDM. Porém, as redes GMPLS-WDM com restrição de continuidade de comprimento de onda possuem uma alta probabilidade de bloqueio de conexão e conseqüentemente um baixo desempenho.

Com o objetivo de diminuir a probabilidade de bloqueio de conexão foi proposto um algoritmo de atribuição de comprimento de onda que utiliza os conceitos de conjunto de rótulos e SRLG (já implementados pelo GMPLS). O algoritmo proposto consegue diminuir a probabilidade de bloqueio de conexão principalmente nos ambientes que apresentam o problema de *traps*.

Foi realizada a análise lógica da porção do protocolo de sinalização responsável pela atribuição de comprimentos de onda do algoritmo proposto e verificou-se que o mesmo é livre de qualquer erro de progresso.

REFERÊNCIAS

- ASSI, C., SHAMI, A., ALI, M. A., **Optical Networking and Real-Time Provisioning: An Integrated Vision for the Next-Generation Internet**, IEEE Network, Agosto, 2001.
- BARRY, R. A., SUBRAMANIAN, S., **The Max-sum Wavelength Assignment Algorithm for WDM Ring Networks**, OFC'97, 1997.
- BERGER, L., **Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS) Signaling Functional Description**, RFC3471, Janeiro 2003.
- CHAUDHURI, S., HJALMTYSSON, G., YATES, J., **Control of Lightpaths in an Optical Network**, Internet Draft, draft-chaudhuri-ip-olxc-control-00.txt, Fevereiro, 2000.
- CHLAMTAC, I., GANZ, A., KARMI, G., **Purely Optical Networks for Terabit Communication**, IEEE INFOCOM'89, páginas 887-896, 1989.
- CUNHA, D. V., **Análise Lógica do Protocolo LMP em um ambiente GMPLS**, XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Belém – Pará – Brasil, Setembro, 2004.
- JERRAN, N., FARREL, A., **MPLS in Optical Networks**, Data Connection Limited, Versão 2, 2001.
- KARASAN, E., AYANOGLU, E., **Effects of Wavelength Routing and Selection Algorithms on Wavelength Conversion Gain in WDM Optical Networks**, IEEE/ACM Transactions on Networks, vol. 6, no. 2, Abril, 1998.
- KIM, C. H., YANG, C. W., JEON, H., LEE, J. Y., **Improved GMPLS Lightpath Setup in Wavelength-Routed Optical Networks**, Joint Conference on Communications and Information, 2003.
- MAIER, G., PATTAVINA, A., BARBATO, L., CECINI, F., MARTINELLI, M., **Routing Algorithms in WDM Networks under Mixed Static and Dynamic Lambda-Traffic**, Photonic Network Communications, vol. 8, no. 1, pp. 69-87, Julho, 2004.
- OKI, E., MATSUURA, N., SHIOMOTO, K., YAMANAKA, N., **Bidirectional Path Setup Scheme Using on Upstream Label Set in Optical GMPLS Networks**, IEICE Trans. Communication, vol. E87-B, no. 6, Junho 2004.
- PAPADIMITRIOU, D., POPPE, F., JONES, J., VENKATACHALAM, S., **Shared Risk Link Groups Inference and Processing**, Internet Draft, draft-papadimitriou-ccamp-srlg-processing-02.txt, Junho 2003, data de expiração Dezembro, 2003.
- ROUSKAS, G. N., **Routing and Wavelength Assignment in Optical WDM Networks**, Wiley Encyclopedia of Telecommunications, John Wiley and Sons, 2001.
- STRAND, J., CHIU, A. L., TKACH, R., **Issues for Routing in the Optical Layer**, IEEE Communications Magazine, Fevereiro, 2001.
- SUBRAMANIAM, S., BARRY, R. A., **Wavelength Assignment in Fixed Routing WDM Networks**, IEEE ICC'97, páginas 406-410, 1997.
- TACHIBANA, T., KASAHARA, S., **Performance Analysis of Dynamic Lightpath Configuration for WDM Tandem Networks**, 10th International Conference on Telecommunication Systems: Modelling and Analysis, pp. 679-688, Califórnia – EUA, Outubro, 2002.
- WIDJAJA, I., ELWALID, A., **Study of GMPLS Lightpath Setup over Lambda-Router Networks**, IEEE International Conference on Communications, 2002.
- ZANG, H., JUE, J. P., MUKHERJEE, B., **A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks**, Optical Networks Magazine, vol. 1, no. 1, pp 47-60, Janeiro, 2000.
- ZANG, H., JUE, J. P., SAHASRABUDDHE, L., RAMAMURTHY, R., MUKHERJEE, B., **Dynamic Lightpath Establishment in Wavelength-Routed WDM Networks**, IEEE Communications Magazine, Setembro, 2001.
- ZHANG, X., QIAO, C., **Wavelength Assignment for dynamic Traffic in Multi-fiber WDM Networks**, IEEE ICCCN, páginas 479-485, 1998.
- ZHU, Y., ROUSKAS, G. N., PERROS, H. G., **A comparison of allocation policies in Wavelength Routing Networks**, Photonic Networks Communication Journal, vol. 2, no. 3, pp 265-293, Agosto, 2000.