

# Estratégia de Priorização para Alocação de Núcleo e Espectro em Redes Ópticas Elásticas SDM

Ismael A. Costa<sup>1</sup>, Jurandir C. Lacerda Jr<sup>1,2</sup>, André C. B. Soares<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Computação - Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
Teresina - PI

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)  
Corrente - PI

ismael@ufpi.edu.br

**Abstract.** *Space Division Multiplexing (SDM) technique expands the possibilities of data transmission in Elastic Optical Networks (EON), using Multi-Core Fibers (MCF). When using more than one core on the same link, the crosstalk problem may occur. This article proposes the "Priorização de Grupos de Núcleos e Intervalos de Espectro" (PGNIE) algorithm to reduce the crosstalk problem. The proposal avoids allocating to slots already occupied in the nearby cores. In relation to approaches in other works in the same area, the algorithm obtained a decrease in circuit blocking probability by at least 70.32%, and an improvement in bandwidth blocking probability by at least 71.70%.*

**Resumo.** *A técnica de Multiplexação por Divisão Espacial (SDM) expande as possibilidades de transmissão de dados em Redes Ópticas Elásticas (EON), utilizando fibras Multi-Núcleo. Ao utilizar mais de um núcleo no mesmo enlace pode ocorrer o problema do crosstalk. Este artigo propõe o algoritmo de Priorização de Grupos de Núcleos e Intervalos de Espectro (PGNIE) para reduzir o problema do crosstalk. A proposta evita alocar em slots já ocupados nos núcleos próximos. Em relação a estratégias existentes em outros trabalhos da mesma área o algoritmo obteve uma diminuição na probabilidade de bloqueio de circuito em pelo menos 70,32%, e uma melhora na probabilidade de bloqueio de banda em pelo menos 71,70%.*

## 1. Introdução

Com um crescente número de usuários e a popularização de aplicações robustas que usam a Internet, aumentou a demanda por uma largura de banda capaz de suportar alto tráfego de informações. Atualmente as redes ópticas compõem a infraestrutura que viabiliza a transmissão desse grande volume de dados. Nos últimos anos está sendo estudado um modelo de rede sem a grade fixa de comprimentos de onda. Esta característica viabiliza que os circuitos ocupem uma largura de banda livre do espectro de acordo com a demanda de tráfego. Redes com largura de banda flexível são denominadas Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Networks - EON*) [Jinno et al. 2009].

A técnica de Multiplexação por Divisão Espacial (*Space Division Multiplexing - SDM*) permite um tráfego maior de informações por utilizar a dimensão espacial. Fibras multi-núcleos (*Multi-Core Fiber - MCF*) são reconhecidas como uma das formas mais eficientes para se implementar SDM [Oliveira and Fonseca 2018]. O espectro óptico pode

ser dividido em *slots* de frequência. Quando dois ou mais circuitos utilizam *slots* com os mesmos *slots* de frequência em núcleos adjacentes ocorre uma interferência na transmissão, chamada de *crosstalk* (XT) [Oliveira and Fonseca 2019].

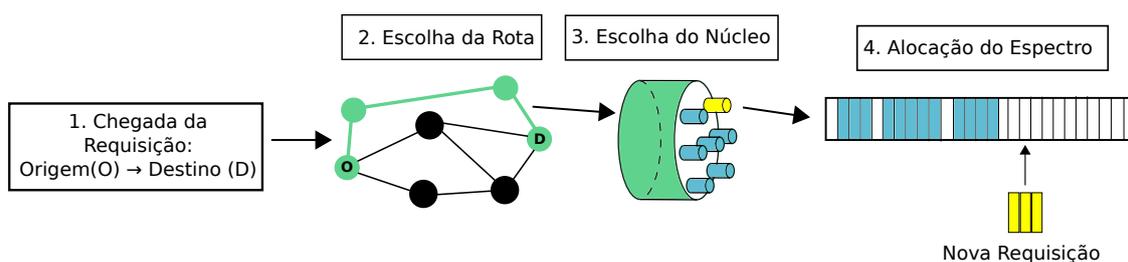
Um dos problemas fundamentais em redes ópticas elásticas é o problema de Roteamento e Alocação de Espectro (*Routing and Spectrum Assignment* - RSA) [Chatterjee et al. 2015]. Ao utilizar Multiplexação por Divisão Espacial, o RSA é estendido, pois deve-se, também, alocar espectro em diferentes núcleos. O novo problema é chamado de Roteamento e Alocação de Núcleo e Espectro (*Routing, Spectrum and Core Assignment* - RSCA) [Oliveira and da Fonseca 2016]. O problema RSCA pode ser resolvido de forma conjunta ou dividido em dois subproblemas: *i*) o roteamento e *ii*) a alocação de núcleo e espectro (*Spectrum and Core Assignment* - SCA) [Lobato et al. 2019].

Nesse contexto, este trabalho propõe o algoritmo de Priorização de Grupos de Núcleos e Intervalos de Espectro (PGNIE) para o subproblema SCA em uma rede EON-SDM. O PGNIE agrupa núcleos e intervalos de espectro, no qual os grupos são ordenados segundo um critério de prioridade de modo a diminuir o XT gerado na rede.

As demais seções deste artigo estão organizadas da seguinte forma. A Seção 2 apresenta as redes ópticas elásticas com multiplexação SDM e suas características. A Seção 3 discute os trabalhos relacionados. O algoritmo proposto é apresentado na Seção 4. A Seção 5 apresenta a avaliação de desempenho da proposta. E, por fim, as conclusões do trabalho são apresentados na Seção 6.

## 2. Redes Ópticas Elásticas Multi-Núcleos

Em uma rede óptica com tráfego dinâmico, os novos circuitos óticos são estabelecidos em atendimento a novas requisições de transmissão de dados. Cada requisição contém a largura de banda requisitada, a origem e o destino dos dados. Após a escolha da rota é necessário decidir o núcleo e o conjunto de *slots* que serão utilizados para criar o novo circuito. A Figura 1 descreve as etapas do problemas RSCA.



**Figura 1. Problema de roteamento e alocação de núcleo e espectro.**

Para este artigo foram consideradas fibras com 7 núcleos, assim como outros trabalhos na área de redes EON-SDM [Oliveira and Fonseca 2019, Lacerda Jr. et al. 2020]. Em cada núcleo o espectro é dividido em *slots* de baixa granularidade (12,5 GHz), de tal forma que o canal óptico se torne flexível para admitir requisições de diferentes larguras de banda [Chen et al. 2015]. A quantidade de *slots* exigidos por uma requisição depende do formato de modulação utilizado.

Para satisfazer uma requisição é necessário respeitar duas restrições: contiguidade e continuidade espectral [Chatterjee et al. 2015]. A contiguidade espectral exige

que todos os *slots* de frequência utilizados pelo circuito óptico sejam adjacentes. Já para obedecer a restrição de continuidade os *slots* utilizados devem ser os mesmos em todos os enlaces da rota. Caso não seja possível respeitar essas restrições, ou não haja quantidade de *slots* disponíveis para atender uma requisição, ocorre bloqueio de requisição [Chatterjee et al. 2015].

Para atender uma requisição existem diversas estratégias de alocação de espectro, como *first fit*, *last fit* e *random fit* [Chatterjee et al. 2015]. A estratégia *first fit* tenta alocar, quando possível, os *slots* próximos ao início do espectro. A estratégia *last fit* busca satisfazer a requisição alocando os slots mais ao final do espectro. Outra opção é utilizar o *random fit*, que atende a nova requisição escolhendo os *slots* de forma aleatória.

Para simular de forma mais realista o cenário estudado é necessário considerar os impactos dos efeitos da camada física esperados para uma rede SDM-EON. Em uma rede, a transmissão de dados é prejudicada por imperfeições da camada física, afetando a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT). Uma forma de analisar a QoT é por meio do cálculo da relação entre sinal e ruído óptico (*Optical Signal to Noise Ratio* - OSNR). Os ruídos ópticos considerados neste artigo são a Emissão Espontânea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* - ASE) e os efeitos não-lineares [Fontinele et al. 2017]. Em [Johannisson and Agrell 2014] é proposto um cálculo para a OSNR em um circuito  $i$ :

$$OSNR_i = \frac{I}{I_{ASE} + I_{NLI}} \quad (1)$$

em que  $I$  é a densidade espectral da potência do sinal (*Power Spectral Density* - PSD), definida por  $I = P_{tr}/\Delta_f$ , em que  $P_{tr}$  é a potência de sinal e  $\Delta_f$  é a largura de banda do circuito. A PSD do ruído de Emissão Espontânea Amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* - ASE) é dada por:

$$I_{ASE} = \sum_{l \in r_i} N_l (G_{AMP} - 1) F h v \quad (2)$$

$N_l$  é o número de *spans* do enlace  $l$ . Um *span* é um segmento de enlace composto por uma fibra óptica e um amplificador [Yan et al. 2015].  $G_{AMP}$  é o ganho do amplificador óptico,  $F$  é a Figura de ruído (*Noise Figure* - NF) do amplificador,  $h$  é a constante de Planck e  $v$  é a frequência da luz. Já a PSD dos ruídos não-lineares (NLI) pode ser calculada por:

$$I_{NLI} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{LNI} \quad (3)$$

sendo  $I_{LNI}$  a PSD do LNI para cada *span* do enlace  $l$ . A  $I_{LNI}$  é calculada da seguinte forma [Zhao et al. 2015]:

$$I_{NLI} = \frac{3\gamma^2 I^3}{2\pi\alpha|\beta_2|} \left( \operatorname{arcsinh} \left( \frac{\pi^2 |\beta_2| B_i^2}{2\alpha} \right) + \sum_j \ln \left[ \frac{\Delta f_{ij} + \frac{B_j}{2}}{\Delta f_{ij} - \frac{B_j}{2}} \right] \right) \quad (4)$$

Na Equação (4),  $j$  representa outro circuito utilizando o mesmo enlace  $l$ .  $B_i$  e  $B_j$  são, respectivamente, as larguras de banda para os circuitos  $i$  e  $j$ ,  $\Delta f_{ij}$  é o espaçamento da frequência central entre os circuitos  $i$  e  $j$ ,  $\gamma$  é o coeficiente não-linear da fibra,  $\beta_2$  é o coeficiente de dispersão de velocidade do grupo e  $\alpha$  é a atenuação de potência causada pela fibra.

Em redes multi-núcleos o XT ocorre quando duas requisições em núcleos adjacentes ocupam os mesmos *slots* de frequência. Quanto mais próximos forem os núcleos, maior o valor do *crosstalk* [Lacerda Jr. et al. 2020]. O XT para um circuito  $i$  pode ser calculado da seguinte forma [Lobato et al. 2019]:

$$XT_{\mu,i}^{(tot)} = \sum_{l=1}^{N_i} XT_{\mu,i}^{(l)} \quad (5)$$

Na Equação (5),  $N_i$  representa a quantidade de enlaces no circuito, com  $XT_{\mu,i}^{(l)}$  sendo o valor de XT de cada enlace individualmente. Esse valor é calculado por:

$$XT_{\mu,i} = \frac{P_{XT_i}}{P_{S_i}} \quad (6)$$

$P_{S_i}$  é a potência do sinal de  $i$ ,  $P_{XT_i}$  é o valor do XT no enlace  $i$  e seu valor pode ser encontrado pela Equação (7).

$$P_{XT_i} = \sum_{j=1}^{N_a} (I_{SO_{ij}} \cdot P_{S_j} \cdot h \cdot L) \quad (7)$$

A variável  $N_a$  representa o número de núcleos adjacentes a  $i$ .  $P_{S_j}$  é a potência de sinal do circuito adjacente  $j$ , e  $L$  é o tamanho do enlace de  $i$ .  $I_{SO_{ij}}$  é o índice de sobreposição de *slots* entre os circuitos  $i$  e  $j$  e pode ser calculado a partir da Equação (8), já  $h$  pode ser encontrado utilizando a Equação (9).

$$I_{SO_{ij}} = \frac{N_{SO_{ij}}}{N_{S_j}} \quad (8)$$

sendo  $N_{SO_{ij}}$  a quantidade de *slots* sobrepostos entre  $i$  e  $j$ , e  $N_{S_j}$  a quantidade de *slots* de  $j$ .

$$h = \frac{2 \cdot k^2 \cdot R}{\beta \cdot \Lambda} \quad (9)$$

A variável  $k$  é o coeficiente de acoplamento,  $R$  é o raio de curvatura,  $\beta$  é a constante de propagação e  $\Lambda$  a distância entre os núcleos. Por impactar a transmissão de dados, existe um valor de limiar para decidir se é possível atender uma nova requisição em um intervalo de espectro com qualidade de transmissão aceitável. Caso o XT no possível novo circuito ultrapasse o valor de limiar, a requisição é bloqueada.

Ao levar em conta o OSNR e o XT para modelar a camada física da rede, também deve ser considerada a modulação utilizada no circuito para definir os valores de limiar. Cada formato de modulação possui uma distância máxima, e um limiar de OSNR e XT suportados. Os valores adotados para este artigo são apresentados na Tabela 1 [Gong et al. 2013, Ives et al. 2015, Moghaddam et al. 2020].

As estratégias para diminuir o bloqueio de requisição causado por XT podem ser divididas em *i) XT-Avoid*; *ii) XT-Worst Case*; e *iii) XT-Aware* [Lobato et al. 2019]. A abordagem *XT-Avoid* evita alocar em *slots* já ocupados nos núcleos adjacentes. A *XT-Worst Case* considera o pior cenário de interferência. Já as estratégias do tipo *XT-Aware*

**Tabela 1. Distância máxima e limiares de OSNR e XT.**

	BPSK	QPSK	8-QAM	16-QAM	32QAM
Distância (km)	10.000	5.000	2.500	1.250	650
Limiar de OSNR (dB)	5,5	8,5	12,5	15,1	18,1
Limiar de XT (dB)	-14	-18,5	-21	-25	-27

calculam o XT durante o processo de estabelecimento do circuito, para decidir em qual núcleo e faixa de *slots* atender a nova requisição. Por simplificar o problema RSCA e diminuir a complexidade computacional, este trabalho utiliza a abordagem *XT-Avoid*.

Após a chegada de uma nova requisição são executados os algoritmos para escolha da rota, modulação, núcleo e intervalo de espectro. Se não for possível encontrar nenhum intervalo de espectro que possa satisfazer a nova requisição, ocorre bloqueio por falta de recursos. Caso haja um núcleo com intervalo de espectro disponível que respeite as exigências de contiguidade e continuidade, é avaliado o OSNR no possível novo circuito e nos circuitos vizinhos já existentes. Se o valor de OSNR no novo circuito estiver menor que o limiar, a requisição é bloqueada por ausência de QoT no Novo circuito (*QoT for the New circuit* - QoTN). Caso o valor de OSNR nos circuitos vizinhos já estabelecidos ultrapasse seus limiares, a requisição é bloqueada por ausência de QoT para os Outros circuitos (*QoT for the Others circuits* - QoTO). Por último, é avaliado o valor de XT gerado no novo circuito, se estiver fora do limiar aceitável ocorre bloqueio por XT, caso contrário, o novo circuito é alocado.

### 3. Trabalhos Relacionados

Os estudos em redes EON-SDM abordam geralmente o problema do XT, além de outros problemas de camada física. Alguns trabalhos estudam problemas que já existiam em redes ópticas mono-núcleo, como sobrevivência na rede, agregação de tráfego e fragmentação de espectro. Com o desejo de utilizar as fibras MCF, esses problemas passaram a ser reestruturados, incluindo a dimensão espacial.

Os autores em [Fujii et al. 2014] propõem um método sob demanda para alocação de espectro e núcleo que reduz tanto XT quanto fragmentação de espectro em redes multi-núcleo. Essa estratégia utiliza a abordagem *XT-Avoid* e é baseada em duas políticas relacionadas ao XT e fragmentação. A primeira é baseada na estrutura de redes multi-núcleo, chamada política de priorização de núcleos. A segunda é a política de classificação de núcleos baseadas na largura de banda requerida pelas conexões.

Os autores em [Lobato et al. 2019] utilizam um algoritmo guloso ciente de imperfeições na camada física e que utiliza k-menores caminhos pré-computados para decidir a rota. O algoritmo proposto é *XT-Aware* e computa o XT para cada circuito candidato antes de tentar atender a requisição.

Em [Liu et al. 2020] foi proposto uma estratégia mista utilizando k-menores caminhos e agregação de tráfego, visando a eficiência energética. Para cada rota é calculado o tráfego no circuito, se o tráfego for baixo é utilizado um algoritmo *XT-Avoid* para alocar o núcleo e espectro. Caso o tráfego esteja acima de um limiar, utiliza-se um algoritmo *XT-Aware* para melhorar a probabilidade de bloqueio.

Em [Lacerda Jr. et al. 2020] é apresentado um algoritmo CSA chamado Algo-

ritmo de Balanceamento de Núcleo e Espectro (ABNE). Por não calcular o XT em tempo real, o algoritmo utiliza a abordagem *XT-Avoid*. A proposta busca uma alocação balanceada de núcleo e espectro, de modo a minimizar o impacto do XT nos circuitos ópticos.

Tendo em vista os temas já estudados na literatura, este trabalho procura investigar o problema de alocação de núcleo e espectro de forma isolada. Para garantir uma melhor complexidade computacional e estar de acordo com a literatura, este artigo utiliza uma abordagem *XT-Avoid*. Uma das contribuições do algoritmo proposto nesse artigo é otimizar a escolha de núcleo, ao contrário das escolhas mais simples utilizadas pelos outros trabalhos *XT-avoid* apresentados.

#### 4. Algoritmo Proposto

O algoritmo proposto baseia-se na ideia de dividir os núcleos e espectros em grupos, onde cada grupo possui uma prioridade para ser utilizado na alocação de recursos. O algoritmo possui uma abordagem *XT-Avoid* e é chamado de Priorização de Grupos de Núcleos e Intervalos de Espectro (PGNIE). Considerando que o XT ocorre quando *slots* de índices iguais são ocupados em núcleos próximos, o algoritmo busca utilizar núcleos não-adjacentes. Quando for necessário alocar em núcleos vizinhos, será utilizado um intervalo de espectro diferente dos núcleos próximos já ocupados, para evitar o XT. O PGNIE pode ser dividido em duas partes: *i*) Alocação de núcleo e *ii*) Alocação de espectro.

##### 4.1. Alocação de Núcleo

Para decidir quais núcleos e intervalos de espectro serão utilizados é feita uma divisão em grupos, onde cada grupo contém apenas núcleos não-adjacentes. A Figura 2 descreve a divisão de grupos.

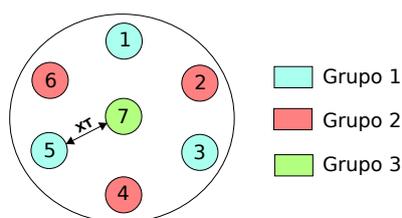


Figura 2. Grupos de núcleos em uma fibra de 7 núcleos.

Após a chegada de uma requisição, o PGNIE analisa um grupo por vez. O algoritmo percorre cada grupo em busca de um núcleo que possua recursos disponíveis para satisfazer a requisição. Quando é encontrado um núcleo livre, ele é escolhido e a busca se encerra. Buscando manter a utilização dos núcleos o mais homogênea possível, os núcleos são ordenados dentro de cada grupo de forma que a cada nova requisição a busca se inicie por um núcleo diferente. A Tabela 2 mostra as três formas com que os núcleos podem ser percorridos.

Na implementação do algoritmo são criados 3 vetores para armazenar cada forma de ordenação. Por exemplo, o primeiro vetor é [1, 3, 5, 2, 4, 6, 7]. A primeira requisição na rede percorre esse vetor, a partir do início, à procura do primeiro núcleo que possua uma faixa de espectro capaz de acomodar a quantidade de *slots* exigidos pela requisição.

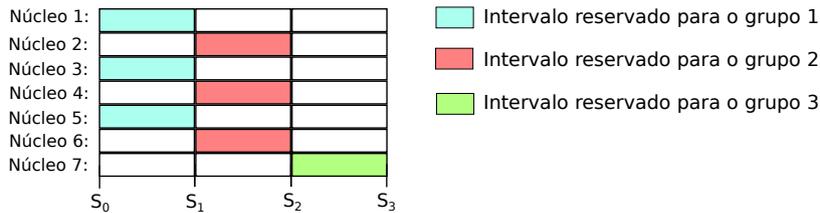
**Tabela 2. Ordenação dos núcleos.**

Forma de ordenação	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3
1 <sup>a</sup>	1	3	5	2	4	6	7
2 <sup>a</sup>	3	5	1	4	6	2	7
3 <sup>a</sup>	5	1	3	6	2	4	7

A segunda e terceira requisições percorrem a segunda e terceira formas de ordenação, sempre a partir do primeiro elemento. A quarta requisição percorre novamente a primeira forma, e assim por diante, com o objetivo de balancear a carga nos núcleos.

#### 4.2. Alocação de Espectro

Para evitar o XT quando núcleos adjacentes forem utilizados, cada grupo de núcleos utiliza um intervalo de espectro diferente. É realizada uma primeira tentativa, onde o algoritmo procura atender a requisição no intervalo de espectro definido para cada grupo. Caso esse intervalo esteja ocupado em todos os núcleos é realizada outra tentativa de alocação, agora analisando também os intervalos pertencentes a outros grupos. Dessa forma a rede irá alocar prioritariamente em intervalos espectrais diferentes nos núcleos adjacentes, evitando o XT. A Figura 3 mostra os intervalos de espectro para cada grupo.



**Figura 3. Intervalos de espectro para cada grupo.**

Na Figura 3 estão marcados os intervalos usados por cada grupo na primeira tentativa. Por exemplo, caso seja a primeira requisição na rede serão analisados:  $S_0$  a  $S_1$  nos núcleos 1, 3 e 5;  $S_1$  a  $S_2$  nos núcleos 2, 4 e 6;  $S_2$  a  $S_3$  no núcleo 7. Caso todos esses intervalos estejam ocupados é feita a segunda tentativa, onde serão analisados:  $S_1$  a  $S_3$  nos núcleos 1, 3 e 5;  $S_0$  a  $S_1$  e  $S_2$  a  $S_3$  nos núcleos 2, 4 e 6;  $S_0$  a  $S_2$  no núcleo 7. Quando é encontrado um intervalo de espectro capaz de acomodar a nova requisição, ele é escolhido e a busca se encerra. Caso todos os intervalos estejam ocupados ocorre bloqueio de requisição.

O espectro é dividido de forma igual entre os grupos, logo é possível encontrar os limites dos intervalos do espectro a partir da Equação:  $S_i = S_{i-1} + (F/G)$ , onde  $F$  é a quantidade de slots de frequência em cada núcleo e  $G$  é o número de grupos. A Tabela 3 apresenta os índices que delimitam cada intervalo de espectro, considerando 320 slots e  $S_0 = 0$ .

**Tabela 3. Limites dos intervalos de espectro.**

Limite	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
Índice do slot	0	107	214	320

Existem diversas técnicas para escolher em quais *slots* de frequência de um determinado grupo será alocado o novo circuito. As estratégias escolhidas podem variar entre a primeira e a segunda tentativa de alocação de espectro. É possível utilizar *first fit* ou *last fit*, porém como na segunda tentativa o intervalo de espectro utilizado é o mesmo intervalo já ocupado no núcleo adjacente, o ideal é que as duas tentativas utilizem estratégias diferentes. A estratégia *random fit* também é viável pois os índices dos *slots* escolhidos no núcleo atual tendem a ser diferentes dos índices dos *slots* ocupados nos núcleos adjacentes. Por ser aleatória, é possível utilizar essa estratégia tanto na primeira quanto na segunda tentativa de alocação espectral. Neste trabalho foram avaliadas duas soluções: i) PGNIE com *first fit - last fit* (PGNIE-FFLF) e ii) PGNIE com *random fit - random fit* (PGNIE-RFRF). Na Seção 5 é avaliado o desempenho das duas estratégias. O Algoritmo 1 mostra como o PGNIE age para decidir qual núcleo e *slots* serão utilizados para atender uma nova requisição.

---

**Algoritmo 1:** PGNIE.

---

**Entrada:** Rota  $R$ , *slots* requeridos  $D$ , Forma de Ordenação  $I$   
**Saída** : Núcleo  $N$  e Espectro  $E$

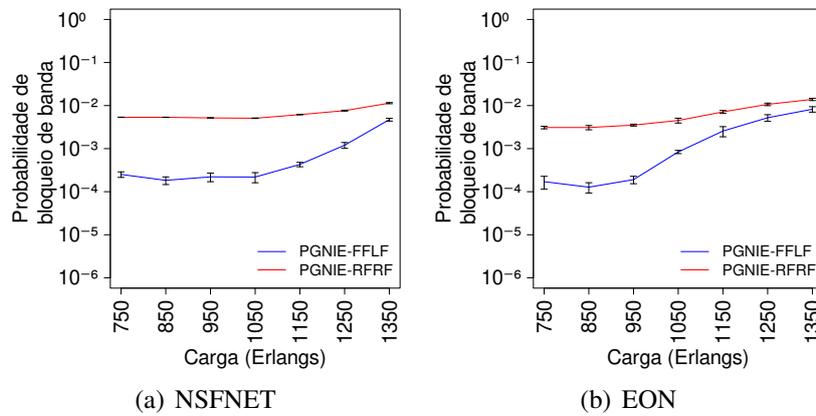
- 1 Para a rota  $R$  especificada:
- 2 **para** cada núcleo  $U$  em vetor  $Prioridades[I]$  **faça**
- 3     **se** dentro do intervalo reservado para o grupo de qual  $U$  faz parte há uma faixa de espectro  $P$  capaz de acomodar  $D$  **então**
- 4          $N \leftarrow U$
- 5          $E \leftarrow P$
- 6 **se** não foi encontrada uma faixa de espectro disponível **então**
- 7     **para** cada núcleo  $U$  em vetor  $Prioridades[I]$  **faça**
- 8         **se** dentro dos intervalos reservados para os grupos de qual  $U$  não faz parte há uma faixa de espectro  $P$  capaz de acomodar  $D$  **então**
- 9              $N \leftarrow U$
- 10             $E \leftarrow P$
- 11  $I++$
- 12 **se**  $I$  igual a 4 **então**
- 13      $I \leftarrow 1$
- 14 **se** foi possível encontrar uma faixa de espectro livre **então**
- 15     **retorna**  $N$  e  $E$
- 16 **retorna** requisição bloqueada

---

Nas linhas 2 e 7 o laço percorre um vetor contendo a ordem com que os núcleos devem ser analisados ( $vetorPrioridades[I]$ ). Existem 3 vetores com essa função, cada um contendo uma ordem diferente de prioridade dos núcleos. A variável  $I$  indica qual linha da Tabela 2 será utilizada, e é inicializada como 1 quando a primeira requisição chega à rede. Essa variável é incrementada a cada requisição, e sempre volta a ser 1 após três requisições. Cada núcleo é analisado no seu intervalo reservado, caso seja a primeira tentativa de alocação, ou nos outros intervalos, caso seja a segunda tentativa. O primeiro núcleo que possuir uma faixa de espectro, dentro do intervalo calculado, grande



As métricas de avaliação de desempenho utilizadas são: *i*) Probabilidade de Bloqueio de Circuito (PBC); e *ii*) Probabilidade de Bloqueio de Banda (PBB). São avaliados dois cenários: *i*) sob baixa incidência de XT e *ii*) sob alta incidência de XT [Lobato et al. 2019]. Assim, os algoritmos são avaliados de modo a verificar os seus desempenhos em relação a incidência de XT [Lobato et al. 2019]. Para simular cenários com diferentes incidências de XT, o valor do coeficiente de acoplamento ( $k$ ) é alterado. Para o primeiro cenário, com baixa incidência de XT,  $k$  recebe o valor de  $5,84 \times 10^{-3}m^{-1}$ . Para simular o segundo cenário, com alta incidência de XT,  $k$  recebe o valor de  $1,2 \times 10^{-2}m^{-1}$ . O PGNIE possui duas variações, PGNIE-RFRF e PGNIE-FFLF, como mostrado na subseção 4.2. A Figura 5 mostra o desempenho das duas estratégias nas topologias NSFNET e EON em um cenário de alta incidência de XT.



**Figura 5. PBB para PGNIE-RFRF e PGNIE-FFLF. Cenário de alta incidência de XT.**

É possível perceber pela Figura 5 que utilizar *first fit* na primeira tentativa e *last fit* na segunda tentativa permite um desempenho superior quando comparado com a utilização do *random fit* em ambos. É possível comparar o desempenho de dois algoritmos a partir da fórmula:  $D_1 = (R_1 - R_2)/R_1$ , onde  $D_1$  é o quanto o primeiro algoritmo é melhor em relação ao segundo algoritmo em um ponto de carga específico, sendo que  $R_1$  e  $R_2$  são os resultados do primeiro e segundo algoritmo nesse ponto. Por apresentar uma melhora de no mínimo 58,58% em relação ao PGNIE-RFRF na topologia NSFNET e de no mínimo 40,90% na topologia EON, o PGNIE-FFLF é a estratégia utilizada no algoritmo PGNIE a partir deste ponto.

O algoritmo proposto é comparado com outros três algoritmos: *i*) alocação aleatória de núcleo (*random core*) com utilização de *first fit* para alocar o espectro, chamada RC-FF; *ii*) alocação de núcleo e espectro feitas a partir do algoritmo ABNE [Lacerda Jr. et al. 2020]; e *iii*) alocação de núcleo feita a partir do algoritmo *Core Prioritization* [Fujii et al. 2014] com alocação de espectro utilizando *random fit*, chamada de CP-RF. A Figura 6 mostra o desempenho em PBC do PGNIE em relação às outras propostas nas topologias NSFNET e EON sob incidência de baixo nível de XT.

Na Figura 6 é possível perceber que o PGNIE apresentou bloqueio de requisição menor que todos os outros algoritmos. Na topologia NSFNET o algoritmo proposto obteve um ganho na PBC de no mínimo 70,32% em relação ao ABNE, de 98,37% em relação ao CP-RF e de 99,87% em relação ao RC-FF, todos observados no ponto de carga com 1350 Erlangs. Abaixo do ponto de carga com 1050 Erlangs o algoritmo PGNIE não

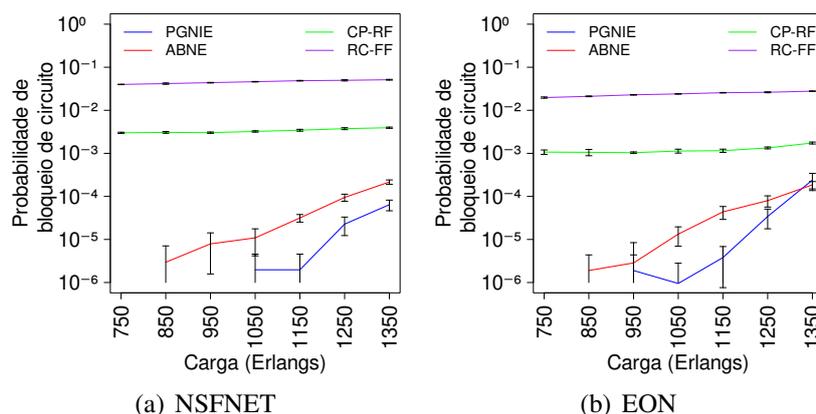


Figura 6. PBC em cenário com baixa incidência de XT.

apresentou PBC. Na topologia EON o algoritmo proposto obteve um desempenho de em média 28,23% pior que o ABNE no ponto de maior carga (1350 Erlangs), porém como apresentaram o mesmo intervalo de confiança não é possível tirar conclusões nesse ponto de carga. Em relação ao CP-RF, o ABNE obteve uma melhora de pelo menos 86,26%, e de 99,14% em relação ao RC-FF, no ponto de maior carga. Nessa topologia o algoritmo PGNIE não apresentou PBC abaixo do ponto de carga com 950 Erlangs. A Figura 7 apresenta a PBB dos algoritmos.

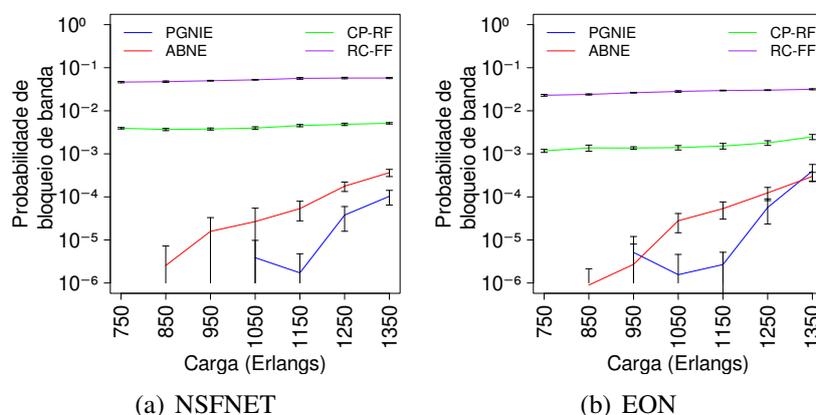


Figura 7. PBB em cenário com baixa incidência de XT.

Como esperado, a PBB aumentou em relação ao primeiro cenário. Novamente o PGNIE obteve resultados melhores do que todos os outros algoritmos analisados. Na topologia NSFNET o algoritmo proposto apresentou uma melhora de pelo menos 71,84% em relação ao ABNE, de 97,99% em relação ao CP-RF e de 99,82% em relação ao RC-FF, todos observados no ponto de carga com 1350 Erlangs. Abaixo do ponto de carga com 1050 Erlangs o algoritmo PGNIE não apresentou PBB. Na topologia EON o algoritmo proposto obteve um desempenho pior que o ABNE em até 89,17%, no ponto de carga com 950 Erlangs, porém novamente os dois algoritmos apresentaram intervalos de confiança semelhantes. Em relação ao CP-RF, o PGNIE obteve uma melhora de pelo menos 83,93%, e de pelo menos 98,74% em relação ao RC-FF, no ponto de maior carga. Nessa topologia o algoritmo PGNIE não apresentou PBB abaixo do ponto de carga com 950 Erlangs. Com o aumento do nível de XT é esperado que o bloqueio das requisições aumente em relação

aos resultados anteriores. A Figura 8 mostra o desempenho dos algoritmos em valores de PBC no segundo cenário, onde é considerada uma maior incidência de XT.

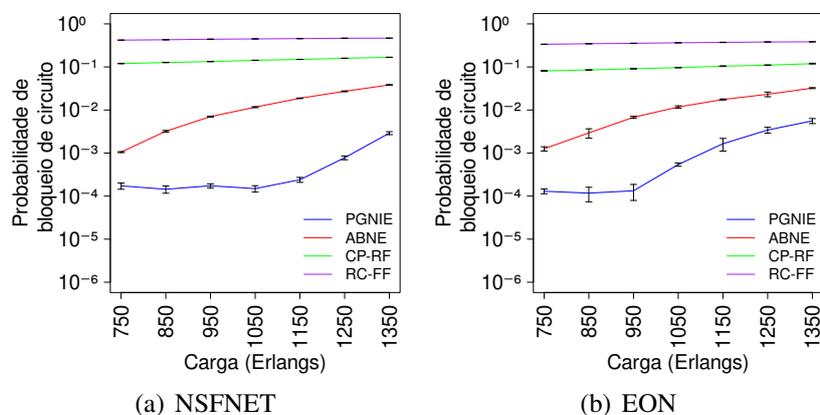


Figura 8. PBC em cenário com alta incidência de XT.

Como esperado, a PBC aumentou em relação ao primeiro cenário. Na topologia NSFNET o algoritmo proposto apresentou uma melhora de no mínimo 83,54% em relação ao ABNE no ponto de carga com 750 Erlangs. Observou-se melhora de pelo menos 98,27% em relação ao CP-RF e de 97,38 em relação ao RC-FF, ambos no ponto de maior carga. Na topologia EON o algoritmo proposto obteve uma melhora de pelo menos 82,68% comparado ao ABNE, de 73,01% comparado ao CP-RF, e de 91,59% comparado ao RC-FF, todos observados no ponto de maior carga. A Figura 9 apresenta os valores de PBB para todos os algoritmos avaliados.

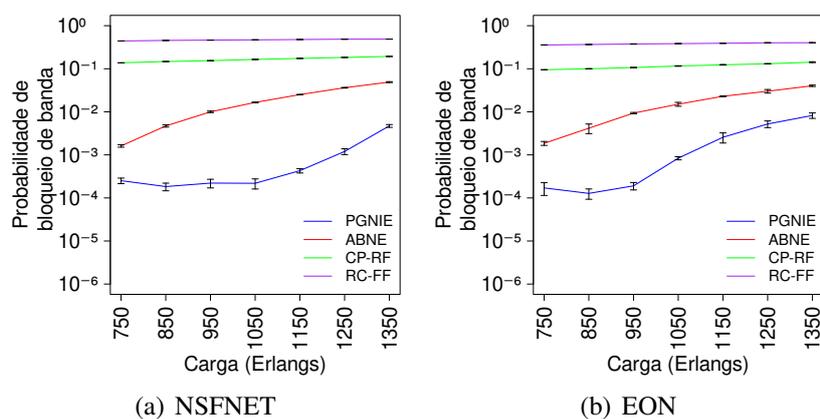


Figura 9. PBB em cenário com alta incidência de XT.

Considerando a PBB, o PGNIE também obteve o melhor desempenho em relação a todos os algoritmos em um cenário com alta incidência de XT. Na topologia NSFNET o algoritmo proposto conseguiu uma melhora de no mínimo 84,38% em relação ao ABNE no ponto de carga com 750 Erlangs, e de 97,56% em relação ao CP-RF e 99,04% em relação ao RC-FF no ponto de maior carga. Na topologia EON a melhora em relação ao ABNE foi de no mínimo 79,56%, de 71,70% em relação ao CP-RF e de 90,01% em relação ao RC-FF, observados no ponto de carga com 1350 Erlangs.

Desconsiderando os pontos de carga onde os algoritmos apresentaram intervalos de confiança sobrepostos e semelhantes, o algoritmo proposto obteve uma diminuição na PBC de no mínimo 70,32%, e de mínimo 71,70% na PBB. No PGNIE os circuitos são criados sempre que possível em núcleos não-adjacentes, ao contrário dos algoritmos comparados que utilizam critérios mais simples, permitindo com que sejam acumuladas novas requisições em núcleos próximos. Outro fator que permitiu com que o PGNIE apresentasse menor bloqueio de requisições, comparado a outros algoritmos CSA, foi priorizar intervalos de espectro diferentes em núcleos adjacentes.

## 6. Conclusão

Este trabalho apresenta uma proposta de algoritmo para alocação de núcleo e espectro chamada Priorização de Grupos de Núcleos e Intervalos de Espectro (PGNIE). A proposta busca mitigar efeitos de XT visando a diminuição do bloqueio de requisições. O PGNIE propõe com que as requisições sejam alocadas prioritariamente em determinados núcleos e intervalos de espectro, evitando ao máximo alocar em núcleos próximos e em *slots* sobrepostos em núcleos adjacentes.

O desempenho do PGNIE foi comparado com outros 3 algoritmos, RC-FF, CP-RF e ABNE, nas métricas de PBC e PBB. Foram utilizadas as topologias NSFNET e EON, em cenários com diferentes níveis de incidência de XT. Em relação aos outros algoritmos analisados, para um cenário de baixa incidência de XT, o algoritmo proposto conseguiu uma melhora na PBC de pelo menos 70,32% e na PBB de pelo menos 83,93%. Já em um cenário de alta incidência de XT a melhora foi de pelo menos 73,01% em relação à PBC e 71,70% em relação à PBB.

Em trabalhos futuros pretende-se utilizar a estratégia de priorização de grupos de núcleos e intervalos de espectro aliado a estratégias como K-menores caminhos e modulação adaptativa. Também pretende-se avaliar a estratégia utilizando a abordagem *XT-Aware* e com variações na quantidade de núcleos. Os novos algoritmos serão avaliados sob outras métricas, novos cenários, topologias e comparados a outros algoritmos.

## Referências

- Beyranvand, H. and Salehi, J. A. (2013). A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(18):3043–3054.
- Chatterjee, B. C., Sarma, N., and Oki, E. (2015). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(3):1776–1800.
- Chen, X., Li, J., Zhu, P., Tang, R., Chen, Z., and He, Y. (2015). Fragmentation-aware routing and spectrum allocation scheme based on distribution of traffic bandwidth in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 7(11):1064–1074.
- Fontinele, A., Santos, I., Neto, J. N., Campelo, D. R., and Soares, A. (2017). An efficient IA-RMLSA algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, 118:1–14.

- Fujii, S., Hirota, Y., Tode, H., and Murakami, K. (2014). On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 6(12):1059–1071.
- Gong, L., Zhou, X., Liu, X., Zhao, W., Lu, W., and Zhu, Z. (2013). Efficient resource allocation for all-optical multicasting over spectrum-sliced elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 5(8):836–847.
- Ives, D., Bayvel, P., and Savory, S. (2015). Routing, modulation, spectrum and launch power assignment to maximize the traffic throughput of a nonlinear optical mesh network. *Photonic Network Communications*, 29.
- 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 Communications Magazine*, 47(11):66–73.
- Johannisson, P. and Agrell, E. (2014). Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, 32(23):4544–4552.
- Lacerda Jr., J., Fontinele, A., Santos, I., Leão, E., Campelo, D., Monteiro, J. A., and Soares, A. (2020). Algoritmo de balanceamento inter-núcleos para redes Ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. In *Anais do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 519–532, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Liu, H., Xiong, Q., and Chen, Y. (2020). Routing core and spectrum allocation algorithm for inter-core crosstalk and energy efficiency in space division multiplexing elastic optical networks. *IEEE Access*, 8:70453–70464.
- Lobato, F., Jacob Junior, A., Rodrigues, J., Cartaxo, A., and Costa, J. (2019). Inter-core crosstalk aware greedy algorithm for spectrum and core assignment in space division multiplexed elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, 33.
- Moghaddam, E. E., Beyranvand, H., and Salehi, J. A. (2020). Crosstalk-aware resource allocation in survivable space-division-multiplexed elastic optical networks supporting hybrid dedicated and shared path protection. *Journal of Lightwave Technology*, 38(6):1095–1102.
- Oliveira, H. and Fonseca, N. (2019). Proteção em redes Ópticas elásticas com multiplexação espacial. In *Anais Estendidos do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 161–168, Gramado, RS, Brasil.
- Oliveira, H. M. and Fonseca, N. (2018). Protection, routing, modulation, core and spectrum allocation in SDM elastic optical networks. *IEEE Communications Letters*.
- Oliveira, H. M. N. S. and da Fonseca, N. L. S. (2016). Algorithm for protection of space division multiplexing elastic optical networks. In *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6.
- Yan, L., Agrell, E., Wymeersch, H., Johannisson, P., Di Taranto, R., and Brandt-Pearce, M. (2015). Link-level resource allocation for flexible-grid nonlinear fiber-optic communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(12):1250–1253.
- Zhao, J., Wymeersch, H., and Agrell, E. (2015). Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 33(22):4554–4564.