

Redes Ópticas Elásticas: Planejamento e Otimização

Igor M. Queiroz e Karcius D. R. Assis

Universidade Federal da Bahia (UFBA), DEE, Rua Aristides Novis, 02 Federação,
Salvador, BA – Brasil, CEP 41950-275.

Email: karcius.assis@ufba.br

Resumo. Este artigo descreve um método mais flexível de alocação de espectro para redes ópticas. O método mostra que uma alocação de espectro com espaçamentos diferentes entre as frequências, ou seja, **Gridless**, é mais eficiente que o método tradicional que usa espaçamentos iguais, **Grid**. Esta nova proposta, que é baseada no sistema de transmissão OFDM, é conhecida como *Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network (SLICE)* ou simplesmente *Redes Ópticas Elásticas*. Neste novo tipo de arquitetura de rede, a largura de banda de um caminho óptico pode ser elástica (a largura de banda varia de acordo com a demanda), para assim se adaptar à demanda de tráfego da camada superior. Neste artigo alguns critérios de otimização são validados e propostos para distribuir o tráfego adequadamente (com grooming e sem grooming) nesta nova arquitetura. Simulações foram realizadas para uma rede de 6 nós e redes de grande dimensão. Os resultados sugerem a vantagem, em termos de economia de espectro, do grooming em redes óptica elásticas e economia de espectro em relação a redes ópticas tradicionais.

Abstract. This paper presents an efficient method for spectrum allocation in optical networks. The method shows that a spectrum allocation without the wavelength grid is more efficient than traditional ones, which use fixed spectrum allocation. This new concept is based on OFDM and is known as *Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network (SLICE)* or *Elastic Optical Networks*. In this new type of network architecture, the lightpath bandwidth can be elastic in order to best attend the traffic demand. In this paper, some optimization criterion are used to properly route the traffic (with and without grooming) in this new architecture. Simulations were performed for a 6-node network as well as large networks. The results evidence the economy of spectrum when traffic grooming is employed and show the benefits of the proposed method when compared with traditional optical networks.

1. Introdução

Desde o final da década de 90 diversas pesquisas sobre planejamento de redes ópticas foram realizadas e algumas perspectivas foram apontadas, como por exemplo, na 1ª edição do WPerformance [Assis e Waldman 2010].

A tecnologia de redes ópticas com roteamento de comprimento de onda amadureceu e atualmente é a forma mais apropriada para suportar a crescente demanda de tráfego. Nessas redes, o tráfego é roteado inteiramente no domínio óptico mediante o uso da multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) [Ramaswami and Sivarajan 2001], 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 comprimentos 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 [Jinno *et. al* 2009] 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 mesmo. 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). Comutadores 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 [Kozicki *et. al* 2009]. Nos transceptores, o sistema de transmissão O-OFDM permite que os dados sejam enviados em subportadoras ortogonais e os sinais de cada subportadora estendam-se para a adjacente 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. Um tutorial sobre esta tecnologia pode ser visto em [Zhang *et. al* 2012].

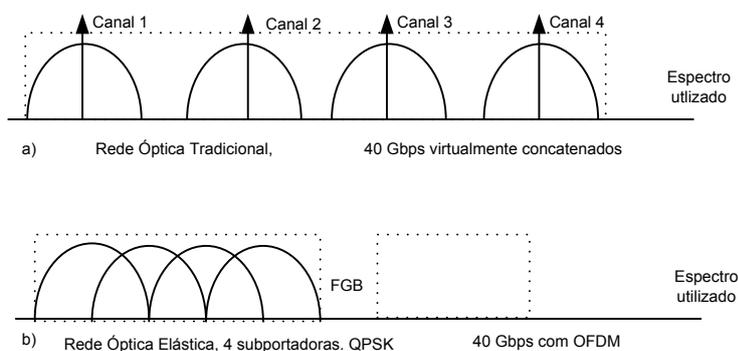


Fig. 1. Espectro de redes WDM, a) tradicional e b) elástica.

Para situar o leitor no problema abordado, a Fig. 1(a) mostra a alocação de canais WDM, espaçados uniformemente, em que cada caminho óptico tem uma capacidade de 10 Gbps. (Evidentemente, esta capacidade ocupa espectro em Hz pela relação entre a taxa de transmissão e a frequência, a qual depende do formato de modulação e define a eficiência espectral).

Usando a tecnologia O-OFDM, a largura do canal é dividida em muitas subportadoras que enviam dados independentemente (por exemplo, QPSK com 4 subportadoras), ver Fig. 1(b). As subportadoras compactam bastante o domínio da frequência, assim, os sinais de cada portadora se estendem para as adjacentes. Contudo, a resposta em frequência de cada subportadora é projetada de modo que seja zero no centro das subportadoras adjacentes. As subportadoras podem, portanto, ser amostradas em suas frequências centrais sem interferências de seus vizinhos.

Observe na configuração abaixo (Fig. 2) que um OXC (*Optical Crossconnect*) [Jinno et. al 2009], que possui a estrutura com a funcionalidade de um *transponder BV*, pode agregar tráfego, criando caminhos ópticos de largura de banda variável e com propriedade de *grooming* (agregação e desagregação de tráfego) [Zhang et. al 2011].

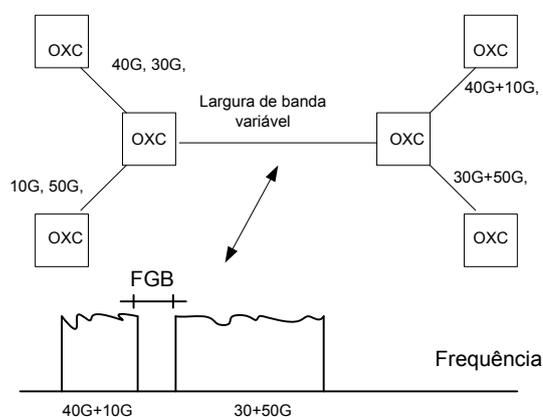


Fig. 2. Grooming em rede ópticas elásticas

Este trabalho apresenta formulações matemáticas, através de Programação Linear Inteira Mista e Programação Inteira, para o roteamento de tráfego na camada óptica da arquitetura de Redes Ópticas Elásticas, com e sem *grooming*. É proposta uma Formulação Matemática Modificada, para a estratégia com *grooming*, que utiliza o conceito de balanceamento de carga para minimizar o número máximo de subportadoras que passa pelos enlaces da rede, contribuindo assim para a economia do espectro.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 são apresentados os trabalhos relacionados e as contribuições deste artigo. As formulações matemáticas com e sem *grooming* são apresentadas na Seção 3. Simulações de validação são também apresentadas nesta seção. A formulação matemática modificada, com *grooming*, é proposta na Seção 4 e simulações são realizadas para verificar a eficiência da nova estratégia. As considerações finais são apresentadas na Seção 5.

2. Trabalhos Relacionados

A maioria dos trabalhos recentes considera o uso de algoritmos ou técnicas de otimização com o objetivo de minimizar a utilização do espectro óptico ou economizar a utilização global [Zhang et. al 2011]-[Assis et. al 2012]. Em [Yang et. al 2011] é apresentada uma formulação matemática e dois algoritmos, chamados SPSR (*Shortest Path with Maximum Spectrum Reuse*) e BLSA (*Balanced Load Spectrum Allocation*), que escolhem a rota “menos carregada” em termos de sub-portadoras utilizadas, ou seja,

a rota que possui mais sub-portadoras disponíveis em todos os enlaces. De [Jinno *et. al* 2010] a [Klinkowski *et. al* 2011] são apresentadas estratégias de otimização para demanda estática e [Takagi *et. al* 2011] apresenta uma estratégia de otimização para tráfego dinâmico. Em [Santos *et. al* 2012] é proposta uma formulação matemática simples e dois algoritmos de roteamento, o BSR (*Best among the Shortest Routes*) e ILR (*Iterative Load Routing*), para auxiliar na alocação de subportadoras. Os autores em [Sone *et. al* 2011] introduzem 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), já em [Assis *et. al* 2012] os autores propõem uma formulação através de Programação Linear Inteira Mista para restauração com o conceito BSR. Em [Zhang *et. al* 2011] duas formulações matemáticas (uma com *grooming* e outra sem *grooming*) são apresentadas com o objetivo de minimizar a taxa média de espectro utilizada na rede e as abordagens são comparadas.

Neste trabalho são apresentadas as seguintes contribuições:

- a) Introduz a formulação do problema de **Roteamento e Distribuição de Tráfego em Redes Ópticas Elásticas** com e sem *grooming*.
- b) Propõe uma **Formulação Linear Modificada** para a estratégia com *grooming* de [Zhang *et. al* 2011], com o objetivo de minimizar o número máximo de subportadoras que atravessa os enlaces da rede;
- c) Compara as heurísticas SPSR e BLSA de [Yang *et. al* 2011] com a Formulação Matemática Modificada para diversos cenários.

3. Formulação Matemática (com *Grooming* e sem *Grooming*)

Nesta seção descreve-se, através de duas formulações, o problema de planejamento de redes ópticas elásticas: a primeira com *grooming* e a segunda sem *grooming*. As notações, dados e variáveis para as duas formulações são descritas 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 de tamanho variável.
- m e n denotam nós finais de 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 os nó m e n e D_{mn} o comprimento de fibra de m para n . Nos exemplos deste estudo, $F_{mn}=F_{nm}=1$ e $D_{mn}=1$ para qualquer enlace de m para n .
- Capacidade de cada fibra: C
- Banda de guarda do filtro: FGB , representa a separação espectral entre duas bandas de frequência.

- Um número M grande, para auxiliar na transformação de algumas variáveis de reais para binárias.

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 link de m para n .
- Uma variável binária, A_{mn}^{ij} : indica que o caminho óptico de i para j passa pelo link de fibra m - n . $A_{mn}^{ij} = 1$ se $P_{mn}^{ij} > 0$ ou $A_{mn}^{ij} = 0$ se $P_{mn}^{ij} = 0$.

3.1 Formulação MILP- (com *Grooming*)

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

Sujeito a:

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

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

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

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

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

A equação (3.1) representa a função objetivo, que é minimização da taxa média de espectro utilizado. Observe que ela representa 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 optar-se em deixá-lo para fim de comparação com [Zhang *et. al* 2011]. (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 no destino “d”, sendo que as frações de tráfego obedecem a conservação de fluxo em nós intermediários. A equação (3.3) cria o caminho óptico de tamanho variável. A equação (3.4) também representa equações de conservação de fluxo, mas na camada física, m - n . Equação (3.5) representa variáveis que compõem a capacidade espectral de cada fibra. Equação (3.6) representa a quantidade de FGBs.

3.2 Formulação ILP- (Sem Grooming)

Nesta estratégia os dados continuam os mesmos da formulação com *grooming*, mas as variáveis agora são as seguintes:

- Roteamento de tráfego na topologia física, P_{mn}^{sd} : Fluxo de tráfego de uma fonte s para um destino d que passa por um enlace físico de m para n .
- Uma variável binária, B_{mn}^{sd} : indica que o tráfego de s para d passa pelo link de fibra m - n . $B_{mn}^{sd} = 1$ se $P_{mn}^{sd} > 0$ ou $B_{mn}^{sd} = 0$ se $P_{mn}^{sd} = 0$.

$$\text{Minimize } \sum_{mn} [\sum_{ij} (P_{mn}^{sd} + FGB \cdot B_{mn}^{sd}) \cdot D_{mn}] / (C \cdot \sum_{mn} D_{mn}) \quad (3.7)$$

Sujeito a:

$$\sum_n P_{mn}^{sd} - \sum_n P_{nm}^{sd} = \begin{cases} K^{sd} & \text{if } m = s \\ -K^{sd} & \text{if } m = d \\ 0 & \text{if } m \neq s, d \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\sum_{ij} (P_{mn}^{sd} + FGB \cdot B_{mn}^{sd}) \leq C \cdot F_{mn} \quad \forall m, n \quad (3.9)$$

$$B_{mn}^{sd} \geq P_{mn}^{sd} / M \quad \forall s, d, m, n \quad (3.10)$$

A equação (3.7), similar a (3.1), representa a função objetivo, que é minimização da taxa de espectro utilizado. (3.8) representa as equações de conservação de fluxo para as demandas. Ou seja, a demanda K^{sd} que sai de uma fonte “s” para um destino “d” é roteada por enlaces de fibra. Essa mesma demanda deve chegar ao destino “d” sem bifurcação, ou seja, não há *grooming*. Equação (3.9) representa a restrição de capacidade espectral de cada enlace e a restrição (3.10) contabiliza o número de FGBs.

3.3. Simulações 1

Para validar os modelos matemáticos descritos, comparando os resultados com [Zhang *et. al* 2011], foram realizadas análises numa rede pequena de seis nós, aqui definida como 6NET (Fig. 3), e em uma rede de grande dimensão, a NSFNET. Todas as simulações foram realizadas com o solver ILOG CPLEX 9.0 [CPLEX 2011] em um Intel Core i3 2.13GHz, 4GB de RAM.

3.3.1 Rede Pequena

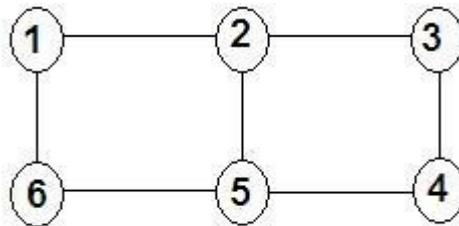


Fig. 3. Rede 6NET

Para efeitos de comparação, os dados de entrada são similares aos de [Zhang *et. al* 2011]. A disponibilidade de espectro para cada fibra é $C=1000$ GHz, a FGB entre as bandas (subportadoras) varia entre 10, 20 e 30 GHz e a eficiência espectral é definida como 4 bits/s/Hz. A demanda de tráfego entre cada par fonte-destino, s-d, é uniforme, variando entre 20, 40, 60, 80, e 100 Gbps. Em todos os casos foram medidos os tempos de simulação, que giraram em torno de 0.073s por cenário. A taxa de utilização média do espectro simulada para uma FGB de 10 GHz pelas duas abordagens (com *grooming* e sem *grooming*) na rede 6NET são apresentadas na Fig. 4.

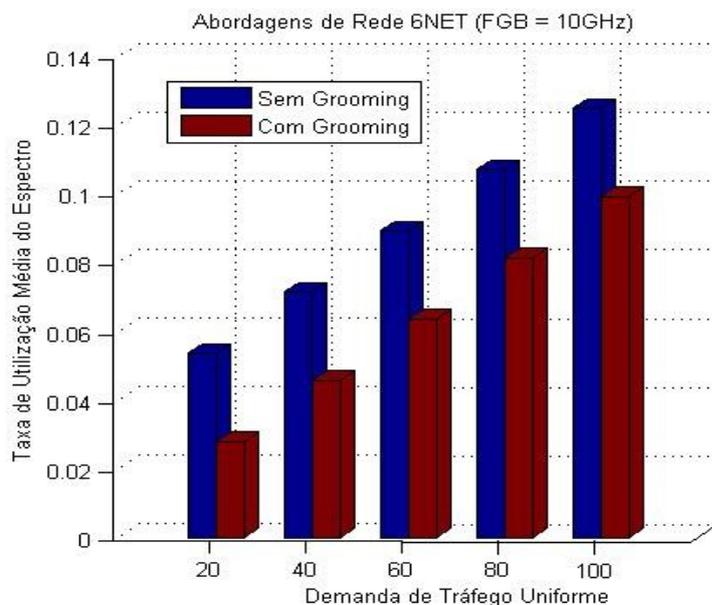


Fig. 4. Utilização de Espectro na 6NET (FGB: 10GHz)

Para uma visualização, ainda mais ampla, e para uma melhor análise e comparação; a Fig. 5 mostra as abordagens com *grooming* e sem *grooming* para a rede 6NET em função da variação das bandas de guarda (FGB's), num só gráfico tridimensional.

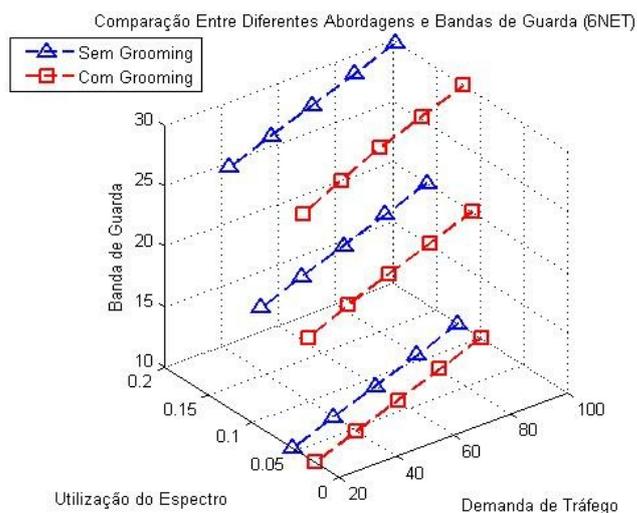


Fig. 5. Comparação Entre Abordagens e Bandas de Guarda (FGBs) na 6NET

3.3.2 Redes Grandes (NSFNET)

O desempenho das abordagens *com grooming* e *sem grooming* para a rede NSFNET (Fig. 6) são também verificados através de simulações, de forma a validar os resultados obtidos. Em um primeiro teste, após 24 horas de simulação, o solver CPLEX não encontrou a solução ótima, pois de forma similar aos tradicionais RWA e Projeto de Topologia Virtual em redes ópticas, o problema aqui abordado é NP [Jinno *et. al* 2009]. Então, para esta rede foi estipulado o tempo de simulação em 4h para cada cenário. Logo, as soluções apresentadas são sub-ótimas.

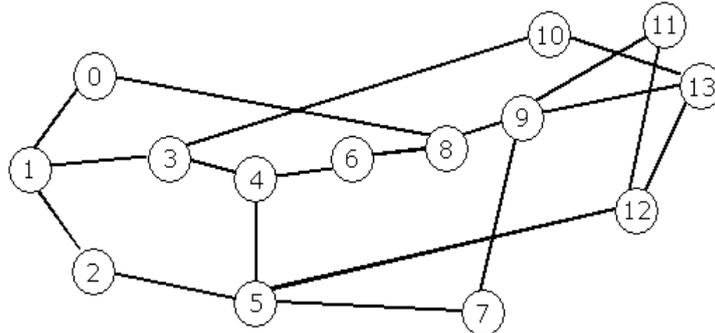


Fig. 6. Rede NSFNET

A disponibilidade de espectro para cada fibra, a demanda de tráfego entre nós, a variação da FGB e a relação entre taxa de dados e largura de banda são as mesmas já definidas para a rede pequena, 6NET. Desta forma, para FGB=10 GHz, os resultados obtidos são apresentados na Fig. 7.

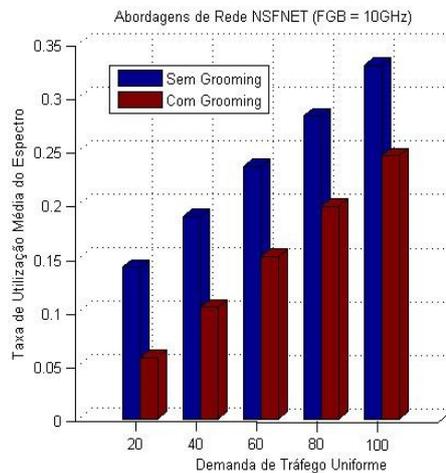


Fig. 7. Utilização de Espectro na NSFNET (FGB: 10GHz)

A Tabela 1 apresenta os resultados das simulações e os resultados apresentados em [Zhang *et. al* 2011] para três cenários: 20Gbps de tráfego com FGB= 10, 20 e 30GHz.

Tabela 1: Economia de espectro e discrepância em relação aos valores de [Zhang et. al 2011] por cenário na Rede NSFNET.

FGB	10GHz	20GHz	30GHz
Resultados de [Zhang et. al 2011]	8%	17%	24%
Simulações	8.29%	16.57%	24.86%
Discrepância	0.29%	0.43%	0.86%

Pode-se observar que a estratégia está validada com uma discrepância menor que 1% em relação aos resultados de [Zhang et. al 2011]. Esta discrepância pode se dever as características do computador usado para simulação ou ao tempo de simulação, o qual não é especificado em [Zhang et. al 2011].

4. Formulação Matemática Modificada

Em [Yang et. al 2011] , os autores abordam uma formulação matemática ILP para o problema RSA (*Routing and Spectrum Assignment*) em Redes Ópticas Elásticas, com o objetivo de minimizar o número máximo de subportadoras nos enlaces físicos da rede e, num segundo momento, sugerem duas heurísticas para serem aplicadas em redes de grande dimensão para o mesmo problema. A técnica utilizada é similar a técnica sem *grooming* de tráfego apresentada na subseção 3.2, mas com outra função objetivo.

A proposta deste trabalho é modificar a formulação com grooming, apresentada na subseção 3.1 e comparar com os resultados de [Yang et. al 2011] . Logo, a nova função objetivo proposta para a estratégia com *grooming* será:

$$\text{Minimize: } MS \quad (4.1)$$

Onde MS é o número máximo de subportadoras que pode atravessar qualquer enlace físico da rede.

E a equação (3.5) será trocada por:

$$\sum_{ij}(P_{mn}^{ij} + FGB \cdot A_{mn}^{ij}) \leq MS \cdot F_{mn} \quad \forall m,n \quad (4.2)$$

Utilizando esta modificação, análises através de simulações para as redes pequena e grande serão realizadas, de maneira a mostrar que mais espectro pode ser economizado com a utilização de *grooming*, em comparação a estratégia de [Yang et. al 2011] .

4.1 Simulações 2

4.1.1 Rede Pequena (6NET)

Para validar a formulação sem *grooming* com a estratégia ILP utilizada em [Yang et. al 2011] e os seus resultados, foram feitas análises numa rede pequena de seis nós, já definida anteriormente como 6NET (Fig. 1).

Também para efeitos de comparação com [Yang et. al 2011] , as demandas e valores de FGB são adimensionais, onde X representa o tráfego de um par fonte-destino, com demanda uniforme, cujo os valores são $X=1$ para $FGB=1$ e $FGB=2$ e $X=2$ para $FGB=1$. Em todos os casos foram medidos os tempos de simulação que giraram em

torno de 0.82 segundos por simulação no cenário sem *grooming* e 5.84 segundos no cenário com *grooming*. O número máximo de subportadoras (MS) nas diferentes configurações de demanda e FGB para as abordagens com *grooming* e sem *grooming* na rede 6NET são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2: Número máximo de subportadoras em diferentes cenários na Rede 6NET.

Cenários	Objetivo (Modelo)	X=1; FGB=1	X=1 ; FGB=2	X=2 ; FGB=1
Sem Grooming	MS em [Yang <i>et. al</i> 2011]	7	10	11
Sem Grooming	MS-Simulações	7	10	11
Com Grooming	MS- Simulações	5	6	9

Percebe-se que a equivalência de resultados na configuração sem *grooming* (subseção 3.2) valida o modelo para redes pequenas e confirma os resultados obtidos neste artigo. Com a introdução da abordagem com *grooming* de tráfego (proposta da formulação modificada deste artigo), a carga de subportadoras diminuiu consideravelmente, o que pode ser bastante significativo para redes grandes, podendo trazer inúmeras vantagens para a rede, através da otimização da utilização do espectro.

4.1.2 Rede Grande (NSFNET)

Com o objetivo de verificar a eficiência na minimização do número máximo de subportadoras em redes de grande dimensão, simulações com a formulação modificada foram realizadas na NSFNET, com um tempo de simulação estipulado em 4h, e comparadas com a formulação sem *grooming* e duas heurísticas: SPSR (*Shortest Path with Maximum Spectrum Reuse*) e BLSA (*Balanced Load Spectrum Allocation*) de [Yang *et. al* 2011].

Para uma demanda de tráfego uniforme (X=1) e FGB variando entre 1, 2 e 3, os resultados das estratégias podem ser vistos na tabela 3. As heurísticas SPSR e BLSA obtém o resultado em menos de 1s. O tempo médio de simulação usando os modelos matemáticos deste artigo, para os 3 cenários, foi fixado em 14400 segundos - o que equivale a 4 horas. Apesar de, com esse tempo de simulação, não se chegar estritamente ao resultado ótimo, os valores obtidos na formulação matemática modificada (MS – simulações com *grooming*) se mostraram satisfatórios, na medida em que, por via de comparação com as heurísticas, diminuem consideravelmente o número máximo de subportadoras usadas em qualquer enlace da rede.

Tabela 3: Carga de subportadoras em diferentes cenários na Rede NSFNET.

Cenários	Objetivo (Modelo/Heurística)	X=1; FGB=1	X=1 ; FGB=2	X=1 ; FGB=3
Sem Grooming	MS com SPSR em [Yang <i>et. al</i> 2011]	29	43	57
Sem Grooming	MS com BLSA em [Yang <i>et. al</i> 2011]	27	40	53
Sem Grooming	MS - simulações	27	39	51
Com Grooming	MS- simulações	18	21	38

Analisando a tabela, é possível perceber a economia de subportadoras quando se utiliza o modelo com *grooming* de tráfego em relação às heurísticas e modelos estudados em [Yang *et. al* 2011] . Para visualização gráfica, a Fig. 8 ilustra o número máximo de subportadoras, com diferentes FGBs para as abordagens com *grooming* e sem *grooming* de tráfego na Rede NSFNET.

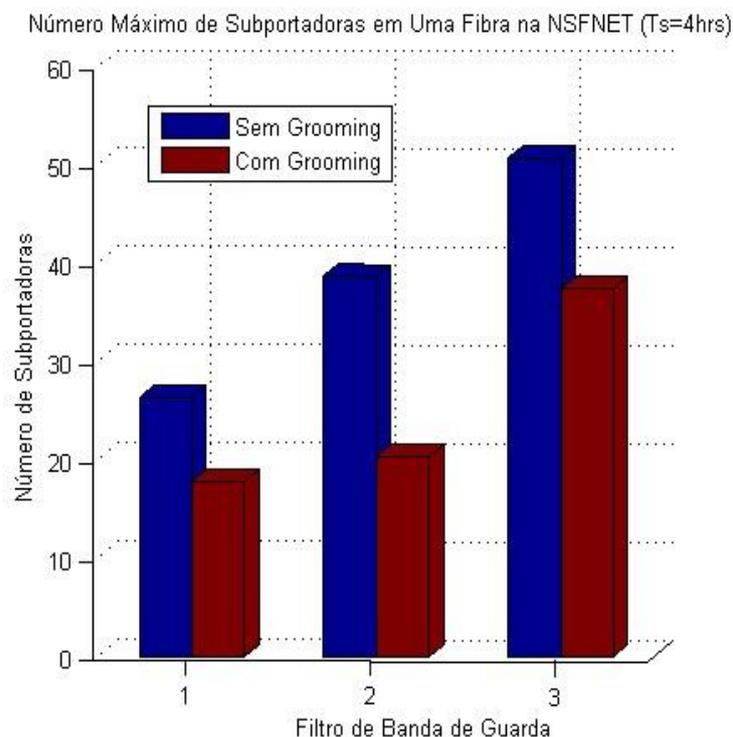


Fig. 8. Número Máximo de Subportadoras por Banda de Guarda na NSFNET

Percebe-se claramente a economia obtida no número de subportadoras na abordagem com *grooming* de tráfego em relação à abordagem sem *grooming*, reafirmando a eficiência do método para redes de grande dimensão em termos de economia de espectro. A economia média obtida aqui foi de 13 subportadoras, representando um resultado bastante significativo, com alto potencial de impacto positivo no gerenciamento de redes de grande dimensão. Pode-se verificar em [Takara *et. al* 2010] que levando em conta os *impairments* (restrições da camada física), a economia de espectro em redes ópticas elásticas pode chegar a 66% quando comparada as redes ópticas WDM tradicionais.

5. Considerações Finais

Neste artigo foram apresentadas formulações matemáticas para o planejamento e otimização de redes ópticas elásticas com e sem *grooming*. Uma formulação modificada foi proposta para o projeto com *grooming* e sua eficiência foi demonstrada através de comparações com a estratégia sem *grooming*. Percebe-se que a estratégia com *grooming* serve para balancear a carga (em termos de subportadoras) melhorando a eficiência e dividindo a demanda de tráfego em redes ópticas elásticas de forma apropriada, através de caminhos ópticos de tamanho variável.

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 análise de desempenho, gerenciamento e planejamento de redes ópticas elásticas.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu apoio do Edital PROPCI-PROPG/UFBA 02/2011-PRODOC-UFBA.

Referências

- Assis, K.D.R.; Waldman, H. (2002) “Redes Ópticas WDM: Planejamento e Perspectivas Futuras” WPerformance 2002 I Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação, 2002, Florianópolis. Anais do XXII SBC.
- Ramaswami, R. and Sivarajan, K. N. (2001) *Optical Networks : A Practical Perspective* (Morgan Kaufmann Series in Networking), 2nd edition, Elsevier Science & Technology Books.
- Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y and Matsuoka, S. (2009) “Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies,” *IEEE Comm. Mag.*, vol.47, pp. 66-73.
- Kozicki, B., Takara, H., Yoshimatsu, T., Yonenaga, K. and Jinno, M. (2009) “Filtering Characteristics of Highly-Spectrum Efficient Spectrum-Sliced Elastic Optical Path (SLICE) Network,” *Proc. OFC/NFOEC*.
- Zhang, G. De Leenheer, M. ; Morea, A.; Mukherjee, B. (2012) “A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Issue 99, pp 1-23.
- Zhang, Y., Zheng, X., Li, Q., Hua, N., Li, Y and Zhang, H. (2011) "Traffic Grooming in Spectrum-Elastic Optical Path Networks," in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD)* (Optical Society of America, 2011), paper OTu11.
- Yang Wang, Xiaojun Cao, Yi Pan. (2011) “A Study of the Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-sliced Elastic Optical Path Networks” *IEEE Infocom*.
- Sone, Y. et al., (2011) “Bandwidth Squeezed Restoration in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks (SLICE),” *J. Optical Communications and Networking*, Vol. 3, No. 3, pp. 223-233.
- Jinno, M. et al., (2010) “Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network,” *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 48, Issue. 8, pp. 138-145.
- Christodouloupoulos et al., (2010) “Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation,” *IEEE Globecom*, Dec.
- Klinkowski, M. and Walkowiak, K. (2011) “Routing and Spectrum Assignment in Spectrum Sliced Elastic Optical Path Network” *IEEE Communications Letters*, August , vol. 15, issue 8, pp. 884-886.

- Takagi, T. et. al., (2011) “Dynamic Routing and Frequency Slot Assignment for Elastic Optical Path Networks that Adopt Distance Adaptive Modulation,” Proc. OFC/NFOEC, OTuI7.
- Santos, A., Santos, C., Durães, G. and Assis, K.D.R. (2012) “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.
- Assis, K.D.R., Camelo Jr, R.C., and Waldman H. (2012) “MILP Formulation for Squeezed Protection in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks” 2012 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (IEEE SPECTS 2012) July 8-11, 2012, Genoa, Italy.
- IBM ILOG CPLEX: high-performance mathematical programming engine, (2011) <http://www.ibm.com/>.
- Takara, H. et. al “Distance Adaptive Super-Wavelength Routing in Elastic Optical Path Network (SLICE) with Optica(2010)l OFDM. ECOC 2010. 19-23 September, Torino, Italy.