

Alocação de Módulos de *Multicasting* de Supercanal em Redes Ópticas Elásticas

Bruno V. A. Correia, Raul C. Almeida Jr. and Helder A. Pereira

Resumo— Com o objetivo de atender às demandas de tráfego, é interessante utilizar de forma eficiente o espectro de frequência nas redes ópticas elásticas. Novas formas de prevenir e mitigar o problema de fragmentação espectral podem ajudar a alcançar esse objetivo. A multiplexação óptica inversa, baseada em múltiplas transmissões (*multicasting*) de supercanal, surge como uma ferramenta promissora para se trabalhar com esse problema. Esse artigo propõe uma heurística de distribuição de um número limitado de módulos de *multicasting* entre os nós da rede, visando otimizar a utilização do espectro de frequência. Os resultados mostram uma redução considerável na probabilidade de bloqueio de chamadas quando se compara a heurística proposta com o procedimento de distribuição uniforme dos módulos.

Palavras-Chave— Desfragmentação, Multiplexação Óptica Inversa, Rede Óptica Elástica.

Abstract— In order to attend the traffic demand, it is interesting to use efficiently the frequency spectrum in elastic optical networks. New proposals to prevent and solve the problem of spectral fragmentation may help to achieve this goal. Inverse optical multiplexing, based on superchannel multicasting, appears as a promising tool to tackle with this problem. This article proposes a heuristic that distributes a limited number of multicasting modules between the network nodes, aiming to optimize the frequency spectrum usage. The results show a considerable reduction in the blocking probability of call requests when the heuristic proposed is compared to the procedure that distributes the modules uniformly.

Keywords— Defragmentation, Elastic Optical Network, Optical Inverse Multiplexing.

I. INTRODUÇÃO

Com as redes ópticas elásticas (EON – *Elastic Optical Network*), a largura de banda para uma determinada requisição de chamada depende da taxa de transmissão de bit e do formato de modulação, constituindo-se de fatias do espectro de frequência (*slots*) [1]. Essa flexibilidade permite a transmissão de taxas de transmissão de bit mais elevadas, como 400 Gbps e 1 Tbps, que, com modulação padrão, não poderiam ser estabelecidas em longas distâncias com a tecnologia de multiplexação por comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), dado o espaçamento rígido da grade [2].

A verificação do estabelecimento das chamadas em EONs é realizada por meio da utilização dos algoritmos de roteamento e de alocação espectral (RSA – *Routing and Spectrum Assignment*), que consistem em determinar a rota e um conjunto de *slots* para o estabelecimento do caminho óptico (*lightpath*),

o qual é responsável por encaminhar o tráfego entre o nó origem e destino. Da mesma forma que nas redes WDM sem conversão de comprimento de onda, em que o comprimento de onda precisa ser o mesmo em todo o *lightpath*, EONs apresentam restrição de continuidade (*continuity constraint*), que exige o mesmo conjunto de *slots* em todos os enlaces da rota. Além desta, redes ópticas elásticas possuem a restrição de contiguidade dos *slots* (*contiguity constraint*), que requer a alocação de *slots* contíguos [2]. Um cenário de tráfego dinâmico juntamente com uma demanda de tráfego heterogênea e tais restrições presentes nas EONs causam a fragmentação espectral (SF – *Spectral Fragmentation*), que acarreta no surgimento de *slots* livres isolados, i.e. não contíguos, ou não alinhados, no espectro da frequência ao longo da rota (fragmentos) [3]. Devido a essas características, esses *slots* dificilmente serão utilizados para alocação, resultando em um aproveitamento espectral ineficiente e, conseqüentemente, em um aumento na probabilidade de bloqueio de chamadas. Essas duas restrições combinadas dificultam o estabelecimento das chamadas. Uma das propostas mais recentes da literatura para mitigar o efeito da fragmentação é a multiplexação óptica inversa (OIM – *Optical Inverse Multiplexing*) [4]. OIM utiliza a técnica de múltiplas transmissões (*multicasting*) de supercanal para a criação de cópias do sinal de interesse, de comutadores ópticos e, também, de WSS's de largura de banda variável (BV-WSS – *Bandwidth Variable Wavelength Selective Switching*), para seleção das sub-bandas que irão compor o sinal, com o objetivo de alocar a requisição nos fragmentos presentes na rede [5].

Neste trabalho, propõe-se uma heurística para distribuição de módulos de *multicasting* de supercanal em redes ópticas elásticas. O objetivo é determinar uma relação eficiente de concentração de módulos que possa ser usada para distribuir esses módulos entre os nós da rede. A proposta é baseada no conjunto de rotas escolhidas pela estratégia de roteamento usada no processo de RSA, sendo usada para quantificar a importância de cada nó da rede para a redução de SF com o processo de OIM. Está organizado da seguinte forma: a técnica OIM e a arquitetura do nó utilizada são apresentadas na Seção II. Na Seção III, a heurística proposta é descrita em detalhes. A Seção IV apresenta as topologias e os parâmetros utilizados nas simulações. Na Seção V, os resultados obtidos são avaliados e, na Seção VI, as conclusões são descritas.

II. DESFRAGMENTAÇÃO ESPECTRAL UTILIZANDO A TÉCNICA DE MULTIPLEXAÇÃO ÓPTICA INVERSA

A técnica de multiplexação óptica inversa, baseada em *multicasting* de supercanal, geralmente utiliza o efeito não-linear da mistura de quatro ondas (FWM – *Four Wave Mixing*)

Bruno V. A. Correia, Raul C. Almeida Jr., Grupo de Fotônica, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, Email: ralmeida.ufpe@gmail.com. Helder A. Pereira, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil.

aplicado ao sinal (supercanal) por meio de K lasers de bombeio co-polarizados em uma fibra com alto índice de não-linearidade (HNLf – *Highly Nonlinear Fiber*), que garante a geração de múltiplas cópias desse supercanal [4]–[7]. A OIM pode ser trivialmente utilizada para *multicasting*, conforme proposto em Zhu et al. [8], pois as cópias geradas podem ser enviadas a diferentes saídas do nó através de um processo de filtragem e comutação. Por outro lado, fatias tanto do sinal original quanto das cópias criadas podem ser adequadamente extraídas de modo a formar um sinal óptico com a mesma quantidade de sub-bandas do sinal original, porém apresentando uma separação entre elas ao longo do espectro [4]. Essas fatias individuais extraídas do sinal original, ou das cópias geradas, são referidas neste trabalho como sub-bandas.

Neste artigo, não se considera transmissão *multicasting* do sinal óptico e sim *unicasting*, pois o sinal óptico é transmitido de um nó para apenas outro nó. Como a técnica de geração de múltiplas cópias de um sinal é frequentemente referida como *multicasting* de supercanal [4], esse termo será usado ao longo do artigo para classificar o processo de criação de réplicas de múltiplas sub-bandas de um sinal, pertencente ao processo de multiplexação óptica inversa. Neste trabalho, o módulo composto por fibras HNLf e K lasers de bombeio co-polarizados recebe o nome de módulo MS (*multicasting* de supercanal). O número de cópias criadas nesses módulos está relacionado com o número de lasers de bombeio, que compõem o módulo, da seguinte forma [6]:

$$C = \binom{K}{2} \cdot 2 = K(K-1), \quad (1)$$

em que C é o número de cópias e K o número de lasers de bombeio. Normalmente, dois ou três lasers são utilizados, podendo gerar duas ou seis cópias, respectivamente, do sinal original, conforme ilustrado na Figura 1 para um módulo MS com dois lasers [6]. A posição de cada cópia do sinal é dada por [8]:

$$f_{R_i} = f_s + f_{P_j} - f_{P_k}, \quad (2)$$

em que f_{R_i} é a frequência central da i -ésima cópia, com $i = 1, \dots, C$; f_s é a frequência central do supercanal original; f_{P_j} é a frequência do j -ésimo laser, com $j = 1, \dots, K$; f_{P_k} é a frequência do k -ésimo laser com $k = 1, \dots, K$ e $j \neq k$. No exemplo da Figura 1 foram utilizados lasers em $f_{P_1} = 192,125$ THz e $f_{P_2} = 192,175$ THz combinados com um sinal de frequência central $f_s = 192,40$ THz para gerar a distribuição das sub-bandas, com cópias em $f_{R_1} = 192,35$ THz e $f_{R_2} = 192,45$ THz. Como também é permitido escolher sub-bandas do sinal original, o módulo MS pode realizar um *multicasting* de supercanal de 1:3 (um para três) ou 1:7 (um para sete) quando dois ou três lasers, respectivamente, são aplicados nesse módulo [6].

Em uma rede óptica, os módulos poderão ser empregados em alguns nós de forma que, com o ajuste das frequências dos lasers de bombeio em um módulo MS, presente em algum nó intermediário da rota, as sub-bandas contíguas do tráfego entre o nó origem e um nó intermediário poderão ser separadas em diferentes conjuntos de sub-bandas e alocadas nos fragmentos presentes nos enlaces restantes dessa rota [4], [5]. Essa abordagem, portanto, é capaz de contornar certas indisponibilidades

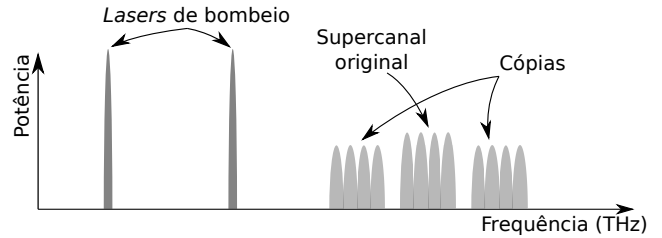


Fig. 1: Disposição no domínio da frequência dos lasers de bombeio, do supercanal e de suas cópias.

no espectro da frequência ao separar os *slots* contíguas da demanda e encaixá-los em múltiplos fragmentos, aplicando a descontiguidade de *slots*. Por conseguinte, essa técnica pode aliviar as restrições de continuidade e contiguidade da rede.

O uso de módulos MS, contudo, impõe algumas restrições. A principal delas é a que limita o uso de OIM a apenas uma vez em todo o *lighpath*, devido às penalidades do *multicasting* de supercanal e da filtragem [5]. As outras restrições estão relacionadas com: (a) as posições das cópias, que devem atender a Equação (2) e (b) o número de cópias úteis produzidas na largura de banda dos enlaces (i.e., que podem ser efetivamente utilizadas) depende da largura de banda do sinal, das posições dos lasers e do número de *slots* da rede [4].

Fig. 2 ilustra a arquitetura do nó com capacidade de compartilhamento dos módulos MS utilizada neste trabalho. A arquitetura é baseada na proposta de Zhu et al. [7], sendo composta por N WSSs $1 \times (N + M)$ (nas entradas) e N acopladores ópticos (OC – *Optical Couplers*) (nas saídas). A arquitetura também é composta por um comutador óptico responsável por direcionar o sinal de entrada a um dos M módulos MS, K lasers de bombeio para cada módulo e um WSS $M \times N$ responsável por selecionar as sub-bandas e direcioná-las para as respectivas saídas. Com essa estrutura, os módulos de *multicasting* de supercanal são compartilhados entre todos os enlaces conectados a esse nó.

III. HEURÍSTICA PROPOSTA PARA ALOCAÇÃO DE MÓDULOS DE *Multicasting* DE SUPERCANAL

Em uma topologia não regular, é comum que alguns nós recebam uma maior quantidade de tráfego e exijam ainda mais recursos para se otimizar alguma métrica da rede. Como não há razão para uso de OIM no nó destino da chamada e não se considera a possibilidade de uso dessa técnica no nó origem, espera-se que nós mais frequentes como nós intermediários, considerando o conjunto de rotas obtidas no processo de roteamento, devam receber uma maior quantidade de módulos MS. Entretanto, na fase de planejamento da rede (*offline*), como escolher uma distribuição desses módulos entre os nós não é uma tarefa trivial. Isto se dá devido a rotas com maiores quantidades de nós terem uma chance maior de não apresentar um conjunto de *slots* disponíveis fim-a-fim (não atender às restrições de continuidade e/ou contiguidade). No entanto, por serem formadas por mais nós intermediários, essas rotas possuem mais opções de se aplicar a técnica quando comparadas com rotas menores. Uma distribuição uniforme dos módulos não pode contemplar esses aspectos e, conseqüentemente, não

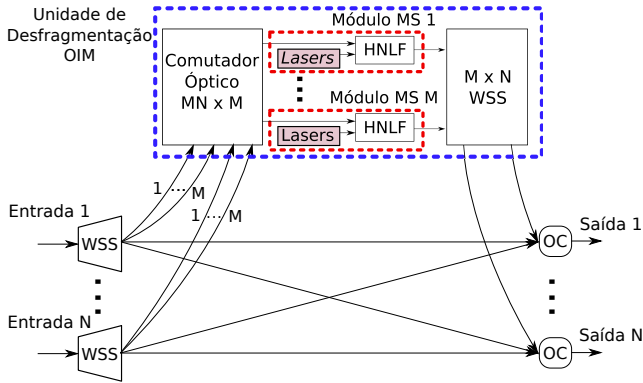


Fig. 2: Arquitetura de um nó com capacidade de OIM compartilhada entre os enlaces a ele conectados.

deve fornecer um uso eficiente dos módulos durante a fase de operação da rede (*online*). Consequentemente, outra técnica deve ser usada para contribuir na redução da probabilidade de bloqueio de chamadas. A contribuição deste artigo é propor uma heurística que encontra uma forma adequada de concentrar os módulos nos nós com maiores frequências de uso como nós intermediários das rotas, com o objetivo de fornecer utilizações mais eficientes dos módulos MS.

Como comumente assumido nas estratégias de planejamento de redes que tentam simplificar o processo de roteamento [9], um procedimento de roteamento fixo de menor caminho é usado neste trabalho. Portanto, a frequência de uso dos nós deve ser calculada de maneira *offline* a partir do conjunto de rotas selecionadas pelo algoritmo de roteamento e uma taxa de concentração de módulos MS deve ser definida para auxiliar a instalação desses módulos entre os nós da rede. A primeira entrada para a estratégia de alocação dos módulos é o conjunto de rotas, para todos os pares de nós, obtido pelo algoritmo de roteamento. Como a ideia é definir como os módulos devem ser distribuídos entre os nós, a estratégia de alocação de módulos tem como objetivo encontrar uma taxa de concentração eficiente por nó (M_i ; $i = 1, 2, \dots, D$), em que D representa o número de nós da rede. O fluxograma da heurística proposta é apresentado no Algoritmo 1.

A primeira parte do Algoritmo 1, entre as linhas 5 e 8, consiste em inicializar todos os elementos do vetor de distribuição de módulos MS nos nós (A) com 0 e cada elemento do vetor de utilização (U) com o número total de vezes que o respectivo nó aparece como intermediário no conjunto de rotas entre todos os pares de nós. Depois disso, a variável L recebe o valor do maior elemento do vetor U , que consiste na quantidade do nó que foi mais vezes nó intermediário, que será usado como uma constante durante o restante da simulação. Entre as linhas 10 e 14, executa-se a política de distribuição dos módulos, que consiste em atribuir um módulo a cada iteração. Primeiro, o índice do elemento de maior valor no vetor U é selecionado. Então, o módulo é atribuído a esse nó e o valor de sua frequência de uso é atualizado de acordo com uma fração α de L . O processo continua até que todos os módulos tenham sido distribuídos entre os nós da rede.

Para determinar o valor ótimo de α para um determinado número de módulos, várias distribuições de módulos serão

Algoritmo 1 Distribuição dos módulos MS baseada na frequência de uso dos nós como nó intermediário.

Entrada: Conjunto de rotas responsável por conectar todos os pares de nós da rede, conforme fornecido pelo algoritmo de roteamento;

Entrada: T {Número total de módulos MS};

Saída: $M = (M_1, M_2, \dots, M_D)$ {Melhor distribuição de módulos};

1: $U = (U_1, U_2, \dots, U_D)$; { U é o vetor de frequência dos nós como nó intermediário e D é o número de nós na rede};

2: $A = (A_1, A_2, \dots, A_D)$ {Distribuição de módulos auxiliar};

3: $P_{B_{best}} \leftarrow 1$;

4: **para** $\alpha = 0.01$ até 0.99 **faça**

5: **para** $i = 1$ até D **faça** {Valores iniciais para U e A }

6: $A_i \leftarrow 0$;

7: $U_i \leftarrow$ número de vezes que o i -ésimo nó foi um nó intermediário no conjunto de todas as rotas da rede;

8: **fim para**

9: $L \leftarrow$ maior valor do vetor U ;

10: **enquanto** $\sum_{i=1}^D A_i < T$ **faça**

11: $i \leftarrow$ índice do nó que apresenta o maior valor no vetor U ;

12: $A_i \leftarrow A_i + 1$; {Atribuição de um módulo MS no i -ésimo nó}

13: $U_i \leftarrow U_i - \alpha \cdot L$; {Atualiza o vetor U }

14: **fim enquanto**

15: $P_{B_{aux}} \leftarrow$ probabilidade de bloqueio de chamada para valor de carga médio com distribuição de módulos A ;

16: **se** $P_{B_{aux}} < P_{B_{best}}$ **então**

17: $P_{B_{best}} \leftarrow P_{B_{aux}}$;

18: $M \leftarrow A$;

19: **fim se**

20: **fim para**

avaliadas a partir de diferentes valores de α , representado no laço (*loop*) da linha 4. Após a distribuição para um α , a probabilidade de bloqueio de chamadas (P_B) é obtida e, se o seu valor for menor que a menor P_B obtida até o momento, o seu valor juntamente com a melhor distribuição são armazenados. Para assegurar um ajuste fino do α e consequentemente uma distribuição eficiente, varia-se α entre 0,01 e 0,99 com passo de 0,01. Quanto mais próximo de 0 for o valor de α , maior a concentração dos módulos entre os nós com maiores frequências. Por outro lado, quanto mais próximo de 1 o valor de α estiver, mais a distribuição se aproximará do tipo uniforme. Percebe-se que a utilização de um passo de α pequeno permite a verificação de várias distribuições de módulos.

IV. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

As topologias NSFNet [10], composta por 14 nós e 42 enlaces, e Alemã [11], composta por 17 nós e 52 enlaces, foram utilizadas nas simulações. Foram considerados os seguintes parâmetros: (a) 128 *slots* por enlace e (b) 10^8 requisições simuladas para cada valor de carga da rede. Foi considerado tráfego dinâmico e que, tanto a requisição de chamadas para

seleção dos nós fonte-destino quanto as requisições, entre 2 e 5 slots, seguiram uma distribuição uniforme. O algoritmo de roteamento utilizado foi o de menor caminho com métrica de custo de enlace (*hop*), enquanto o de alocação espectral utilizado foi o de primeiro preenchimento (FF – *First Fit*).

Na saída do módulo MS, após a geração das cópias do sinal, é possível escolher entre diversas combinações de slots para o segundo segmento da rota (i.e., a parte da conexão partindo do nó intermediário, onde o OIM foi implementado, até o nó destino). A seleção das sub-bandas também é baseada no FF, portanto os slots com menores índices são os escolhidos. A frequência dos lasers de bombeio são inicializadas com valores tais que a distância entre o sinal original e sua cópia mais próxima fique o mais distante possível. Se nenhuma das possíveis combinações de sub-bandas puderem ser usadas para o estabelecimento da chamada, a distância entre as cópias é decrementada em um slot, as frequências dos lasers são recalculadas e se faz uma nova tentativa de alocação. A distância mínima entre o supercanal central e sua cópia mais próxima é de 1 slot, conforme especificado em [8]. Finalmente, o algoritmo pode utilizar a técnica de OIM em qualquer nó intermediário ao longo da rota, seguindo uma sequência de nós sorteada aleatoriamente. Os módulos aplicam um *multicasting* de supercanal (1:3), ou seja, 2 lasers por módulo MS, a mesma quantidade assumida em [5].

V. RESULTADOS

Conforme descrito na Seção III, a heurística proposta neste artigo é baseada em várias simulações para diferentes valores de α . Com o cálculo da probabilidade de bloqueio para cada simulação, é possível obter um valor ótimo de α para uma quantidade de módulos específica. As simulações foram realizadas considerando um determinado valor de carga da rede (250 Erlangs para a NSFNet e 162 Erlangs para a Alemã). Para cada uma das topologias, foram escolhidas quantidades de módulos múltiplos da quantidade de nós da rede, com o objetivo de comparar a heurística proposta com a política de distribuição uniforme dos módulos, equivalentes a 1, 2, 3 e 5 módulos por nó. O valor de α obtido para a respectiva carga foi aplicado nas simulações para múltiplas cargas, com o objetivo de confirmar a eficiência da distribuição em distintas condições de tráfego na rede. Portanto, o processo de obtenção do valor ótimo de α é realizado apenas uma vez. Esse valor obtido ficou mais próximo de 0 do que de 1 para ambas as topologias, confirmando que a distribuição uniforme não apresenta o melhor arranjo dos módulos. Finalmente, à medida em que o número de módulos aumenta, o valor ótimo de α diminui, mostrando que o algoritmo pode distribuir apropriadamente os módulos MS entre os nós da rede de acordo com o número total de módulos. Os melhores valores de α obtidos para cada quantidade de módulos específica e suas respectivas distribuições entre os nós estão descritos na Tabela I (Tabela II) para a topologia NSFNet (Alemã), respectivamente.

Fig. 3 (Fig. 4) ilustra a probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga para a topologia NSFNet (Alemã) considerando a simulação com: (1) Nenhum módulo; Distribuição uniforme com: (2) 14 módulos (17 módulos); (3) 28

TABELA I: Valores ótimos de α 's e suas respectivas distribuições de módulos para a topologia NSFNet.

Total	α	Distribuição (Nó 1 ao Nó 14)
14	0,25	1-0-1-2-1-3-0-2-2-0-1-1-0-0
28	0,13	2-1-2-4-3-6-0-3-4-0-2-1-0-0
42	0,08	2-2-2-6-4-10-0-5-7-0-2-2-0-0
70	0,06	4-3-4-10-7-14-0-8-10-0-4-4-2-0

TABELA II: Valores ótimos de α 's e suas respectivas distribuições de módulos para a topologia Alemã.

Total	α	Distribuição (Nó 1 ao Nó 17)
17	0,11	0-0-1-2-0-0-0-4-0-1-4-5-0-0-0-0-0
34	0,09	0-0-3-5-0-0-0-7-0-3-7-8-0-0-1-0-0
51	0,07	0-0-5-7-0-0-0-10-0-5-10-11-0-0-3-0-0
85	0,05	0-0-9-11-0-0-0-16-0-8-16-17-2-0-6-0-0

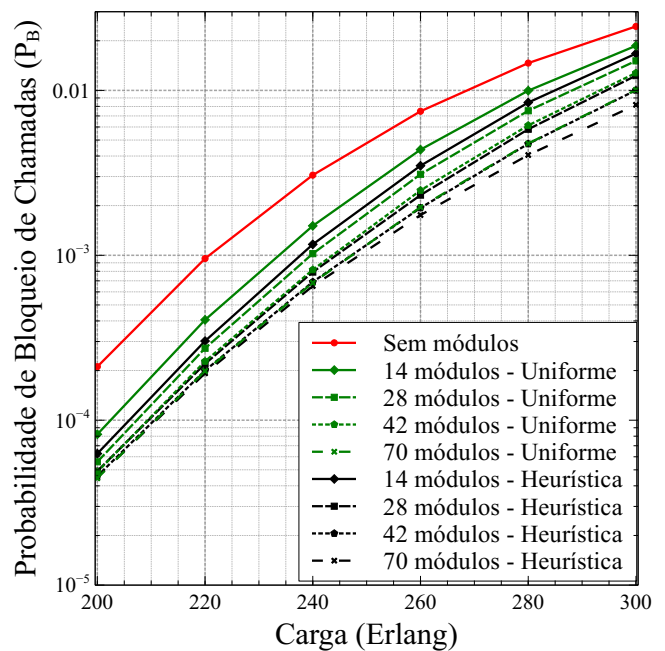


Fig. 3: Probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga para a topologia NSFNet considerando simulações com: (1) Nenhum módulo. Distribuição uniforme com: (2) 14 módulos; (3) 28 módulos; (4) 42 módulos; (5) 70 módulos. Heurística com: (6) 14 módulos; (7) 28 módulos; (8) 42 módulos; (9) 70 módulos.

módulos (34 módulos); (4) 42 módulos (51 módulos); (5) 70 módulos (85 módulos). Heurística (melhores valores de α) com: (6) 14 módulos (17 módulos); (7) 28 módulos (34 módulos); (8) 42 módulos (51 módulos); (9) 70 módulos (85 módulos). Pode-se observar que, quanto menor a quantidade de módulos, maior é a importância do uso da heurística proposta, pois o ganho na redução da probabilidade de bloqueio de chamadas é maior. Em contrapartida, quando um número de módulos maior é utilizado, a importância da heurística proposta ainda é observada para valores de carga mais elevados.

Com o objetivo de quantificar a redução na probabilidade de bloqueio de chamadas, foi considerado inicialmente o menor valor de carga submetido a cada topologia. Nesse ponto, o ganho de probabilidade de bloqueio de chamadas foi de 25% para a topologia NSFNet, com um total de 14

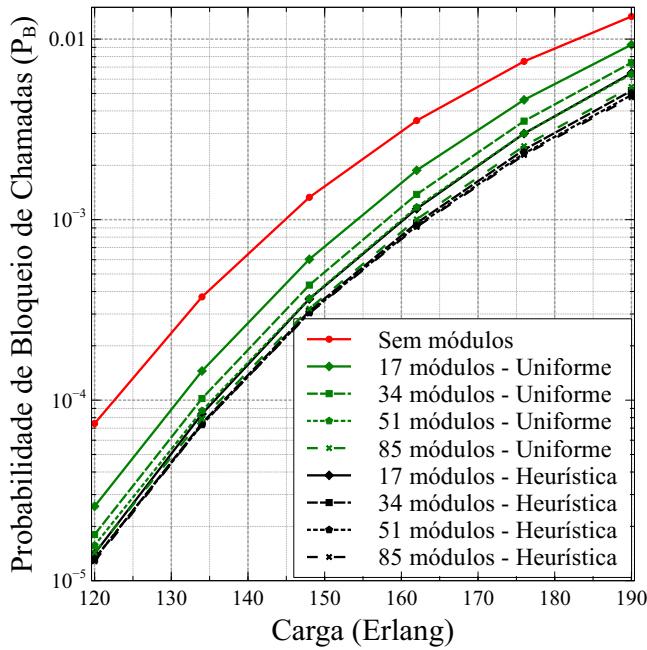


Fig. 4: Probabilidade de bloqueio de chamadas em função da carga para a topologia alemã considerando simulações com: (1) Nenhum módulo. Distribuição uniforme com: (2) 17 módulos; (3) 34 módulos; (4) 51 módulos; (5) 85 módulos. Heurística com: (6) 17 módulos; (7) 34 módulos; (8) 51 módulos; (9) 85 módulos.

módulos MS, e 46 % para a topologia Alemã, com um total de 17 módulos MS. Valores esses bem expressivos, dado que nenhuma despesa de capital (Capex – *Capital Expenditure*) adicional foi empregada. Adicionalmente, em uma perspectiva operacional, a limitação do número de nós capazes de realizar OIM permitirá uma supervisão mais eficiente dos módulos instalados, o que reduz custos operacionais (Opex – *Operational Expenditure*) adicionais, como discutido por Maroua et al. [12] para uso de regeneradores. Percebe-se, pelos resultados descritos na Tabela I e na Tabela II, que a proposta deste trabalho também pode superar a distribuição uniforme em termos da expectativa do operador da rede em reduzir o custo operacional. Por fim, para condições de carga mais elevadas, foram obtidos ganhos de 20 % e 23 % para as simulações com 28 e 42 módulos MS na topologia NSFNet, e 33 % e 30 % para as simulações com 34 e 51 módulos MS na topologia Alemã.

Ainda é possível acrescentar que, conforme visto na Figura 3, ocorre um empate entre a curva da distribuição uniforme com 42 módulos e a curva da heurística com 28 módulos, apresentando assim uma redução de mais de 33% em CAPEX. Nessa mesma figura, também há um empate entre as curvas da distribuição uniforme com 70 módulos e da heurística com 42 módulos MS, resultando em uma redução de CAPEX de 40%. Já para a Figura 4, ocorre empate entre as curvas da distribuição uniforme com 51 módulos MS e a heurística com 17 módulos, resultando em uma redução de mais de 66% em CAPEX.

VI. CONCLUSÕES

Esse trabalho propôs uma heurística de alocação de módulos de *multicasting* de supercanal em redes ópticas elásticas com capacidade de desfragmentação espectral. Avaliando a probabilidade de bloqueio de chamadas da rede, foram observadas reduções significativas quando a heurística proposta foi utilizada ao invés de uma distribuição uniforme dos módulos. Reduções na probabilidade de bloqueio de chamadas próximas a 46 % foram obtidas para a topologia Alemã e próximas a 25 % para a topologia NSFNet. Tais resultados mostraram que a heurística proposta examina através de alguns testes como melhor distribuir os módulos MS entre os nós de acordo com a utilização deles como nó intermediário. Foi verificado também o quanto é importante a instalação de um módulo MS em um nó intermediário, apresentando uma boa maneira de distribuir esse tipo de dispositivo entre os nós. Como trabalhos futuros, pode-se investigar uma metodologia para determinar a distribuição de quantidades de módulos (valor de α) não testadas, à partir de pontos previamente simulados.

REFERÊNCIAS

- [1] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. J. B. Yoo, "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?" *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. 12–20, 2012.
- [2] 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 Communications Magazine*, vol. 47, no. 11, pp. 66–73, 2009.
- [3] B. C. Chatterjee, S. Ba, and E. Oki, "Fragmentation Problems and Management Approaches in Elastic Optical Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, no. c, pp. 1–1, 2017.
- [4] B. Guo, Y. Xu, P. Zhu, Y. Zhong, Y. Chen, J. Li, Z. Chen, and Y. He, "Multicasting based optical inverse multiplexing in elastic optical network," *Optics Express*, vol. 22, no. 12, pp. 15 133–42, Junho 2014.
- [5] Y. Xu, J. Li, P. Zhu, B. Guo, Y. Chen, Y. Zhong, Y. Wang, Z. Chen, and Y. He, "Demonstration of All-optical Inverse Multiplexing in Elastic Optical Networks," in *Optical Fiber Communication Conference*. OSA, 2014, pp. 1–3.
- [6] Y. Chen, J. Li, P. Zhu, B. Guo, L. Zhu, Y. He, and Z. Chen, "Experimental demonstration of 400 Gb/s optical PDM-OFDM superchannel multicasting by multiple-pump FWM in HNLF," *Optics Express*, vol. 21, no. 8, pp. 9915–9922, Abril 2013.
- [7] P. Zhu, J. Li, D. Wu, Z. Wu, Y. Tian, Y. Chen, D. Ge, X. Chen, Z. Chen, and Y. He, "Demonstration of Elastic Optical Network Node with Defragmentation Functionality and SDN Control," *Optical Fiber Communication Conference*, pp. 3–5, 2016.
- [8] P. Zhu, J. Li, Y. Chen, X. Chen, Z. Wu, D. Ge, Z. Chen, and Y. He, "Experimental demonstration of EON node supporting reconfigurable optical superchannel multicasting," *Optics Express*, vol. 23, no. 16, pp. 20 495–20 504, 2015.
- [9] G. M. Durães, A. Soares, J. R. Amazonas, and W. Giozza, "The Choice of the Best Among the Shortest Routes in Transparent Optical Networks," *Computer Networks*, vol. 54, no. 14, pp. 2400–2409, Outubro 2010.
- [10] C. J. N. de Lira, R. C. Almeida, and J. F. Martins-Filho, "On combining split spectrum technique with a slot-continuity capacity loss heuristic in elastic optical networks," in *International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, Junho 2017, pp. 1–6.
- [11] C. T. Politi, H. Haunstein, D. A. Schupke, S. Duhovnikov, G. Lehmann, A. Stavdas, M. Gunkel, J. Martensson, and A. Lord, "Integrated design and operation of a transparent optical network: a systematic approach to include physical layer awareness and cost function [topics in optical communications]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 2, pp. 40–47, Fevereiro 2007.
- [12] M. Bakri, M. Koubàa, and A. Bouallègue, "On the optimization of capex and opex for the design of island-based translucent optical backbone networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 13, pp. 1–16, 2014.