

Redução da Perda de Capacidade em Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação Espacial

Paulo F. de Souza Filho, Raul C. Almeida Jr

Resumo— Com o aumento das demandas de aplicações, um dos grandes desafios das Redes Ópticas Elásticas é dar suporte a essa crescente demanda de tráfego. Neste contexto, Fibras Multi-Núcleo (MCF, do inglês *Multi Core Fiber*) surgem como uma alternativa para o aumento da capacidade das Redes Ópticas Elásticas. Dada a inclusão da dimensão espacial para a alocação das requisições, algoritmos de roteamento e atribuição de espectro tornam-se mais complexos. Este trabalho propõe uma adaptação da Heurística de atribuição de espectro MSCL para redes elásticas MCF com o intuito de escolher um conjunto de *slots* e um núcleo de forma a reduzir a perda de capacidade de futuras alocações na rede. Os resultados mostram que, para cada requisição que chega à rede, é possível escolher um núcleo e um conjunto de *slots* dentro do núcleo de forma a diminuir a perda de capacidade da rede e portanto reduzir a probabilidade de bloqueio em relação à atribuição de espectro baseada no *First-Fit* convencional.

Palavras-Chave— Redes Ópticas Elásticas; Multiplexação por Divisão Espacial; Roteamento e Atribuição de Núcleo e Espectro.

Abstract— Given the increase in application demands, one of the biggest challenges of Elastic Optical Networks is to support such growing traffic demands. In this context, Multi-Core Fibers arise as an alternative to increase the network capacity of Elastic Optical Networks. Since there appears the spatial dimension for request assignment, routing and spectrum assignment algorithms become more complex. This paper proposes an adaptation of the MSCL spectrum assignment heuristic for MCF elastic networks in order to choose a set of slots and a core to obtain the least loss of capacity of the network. The results show that for each request arriving at the network, it is possible to choose a set of slots within a core in order to reduce the loss of network capacity and therefore reduce the blocking probability in relation to the spectrum assignment based on conventional First-Fit.

Keywords— Elastic Optical Networks; Space Division Multiplexing; Routing, Spectrum and Core Assignment.

I. INTRODUÇÃO

Grandes avanços nas áreas da informação e comunicação têm provocado considerável aumento na quantidade de banda das requisições em redes ópticas. Um dos maiores desafios dos operadores de tais redes é aumentar sua capacidade e/ou explorar de maneira eficiente os recursos disponíveis. A flexibilização introduzida com as Redes Ópticas Elásticas (EON, do inglês *Elastic Optical Networks*) propiciou uma maneira mais eficiente de tratar os recursos disponíveis [1] [2] quando comparada à rigidez da grade fixa das Redes com Roteamento de Comprimento de Onda baseadas em WDM.

Paulo F. de Souza Filho, Raul C. Almeida Jr. Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil, E-mails: paulofernandof@hotmail.com, raul.almeidajunior@ufpe.br.

Apesar da grande melhoria do uso de banda com o advento das EONs, o tráfego continua aumentando e outras maneiras de aumentar a capacidade das fibras vêm sendo estudadas. Nesse contexto, a multiplexação por divisão espacial (SDM, do inglês *Space Division Multiplexing*) [3] ganha cada vez mais espaço com os conceitos de Fibras Multi-Núcleo (MCF, do inglês *Multi-Core Fibers*) e Fibras Multi-Modo (MMF, do inglês *Multi-Mode Fiber*). Alguns estudos já analisaram o potencial das MMF [4] e MCF [10], assim como aspectos físicos e problemas de interferência (*Crosstalk*) entre núcleos e modos [5] [6] [7] [8]. Uma alternativa para o aumento da capacidade de transmissão para as atuais estruturas das redes é a adição de múltiplas fibras com único modo ou núcleo (SMF, do inglês *Single Mode Fibers*). Essa estratégia pode ser eficiente em curto prazo, mas em [9] foi mostrado que estruturas baseadas em MCF são mais eficientes energeticamente quando comparadas com estruturas baseadas em SMF. Portanto, estruturas baseadas em MCF ganham cada vez mais espaço e se mostram como alternativas para suprir a crescente demanda por capacidade nas redes ópticas.

No contexto das EONs, uma importante questão é a resolução do problema de roteamento e alocação de espectro (RSA, do inglês *Routing and Spectrum Assignment*), que consiste em alocar *slots* fim-a-fim de forma contígua (i.e., consecutivos) e contínua (i.e., de mesmos índices em todos os enlaces percorridos pela conexão) para cada requisição. Quando se trata de MCF, o problema de RSA se torna um pouco mais complexo, pois agora deve-se escolher, para cada requisição, um núcleo de modo que os recursos sejam utilizados da maneira mais eficiente possível. Portanto, o novo problema é de: roteamento e atribuição de núcleo e espectro (RSCA, do inglês *Routing, Spectrum and Core Assignment*) [10] [11] [12].

Em redes ópticas, a restrição imposta de continuidade do espectro surge em decorrência dos elevados custos associados com a conversão do espectro. Um problema similar surge nas redes MCF, visto que, num nó comutador, a arquitetura pode permitir ou não o estabelecimento da conexão entre núcleos distintos da fibra de entrada e saída do nó comutador. Caso a conversão de núcleo seja permitida, durante o processo de RSCA, deve-se decidir a que núcleo de uma determinada fibra de saída deve-se comutar o sinal óptico de uma fibra/núcleo de entrada. Em [13], um estudo comparativo do custo-benefício entre arquiteturas que permitem ou não a troca de núcleo entre as fibras de entrada e saída do nó foi realizado, a interferência entre núcleos foi considerada, e mostrou-se que as penalidades obtidas para as duas arquiteturas são similares. Em [10], um estudo comparativo entre as arquiteturas com e sem troca de

núcleos e com rotas alternativas em termos de probabilidade de bloqueio, para redes MCF, foi realizado. Como esperado, mais rotas alternativas provocam uma melhoria no desempenho da rede. Com tudo, constatou-se que a troca de núcleo não provoca uma melhoria significativa no desempenho da rede quando comparada à estrutura que não permite a troca de núcleos. Isso justifica o uso da arquitetura que não realiza a troca de núcleo, visto que a arquitetura que permite a troca apresenta um custo maior para poucos benefícios. Neste trabalho, a arquitetura de nó assume que não há a troca de núcleo entre as fibras de entrada e saída do nó. Portanto, além da continuidade de espectro, a continuidade do índice do núcleo nos diversos enlaces da rota escolhida para a conexão deve ser respeitada.

Assim como nas redes EON para o problema de RSA, existem diversas formas de resolução do problema de RSCA nas redes MCF. Em [12], utilizou-se a ferramenta de programação linear inteira (ILP, do inglês *Integer Linear Programming*) para a modelagem e solução do problema de RSCA objetivando a diminuição do número de slots utilizados nos núcleos da rede. As heurísticas e meta heurísticas também são ferramentas bastante aplicadas na resolução do problema de RSCA, pois as soluções geradas são próximas à solução ótima e apresentam tempo computacional viável. Em [10] uma heurística é aplicada para a separação de áreas em redes MCF, em cada núcleo de cada link da rede, para diferentes tamanhos de requisições, comprovando que tal procedimento diminui a fragmentação espectral dos *links* e resulta em uma melhoria na probabilidade de bloqueio das requisições.

Quando se trata da camada de rede apenas, estruturas baseadas em WDM não apresentam diferença de desempenho quando se alteram as ordens em que os comprimentos de onda são alocados, pois esse tipo de arquitetura permite que apenas um único núcleo seja alocado por requisição. Já para as redes EON as ordens em que os *slots* são alocados podem causar grande impacto no desempenho da rede, pois agora cada requisição pode apresentar quantidades diferentes de *slots*. As possibilidades de alocação das requisições são ainda maiores quando se trata das redes MCF, pois a capacidade de cada link é multiplicada por \mathbf{C} (quantidade de núcleos por link) quando comparada com as redes EON. Em [14] foi apresentada a heurística MSCL (do inglês *Min Slot-Continuity Capacity Loss*), cujo objetivo é a escolha de um conjunto de *slots* para alocação de uma requisição de modo que a perda de capacidade da rede seja a menor possível, visando uma redução na probabilidade de bloqueio das requisições. A heurística proposta neste trabalho é uma adaptação da heurística MSCL das redes EON para redes com estrutura MCF, objetivando a redução da fragmentação espectral que resultará na redução da probabilidade de bloqueio das requisições.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção II, uma breve explicação do conceito da heurística MSCL é apresentada. Na Seção III, é explicada como foi realizada a adaptação da heurística MSCL para redes MCF. Na Seção IV, são apresentadas as simulações e a discussão dos resultados obtidos. Por fim, na Seção V, são apresentadas as exposições finais.

II. HEURÍSTICA MSCL

O MSCL é um algoritmo para alocação de espectro que busca escolher, para cada requisição, o conjunto de *slots* que causa o menor impacto possível em termos da perda de capacidade de alocação de futuras conexões na rede. Como proposto em [14], a alocação é feita considerando a perda de capacidade de requisições tanto na rota requisitada quanto nas rotas que compartilham pelo menos um *link* com a rota requisitada. Suponha que uma requisição R chegue à rede e seja escolhida uma rota r . Cada possibilidade de alocação de espectro na rota r resultará em uma diferente capacidade de alocação de futuras requisições. O cálculo realizado no MSCL da perda de capacidade da rede decorrente do estabelecimento de R é descrito como:

$$\mathbf{C}(\mathbf{n}) = \sum_{p \in I_r} \mathbf{S}^{<P>}(\psi, \mathbf{n}) - \mathbf{S}^{<P>}(\psi', \mathbf{n}), \quad (1)$$

Onde:

- $\mathbf{C}(\mathbf{n})$ é a perda de capacidade para requisições por n *slots* decorrente do estabelecimento de R ;
- I_r é o conjunto de rotas que interferem (i.e. possuem ao menos um link em comum) com a rota requisitada, r , sob análise;
- p é a atual rota interferente com r , que está sendo analisada;
- ψ representa o estado atual da rede (ou seja, o conjunto de todos os caminhos e respectivos slots alocados);
- ψ' representa o estado da rede após o estabelecimento de R ;
- $S^{<p>}(\psi, n)$ é o número total de possibilidades de alocação que uma requisição por n *slots* tem para alocar no caminho p antes do estabelecimento de R ;
- $S^{<p>}(\psi', n)$ é o número total de possibilidades de alocação que uma requisição por n *slots* terá para alocar no caminho p após o estabelecimento de R .

A equação 1 calcula o impacto que uma requisição R exerce sobre requisições futuras de \mathbf{n} *slots* em cada rota que possui ao menos um link em comum (i.e. interferente com a rota requisitada, r). A perda de capacidade total que o estabelecimento da requisição R provocará na rede é dada somando-se a perda de capacidade de cada possível futura requisição por n *slots*. Assim, pode-se descrever a perda de capacidade da rede como:

$$\mathbf{C} = \sum_{\mathbf{n} \in N} \mathbf{C}(\mathbf{n}), \quad (2)$$

sendo N o conjunto de todas as classes de requisições com diferentes pedidos de *slots*.

A requisição será alocada na posição espectral que gerar o menor valor em (2), cujo intuito é o de gerar o menor impacto possível na capacidade de atender futuras requisições na rota requisitada, r , e em todas as suas rotas interferentes. Na Figura 1, está apresentada uma aplicação da heurística MSCL. Considere que uma requisição R por k *slots* entre os nós 2 e 4 chegue à rede e a rota r_0 seja selecionada para atendê-la, sendo r_0 representada pelos nós 2 – 3 – 4. As rotas r_1 (nós: 1 – 2 – 3 – 7) e r_2 (nós: 6 – 3 – 4 – 5) são os

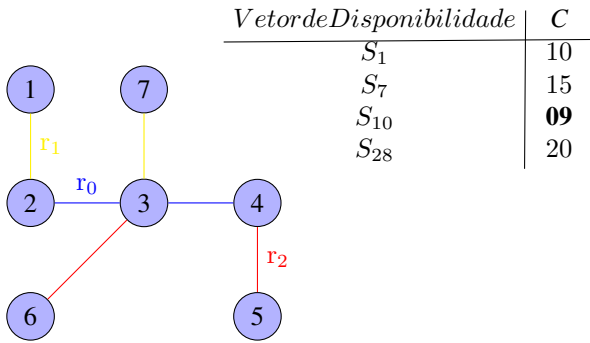


Fig. 1: Exemplo da heurística MSCL.

caminhos que possuem ao menos um link em comum com o caminho principal, ou seja, $I_{r_0} = \{r_1, r_2\}$. O vetor de disponibilidade da rota principal representa os conjuntos de *slots* que estão disponíveis para a alocação da requisição. Na tabela da Figura 1, s_i indica onde a requisição por k *slots* pode ser alocada a partir do *slot* de índice i , ou seja, usando os *slots* $i, i + 1, \dots, i + k - 1$. À direita de cada possibilidade de alocação, está descrita a perda de capacidade da rede, C , gerada por aquela alocação de *slots*. No exemplo proposto, a mínima perda de capacidade da rede, ilustrada em negrito, é dada pelo elemento S_{10} do vetor de disponibilidade. Portanto os k *slots* serão alocados a partir do *slot* de índice 10 na rota r_0 designada para atender a requisição R .

III. HEURÍSTICA PROPOSTA

A heurística proposta neste trabalho é uma adaptação do algoritmo MSCL para redes com estrutura MCF. A principal diferença está na quantidade de opções para a alocação de espectro das redes MCF. Considerando que N representa o número de núcleos da fibra, agora cada *link* aumentará em N vezes sua capacidade quando comparado com os links de redes SMF com uma única fibra. Neste trabalho, a troca de núcleos não foi adotada. Portanto, para que uma requisição seja alocada, é necessário que o conjunto de *slots* escolhido para atender a requisição esteja disponível no núcleo de mesmo índice em todos os links da rota principal [10] [15]. Para uma melhor descrição da política proposta, a Figura 2 apresenta o fluxograma do algoritmo proposto. Os passos para a aplicação do algoritmo proposto são os seguintes: à chegada de uma requisição, encontra-se a rota r (assumida aqui pré-definida pelo método de roteamento fixo) e todas as possibilidades de alocação de núcleo/*slots* nessa rota. Para cada combinação núcleo/*slots*, é realizado o cálculo da perda de capacidade de todas as rotas interferentes com r . A opção que gera a menor perda de capacidade é escolhida.

IV. RESULTADOS E ANÁLISES

As simulações foram realizadas num simulador ad-hoc estruturado para fibras multi núcleo baseado no simulador EON [14] [16] desenvolvido na UFPE. Efeitos da camada física não foram considerados. Três topologias diferentes foram simuladas, todas com links bidirecionais, conforme ilustram as Figuras 3, 4 e 5. Cada link possui sete núcleos

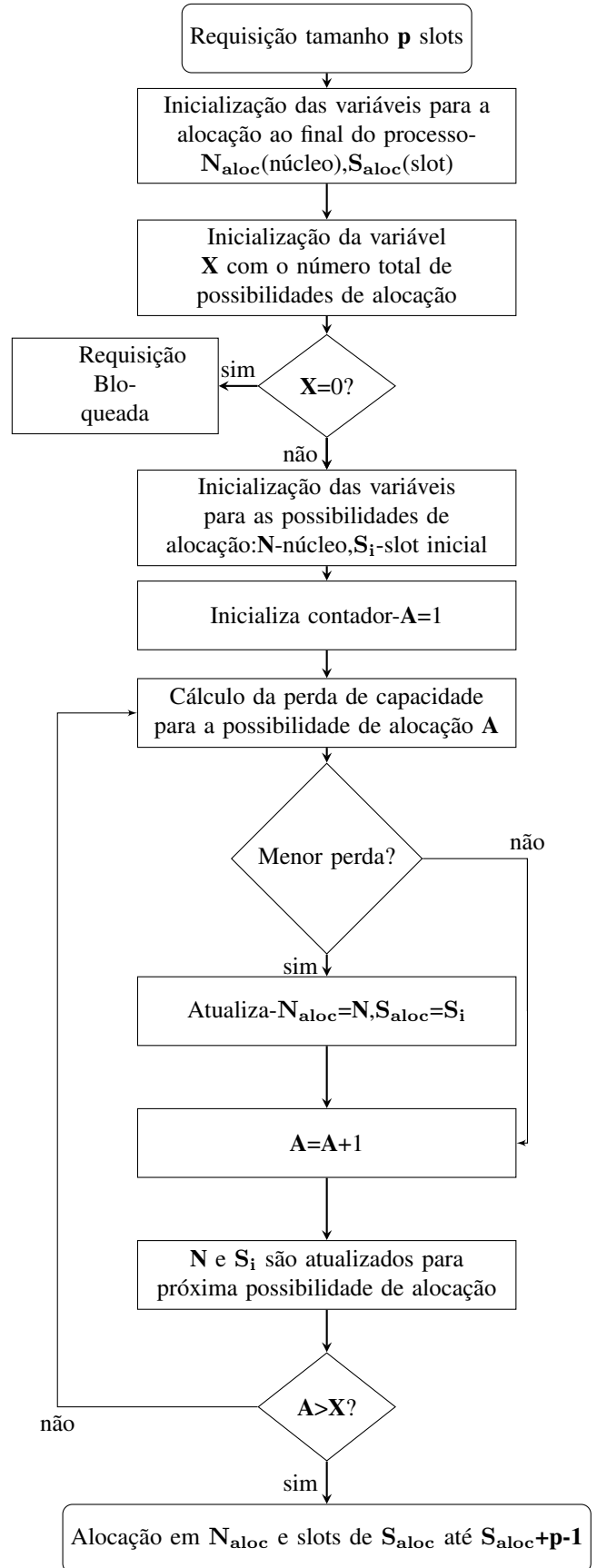


Fig. 2: Fluxograma MSCL para redes MCF.

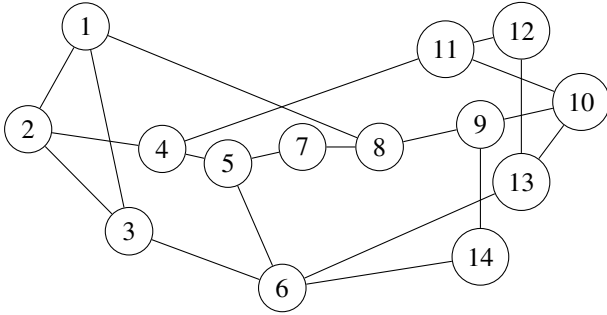


Fig. 3: Topologia NSFNET.

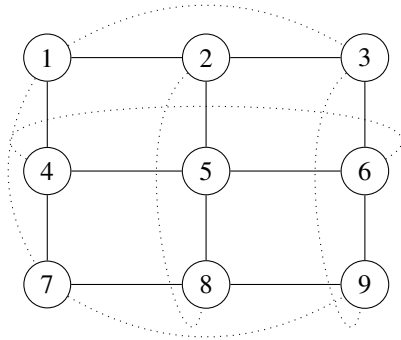


Fig. 4: Topologia Toroidal.

com 320 slots por núcleo, conforme adotado em [10]. Para a chegada de requisições, adotou-se o tráfego *Poissonian*, tempo de permanência com distribuição exponencial e requisições por larguras de banda uniformemente distribuídas entre 2, 3, 4 e 5 slots. Para o roteamento, foi escolhido o algoritmo de caminho mais curto por hops. Bloqueios acontecem quando um conjunto de slots requisitados não pode ser alocado de forma contígua em um núcleo com o mesmo índice em todos os enlaces da rota. Cada simulação foi realizada para 10^6 requisições.

Para critério de comparação, foi utilizada uma adaptação do algoritmo *First-Fit* para redes MCF. O algoritmo *First-Fit* é uma heurística bastante explorada nas redes WDM e EON. Isso decorre principalmente da sua simplicidade de implementação, baixo esforço computacional demandado na busca dos recursos espectrais livres e bons resultados devido à sua característica de compactação das requisições em determinada faixa do espectro, o que deixa capacidade livre fim-a-fim na rede para o atendimento de futuras requisições. O algoritmo *First-Fit* adaptado para este trabalho é chamado de *First-Fit-Core*(FFC) e começa a tentativa de alocação pelo núcleo de menor índice e, dentro do núcleo, busca-se o conjunto de slots disponível com o menor índice possível [11]. Nas Figuras 6, 7 e 8, estão apresentados os gráficos de probabilidade de bloqueio em função da carga do tráfego oferecido à rede para as topologias NSFNET, Japonesa e Toroidal, respectivamente. A melhoria do algoritmo proposto é consistente, pois em nenhum ponto de carga o resultado do algoritmo proposto é inferior ao do FFC. Para a topologia NSFNET, no ponto de carga de

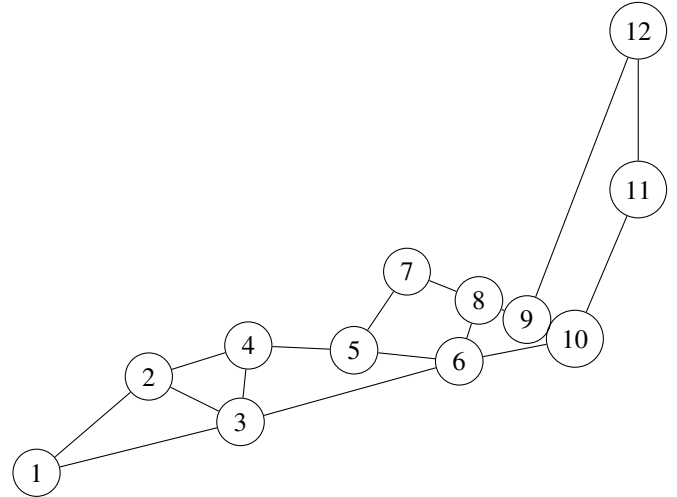


Fig. 5: Topologia Japonesa.

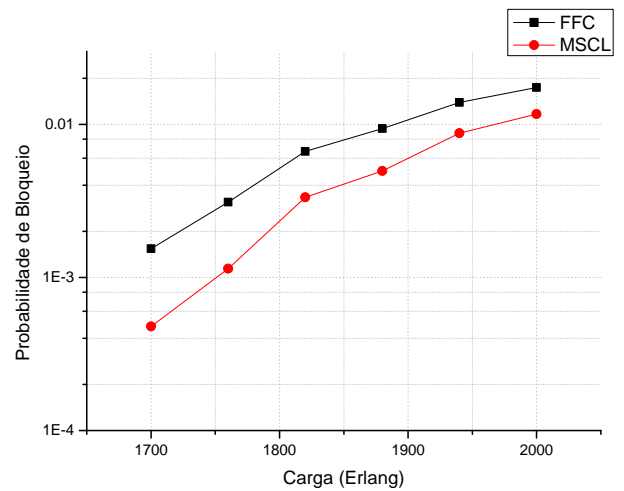


Fig. 6: Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core* e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia NSFNET.

1700 Erlangs, a melhoria foi de aproximadamente 69%. Para a topologia Japonesa, no ponto de carga de 1000 Erlangs, a redução da probabilidade de bloqueio foi de aproximadamente 68%. Finalmente, para a topologia Toroidal, no ponto de carga de 2700 Erlangs, a melhoria foi de aproximadamente 65%. Com as mesmas configurações já citadas, outras simulações também foram realizadas para o cenário de requisições com largura de banda uniformemente distribuída entre 2, 4 e 8 slots. Os resultados obtidos mostram menores desempenhos que as simulações anteriores, mas ainda apresentam uma melhora de desempenho considerável quando comparados à heurística FFC. Todos esses resultados comprovam a eficiência do algoritmo proposto e a sua relevância para aplicação em redes MCF.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi introduzida uma heurística para atribuição de espectro em redes com estrutura MCF. A heurística foi baseada no conceito MSCL desenvolvido para redes EON e

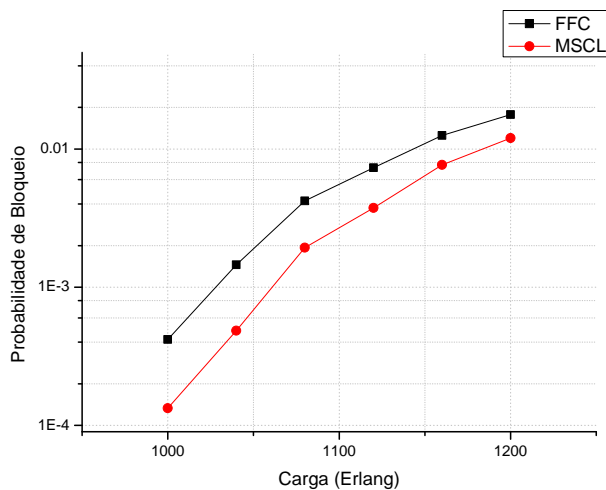


Fig. 7: Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core* e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia japonesa.

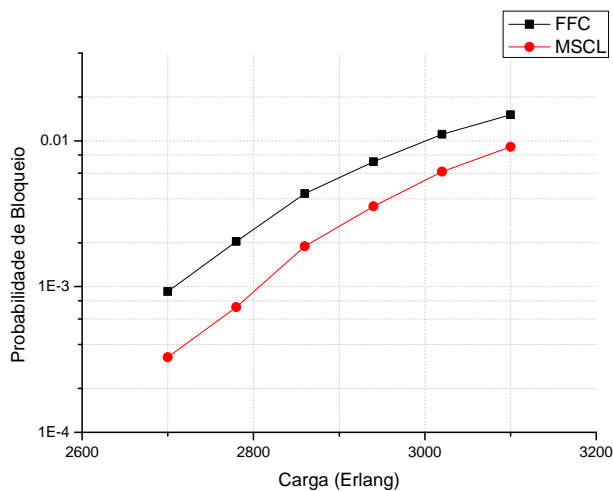


Fig. 8: Gráfico comparativo entre o *First-Fit-Core* e o algoritmo proposto (MSCL) para a topologia toroidal.

adaptada para fibras multi-núcleos. O conceito do algoritmo MSCL consiste em escolher um conjunto de *slots* para acomodar uma requisição que cause a menor perda de capacidade possível para as rotas interferentes à rota principal. A proposta desenvolvida neste artigo tem por objetivo a diminuição da probabilidade de bloqueio quando comparada com a heurística *First-Fit* usual também adaptada para redes MCF, denominada de *First-Fit-Core* (FFC). Após as simulações, ficou comprovada a redução na probabilidade de bloqueio da proposta quando comparada com o FFC. Para as topologias NSFNET, Japonesa e Toroidal, melhorias de aproximadamente 69%, 68% e 65%, respectivamente, foram alcançadas em determinados pontos de carga e demandas por *slots*. Uma sugestão para trabalhos futuros é a aplicação e o estudo dos efeitos da camada física. Outra sugestão é a aplicação da proposta para *links* com núcleos de tamanhos heterogêneos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e à Facepe por ter financiado este trabalho, e ao apoio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE / UFPE.

REFERÊNCIAS

- [1] Ori Gerstel, Masahiko Jinno, Andrew Lord, and S. J. Ben Yoo, "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. 12–20, 2012.
- [2] Masahiko Jinno, Hidehiko Takara, Bartłomiej Kozicki, Yukio Tsukishima, Yoshiaki Sone, and Shinji 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] Peter J. Winzer, "Spatial multiplexing in fiber optics: The scaling of metro/core capacities," *Bell Labs Technical Journal*, vol. 19, pp. 22–30, 2014.
- [4] Cristina Rottondi, Pierpaolo Boffi, Paolo Martelli, and Massimo Tornatore, "Routing, Modulation Format, Baud Rate and Spectrum Allocation in Optical Metro Rings with Flexible Grid and Few-Mode Transmission," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 1, pp. 61–70, 2017.
- [5] George M. Saridis, Dimitris Alexandropoulos, Georgios Zervas, and Dimitra Simeonidou, "Survey and evaluation of space division multiplexing: From technologies to optical networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2136–2156, 2015.
- [6] Werner Klaus, Benjamin J. Puttnam, Ruben S. Luís, Jun Sakaguchi, José-Manuel Delgado Mendinueta, Yoshinari Awaji, and Naoya Wada, "Advanced Space Division Multiplexing Technologies for Optical Networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, no. 4, pp. C1, 2017.
- [7] Roberto Proietti, Lei Liu, Ryan P. Scott, Binbin Guan, Chuan Qin, Tiehui Su, Francesco Giannone, and S. J. B. Yoo, "3D elastic optical networking in the temporal, spectral, and spatial domains," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 2, pp. 79–87, 2015.
- [8] Yongli Zhao, Liyazhou Hu, Ruijie Zhu, Xiaosong Yu, Xinbo Wang, and Jie Zhang, "Crosstalk-Aware Spectrum Defragmentation based on Spectrum Compactness in Space Division Multiplexing enabled Elastic Optical Networks with Multi-core Fiber," *IEEE Access*, vol. 6, 2018.
- [9] P. J. Winzer, "Energy-Efficient Optical Transport Capacity Scaling Through Spatial Multiplexing," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 13, pp. 851–853, 2011.
- [10] Hideki Tode and Yusuke Hirota, "Routing, Spectrum and Core Assignment on SDM Optical Networks (Invited)," *Optical Fiber Communication Conference 2016*, vol. 9, no. 1, pp. 5–7, 2016.
- [11] Mirosław Klinkowski, Piotr Lechowicz, and Krzysztof Walkowiak, "Survey of resource allocation schemes and algorithms in spectrally-spatially flexible optical networking," *Optical Switching and Networking*, vol. 27, no. September 2017, pp. 58–78, 2018.
- [12] Ajmal Muhammad, Georgios Zervas, Dimitra Simeonidou, and Robert Forchheimer, "Routing, Spectrum and Core Allocation in Flexgrid SDM Networks with Multi-core Fibers," pp. 19–22, 2014.
- [13] R. Rumipamba-Zambrano, F. J. Moreno-Muro, P. Pavon-Marino, J. Perello, S. Spadaro, and J. Sole-Pareta, "Assessment of flex-grid/mcf optical networks with roadm limited core switching capability," in *2017 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Maio 2017, pp. 1–6.
- [14] H Waldman and Joaquim F Martins Filho, "Slot assignment strategy to reduce loss of capacity of contiguous-slot path requests in flexible grid optical networks," , no. FEVEREIRO, pp. 3–5, 2013.
- [15] Domenico Siracusa, Federico Pederzoli, Dimitrios Klondisz, Víctor Lopéz, Elio Salvadori, Victor Lopezy, and Elio Salvadori, "Resource allocation policies in SDM optical networks (Invited paper)," *2015 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pp. 168–173, 2015.
- [16] Clayton J. N. de Lira, Raul C. Almeida, and Joaquim F. Martins-Filho, "On combining Split Spectrum technique with a Slot-Continuity Capacity Loss heuristic in Elastic Optical Networks," in *2017 IEEE 18th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, jun 2017, pp. 1–6, IEEE.