

Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas: O Conceito *SLICE*

Alex F. Santos, Clécio C. Santos, Gilvan M. Durães e K. D. R. Assis

Resumo— Este artigo descreve um método mais flexível de alocação de espectro para redes ópticas que utiliza Programação Linear Inteira (ILP-Integer Linear Programming) e Heurísticas. 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). 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 um critério de otimização é proposto para distribuir a demanda de tráfego adequadamente nesta nova arquitetura. Simulações foram realizadas com a formulação matemática para redes pequenas e heurísticas foram propostas para redes de grande dimensão. Os resultados sugerem a vantagem em termos de economia de espectro do método proposto.

Palavras-Chave—Redes Ópticas, Roteamento e Alocação de Espectro, OFDM, SLICE.

Abstract— This paper presents an efficient method for spectrum allocation and path protection that uses Integer Linear Programming – ILP. The method shows that a spectrum allocation gridless is more efficient than traditional use. This new concept, which is based on-OFDM, is known as Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network (SLICE). In this new type of network architecture, the lightpath bandwidth can be elastic in order to best attend the traffic demand. In this paper a new criterion of optimization is proposed to route traffic properly in this new architecture. Simulations were performed with the mathematical formulation for small networks and a heuristic was proposed for large networks. The results suggest the advantage of economy of the spectrum of the proposed method.

Keywords— Optical Network, Routing and Spectrum Allocation, OFDM, SLICE.

I. INTRODUÇÃO

As Redes ópticas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) adotam uma alocação de frequência de tamanho fixo (capacidade) por comprimento de onda, que é a menor granularidade para acomodar as demandas de tráfego [1], [2]. Cada comprimento de onda em uma rede WDM é separado de outro adjacente por um espaçamento, o qual pode ser chamado de banda de guarda, isto é feito para garantir a qualidade do sinal e a filtragem adequada nos receptores.

Para o estabelecimento de uma conexão entre dois nós de uma rede óptica WDM, é necessário definir os caminhos ópticos na qual o tráfego será encaminhado e alocar os

recursos necessários para o estabelecimento desta conexão [3], [4]. Este processo é definido como problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*) [1], [2].

A atribuição de frequências de tamanho fixo em uma rede WDM, no entanto, tem desvantagens em relação a granularidade e pouca flexibilidade. Por exemplo, quando a demanda de tráfego é menor do que a capacidade de um comprimento de onda, este comprimento de onda inteiro pode ser alocado para acomodar a demanda. Desta forma, uma parte da banda é desperdiçada. Além disso, quando uma demanda de tráfego requer múltiplos comprimentos de onda, não é possível eliminar a lacuna espectral (ou seja, as frequências de banda de guarda para facilitar a filtragem) entre dois comprimentos de onda.

Por exemplo, a Figura 1 mostra alocação de canais WDM, espaçados uniformemente, e com capacidade de até 40 GHz de espectro disponível para cada canal (Evidentemente, esta capacidade pode ser transformada em bps pela relação entre a taxa de transmissão e a frequência). Supondo que necessitamos alocar 50GHz, como cada canal suporta 40 GHz temos a seguinte situação: o canal 1 ocupa de 0 a 40 GHz, e o canal 2 ocupa de 65GHz a 75GHz. Observe que há 25 GHz de espectro não utilizado entre o canal 1 e o canal 2, o mesmo ocorrendo entre os canais 2 e 3. Isto acontece porque foi alocado apenas 10GHz no canal 2, restando 30 GHz de espectro não utilizado. Logo, temos 15GHz de espectro não utilizado mais 10GHz de frequência de banda de guarda entre os canais 1 e 2, totalizando 25 GHz, sendo que o mesmo ocorre entre os canais 2 e 3.

Logo, um planejamento, com capacidade pré-fixada para os canais, pode desperdiçar uma quantidade razoável de espectro. Ou seja, o planejamento tradicional (considerando a situação hipotética acima) é feito para caminhos ópticos de tamanho fixo, no caso 40 GHz.

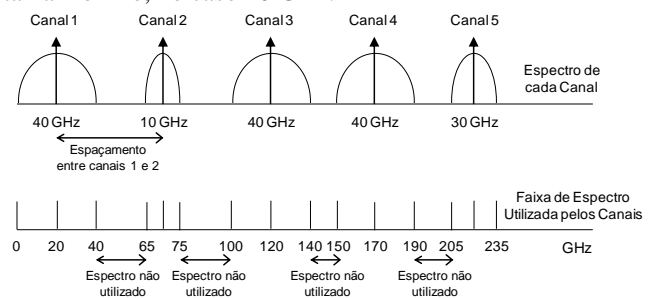


Fig. 1. Espectro de rede WDM tradicional

Recentemente muitos estudos estão sendo realizados com uma nova estratégia para o planejamento de redes ópticas [7]-[11], [16]. Esta estratégia propõe um método mais flexível de alocação de espectro para redes ópticas WDM. O método mostra que uma alocação de espectro, com espaçamentos diferentes entre os canais, ou seja, “Gridless” é mais eficiente que o método tradicional. Esta nova proposta, que é baseada no sistema de transmissão OFDM

(*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), é conhecida como *Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network* (SLICE) [8], [10].

A proposta da arquitetura SLICE é realizar o planejamento da rede para suportar caminhos ópticos de tamanho variável. Para isso os *transponders BV* [8], conhecidos como *transponders* de largura de banda variável, e a tecnologia OFDM são necessárias. Também é preciso utilizar um Filtro de Banda de Guarda (FGB) [9], para aplicação dessa nova técnica. A Figura 2 apresenta a alocação de espectro realizada na Figura 1 utilizando SLICE. O FGB considerado foi 10 GHz e o espectro total utilizado foi de 190 GHz, contra 235 GHz da Figura 1. Isto ocorre porque podemos alocar de forma otimizada o espectro.

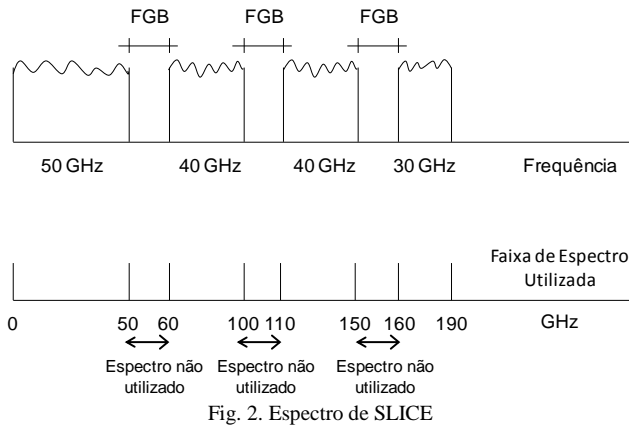


Fig. 2. Espectro de SLICE

Similar ao problema de roteamento e alocação de comprimentos de onda (RWA) em redes WDM, na rede SLICE existe o problema de roteamento e alocação de espectros (RSA – *Routing and Spectrum Allocation*) [10], [11]. No RSA é alocado um espectro (ou conjunto de sub-portadoras) para atender a demanda de tráfego da rede. Em [10], os autores afirmam que o RSA é diferente e mais desafiador do que o problema RWA tradicional. Primeiro, porque a sub-portadora alocada deve ter continuidade, isto é, ser a mesma em todos os enlaces da rota. Segundo, as sub-portadoras de um mesmo caminho óptico de tamanho variável (conjunto de sub-portadoras) devem ser consecutivas. Além disso, a filtragem no receptor requer que os caminhos ópticos que compartilhem links físicos sejam separados por uma banda de guarda.

Algumas estratégias de roteamento através de técnicas de programação inteira e algoritmos heurísticos foram propostas visando melhorar o desempenho das redes ópticas em termos de economia do espectro, diminuindo o número de subportadoras usadas. Por exemplo, em [10] é apresentado uma formulação 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 utilizados, ou seja, a rota que possui mais sub-portadoras disponíveis em todos os enlaces.

Neste artigo propomos uma formulação matemática mais simples e utilizamos dois algoritmos, o BSR (*Best among the Shortest Routes*) [12] e ILR (*Iterative Load Routing*) [13], para efeitos de comparações. Ao final deste artigo, percebe-se que os algoritmos apresentados obtiverem melhores resultados que os propostos em [10].

Neste trabalho são apresentadas as seguintes contribuições:

- Inicializamos uma formulação simples através de Programação Inteira para o problema de **Roteamento e Alocação de Espectro (Routing and Spectrum Assignment – RSA)** em Redes SLICE, com o objetivo de minimizar o número de sub-portadoras nos links físicos;
- Proposta de duas **Heurísticas** para a formulação do item “a”, para serem aplicadas em redes de grande dimensão, realizando simulações que comprovam a eficiência das mesmas.

As próximas seções deste artigo estarão organizadas da seguinte maneira: na seção 2 será exemplificado o RSA em redes SLICE. Na seção 3 será apresentada uma formulação matemática exata para o problema RSA. A seção 4 descreverá as heurísticas utilizadas para tornar a solução RSA viável em redes de grande dimensão. A seção 5 apresentará os resultados dos experimentos obtidos. Por fim, na seção 7 estarão as considerações finais.

II. ROTEAMENTO E ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM REDES SLICE

Em uma rede SLICE a alocação de banda adaptada é possível devido a modulação OFDM. No domínio da frequência uma sub-portadora normalmente corresponde a vários GHz, e a capacidade de uma sub-portadora é da ordem de Gbps.

Na alocação, se a demanda de tráfego a ser transmitida por um nó for menor que a capacidade do comprimento de onda disponível, utiliza-se OFDM para dividir o comprimento de onda em diversas sub-portadoras com tamanhos menores, para assim alocar apenas a quantidade necessária de subportadoras para a demanda, as restantes podem ser alocadas para outra demanda. Desta forma evitamos o desperdício de banda [8].

Para formar o caminho de espectro para uma demanda de tráfego usando várias sub-portadoras, de tamanhos distintos, a rede SLICE precisa ter *transponders* (BV) que podem variar a largura de banda na borda da rede e de *Optical Crossconnects* (WXC) que pode variar a largura de banda a partir do núcleo da rede, isto pode ser observado em [8], [14], [15].

Para facilitar a filtragem do sinal óptico nos receptores, dois caminhos de espectro que compartilham um ou mais enlaces de fibra em comuns devem ser separados no domínio da frequência por uma frequência de banda de guarda, ou simplesmente GC (*Guard-Carrier*). O tamanho da banda de guarda, no entanto, não é trivial e pode ser da ordem de uma ou múltiplas sub-portadoras [9].

Um exemplo do RSA é ilustrado na Figura 3a. Nesta, temos uma rede em estrela com enlaces bi-direcionais, $GC=1$, um caminho de espectro SP_1 com 2 sub-portadoras de A para B e um outro caminho de espectro SP_2 com 1 sub-portadora de A para C. A Figura 3b ilustra a alocação de espectro na Fibra F_1 para SP_1 e SP_2 . Como mostrado na Figura 3b, cada sub-portadora na fibra tem um índice. A sub-portadora com índices 1 e 2 são alocados para o SP_1 que requer 2 sub-portadoras consecutivas. A sub-portadora com índice 4 é alocada para o SP_2 . A sub-portadora com índice 3 é alocada como banda de guarda (GC) entre o SP_1 e SP_2 na

Fibra 1. Como as sub-portadoras dentro do SP_1 são consecutivas, não é necessária uma banda de guarda entre elas. No entanto, para separar o sinal do SP_1 do SP_2 na Fibra F_1 é necessário utilizar uma GC. Assim, não podemos utilizar a sub-portadora 3 para o SP_2 . Como resultado, para alocar o SP_1 e SP_2 são necessárias 4 sub-portadoras. Para representar o número máximo de sub-portadoras alocados em uma fibra na rede é utilizada a variável MS . Logo, para alocar a demanda de tráfego desta rede o MS irá ser 4.

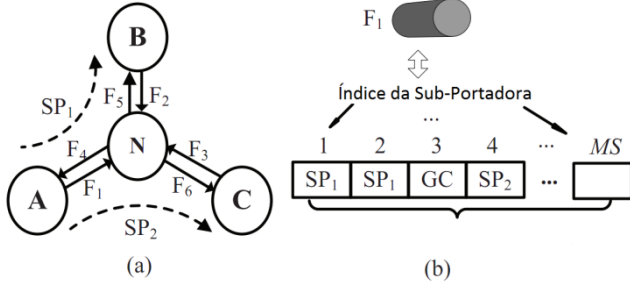


Fig. 3. Um exemplo de roteamento e espectros em uma rede SLICE [10].

III. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Nesta seção é descrita uma formulação matemática para o problema RSA em redes SLICE. O intuito é minimizar o número de subportadoras utilizadas nos links físicos, economizando o espectro utilizado. Para isto é utilizada a formulação ILP a seguir.

A. Notação

- i e j denotam, respectivamente, origem e destino de um caminho óptico.
- m e n denotam nós de uma topologia física, pelos quais pode passar um caminho óptico.

B. Dados

- Número de nós da rede: N .
- Matriz de tráfego de sub-portadoras: V_{ij} que denota a intensidade de tráfego de sub-portadoras do nó origem i para o nó destino j .
- Topologia física: F_{mn} representa o número de fibras que interconecta os nós m e n .
- Filtro de banda de guarda (em Hz): GC é a largura de espectro mínima entre bandas de frequência.
- Um número K grande, para auxiliar na transformação de variáveis inteiras em binárias.

C. Variáveis

- Número máximo de sub-portadoras em qualquer link físico da rede: MS .
- Largura de banda de um caminho óptico, V_{ij} : representa a largura de banda de um caminho óptico de i para j que tem tamanho variável.
- Rota na topologia física, P_{mn}^{ij} : quantidade de largura de banda que um caminho óptico de i para j usa ao passar pelo link de m para n .
- Uma variável binária, A_{mn}^{ij} : indica se 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 $P_{mn}^{ij} = 0$.

D. Formulação ILP

$$\text{Minimizar: } MS \quad (3.1)$$

$$\sum_n P_{mn}^{ij} - \sum_n P_{nm}^{ij} = \begin{cases} V_{ij} & m = i \\ -V_{ij} & m = j \\ 0 & m \neq i, j \end{cases} \quad \forall m-n \in E \quad (3.2)$$

$$\sum_{ij} (P_{mn}^{ij} + GC \cdot A_{mn}^{ij}) - GC \leq MS \cdot F_{mn} \quad \forall i, j \in N \text{ e } \forall m-n \in E \quad (3.3)$$

$$A_{mn}^{ij} \geq P_{mn}^{ij} / K \quad \forall i, j \in N \text{ e } \forall m-n \in E \quad (3.4)$$

A equação (3.1) representa a função objetivo, que é a minimização do espectro utilizado. Observe que ela representa a soma de subportadoras que passa por qualquer enlace físico da rede, com o correspondente intervalo GC. (3.2) representa as equações de conservação de fluxo para as demandas. Equação (3.3) representa variáveis que compõem a capacidade espectral de cada fibra. Equação (3.4) representa uma variável que auxilia na conta da quantidade de GCs que são usados em cada enlace físico.

IV. HEURÍSTICAS PARA O PROBLEMA RSA

Infelizmente, em redes de grande dimensão, o problema não é tratável com ILP. Logo, heurísticas devem ser usadas para resolver o RSA.

Em [10] foram apresentadas duas heurísticas para resolver o problema RSA. A SPSR (*Shortest Path with Maximum Spectrum Reuse*) utiliza dois parâmetros para o roteamento e alocação: 1) os caminhos ópticos são classificados em ordem crescente de demanda de tráfego; 2) são alocados os caminhos ópticos, respeitando a restrição de continuidade da sub-portadora. Nesta alocação, o caminho óptico escolhido é o primeiro disponível. Este passo é similar ao First-Fit [17]. O BLSA (*Balanced Load Spectrum Allocation*) determina o roteamento através do balanceamento de carga no interior da rede, com intuito de minimizar o número máximo de sub-portadora em uma fibra. Este algoritmo é constituído por três passos, como podemos observar em [10].

Neste trabalho, comparamos as heurísticas supracitadas com a BSR (*Best among the Shortest Routes*) [12], e a ILR (*Iterative Load Routing*) [13]. A BSR tem como objetivo encontrar as melhores rotas dentro de um conjunto de rotas possíveis. Como cada par(fonte, destino) pode ter mais de uma rota de menor caminho (chamadas neste trabalho de Rotas Candidatas – RC), existem M soluções diferentes para o planejamento das rotas fixas em uma determinada topologia de rede. O cálculo de M , que representa o número de soluções possíveis, é dado pela Equação 1 em [12].

A heurística ILR tem o principal objetivo de balancear a carga da rede. Isto é feito realizando o re-roteando dos caminhos sobre conjuntos de enlaces físicos menos congestionados. Desta forma, consegue-se reduzir o número de sub-portadoras alocadas em um enlace da rede.

A. Simulações para Redes Pequenas

Com intuito de validar a formulação matemática proposta, simulamos duas redes em anel (bi-direcionais: uma fibra em cada direção), uma com 4 nós e outra com 5 nós, como apresentado em [10].

TABELA I. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA REDES PEQUENAS: R4 E R5 (ANEL), R6 (MALHA)

Rede	X =1, GC=1					X =1, GC=2					X =2, GC=1				
	ILP	BSR	ILR	BLSA	SPSR	ILP	BSR	ILR	BLSA	SPSR	ILP	BSR	ILR	BLSA	SPSR
R ₄	3 (7ms)	5 (63ms)	5 (13ms)	3 (169ms)	5 (35ms)	4 (7ms)	7 (63ms)	7 (13ms)	4 (169ms)	7 (35ms)	5 (7ms)	8 (63ms)	8 (13ms)	5 (169ms)	8 (35ms)
R ₅	5 (17ms)	5 (92ms)	5 (38ms)	7 (220ms)	5 (40ms)	7 (20ms)	7 (92ms)	7 (38ms)	10 (220ms)	7 (40ms)	8 (15ms)	8 (92ms)	8 (38ms)	11 (220ms)	8 (40ms)
R ₆	7 (32s)	7 (125ms)	7 (79ms)	9 (286ms)	9 (44ms)	10 (473s)	10 (125ms)	10 (79ms)	13 (286ms)	13 (44ms)	11 (13s)	11 (125ms)	11 (79ms)	14 (286ms)	14 (44ms)

Nestas simulações conseguimos obter os mesmos resultados da programação linear inteira (ILP) de [10] e acrescentamos o tempo de simulação para cada cenário. Também realizamos simulações para uma rede de 6 nós (Figura 4) e utilizamos as heurísticas BSR, ILR, BLSA e SPSR em todos os cenários para comparar os resultados. Todas as simulações para a ILP foram realizadas com o solver ILOG CPLEX 9.0 [19] em um Intel Core i3 2.13GHz, 4GB de RAM.

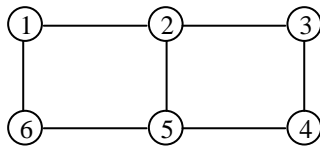


Fig. 4. Rede Pequena (Malha)

Como podemos observar na Tabela I, as redes com maiores quantidades de nós demandam mais tempo de simulação. Nas simulações, variamos a quantidade de banda de guarda (GC) e a demanda de tráfego (X), ou seja, o número de sub-portadoras. Para a rede de 4 nós em anel a heurística que conseguiu obter o resultado ótimo foi a BLSA, alocando 3, 4 e 5 sub-portadoras para X =1 e GC=1, X =1 e GC=2, e X =2 GC=1, respectivamente. No entanto, em relação ao tempo de simulação esta heurística foi a pior dentre todas, obtendo 169 ms em todas as simulações. Para as redes de 5 nós, as heurísticas que conseguiram obter resultados ótimos foram as BSR, ILR e SPSR, todas alocaram 5, 7 e 8 sub-portadoras para X =1 e GC=1, X =1 e GC=2, e X =2 GC=1, respectivamente. Os tempos de simulação foram ILR (38ms), SPSR (40ms) e BSR (92ms) em todos os cenários. No entanto, para a rede de 6 nós apenas as heurísticas ILR e BSR obtiveram resultados ótimos com 7, 10 e 11 sub-portadoras alocadas para X =1 e GC=1, X =1 e GC=2, e X =2 GC=1, respectivamente. Os tempos de simulação para as heurísticas ILR e BSR foram 79ms e 125ms. Estes tempos são muito bons quando comparados com 32s, 473s e 13s, para X =1 e GC=1, X =1 e GC=2, e X =2 GC=1, da solução ótima (ILP).

Em todos os cenários percebemos que a demanda maior no tempo das simulações é devido à fase de roteamento do tráfego da rede. Nesta, são escolhidos os caminhos pelos quais as sub-portadoras devem ser alocadas posteriormente.

Para as redes maiores não podemos utilizar o ILP devido a dispendiosa quantidade de tempo gasto para obtermos os resultados. Logo, utilizamos apenas as heurísticas citadas. No entanto, percebemos que, à medida que a quantidade de nós da rede aumenta apenas as heurísticas BSR e ILR conseguem obter os melhores resultados.

B. Simulações para Rede Grande (NSFNet)

Para verificar a eficiência das heurísticas em redes de grande dimensão, realizamos simulações com a rede NSFNet [10] com tráfego uniforme e não uniforme. Essa rede contém 14 nós e 42 enlaces.

1) Demanda de Tráfego Uniforme

A Figura 5 ilustra os resultados de uma rede SLICE NSFNet com uma sub-portadora em cada caminho de espectro alocado. Simulamos as heurísticas SPSR, BLSA, BSR e ILR com a GC iguais a 1, 2 e 3. Ambas as heurísticas BSR e ILR com GC = 1 alocaram 25 sub-portadoras, obtendo melhores resultados que as heurísticas BLSA e SPSR que conseguiram 27 e 29 sub-portadoras respectivamente. Quando aumentamos a quantidade de banda de guarda, o número de sub-portadoras aumenta em cada alocação entre caminhos de espectros. Logo, para GC = 2, observamos que ambas as heurísticas BSR e ILR alocaram 37 sub-portadoras e as heurísticas BLSA e SPSR 40 e 43 sub-portadoras. Para GC = 3, BSR e ILR alocaram 49 sub-portadoras enquanto as heurísticas BLSA e SPSR alocaram 53 e 57. Isto ocorre porque as heurísticas BSR e ILR têm como objetivo principal balancear a carga da rede, evitando os caminhos mais congestionados para fazer a alocação de espectros. Desta forma, a alocação é realizada pelos caminhos menos utilizados, dividindo a demanda de tráfego para todos os enlaces da rede.

Apesar das heurísticas BSR e ILR serem distintas e realizarem a alocação por caminhos diferentes, ambas conseguem obter resultados melhores que as heurísticas BLSA e SPSR propostas por [10], para esta topologia.

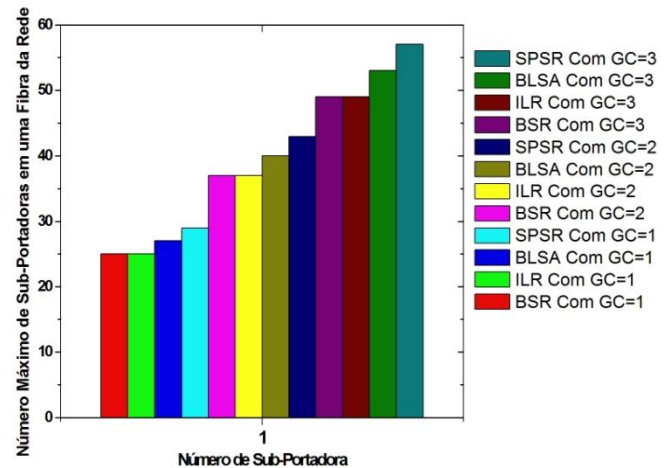


Fig. 5. Número máximo de sub-portadoras em uma fibra da rede com uma sub-portadora em cada caminho de espectro.

1) Demanda de Tráfego Não Uniforme

A Tabela II apresenta a demanda de tráfego gerada de forma aleatória entre 0 e 3 para a Rede NSFNet. Os resultados podem ser observados na Figura 6.

Para GC = 1, ambas as heurísticas BSR e ILR alocaram 39 subportadoras e as heurísticas BLSA e SPSR alocaram 40 e 44 sub-portadoras, respectivamente. Quando aumentamos a quantidade de banda de guarda, o número de sub-portadoras aumenta em cada alocação entre caminhos de espectros. Logo, para GC = 2, observamos que ambas as heurísticas BSR e ILR alocaram 50 sub-portadoras e as BLSA e SPSR 53 e 56 sub-portadoras, respectivamente.

Para GC = 3, BSR e ILR alocaram 61 sub-portadoras enquanto as BLSA e SPSR alocaram 66 e 68 sub-portadoras.

Como em todas as simulações as heurísticas BSR e ILR obtiveram os mesmos resultados, ilustramos na Figura 7 a alocação de sub-portadoras por enlaces, para GC = 1, com intuito de verificarmos que apesar do número de sub-portadoras serem iguais, o roteamento e alocação são distintos. Os enlaces mais congestionados são 9 (3-6) e 28 (10-9) obtendo em ambos 39 sub-portadoras.

Então, para a banda de guarda igual a 1, 2 e 3, percebemos que as heurísticas BSR e ILR obtiveram melhores resultados que as BLSA e SPSR, para essa topologia.

TABELA II. MATRIZ DE TRÁFEGO PARA REDE NSFNET

0	1	3	3	0	3	0	3	1	1	3	3	1	0
0	0	0	3	0	0	3	3	0	3	3	2	2	1
3	0	0	3	1	3	2	1	3	2	0	3	3	3
2	0	0	0	1	0	3	1	2	3	0	1	1	0
3	0	2	3	0	1	0	3	3	3	1	0	2	0
0	2	3	3	0	0	2	1	1	1	2	2	1	3
3	0	1	1	2	2	0	1	0	2	2	1	0	2
0	2	2	1	2	0	0	0	3	2	1	0	1	3
0	1	3	3	2	2	0	1	0	0	2	1	3	0
0	2	1	0	2	1	2	1	3	0	0	0	3	3
3	3	1	0	0	0	2	2	3	2	0	3	0	0
2	0	1	2	1	1	2	1	3	2	1	0	0	2
2	1	2	0	2	2	3	2	3	1	1	0	0	0
0	0	1	0	0	2	3	3	3	2	2	2	1	0

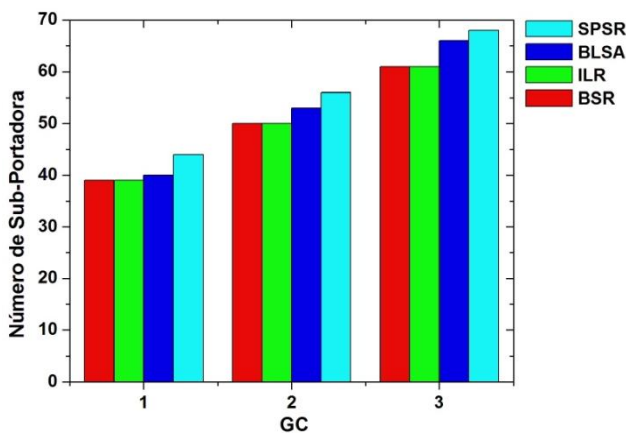


Fig. 6. Número máximo de sub-portadoras em uma fibra da rede NSFNet para o tráfego não uniforme.

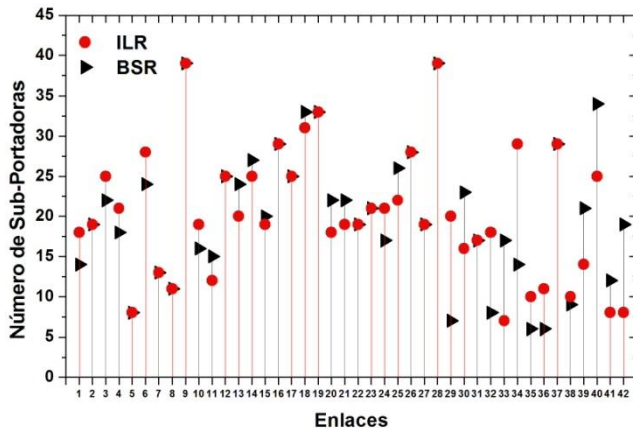


Fig. 7. Número de sub-portadoras, em cada enlace da rede NSFNet, das heurísticas BSR e ILR.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentamos duas heurísticas que tiveram melhores resultados, em todas as simulações, que as heurísticas apresentadas em [10] para a rede NSFNet com tráfego uniforme e não uniforme. As heurísticas propostas conseguiram resultados ótimos para as redes de 5 e 6 nós e apresentaram tempos de simulações aceitáveis, na ordem de milissegundos. Desta forma, percebe-se que as heurísticas utilizadas para balancear a carga melhoram o congestionamento e dividem a demanda em redes SLICE de forma apropriada.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, Optical Networks: a practical perspective. Morgan Kaufmann, San Francisco, 2002.
- [2] B. Mukherjee, Optical Communication Networks. Springer-Verlag, New York, 2006.
- [3] Soares, A. C. B., Maranhão, J. C., Giozza, W. F. e Cunha, P. R. F. "First Load Priority: A Wavelength Converter Placement Scheme for Optical Networks with Sparse-Partial Wavelength Conversion". In Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores – SBRC, v.2, p.1089-1103, Curitiba, 2006.
- [4] Chu, Xiaowen; Liu, Jiangchuan e Zhang, Zhensheng. "Analysis of Sparse-Partial Wavelength Conversion in Wavelength-Routed WDM Networks". INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, March, 2004.
- [5] Deng, T., Subramaniam, S. e Xu, J., (2004) "Crosstalk-Aware are Wavelength Assignment in Dynamic Wavelength Routed Optical Networks", Broadnets 2004. First International Conference on Broadband Networks.
- [6] K.D.R. Assis; Savasini, M. S.; Santos, A. F. "Linear formulation to avoid adjacent channel interference in LTD of optical networks". In: Optical Metro Networks and Short-Haul Systems III, São Francisco-CA, 2011.
- [7] M. Jinno, H. Takara, and B. Kozichi, "Dynamic optical mesh networks: drivers, challenges, and solutions for the future," in Proceedings of ECOC, 2009, pp. 1-5.
- [8] M. Jinno, H. Takara, B. Kozichi, Y. Tsukishima, and Y. Sone, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies," IEEE Communications Magazine, vol. 47, pp. 66-73, 2009.
- [9] M. Jinno, H. Takara, and B. Kozichi, "Filtering characteristics of highly-spectrum efficient spectrum-sliced elastic optical path (SLICE) network," in Proceedings of OFC, 2009.
- [10] Y. Wang, X. Cao, and Y. Pan, "A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks," in Proc. of IEEE INFOCOM, 2011.
- [11] M. Klinkowski and K. Walkowiak, "Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network," IEEE Comm. Lett., vol. 15, pp. 884-886, 2011
- [12] G. M. Durães, K.D.R. Assis, A. F. Santos, A. C. B. Soares, and W. Giozza, "Which of the shortest paths should we choose? A proposal of routing in the all-optical WDM networks design", International Conference on Transparent Optical Networks - ICTON, 2010.
- [13] C.C. Santos and K.D.R. Assis. "Optical Networks Security: Design to avoid the Jamming Attacks", in Transparent Optical Networks (ICTON), p. 1-4, 2011.
- [14] R. Ryf, Y. Su, L. Moller, S. Chandrasekhar, X. Liu, D. T. Neilson, and C. R. Giles, "Wavelength blocking filter with flexible data rates and channel spacing," IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 23, pp.54-61, 2005.
- [15] G. Baxter, S. Frisken, D. Abakoumov, H. Zhou, I. Clarke, A. Bartos, and S. Poole, "Highly programmable wavelength selective switch based on liquid crystal on silicon switching elements," in Proceedings of OFC, 2006, p. OTuF.
- [16] M. Klinkowski and K. Walkowiak, "Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network," IEEE Comm. Lett., vol. 15, pp. 884-886, 2011
- [17] H. Zang, J.P. Jue, B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM network", Optical Network Magazine, 2000.
- [18] J. Yen, "Finding the k shortest loopless paths in a network," Management Science, vol. 17, no. 11, pp. 712-16, 1971.
- [19] "IBM ILOG CPLEX: high-performance mathematical programming engine," <http://www.ibm.com/>, 2011.