

Um novo esquema de proteção com economia de banda em Redes Óptica Elásticas

K. D. R. Assis¹, R.C. Almeida Jr² e H. Waldman³

Resumo— As redes ópticas elásticas surgiram recentemente como uma solução eficiente para a alocação flexível do espectro em redes ópticas que empregam roteamento de comprimento de onda. Neste novo tipo de arquitetura, a largura de banda dos caminhos ópticos não se restringe aos espaçamentos rígidos das redes tradicionais, mas pode assumir diferentes valores (dita assim *gridless*) e variar de acordo com a demanda para melhor se adaptar à intensidade e dinamicidade do tráfego da camada cliente. Este artigo introduz uma nova forma de proteção que utiliza os benefícios da flexibilidade do uso da largura de banda dos caminhos ópticos para distribuir o tráfego adequadamente na rede e economizar o uso do espectro óptico. Uma formulação matemática baseada em Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Programming – MILP*) é proposta para a otimização da alocação dos recursos na rede. Simulações foram realizadas com a formulação proposta para uma rede de 6 nós e uma heurística foi proposta para redes de grande dimensão. Os resultados mostram a vantagem em termos de economia de espectro do método proposto quando comparado com a forma tradicional de proteção dedicada.

Palavras-Chave—Redes Ópticas elásticas, OFDM, MILP, Proteção de caminho.

Abstract— Elastic optical path networks have been recently proposed as an efficient solution for flexible spectrum allocation in wavelength routing optical networks. In this new type of network architecture, the lightpath bandwidth is not rigid as it has been traditionally assumed, but may assume different values (referred to as *gridless*) and vary according to the traffic demand to adequately suit the intensity and dynamicity of the client layer. This paper introduces a new criterion of protection that uses the benefits of the flexible use of the lightpath bandwidth to route the traffic appropriately in the network and save frequency resources. A Mixed Integer Linear Programming – MILP is proposed for optimizing the network resources' assignment. Simulations have been performed with the mathematical formulation for a 6-node network and a heuristic has been suggested for large networks. The results show the advantage in terms of spectrum economy of the proposed method when compared with traditional dedicated protection.

Keywords— Elastic Optical Networks, OFDM, MILP, Path Protection.

I. INTRODUÇÃO

Os diversos serviços existentes ou emergentes na Internet (e.g. televisão via Internet, vídeo sob demanda, aplicações

peer-to-peer e redes privadas virtuais) têm impulsionado uma demanda crescente por banda passante nos *backbones* dos sistemas de comunicações [1]. A tecnologia de redes ópticas com roteamento de comprimento de onda é hoje a forma mais apropriada para suportar essa evolução. Nessas redes, o tráfego é roteado inteiramente no domínio óptico mediante o uso da multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) [2], em que a largura de banda de uma fibra é loteada em diferentes raias espectrais com espaçamentos uniformes, chamadas de comprimentos de onda. Um caminho óptico é formado pela concatenação nos nós roteadores de comprimentos de onda em diferentes fibras sem que o sinal saia do domínio fotônico. Com WDM, vários caminhos ópticos em diferentes comprimentos de onda podem ser estabelecidos de forma simultânea em uma mesma fibra óptica, possibilitando o uso da ampla largura de banda da fibra.

Recentemente tem havido um crescente interesse na investigação de uma arquitetura de rede óptica sem a grade fixa de comprimento de onda (denominada de *gridless*) e onde o gerenciamento e os elementos da rede darão suporte para que a largura de banda dos caminhos ópticos seja flexível, ou seja, possa expandir-se e contrair-se livremente de acordo com o volume de tráfego e as requisições do usuário. Essas redes foram introduzidas em [3] e são conhecidas na literatura como redes de caminhos ópticos elásticos, ou, simplesmente, redes ópticas elásticas. Nelas, o espectro da fibra é tratado como um recurso contínuo, possibilitando uma maior compactação e eficiência no uso do espectro. Basicamente, o caminho óptico pode ser alocado em qualquer intervalo contínuo de frequência e deve ser separado de outros caminhos ópticos por uma banda de guarda, denominada de *Filter Guard Band* (FGB). Computadores de comprimentos de onda seletivos (Wavelength-Selective Switches – WSS) e filtros ópticos de largura de banda variável são utilizados para a comutação e a filtragem das larguras de banda flexíveis [4]. Nos transceptores, o sistema de transmissão OFDM permite que os dados sejam enviados em subportadoras ortogonais e os sinais de cada subportadora estendam-se para as adjacentes tal que o espectro seja bastante compactado.

Dada a introdução de novos elementos e de uma nova forma do uso do espectro, novos conceitos de roteamento, gerenciamento, agrupamento de tráfego, restauração, proteção, etc. deverão ser contemplados e analisados. A maioria dos trabalhos recentes considera o uso de algoritmos ou técnicas de programação inteira com o objetivo de minimizar a utilização do espectro óptico [5], [8], [10]. Os autores em [6] introduziram o conceito de restauração com largura de banda espremida (*Bandwidth Squeezed Restoration – BSR*), onde é possível atribuir aos caminhos ópticos atingidos por uma falha uma largura de banda mais estreita do que a sua largura de banda original (ou seja, aquela antes do instante da falha). Consequentemente, mais caminhos ópticos podem ser restaurados ou,

¹K. D. R. Assis (karcus.assis@ufba.br), Universidade Federal da Bahia, DEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Rua Aristides Novis, 02, Federação, CEP: 40210-630 – Salvador – BA – Brasil. ²R.C. Almeida Jr (raul.almeidajunior@ufpe.br), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Av. Prof. Moraes Rego, 1235 Cidade Universitária, Recife, PE – Brasil, CEP 50670-901. ³H. Waldman (helio.waldman@ufabc.edu.br), Universidade Federal do ABC (UFABC), Rua Santa Adélia, 166 Bairro Bangú, Santo André, SP – Brasil, CEP 09210-170.

equivalentemente, necessita-se de uma menor largura de banda para restaurar o tráfego da rede. A largura de banda pós falha para cada caminho óptico é determinada por um acordo de nível de serviço (*Service Level Agreement - SLA*) realizado entre o cliente e a gerência da rede óptica.

Este trabalho introduz um novo esquema de proteção para as rede ópticas elásticas que, mediante um modelo adequado de roteamento e a possibilidade de espremer o tráfego durante a proteção, permite que o espectro óptico necessário para o provimento da proteção dos caminhos ópticos seja inferior àquele utilizado pelo esquema de proteção dedicada. Neste último, o tráfego de trabalho é protegido por um tráfego de proteção com a mesma largura de banda, o que exige o uso de duas vezes a largura de banda de trabalho. Para o roteamento eficiente do tráfego na rede, o artigo propõe uma formulação matemática baseada em Programação Linear Inteira Mista de forma que a fração mínima do tráfego espremido seja garantida no evento de falhas e a utilização do espectro seja minimizada.

II. PROTEÇÃO COM ECONOMIA DE BANDA E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PROPOSTAS

A ideia central do mecanismo de proteção aqui proposto é garantir que, no evento de uma falha de enlace, a demanda de tráfego entre quaisquer pares de nós seja mantida acima ou igual ao valor mínimo acordado no SLA e ao mesmo tempo a rede não precise reservar tanta largura de banda como na proteção dedicada. As notações, dados e variáveis para a explicação do mecanismo de proteção e a formulação matemática propostas são descritos a seguir:

Notação

- s e d denotam, respectivamente, os nós que são fonte e destino de tráfego na rede.
- i e j denotam nós de origem e destino de caminhos ópticos.
- m e n denotam os nós dos enlaces de fibra na rede.

Dado

- Número de nós da rede: N .
- Elemento da matriz de tráfego: K^{sd} , representa a intensidade de tráfego de uma fonte s para um destino d .
- Topologia física: F_{mn} , representa o número de fibras ligando o nó m ao nó n , sendo que nos exemplos deste estudo, $F_{mn} = F_{nm} = 1$. D_{mn} é o comprimento da fibra de m para n .
- Capacidade de cada fibra: C
- Banda de guarda do filtro: FGB , representa a separação espectral entre duas bandas de frequência, ou seja, a separação espectral mínima entre dois caminhos ópticos.
- Um número M grande, para auxiliar na transformação de algumas variáveis de reais para inteiras.

Variáveis

- Largura de banda de um caminho óptico, V_{ij} : representa a largura de banda de um caminho óptico de i para j .
- Roteamento de tráfego, λ_{ij}^{sd} : fluxo de tráfego de uma fonte s para um destino d que passa por um caminho óptico de i para j .
- Rota na topologia física, P_{mn}^{ij} : quantidade de largura de banda que um caminho óptico de i para j usa passando pelo enlace de m para n .

- Uma variável binária, A_{mn}^{ij} : indica que o caminho óptico de i para j passa pelo enlace de fibra $m-n$. $A_{mn}^{ij} = 1$ se $P_{mn}^{ij} > 0$ ou $A_{mn}^{ij} = 0$ se $P_{mn}^{ij} = 0$.
- Uma variável binária, B_{ij}^{sd} : indica se uma fração do tráfego de s para d passa pelo caminho óptico de origem i e destino j . $B_{ij}^{sd} = 1$ se $\lambda_{ij}^{sd} > 0$ ou $B_{ij}^{sd} = 0$ se $\lambda_{ij}^{sd} = 0$.

A. Formulação MILP – (sem Proteção)

$$\text{Minimize: } \sum_{mn} [\sum_{ij} (P_{mn}^{ij} + FGB \cdot A_{mn}^{ij}) \cdot D_{mn}] / (C \cdot \sum_{mn} D_{mn}) \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_j \lambda_{ij}^{sd} - \sum_j \lambda_{ji}^{sd} = \begin{cases} K^{sd} & \text{se } i = s \\ -K^{sd} & \text{se } i = d \\ 0 & \text{se } i \neq s, d \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd} = V_{ij} \quad \forall i, j \quad (3.3)$$

$$\sum_n P_{mn}^{ij} - \sum_n P_{nm}^{ij} = \begin{cases} V_{ij} & \text{se } m = i \\ -V_{ij} & \text{se } m = j \\ 0 & \text{se } m \neq i, j \end{cases} \quad \forall i, j, m \quad (3.4)$$

$$\sum_{ij} (P_{mn}^{ij} + FGB \cdot A_{mn}^{ij}) \leq C \cdot F_{mn} \quad \forall m, n \quad (3.5)$$

$$A_{mn}^{ij} \geq P_{mn}^{ij} / M \quad \forall i, j, m, n \quad (3.6)$$

A equação (3.1) representa a função objetivo, que enfatiza a minimização do espectro utilizado. Observe que ela contabiliza a soma das frações de tráfego que passam por enlaces físicos da rede com o correspondente intervalo FGB . A consideração de todos os enlaces físicos na função objetivo torna a minimização “global”. Observe também que o denominador poderia ser eliminado, pois é uma constante, mas optou-se por deixá-lo para fim de comparação com [5], que utiliza a formulação sem proteção. (3.2) representa as equações de conservação de fluxo para as demandas, ou seja, a demanda K^{sd} que sai de uma fonte “ s ” pode ser dividida e roteada para caminhos ópticos “ $i-j$ ” distintos. Essa mesma demanda deve chegar ao destino “ d ”, sendo que as frações de tráfego obedecem à conservação de fluxo em nós intermediários. A equação (3.3) lida com o tráfego que passa em cada caminho óptico. A equação (3.4) também representa equações de conservação de fluxo, mas nos enlaces da camada física. A equação (3.5) representa variáveis que compõem a capacidade espectral de cada fibra. Equação (3.6) auxilia na contabilização de $FGBs$ em um enlace de fibra

B. Formulação MILP – (com Proteção)

Para o esquema de proteção, a fim de proteger uma conexão $s-d$, sua demanda de tráfego original, K^{sd} , deve ser expandida pelo fator $(1 + \alpha)$, sendo $0 < \alpha \leq 1$ a relação entre a largura de banda reservada para proteção, dada assim por αK^{sd} , e a largura de banda de trabalho, K^{sd} . No caso de proteção dedicada, é fácil perceber que $\alpha = 1$, mas, conforme mencionado anteriormente, o esquema de proteção aqui proposto procura reservar apenas uma fração do tráfego a fim de economizar banda. E isso acontece mediante o agrupamento e alocação conjunta de banda para o que seria o tráfego de trabalho e proteção. A equação (3.2) será então assim reescrita:

$$\sum_j \lambda_{ij}^{sd} - \sum_j \lambda_{ji}^{sd} = \begin{cases} (1 + \alpha) \cdot K^{sd} & \text{se } i = s \\ -(1 + \alpha) \cdot K^{sd} & \text{se } i = d \\ 0 & \text{se } i \neq d \end{cases} \quad (3.7)$$

O conceito de banda espremida permite que, na eventualidade de uma falha numa das fibras da rede, seja tolerável que a largura de banda remanescente (i.e. sobrevivente) seja $(1 - \beta)K^{sd} \leq K^{sd}$, sendo $0 \leq \beta < 1$ um parâmetro do SLA da conexão.

Para garantir que a banda sobrevivente de qualquer conexão após uma falha simples esteja em conformidade com seu SLA, falta ainda definir o roteamento do tráfego através dos enlaces da rede. Propõe-se portanto que tal que o tráfego que passa em qualquer fibra deva ser limitado a $(\alpha + \beta)K^{sd}$, pois da ocorrência de uma falha, o tráfego mínimo entre s e d estará limitado a $(1 + \alpha)K^{sd} - (\alpha + \beta)K^{sd} = (1 - \beta)K^{sd}$, ou seja, satisfará o SLA. Para isso, as seguintes condições suficientes são introduzidas:

$$\lambda_{ij}^{sd} \leq (\alpha + \beta)K^{sd} \quad \forall i, j, s, d \quad (3.8)$$

Para cada conexão s - d e enlace físico m - n , o número de caminhos ópticos que transportam tráfego de s - d e percorrem m - n é no máximo 1. Para formular essa condição, definimos a seguinte variável binária:

$$B_{ij}^{sd} = \begin{cases} 1 & \text{se } \lambda_{ij}^{sd} > 0 \\ 0 & \text{se } \lambda_{ij}^{sd} = 0 \end{cases}$$

Se M for grande, esta variável pode ser escrita usando a seguinte restrição:

$$B_{ij}^{sd} \geq \lambda_{ij}^{sd} / M \quad \forall i, j \in N \text{ e } \forall m, n \in E \quad (3.9)$$

A condição enunciada acima pode então ser assim formulada:

$$\sum_{ij} B_{ij}^{sd} \cdot A_{mn}^{ij} \leq 1 \quad \forall s, d, m, n \quad (3.10)$$

Essa condição é não linear, mas envolve apenas variáveis binárias. Por isso, ela pode ser linearizada com o esquema descrito no apêndice, resultando nas seguintes restrições lineares:

$$\sum_{ij} w_{sdmn}^{ij} \leq 1 \quad \forall s, d, m, n \quad (3.11)$$

$$w_{sdmn}^{ij} \leq B_{ij}^{sd} \quad \forall s, d, m, n, i, j \quad (3.12)$$

$$w_{sdmn}^{ij} \leq A_{mn}^{ij} \quad \forall s, d, m, n, i, j \quad (3.13)$$

$$w_{sdmn}^{ij} \geq 0 \quad \forall s, d, m, n, i, j \quad (3.14)$$

$$w_{sdmn}^{ij} \geq B_{ij}^{sd} + A_{mn}^{ij} - 1 \quad \forall s, d, m, n, i, j \quad (3.15)$$

A nova formulação MILP para a rede protegida será similar à apresentada nas equações (3.1) a (3.6), porém substituindo a equação (3.2) pela (3.7) e acrescentando as equações de (3.8) a (3.15) como novas restrições do problema.

C. Limitações e Comentários:

Com a substituição da equação 3.10 pelas equações 3.11 a 3.15, tem-se uma formulação linear. Contudo, deve-se observar que as variáveis $w_{sdmn}^{ij} = B_{ij}^{sd} \cdot A_{mn}^{ij}$ são muitas, da ordem de N^6 , onde N é o número de nós da rede. Ou seja, da ordem de 1 milhão de variáveis para 10 nós, 1 trilhão para 100 nós, etc.

A falha simples considerada é o corte do enlace m - n , sem o corte concomitante do enlace n - m . Para cortar os dois ao mesmo tempo, A_{mn}^{ij} deveria ser substituído por $(A_{mn}^{ij} + A_{nm}^{ij})$ em (3.10), mas nesse caso a linearização não funcionaria, pois seria criada uma variável ternária e não binária.

Observe que, pelo fato de cada enlace só poder transportar $(\alpha + \beta)K^{sd}$ e, devido à restrição (3.10), cada enlace físico também deve ter esse limite. O tráfego total enviado por um nó é $(1 + \alpha)K^{sd}$, conseqüentemente o grau físico, G_f , de cada nó da rede terá que ser no mínimo $(1 + \alpha)K^{sd} / (\alpha + \beta)K^{sd}$. Assim, os valores de α e β estão relacionados com o grau físico dos nós da rede através do seguinte limite:

$$\min\{G_f\} \geq [(1 + \alpha) / (\alpha + \beta)] \quad (3.16)$$

Logo, o manuseio dessas duas variáveis deverá ser feito observando o limite da condição (3.16).

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Para a quantificação dos benefícios do esquema de proteção aqui proposto, são apresentadas inicialmente simulações para uma rede pequena alguns resultados são discutidos de forma a validar a formulação. A seguir descreve-se uma estratégia heurística para uma rede de maior dimensão, a NSFNET, e alguns resultados de simulação são apresentados. Todas as simulações foram realizadas com o solver ILOG CPLEX (<http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/11>) em um Intel Core i3 2.13GHz, 4GB de RAM.

A. Rede Pequena

Para este caso foi utilizada a rede da Fig. 1, onde a disponibilidade de espectro para cada fibra foi assumida em 7.5 GHz, a FGB entre as bandas usadas foi de 0.25 GHz e a relação entre a taxa de dados e a largura de banda foi de 4 bits/s/Hz (necessária para transformar os valores espectrais de Hz para bps e uniformizar as unidades na simulação do problema). A demanda de tráfego entre cada par fonte- s destino- d foi de 2 Gbps, conforme mostra a Tabela 1 abaixo. Em todos os casos o tempo de simulação foi de aproximadamente 2 min.

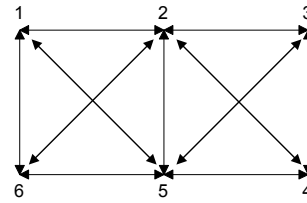


Figura 1. Topologia física para a rede de 6 nós.

TABELA I. MATRIZ DE TRÁFEGO PARA A REDE DE 6 NÓS.

-	2	2	2	2	2
2	-	2	2	2	2
2	2	-	2	2	2
2	2	2	-	2	2
2	2	2	2	-	2
2	2	2	2	2	-

Com o intuito de quantificar o uso de banda com a implementação da estratégia de proteção proposta, foram também realizadas simulações para a rede sem proteção, ou seja, quando se assume $\alpha = \beta = 0$, o que torna a formulação MILP semelhante à de [5]. Neste caso, o valor da função objetivo (i.e., a taxa média de utilização do espectro) encontrada foi de 0.075. Para entender o roteamento resultante na rede com e sem o esquema de proteção proposto, considere o tráfego entre o par de nós 1 e 2. Sem

proteção, o tráfego de 2 Gbps foi encaminhado por dois caminhos ópticos, 1-5 e 5-2, que passam pelos enlaces físicos 1-5 e 5-2, respectivamente, e estão mostrados na fig. 2 por elementos pontilhados. Obviamente, os valores do tráfego em cada enlace são: $\lambda_{15}^{12} = 2$; $\lambda_{52}^{12} = 2$ Gbps.

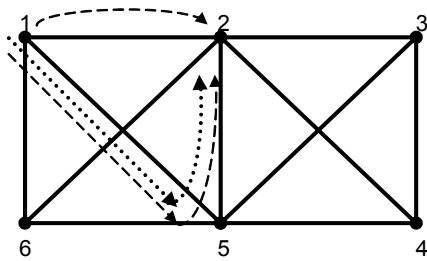


Figura 2. Encaminhamento do tráfego para o par fonte-destino 1-2 com e sem proteção para $K^{12} = 2$ Gbps.

Com o esquema de proteção proposto, assumindo-se um fator de expansão $\alpha = 0.2$ e diferentes valores de β , o tráfego entre os nós 1 e 2 foi roteado por três caminhos ópticos, que passam pelos enlaces 1-2, 1-5 e 5-2, conforme mostrados na fig. 2 por elementos tracejados. A intensidade do tráfego em cada enlace é descrito na Tabela II. Note que o tráfego total reservado na rede é $(1 + \alpha)K^{sd} = 2.4$ Gbps, independente do valor de β . Além disso, cada enlace pode transportar no máximo $(\alpha + \beta)K^{sd}$, conforme explicado anteriormente. Logo, quando $\beta = 0.4$, é permitido rotear apenas 60% de 2 Gbps em cada enlace da rede, i.e. 1.2 Gbps, de maneira que o SLA é garantido em caso de falha em qualquer dos enlaces físicos 1-2, 1-5 e 5-2. Note que o tráfego pela rota 1-2 resultante do MILP é sempre igual ao máximo permitido para cada enlace pelo esquema de proteção proposto, i.e., $(\alpha + \beta)K^{sd}$. Isto é devido à forma como a função objetivo foi formulada, priorizando o tráfego que passa pelas rotas mais curtas.

TABELA II. DISTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO $K^{12} = 2$ GBPS ENTRE OS ENLACES DA REDE PARA O CASO DE PROTEÇÃO COM ECONOMIA DE BANDA.

$\beta = 0.4$	$\lambda_{12}^{12} = 1.2$; $\lambda_{15}^{12} = 1.2$; $\lambda_{52}^{12} = 1.2$ Gbps
$\beta = 0.5$	$\lambda_{12}^{12} = 1.4$; $\lambda_{15}^{12} = 1.0$; $\lambda_{52}^{12} = 1.0$ Gbps
$\beta = 0.6$	$\lambda_{12}^{12} = 1.6$; $\lambda_{15}^{12} = 0.8$; $\lambda_{52}^{12} = 0.8$ Gbps
$\beta = 0.7$	$\lambda_{12}^{12} = 1.8$; $\lambda_{15}^{12} = 0.6$; $\lambda_{52}^{12} = 0.6$ Gbps
$\beta = 0.8$	$\lambda_{12}^{12} = 2.0$; $\lambda_{15}^{12} = 0.4$; $\lambda_{52}^{12} = 0.4$ Gbps
$\beta = 0.9$	$\lambda_{12}^{12} = 2.2$; $\lambda_{15}^{12} = 0.2$; $\lambda_{52}^{12} = 0.2$ Gbps

A diferença entre a taxa espectral média utilizada no MILP com proteção e MILP sem proteção (neste caso 0.075) é referida neste artigo como discrepância (Δ) entre as estratégias. A Fig. 3 ilustra a discrepância quando $\alpha = 0.2$ e β varia de 0.4 a 0.9. A taxa espectral média usada pela proteção dedicada (i.e. $\alpha = 1$ e $\beta = 0$) também é mostrada na Fig. 3. Devido à necessidade da largura de banda extra, a estratégia com proteção apresenta maiores valores de taxa de utilização de espectro quando comparada com a estratégia sem proteção. Entretanto, quando comparada com a proteção dedicada, observa-se que em todos os casos uma grande quantidade de espectro é economizada, confirmando a importância da estratégia de proteção proposta, que se torna ainda mais eficiente quanto maior é o valor de β com a utilização da estratégia de banda espremida.

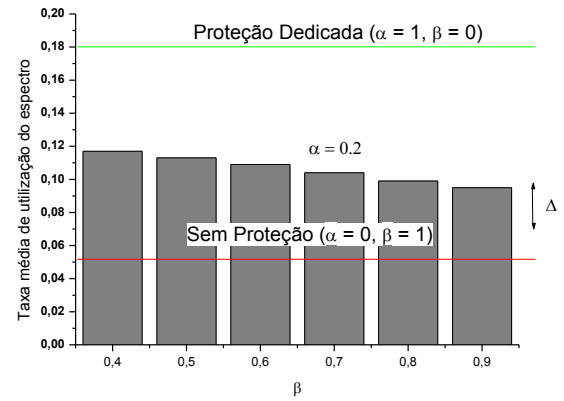


Figura 3. Taxa média de utilização do espectro em função de β .

De maneira a confirmar a eficiência da utilização da estratégia de banda espremida, a Tabela III compara os resultados da proteção dedicada convencional (caso 1, com $\alpha = 1$ e $\beta = 0$) com uma situação que permite 50% de banda espremida e sem recursos extras (caso 2, com $\alpha = 0$ e $\beta = 0.5$), o que comprova a grande economia de recursos. Novamente, a estratégia com largura de banda espremida provê melhores resultados que a proteção dedicada, com uma economia de recursos que excede 89%.

TABELA III. CASOS ESPECIAIS

Caso	Tráfego do par 1-2.	Δ %
1	$\beta = 0.0$; $\alpha = 1.0$; $\lambda_{12}^{12} = 2.0$; $\lambda_{15}^{12} = 2.0$; $\lambda_{52}^{12} = 2.0$	$\cong 153,9$
2	$\beta = 0.5$; $\alpha = 0.0$; $\lambda_{12}^{12} = 1.0$; $\lambda_{15}^{12} = 1.0$; $\lambda_{52}^{12} = 1.0$	$\cong 33,78$

B. Rede Grande

Dada a complexidade para resolver o MILP para redes de grande dimensão, esta seção apresenta uma heurística simples, baseada na formulação tradicional (i.e., sem o uso de proteção) para inicialização da heurística e seguida da estratégia com proteção. Nosso principal objetivo é distribuir o tráfego pelos caminhos ópticos usando os critérios de proteção estudados neste artigo. Então:

Estratégia heurística

Passo 1: Dados a matriz de tráfego, FGB e a capacidade dos enlaces, C , encontre os enlaces virtuais e as rotas físicas para os mesmos (ou seja, encontre A_{mn}^{ij}) com a formulação tradicional (MILP- sem proteção);

Passo 2: Resolva a formulação MILP- com proteção colocando valores para α e β , mas agora os valores A_{mn}^{ij} encontrados no passo 1 são entradas para a formulação.

A estratégia heurística foi aplicada primeiramente na rede pequena, de 6 nós, para validar a mesma. Em todos os casos simulados, o valor encontrado para a função objetivo foi no máximo 5% superior ao valor exato, obtido com a formulação exata linear, o que torna a heurística razoável para aplicação em redes de dimensões maiores.

Utilizando a heurística apresentada acima em uma rede de tamanho razoável, por exemplo a NSFNET com 14 nós e 21 enlaces mostrada na Fig. 4, foram realizadas simulações de forma similar às apresentadas anteriormente para redes pequenas. Foi assumido um par de fibras unidirecionais em cada enlace com capacidade espectral individual de 1 THz e

uma FGB de 10 GHz. A relação entre a taxa de dados e a largura de banda foi a mesma, de 4 bit/s/Hz, e a demanda de tráfego foi assumida uniforme para cada par fonte-destino, com valor de 20 Gbps.

Após aplicar a estratégia heurística, os caminhos ópticos encontrados no passo 1 são apresentados na Tabela IV (sem mostrar o roteamento na topologia física devido a restrições de espaço no artigo). O valor encontrado para a função objetivo no passo 1 (i.e., taxa média de utilização do espectro) foi de 0.05.

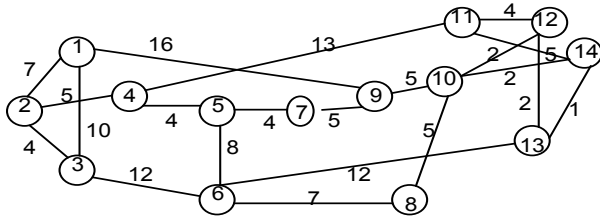


Figura 4. Rede NSFNet analisada, com o comprimento D_{mn} dos enlaces da rede.

TABELA IV. TOPOLOGIA VIRTUAL DA FORMULAÇÃO TRADICIONAL (SEM PROTEÇÃO)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1		1								1				
2	1		1	1										
3		1				1								
4		1			1							1		
5			1	1		1	1							
6			1	1			1							
7					1			1						
8						1			1					
9	1						1			1				
10								1	1			1	1	
11				1								1		
12										1	1		1	
13												1		1
14											1		1	

A Fig. 5 mostra a taxa média de espectro utilizado para a formulação MILP sem proteção (passo 1 da estratégia heurística), a proteção dedicada e a proposta heurística para $\alpha = 0.5$ e $0.3 \leq \beta \leq 0.9$. Novamente, percebe-se que a estratégia de proteção proposta fornece melhores resultados que a proteção dedicada, economizando recursos e deixando a rede com mais capacidade aberta para futuras demandas. De forma similar às simulações realizadas para a rede pequena, a mesma comparação é realizada para a NSFNET e mostrada na Tabela V. Novamente, observa-se que uma grande quantidade de espectro é economizada.

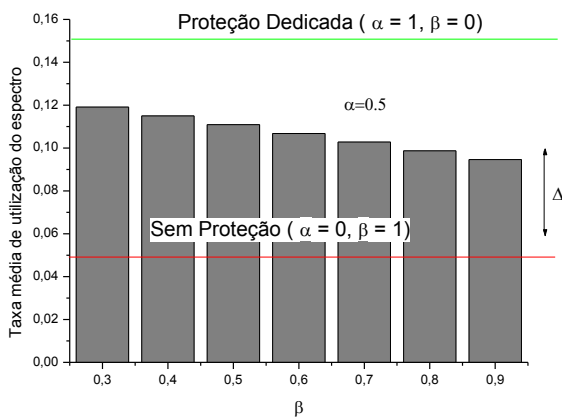


Figura 5. Taxa média de utilização do espectro.

TABELA V. CASOS ESPECIAIS

Caso	Tráfego roteado no par 1-2.	Δ %
1	$\beta = 0.0; \alpha = 1.0; \lambda_{12}^{12} = 20; \lambda_{19}^{12} = 20; \lambda_{97}^{12} = 20; \lambda_{75}^{12} = 20; \lambda_{54}^{12} = 20; \lambda_{42}^{12} = 20$	$\cong 209,2$
2	$\beta = 0.5; \alpha = 0.0; \lambda_{12}^{12} = 10; \lambda_{19}^{12} = 10; \lambda_{97}^{12} = 10; \lambda_{75}^{12} = 10; \lambda_{54}^{12} = 10; \lambda_{42}^{12} = 10$	$\cong 54,8$

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo propõe um esquema de proteção e uma formulação matemática para economia de banda em redes ópticas elásticas. As simulações apresentadas sugerem a eficiência do método proposto. Uma estratégia heurística simples foi também apresentada para redes de grande dimensão. Outras heurísticas e instâncias estão sob estudo [7] e serão apresentadas em um próximo artigo. A proposta é aplicável para tráfego uniforme e não uniforme, entretanto só foi analisado o primeiro tipo para efeitos de comparação com [5]. O tópico apresentado neste artigo é novo e diversos problemas estão abertos na literatura para melhorar a eficiência das redes elásticas, de maneira que se espera a utilização deste artigo como uma referência para futuros estudos de gerenciamento e planejamento de redes ópticas elásticas com proteção.

V. APÊNDICE

Sejam X e Y duas variáveis binárias que podem assumir os valores do conjunto $\{0,1\}$ e W uma variável real com as seguintes propriedades:

$$W \leq 1 \quad (A1)$$

$$W \geq 0 \quad (A2)$$

$$W \leq X \quad (A3)$$

$$W \leq Y \quad (A4)$$

$$W \geq X + Y - 1 \quad (A5)$$

Se X é zero, (A3) implica em $W \leq 0$, enquanto (A2) implica em $W \geq 0$. Se Y é zero, (A4) implica em $W \leq 0$, enquanto (A2) implica em $W \geq 0$. Logo, se X ou Y é zero, então $W = 0$ e as desigualdades remanescentes continuam válidas. Se $X = Y = 1$, (A1) implica em $W \leq 1$, enquanto (A5) implica em $W \geq 1$. Logo, $W = 1$ é válida para todas as desigualdades. Consequentemente, $W = XY$ para todo $(X, Y) \in \{0,1\} \times \{0,1\}$.

Este artigo foi apoiado pelo CNPq, FACEPE e PROPICI-UFBA

REFERÊNCIAS

- [1] E. Palkopolou; D. A. Schupke; C. G. Gruber; A. Kirstädter e C. Merkle, "Service Oriented Traffic Models for Future Backbone Networks", ITG-Fachtagung Photonische Netze, Leipzig, Alemanha, Maio 2007.
- [2] C. S. R. Murthy e M. Gurusamy, WDM Optical Networks - Concepts, Design and Algorithms. Prentice Hall PTR, 2002.
- [3] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, "Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies," IEEE Comm. Mag., vol.47, pp. 66-73, 2009.
- [4] B. Kozicki, H. Takara, T. Yoshimatsu, K. Yonenaga, and M. Jinno, "Filtering Characteristics of Highly-Spectrum Efficient Spectrum-Sliced Elastic Optical Path (SLICE) Network," Proc. OFC/NFOEC'09, 2009.
- [5] Y. Zhang, X. Zheng, Q. Li, N. Hua, Y. Li, and H. Zhang, "Traffic Grooming in Spectrum-Elastic Optical Path Networks," in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper OTu11.
- [6] Y. Sone, et al., "Bandwidth Squeezed Restoration in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks (SLICE)," J. Optical Communications and Networking, Vol. 3, No. 3, pp. 223-233, 2011.
- [7] A. Santos, C. Santos, G. Durães and K.D.R. Assis "Heuristics for Routing in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks" The 10th International Conference on Optical Internet (COIN 2012), May 29-31, 2012. Yokohama, Japan. TuP6. (Accepted).
- [8] K. Christodoulopoulos et al., "Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation," IEEE Globecom, Dec. 2010.
- [9] Mirosław Klinkowski and Krzysztof Walkowiak "Routing and Spectrum Assignment in Spectrum Sliced Elastic Optical Path Network" IEEE Communications Letters, August 2011, vol. 15, issue 8, pp. 884-886.
- [10] Yang Wang, Xiaojun Cao, Yi Pan. "A Study of the Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Path Networks" IEEE Infocom 2011.