

# Um Novo Algoritmo Para Mitigar Crosstalk e Fragmentação em Redes Ópticas Elásticas Multi-Núcleos

Jurandir Lacerda Jr<sup>1,2</sup>, Aline Morais<sup>1</sup>, Adolfo Cartaxo<sup>3</sup>, André Soares<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)  
Corrente, Piauí, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Computação - Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
Teresina, Piauí, Brasil

<sup>3</sup>Instituto de Telecomunicações (IT) - Instituto Universitário de Lisboa (Iscte)  
Lisboa, Portugal

`jurandir.cavalcante@ifpi.edu.br`

**Abstract.** *This paper proposes a core and spectrum allocation algorithm for optical networks based on multi-core fiber. In this context, the algorithm for reducing fragmentation and crosstalk (AMIFRAC) is proposed. The AMIFRAC implements mechanisms to reduce spectral fragmentation and inter-core crosstalk in the network, proving efficient compared with seven other algorithms in the literature. The numerical results show that when compared with the most competitive of the seven algorithms, AMIFRAC achieves: i) a gain in terms of circuit blocking probability of at least 40.45%; a gain in terms of bandwidth blocking probability of at least 43.95%; and an increase in spectral utilization of at least 5.30%.*

**Resumo.** *Este artigo propõe um algoritmo para alocação de núcleo e espectro em redes ópticas multi-núcleos. Neste contexto é proposto o algoritmo para mitigação de fragmentação e crosstalk (AMIFRAC). O AMIFRAC implementa mecanismos para reduzir a fragmentação espectral e o crosstalk inter-núcleos na rede, mostrando-se eficiente em relação a outros sete algoritmos da literatura. Os resultados numéricos mostram que quando comparado com o mais competitivo dos sete algoritmos, o AMIFRAC atinge: i) um ganho em termos de probabilidade de bloqueio de circuito de pelo menos 40,45%; um ganho em termos de probabilidade de bloqueio de banda de pelo menos 43,95%; e um aumento de utilização espectral de pelo menos 5,30%.*

## 1. Introdução

Nos últimos anos, a comunidade científica tem apontado as redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (*space-division multiplexed elastic optical networks* (SDM-EONs)) para compor a infraestrutura das redes de transporte e atender a crescente demanda de tráfego dos usuários [Sillard 2011, Brasileiro et al. 2020]. Nas SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos, a fibra é dividida em vários núcleos e cada núcleo possui seu espectro óptico. Cada espectro óptico é dividido em fatias espectrais conhecidas como *slots* de frequência. Assim, cada cliente da rede pode contar com um caminho óptico que possua um ou mais *slots* de frequência. Portanto, as SDM-EONs são capazes

de otimizar o uso do espectro óptico devido a sua elasticidade, além da escalabilidade proporcionada pelas fibras multi-núcleos.

Uma questão fundamental em uma SDM-EON é a alocação de novos caminhos ópticos a partir de chegadas de requisições para novas conexões. Esta questão está relacionado a um problema conhecido como problema de roteamento, escolha de modulação, alocação de núcleo e espectro (*routing, modulation, core, and spectrum assignment* (RMCSA)) [Brasileiro et al. 2020, Muhammad et al. 2015]. O problema RMCSA consiste em: *i*) definir uma rota entre um nó de origem  $O$  e um nó de destino  $D$  na rede; *ii*) definir um formato de modulação para ser usado pelo caminho óptico; *iii*) definir qual dos núcleos da fibra será utilizado pelo caminho óptico; e *iv*) definir qual o conjunto de *slots* de frequência será usado pelo caminho óptico.

Para resolver o problema RMCSA, duas restrições devem ser obedecidas [Chatterjee et al. 2015]: *i*) a restrição de contiguidade espectral, que exige que todos os *slots* de frequência de um caminho óptico sejam adjacentes; e *ii*) a restrição de continuidade espectral, que exige que o conjunto de *slots* de frequência usados por um caminho óptico em um enlace sejam os mesmo em todos os enlaces ao longo da rota. Tais restrições, somado à natureza dinâmica da rede (alocação e desalocação de caminhos ópticos) e a heterogeneidade das taxas de bits requisitadas por cada cliente tornam o espectro óptico fragmentado. A fragmentação espectral é um problema que cria situações em que os algoritmos RMCSA não são capazes de encontrar soluções de caminhos ópticos contíguos e contínuos. Quando o algoritmo RMCSA não é capaz de encontrar uma solução para uma dada requisição, a requisição é bloqueada e não é atendida pela rede.

Além da fragmentação espectral, outro problema pode causar o bloqueio de uma requisição: as limitações de camada física [Hayashi et al. 2011, Poggiolini et al. 2015]. As limitações de camada física impactam diretamente na qualidade de transmissão (QoT) dos caminhos ópticos da rede. Caso a QoT de um caminho óptico não esteja em concordância com o acordo de nível de serviço (*service level agreement* (SLA)) da rede, este caminho óptico não é estabelecido. Dentre as várias limitações de camada física, o *crosstalk* (XT) inter-núcleo se destaca como o maior fator limitante em redes multi-núcleos [Hayashi et al. 2011]. O *crosstalk* ocorre quando dois caminhos ópticos localizados em núcleos adjacentes usam os mesmos *slots* de frequência (sobreposição espectral) [Hayashi et al. 2011]. Duas abordagens podem ser utilizadas para lidar com o *crosstalk*: *i*) na abordagem *XT-avoid* o algoritmo RMCSA tenta evitar sobreposição espectral sem ter ciência os níveis reais de *crosstalk*; e *ii*) na abordagem *XT-aware* o algoritmo RMCSA possui ciência dos níveis reais de *crosstalk* e usa esta informação para a tomada de decisão. Apesar de eficientes, as abordagens *XT-aware* introduzem um alto custo computacional para algoritmos RMCSA.

Neste contexto, o objetivo deste artigo é propor um algoritmo para resolver o problema de alocação de núcleo e espectro em SDM-EON. Assim, a principal contribuição do artigo é a proposta do algoritmo para mitigação de fragmentação e *crosstalk* (AMIFRAC). O AMIFRAC é um algoritmo *XT-avoid*, o que se traduz em um baixo custo computacional. Além disso, o AMIFRAC apresenta eficiência em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, probabilidade de bloqueio de banda e utilização do espectro quando comparado a outros sete algoritmos da literatura. Outra contribuição deste artigo é a análise do algoritmo proposto em cenários que consideram diversas limitações de

camada física de forma dinâmica.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados ao tema deste artigo. A modelagem do sistema em termos das limitações de camada física são discutidas na Seção 3. A Seção 4 apresenta o algoritmo proposto. A avaliação de desempenho do algoritmo proposto é apresentada na Seção 5. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção 6.

## 2. Trabalhos Relacionados

O problema de alocação espectral começou a ser investigado antes mesmo do estudo de redes multi-núcleos, quando o foco eram redes de único núcleo. Neste sentido, existem políticas clássicas para a alocação espectral, como a *first fit*, *last fit* e *random fit* [Chatterjee et al. 2015]. Na política de alocação de espectro *first fit* [Rosa et al. 2012], os *slots* são indexados em uma lista de *slots* disponíveis. Esta política sempre tenta escolher o *slot* de índice mais baixo da lista de *slots* disponíveis e, em seguida, alocar este *slot* para atender à requisição de conexão. Por outro lado, a política de alocação de espectro *last fit* [Fadini and Oki 2014] possui uma atuação oposta ao *first fit*, escolhendo o *slot* com maior índice da lista de *slots* disponíveis. Portanto, os *slots* ocupados ficam concentrados no final do espectro, enquanto a porção inicial do espectro permanece livre para atender a novas requisições. Na política de alocação de espectro *random fit* [Rosa et al. 2012], quando uma requisição de conexão chega na rede, o *random fit* seleciona aleatoriamente um *slot* da lista de *slots* disponíveis e o aloca ao caminho óptico usado para atender a requisição de conexão.

Além das políticas de alocação clássicas, muitos trabalhos da literatura tem investigado formas mais eficientes de aprimorar a alocação de recursos em SDM-EON. Alguns destes trabalhos propõem estratégias *XT-aware* para lidar com o problema do *crosstalk* inter-núcleo [Klinkowski and Zalewski 2019, Lobato et al. 2019, Liu et al. 2020, Moghaddam et al. 2020, Tang et al. 2020, Takeda et al. 2022, Ravipudi and Brandt-Pearce 2023, Lacerda-Jr et al. 2024]. Por outro lado, as estratégias *XT-avoid* surgem como uma opção de baixo custo computacional [Fujii et al. 2014, Tode and Hirota 2017, Lacerda-Jr et al. 2020, Liu et al. 2020, Araujo et al. 2021].

No âmbito de algoritmos *XT-avoid*, [Fujii et al. 2014] propõe uma estratégia de alocação de núcleo e espectro. Os autores propõem uma política de priorização de núcleo, nomeada de *core prioritization* (CP). Tal política busca evitar o *crosstalk* entre núcleos ao balancear o uso de cada núcleo da fibra óptica. Já em [Tode and Hirota 2017], os autores propõem um esquema de atribuição de espectro *intra-area first fit* (IAFF). A proposta visa classificar as requisições de acordo com o número de *slots* de frequência solicitado em várias áreas priorizadas em cada núcleo. Então, o esquema agrupa caminhos ópticos com o mesmo número de *slots* de frequência na mesma área priorizada.

Os autores em [Lacerda-Jr et al. 2020] apresentaram o algoritmo de balanceamento de núcleo e espectro para Redes SDM (ABNE). O algoritmo ABNE apresenta uma estratégia de balanceamento no uso de núcleos para evitar sobreposição espectral e consequentemente o *crosstalk*. Para isso, o algoritmo divide os núcleos da fibra em grupos de prioridade, em que cada grupo prioriza uma região espectral diferente, variando entre as políticas de alocação espectral *first fit* e *last fit*.

Os autores em [Liu et al. 2020] apresentaram uma estratégia *XT-avoid* e outra

*XT-aware*. A estratégia *XT-avoid*, denominada *crosstalk avoidance strategy* (CAS), particiona o espectro em grupos onde núcleos adjacentes possuem áreas de priorização diferentes. Já a estratégia *XT-aware*, denominada *inter-core XT-aware algorithm* (ICXTAA), verifica o *crosstalk* para o bloco de *slots* do caminho óptico candidato e dos caminhos ópticos já ativos na rede. Para isso, o ICXTAA rotula os blocos de *slots* candidatos com o nível de *crosstalk* do *slot* mais afetado (por *crosstalk*) dentro do bloco (ou o *slot* do núcleo adjacente mais afetado por *crosstalk*). Então, o ICXTAA seleciona o bloco de *slots* que é contíguo, contínuo, situado na região de prioridade definida pela estratégia CAS e com um nível de *crosstalk* (baseado nos rótulos do ICXTAA) menor que o limite de *crosstalk* estabelecido para a rede.

Em [Araujo et al. 2021] é proposto o algoritmo de distanciamento espectral inter-núcleos (ADEIN). Com o objetivo de evitar o *crosstalk*, o ADEIN realiza um balanceamento no uso dos recursos através do uso de um sistema de pontuação e divisão de grupos de prioridades. Tal sistema de pontuação consiste na criação de uma tabela atualizada a cada alocação de um novo caminho óptico, onde tal tabela serve como referência para a escolha dos futuros caminhos ópticos candidatos.

**Tabela 1. Comparação entre algoritmos de alocação de recursos em SDM-EONs.**

Referência	Avaliação do XT	Tipo de Tráfego	Nº de Núcleos
[Fujii et al. 2014]	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7, 12 e 19
[Tode and Hirota 2017]	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7
[Klinkowski and Zalewski 2019]	<i>XT-aware</i>	dinâmico	3, 7 e 12
[Lobato et al. 2019]	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7
[Lacerda-Jr et al. 2020]	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7
[Liu et al. 2020]	<i>XT-avoid</i> e <i>XT-aware</i>	dinâmico	7 e 19
[Moghaddam et al. 2020]	<i>XT-aware</i>	estático	3 e 7
[Tang et al. 2020]	<i>XT-aware</i>	estático	7 e 19
[Araujo et al. 2021]	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7
[Takeda et al. 2022]	<i>XT-aware</i>	estático	3, 7 e 19
[Ravipudi and Brandt-Pearce 2023]	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7 e 12
[Lacerda-Jr et al. 2024]	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7

A Tabela 1 apresenta uma síntese de trabalhos que investigam a alocação de recursos em SDM-EON. Alguns destes trabalhos realizam a avaliação de desempenho através de uma matriz de tráfego estático, enquanto outros geram chegadas e encerramento de novas requisições dinamicamente. O número de núcleos por fibra varia entre os trabalhos, porém, de modo geral, a fibra de sete núcleos é a mais investigada na literatura. Neste sentido, o escopo deste artigo engloba fibras de sete núcleos (estando assim em conformidade com a literatura), tráfego dinâmico e estratégias *XT-avoid*.

### 3. Modelagem e Limitações do Sistema

Devido as limitações da camada física da rede, a QoT do caminho óptico se degrada enquanto o sinal se propaga ao longo da fibra e nos equipamentos da rede. Neste artigo são considerados três fatores limitadores de desempenho pela camada física: *i*) o ruído de emissão espontânea amplificada (*amplified spontaneous emission* - ASE); *ii*) as interferências não-lineares (*nonlinear interference* (NLI)); e *iii*) o *crosstalk* inter-núcleo.

Diferente do *crosstalk* que ocorre entre núcleos (inter-núcleo), o ruído ASE e os NLIs ocorrem dentro de um mesmo núcleo (intra-núcleo). O ruído ASE ocorre no processo de amplificação óptica, que geralmente é realizada por amplificadores de fibra dopada com érbio (*erbium doped fiber amplifier* - EDFA) [Yan et al. 2015]. Os NLIs se manifestam devido à propagação ao longo da fibra óptica, fazendo com que um caminho óptico cause interferência em si mesmo (*self-phase modulation* - SPM) e também em outros caminhos ópticos, através da modulação de fase cruzada (*cross-phase modulation* - XPM) e mistura de quatro ondas (*four-wave mixing* - FWM). Neste artigo, o modelo apresentado em [Poggiolini and Jiang 2017], que é baseado em um modelo de ruído Gaussiano aprimorado (*enhanced Gaussian-noise* - EGN) [Carena et al. 2014], é usado para calcular a densidade espectral de potência (*power spectral density* - PSD) dos NLIs (SPM, XPM e FWM).

Uma maneira de medir os níveis de QoT da rede é por meio da relação sinal-ruído óptico (*optical signal to noise ratio* - OSNR). A OSNR estabelece uma relação entre a PSD do caminho óptico e a PSD do ruído ASE e da NLI que o afeta. A OSNR é usada como um dos critérios de QoT neste artigo e é dada por

$$OSNR_m = \frac{G_m}{G_m^{ASE} + G_m^{NLI}}, \quad (1)$$

onde  $G_m$  é a PSD do sinal usado no caminho óptico  $m$ .  $G_m^{ASE}$  é a PSD total de ruído ASE gerado por todos os EDFAs usados pelo caminho óptico  $m$ .  $G_m^{NLI}$  é a PSD total dos efeitos não lineares que afetam o caminho óptico  $m$ . Por limitações na quantidade de páginas deste artigo, as equações do cálculo de  $G_m^{ASE}$  e  $G_m^{NLI}$  não são apresentados. Entretanto, estas equações podem ser encontradas em [Habibi and Beyranvand 2019].

Outro importante limitador em uma SDM-EON, considerado como segundo critério de QoT neste artigo, é o *crosstalk* inter-núcleos [Hayashi et al. 2011]. Em [Lobato et al. 2019] é apresentado um modelo para mensurar a potência média de *crosstalk* (normalizada pela potência de sinal do caminho óptico) em um determinado caminho óptico  $m$ . Esta potência normalizada média de *crosstalk* é dada por

$$XT_{\mu,m}^{(tot)} = \sum_{e=1}^{|E_m|} XT_{\mu,m,e}, \quad (2)$$

em que  $|E_m|$  é a quantidade de enlaces que compõem o caminho óptico  $m$  e  $e$  é o índice que identifica um enlace deste conjunto.  $XT_{\mu,m,e}$  é a potência normalizada média de *crosstalk* gerada no enlace  $e$  do caminho óptico  $m$  dada por [Lobato et al. 2019]

$$XT_{\mu,m,e} = \frac{P_{XT_{m,e}}}{P_m}, \quad (3)$$

onde  $P_{XT_{m,e}}$  é a potência média de *crosstalk* (não normalizada) do caminho óptico  $m$  gerada no enlace  $e$  e  $P_m$  corresponde à potência de sinal do caminho óptico  $m$ . O valor de  $P_{XT_{m,e}}$  é calculado por [Lobato et al. 2019]

$$P_{XT_{m,e}} = \sum_{n=1}^{N_{m,e}} (I_{SO_{m,e,n}} \cdot P_n \cdot h_e \cdot L_e), \quad (4)$$

em que  $N_{m,e}$  é a quantidade de caminhos ópticos alocados em núcleos adjacentes ao núcleo do caminho óptico  $m$ , que utilizam a mesma fração do espectro (em todo ou em parte) do caminho óptico  $m$  no enlace  $e$  e  $n$  é o índice que identifica o caminho óptico interferente.  $P_n$  é a potência de sinal do  $n$ -ésimo caminho óptico adjacente de  $N_{m,e}$  caminhos ópticos possíveis,  $L_e$  é o comprimento do enlace  $e$  e  $h_e$  representa o coeficiente de acoplamento de potência da fibra.  $I_{SO_{m,e,n}}$  é o índice de sobreposição de *slots* entre os caminhos ópticos  $m$  e  $n$  no enlace  $e$ , dado por [Lobato et al. 2019]

$$I_{SO_{m,e,n}} = \frac{S_{SO_{m,e,n}}}{S_{e,n}}. \quad (5)$$

onde  $S_{SO_{m,e,n}}$  é a quantidade de *slots* sobrepostos entre os caminhos ópticos  $m$  e  $n$  no enlace  $e$ , isto é, quantos dos *slots* do caminho óptico  $m$  possuem *slots* de mesmo índice alocados no caminho óptico  $n$  (desconsiderando banda de guarda) no enlace  $e$ , e  $S_{e,n}$  é a quantidade de *slots* do caminho óptico  $n$  no enlace  $e$ .

Neste artigo, a QoT é avaliada através do impacto dos efeitos intra e inter núcleo (OSNR e *crossstalk*). Para cada caminho óptico retornado por um algoritmo RMCSA, deve-se verificar se o seu nível de OSNR e *crossstalk* está de acordo com os limites de OSNR e *crossstalk* definidos pelo SLA da rede. Caso contrário, a requisição é bloqueada. Os níveis de QoT também são verificados para os caminhos ópticos já ativos na rede e o impacto sofrido por eles com a chegada de um novo caminho óptico. Se tal impacto afetar algum dos caminhos ópticos já ativos de tal forma que a sua QoT descumpra o limite estabelecido, o novo caminho óptico não pode ser alocado (bloqueio de requisição). Os limites de OSNR e *crossstalk* adotados neste artigo estão listados na Tabela 3 da Seção 5.

#### 4. Algoritmo Proposto

Neste artigo é proposto o algoritmo para mitigação de fragmentação e *crossstalk* (AMIFRAC) em redes SDM-EON multi-núcleos. O AMIFRAC é proposto para a alocação de núcleo e espectro, usa uma estratégia *XT-avoid* e é baseado em dois pilares: reduzir o *crossstalk* inter-núcleos e a fragmentação espectral.

Para reduzir a ocorrência de *crossstalk*, o AMIFRAC define que núcleos vizinhos devem priorizar regiões do espectro distintas. Neste sentido, os núcleos 1, 3, e 5 (não adjacentes entre si) adotam a política de alocação espectral *first fit*. Já os núcleos 2, 4 e 6 adotam a política de alocação espectral *last fit*. O núcleo 0 (central) prioriza a região central do espectro, para evitar sobreposição espectral com os demais núcleos. Ao final desta Seção, a Figura 1 ilustra, entre outros fatores, a divisão das regiões priorizadas por cada núcleo. A eficiência desta estratégia de balanceamento já foi investigada em trabalhos anteriores [Lacerda-Jr et al. 2020, Lacerda-Jr et al. 2024].

Para reduzir a fragmentação espectral, o AMIFRAC classifica determinados núcleos da fibra para receber apenas caminhos ópticos que necessitem de um mesmo número de *slots* de frequência. Por exemplo, se o núcleo  $n_1$  do enlace  $e_1$  for destinado a receber apenas caminhos ópticos de 3 *slots*, o problema de fragmentação será mitigado para o espectro daquele núcleo do enlace  $e_1$ . Além disso, o espectro óptico estará mais “organizado”, pois as políticas *first fit* e *last fit* serão mais efetivas. Isso ocorre porque ao desalocar um caminho óptico, o bloco de *slots* livres originado desta desalocação será de tamanho exato ao exigido pelo próximo caminho óptico a ser alocado naquele núcleo.

Uma ideia similar foi apresentada para o algoritmo IAFF [Tode and Hirota 2017]. Entretanto, diferente do IAFF, o AMIFRAC classifica os núcleos de forma mais eficiente, além de implementar estratégias de mitigação de *crossstalk*. Uma comparação entre o AMIFRAC e o IAFF é apresentada na Seção 5.

No processo de classificação dos núcleos para mitigação de fragmentação, o AMIFRAC considera quantas vezes uma determinada quantidade de *slots* é solicitada e também o quão rápido este tipo de requisição aumenta a ocupação do núcleo, o que é medido através de um peso  $\Phi_{|s|}$ . Para isso, um vetor  $G = \{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6, G_7\}$  define sete grupos (um para cada núcleo), sendo que cada grupo (com exceção do  $G_7$ ) receberá apenas requisições com a mesma quantidade de *slots* de frequência. Os grupos de  $G_1$  a  $G_5$  guardam as requisições com ordem decrescente de  $\Phi_{|s|}$ . O grupo  $G_6$  guarda a requisição com menor  $\Phi_{|s|}$ . E, por fim, o grupo  $G_7$  guarda todas as requisições não classificadas nos grupos anteriores. A divisão dos grupos ocorre em ordem decrescente do peso  $\Phi_{|s|}$ , dado por

$$\Phi_{|s|} = T_{|s|} \cdot |s|, \quad (6)$$

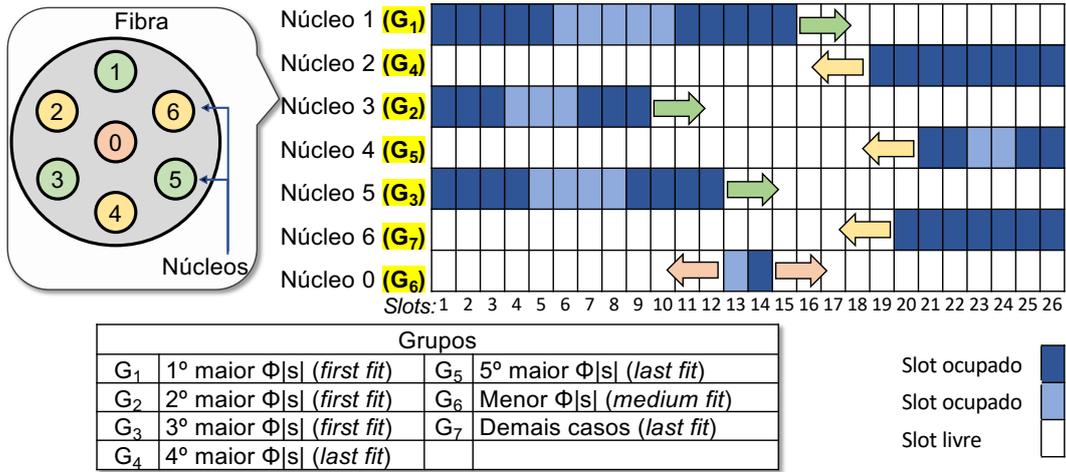
em que  $T_{|s|}$  é a taxa de ocorrência de requisições que necessitam de  $|s|$  *slots* de frequência e  $|s|$  é a quantidade de *slots* requeridos. O valor de  $T_{|s|}$  é definido a partir de uma série de simulações prévias, em que são observadas quantas vezes uma determinada quantidade de *slots* foi requisitada. Por exemplo, se caminhos ópticos de 3 *slots* compreenderem a 40% de todos os caminhos ópticos da rede, o valor de  $\Phi_{|3|} = 1,2$ , pois  $0,4 \times 3 = 1,2$ . Já se caminhos ópticos que possuam 2 *slot* compreenderem a 15% de todos os caminhos ópticos da rede, o valor de  $\Phi_{|2|} = 0,3$ , pois  $0,15 \times 2 = 0,3$ . Portanto, em outras palavras, o valor  $\Phi_{|s|}$  indica o quão rápido a utilização espectral aumenta para um determinado grupo de requisições (de acordo com históricos da rede).

**Tabela 2. Definição dos grupos a partir do Peso  $\Phi_{|s|}$ .**

Grupo	Quantidade de <i>slots</i> $ s $	Taxa de ocorrência $T_{ s }$	Peso $\Phi_{ s }$
$G_1$	5	0,189	0,944
$G_2$	3	0,214	0,643
$G_3$	4	0,158	0,631
$G_4$	8	0,069	0,548
$G_5$	2	0,256	0,512
$G_6$	1	0,044	0,044

A Tabela 2 apresenta a distribuição dos grupos do algoritmo AMIFRAC. Os valores de  $T_{|s|}$  foram obtidos a partir de uma série de simulações realizadas com os parâmetros adotados neste artigo. Tais parâmetros são apresentados na Seção 5. Além das quantidades de *slots* apresentadas na Tabela 2, também foram requisitados caminhos ópticos com 10 e 7 *slots*, apresentando taxas de ocorrência de 0,034 e 0,036 respectivamente. Neste caso, os caminhos ópticos com  $|s| = 10$  e  $|s| = 7$  serão destinados ao grupo  $G_7$ .

A Figura 1 apresenta um exemplo do funcionamento do AMIFRAC e como são definidos os grupos (com base na Tabela 2). As requisições com 5, 3 e 4 *slots* são as que possuem o maior  $\Phi_{|s|}$ , respectivamente (Tabela 2). Portanto as requisições com 5 *slots* comporão o  $G_1$  e serão alocadas no núcleo 1. As requisições com 3 *slots* comporão o  $G_2$



**Figura 1. Priorização espectral para o algoritmo AMIFRAC.**

e serão alocadas no núcleo 3. As requisições com 4 slots comporão o  $G_3$  e serão alocadas no núcleo 5. A alocação dos grupos  $G_1$ ,  $G_2$  e  $G_3$  em núcleos alternados (1, 3 e 5) é feita para evitar que os grupos mais requisitados fiquem em núcleos adjacentes, evitando assim a sobreposição espectral e o *crosstalk*. O grupo  $G_6$  é composto pelas requisições com o menor  $\Phi_{|s|}$  de todos e são sempre alocadas no núcleo central. A alocação de requisições com menor  $\Phi_{|s|}$  no núcleo 0 (central) é porque este núcleo é adjacente de todos os outros, portanto possui um maior potencial para causar e sofrer *crosstalk*. Todas as requisições não classificadas nos núcleos de  $G_1$  a  $G_6$ , irão compor o  $G_7$  e serão alocadas no núcleo 6.

## 5. Avaliação de Desempenho

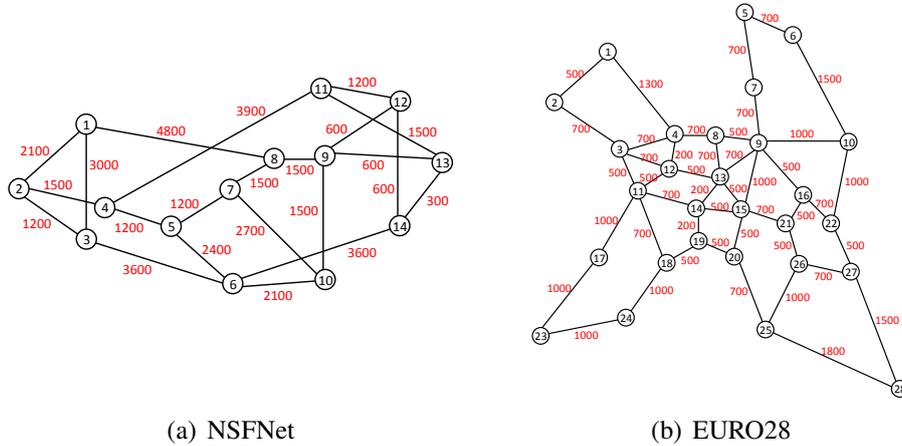
Para a avaliação de desempenho deste trabalho é utilizada a técnica de simulação computacional, com uso do simulador SNetS [Fontinele et al. 2017]. São geradas 100.000 requisições em cada simulação. A geração de requisições é um processo de *Poisson* com taxa média de  $\lambda$  e o tempo médio de retenção dos caminhos ópticos é distribuído exponencialmente com média  $1/\mu$ . A carga de tráfego é distribuída uniformemente entre todos os pares de nós origem e destino. São geradas requisições de 100, 200, 300 e 400 Gbps, seguindo a proporção de chegadas de 4, 3, 2, 1, respectivamente. Isto é, para cada requisição solicitando uma taxa de bits de 400Gbps, surgem quatro requisições solicitando uma taxa de bits de 100 Gbps. A carga, em Erlangs, pode ser definida por  $\rho = \lambda/\mu$ . Para cada cenário de avaliação são realizadas cinco simulações (replicações) com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados apresentados possuem nível de confiança de 95%. Este artigo considera cinco formatos de modulação, sendo eles: 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM e 64-QAM. Os limites de OSNR por símbolo e de *crosstalk* são apresentados na Tabela 3 [Lacerda-Jr et al. 2024].

**Tabela 3. Limites dos formatos de modulação [Lacerda-Jr et al. 2024].**

Limite	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
OSNR (dB)	8,95	13,15	15,49	18,51	21,28
XT (dB)	-19,03	-23,23	-25,57	-28,59	-31,36

Nos cenários simulados, cada fibra possui sete núcleos. Cada núcleo é dividido

em 320 *slots* de frequência, em que cada *slot* possui 12,5 GHz. Entre cada caminho óptico existe uma banda de guarda de largura de banda de um *slot*. Os ganhos dos amplificadores são ajustados para compensar as perdas dos dispositivos e da fibra. As topologias utilizadas são a NSFNet e a EURO28, mostradas na Figura 2.



**Figura 2. Topologias com os comprimentos dos enlaces em km.**

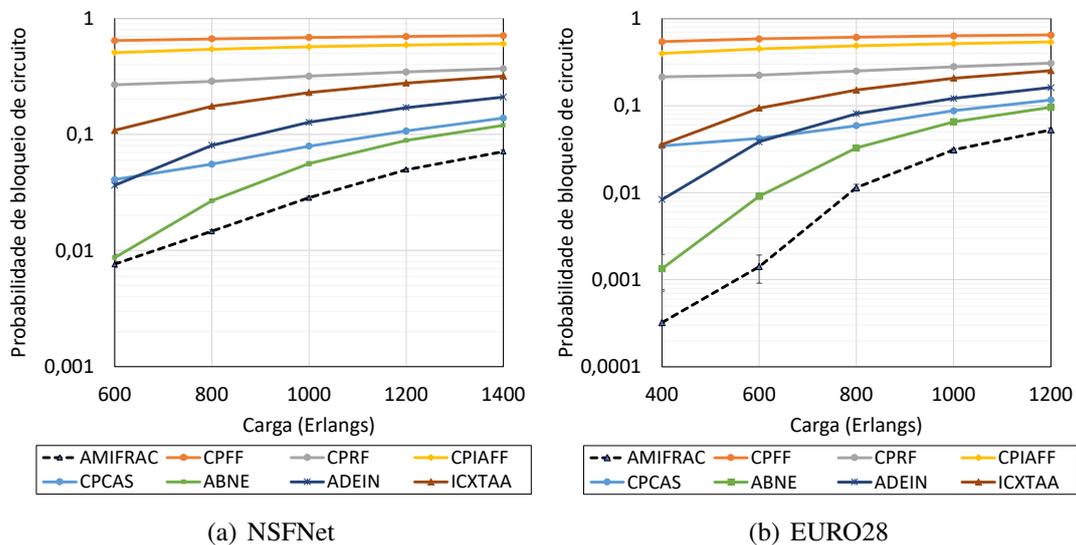
Outros parâmetros utilizados nas simulações estão listados na Tabela 4 [Beyranvand and Salehi 2013, Zhao et al. 2015, Lobato et al. 2019].

**Tabela 4. Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.**

Descrição	Valor
Atenuação da fibra ( $\alpha$ )	0,2 dB/km
Coefficiente não linear da fibra ( $\gamma$ )	$1,3 (W \cdot km)^{-1}$
Coefficiente de acoplamento de potência ( $h_e$ )	$6,4 \times 10^{-9} m^{-1}$
Dispersão de velocidade de grupo da fibra ( $\beta_2$ )	-20 ps <sup>2</sup> /km
Figura de ruído do amplificador ( $N_F$ )	5 dB
Frequência óptica ( $\nu$ )	193 THz
Parâmetro de dispersão da fibra ( $D$ )	16 ps/nm/km
Perda do nó ( $W_n$ )	15 dB
Sobrecarga FEC ( $F$ )	25%
Tamanho de um <i>span</i> ( $L_s$ )	80 km

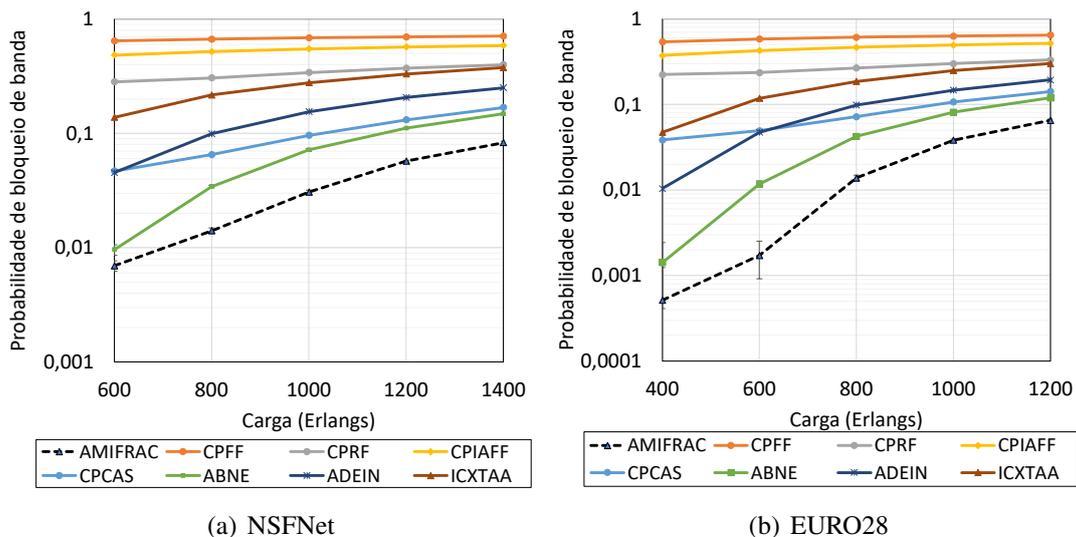
Por tratar-se de um algoritmo *XT-avoid*, o AMIFRAC é comparado com outros sete algoritmos *XT-avoid*, sendo eles: *i*) o algoritmo CP [Fujii et al. 2014] para a escolha de núcleo em conjunto com o algoritmo *first fit* para escolha de espectro, denominado CPFF; *ii*) o algoritmo CP [Fujii et al. 2014] para a escolha de núcleo em conjunto com o algoritmo *random fit* para escolha de espectro, denominado CPRF; *iii*) o algoritmo CP [Fujii et al. 2014] para a escolha de núcleo em conjunto com o algoritmo IAFF [Tode and Hirota 2017] para escolha de espectro, denominado CPIAFF; *iv*) o algoritmo CP [Fujii et al. 2014] para a escolha de núcleo em conjunto com o algoritmo CAS [Liu et al. 2020] para escolha de espectro, denominado CPCAS; *v*) o algoritmo ABNE [Lacerda-Jr et al. 2020]; *vi*) o algoritmo ADEIN [Araujo et al. 2021]; e *vii*) o algoritmo ICXTAA [Liu et al. 2020]. A escolha da rota em todos os algoritmos é realizada pelo algoritmo de Dijkstra [Dijkstra 1959]. A partir da definição de rota, o formato de modulação

espectralmente mais eficiente é selecionado considerando os limites de OSNR. Todos os algoritmos são avaliados através das métricas: probabilidade de bloqueio de circuito (PBC), probabilidade de bloqueio de banda (PBB) e utilização de espectro (UE).



**Figura 3. Probabilidade de bloqueio de circuito.**

A Figura 3 apresenta os resultados em termos de probabilidade de bloqueio de circuito. O algoritmo AMIFRAC obteve uma menor PBC comparado a todos os outros algoritmos nas duas topologias avaliadas. Tal resultado indica que o AMIFRAC é capaz de atender mais requisições em relação aos demais algoritmos, nas mesmas condições de tráfego. Tal desempenho ocorre porque o AMIFRAC implementa mecanismos que se mostram eficientes para reduzir a ocorrência de *crossstalk* e de fragmentação espectral.



**Figura 4. Probabilidade de bloqueio de banda.**

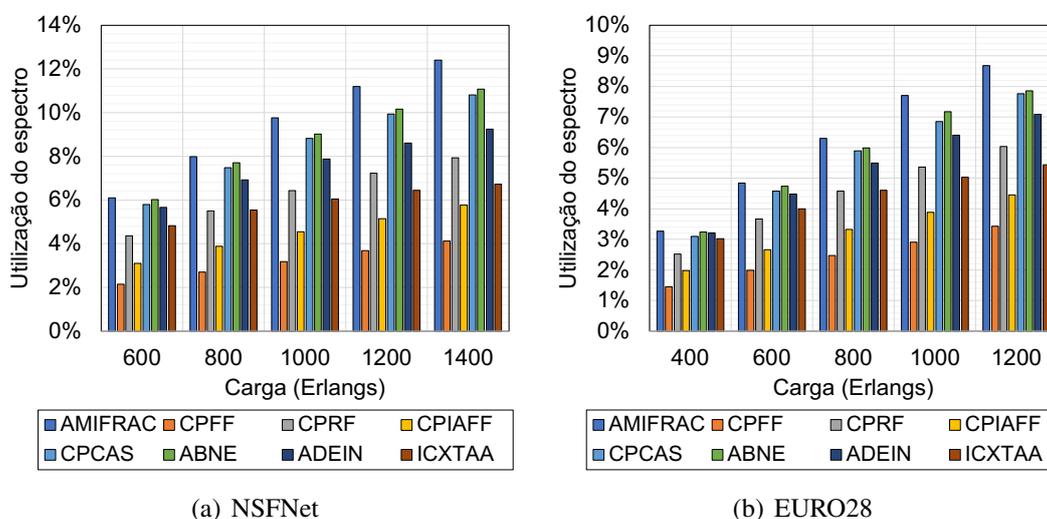
A Figura 4 apresenta os resultados em termos de PBB. Assim como a PBC, a métrica de PBB indica um melhor desempenho do AMIFRAC comparado aos demais

algoritmos nas duas topologias avaliadas. Este resultado mostra que o AMIFRAC garante que menos dados são bloqueados na rede. Em outras palavras, os resultados indicam que o AMIFRAC garante que mais tráfego pode ser transportado na rede. Para avaliar o desempenho da proposta em relação aos demais algoritmos, a Tabela 5 apresenta o ganho do AMIFRAC, em termos de PBC e PBB, no último ponto de carga de cada cenário.

**Tabela 5. Ganho do AMIFRAC em relação a outros algoritmos no maior ponto de carga das duas topologias avaliadas.**

Algoritmo	PBC (NSFNet) 1400 Erlangs	PBC (EURO28) 1200 Erlangs	PBB (NSFNet) 1400 Erlangs	PBB (EURO28) 1200 Erlangs
CPFF	89,96%	91,86%	88,31%	89,90%
CPRF	80,69%	82,84%	79,16%	80,33%
CPIAFF	88,21%	90,20%	85,85%	87,38%
CPCAS	48,50%	54,57%	50,71%	53,95%
ABNE	40,45%	44,77%	43,95%	45,30%
ADEIN	65,97%	67,38%	66,90%	66,27%
ICXTAA	77,65%	79,16%	77,91%	78,28%

O ganho do AMIFRAC é calculado por  $G = (R_n - R_m)/R_n$ , onde  $R_m$  é o resultado (PBC ou PBB) do AMIFRAC e  $R_n$  é o resultado (PBC ou PBB) dos concorrentes avaliados (CPFF, CPRF, CPIAFF, CPCAS, ABNE, ADEIN e ICXTAA). De acordo com a Tabela 5, observa-se que o AMIFRAC obteve um ganho mínimo de PBC de 40,45% na topologia NSFNet e de 44,77% na topologia EURO28, em ambos os casos comparado com o algoritmo ABNE. No melhor caso de PBC, o AMIFRAC atingiu um ganho de 89,96% em relação ao algoritmo CPFF na topologia NSFNet e 91,86% em relação ao algoritmo CPFF na topologia EURO28. Em relação a PBB, o AMIFRAC obteve um ganho mínimo de 43,95% na topologia NSFNet e de 45,30% na topologia EURO28. No melhor caso de PBB, o AMIFRAC atingiu um ganho de 88,31% em relação ao algoritmo CPFF na topologia NSFNet e 89,90% em relação ao algoritmo CPFF na topologia EURO28.



**Figura 5. Utilização do espectro.**

A Figura 5 apresenta as informações sobre a utilização do espectro dos algoritmos. Esta métrica é definida como a razão entre o número de *slots* de frequência alocados e o número total de *slots* de frequência da rede. Neste artigo, o formato de modulação espectralmente mais eficiente é escolhido para cada um dos algoritmos avaliados. Portanto, neste contexto, uma maior UE significa uma melhor gestão dos recursos da rede [Lobato et al. 2019, Walkowiak et al. 2020]. Neste sentido, o AMIFRAC obteve a maior utilização espectral dos cenários avaliados. O AMIFRAC obteve 7,04% a mais de utilização espectral que o segundo melhor algoritmo (ABNE) na topologia NSFNet (considerando a média dos cinco pontos de carga). Já na topologia EURO28, o AMIFRAC obteve 5,30% a mais de utilização espectral que o segundo melhor algoritmo (ABNE). Já em relação ao CPPF (menor utilização espectral), o AMIFRAC obteve um aumento média de UE de 198,12% na topologia NSFNet e 148,41% na topologia EURO28. Considerando o uso do formato de modulação mais espectralmente eficiente possível por todos os algoritmos e a mesma carga na rede, estes resultados mostram que o AMIFRAC é capaz de lidar de forma mais eficiente com o espectro óptico, reduzindo recursos ociosos e atendendo mais clientes (ou clientes com uma maior demanda de taxa de bits).

## 6. Conclusão

Neste artigo o algoritmo AMIFRAC foi proposto para alocação de núcleo e espectro em redes ópticas elásticas multi-núcleos. O AMIFRAC é comparado com outros sete algoritmos da literatura e obteve o melhor desempenho na topologia NSFNet e EURO28. Os resultados numéricos mostram que: o AMIFRAC atinge um ganho em termos de PBC de pelo menos 40,45% em relação ao segundo melhor algoritmo; um ganho em termos de PBB de pelo menos 43,95% em relação ao segundo melhor algoritmo; e um aumento de utilização espectral de pelo menos 5,30% em relação ao segundo melhor algoritmo. Tais resultados indicam que os mecanismos de alocação espectral do AMIFRAC são eficientes nos cenários avaliados pois conseguem reduzir o *crossstalk* e a fragmentação espectral.

Em trabalhos futuros pretende-se investigar o problema de alocação de recursos em SDM-EON considerando o problema de roteamento. Além disso, pretende-se expandir a avaliação de desempenho considerando métricas específicas de fragmentação, como a fragmentação externa ou entropia de Shannon.

## Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com apoio parcial do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI) e da Fundação para a Ciência e Tecnologia/Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (FCT/MCTES) no âmbito do Projeto UIDB/50008/2020.

## Referências

- Araujo, P., Lacerda-Jr, J., and Soares, A. (2021). Um novo algoritmo de balanceamento espectral entre grupos de núcleos para redes Ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. In *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Uberlândia, MG, Brasil.
- Beyranvand, H. and Salehi, J. (2013). A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 31(18):3043–3054.

- Brasileiro, I., Costa, L., and Drummond, A. (2020). A survey on challenges of spatial division multiplexing enabled elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, 38:100584.
- Carena, A., Bosco, G., Curri, V., Jiang, Y., Poggiolini, P., and Forghieri, F. (2014). Egn model of non-linear fiber propagation. *Optics Express*, 22(13):16335–16362.
- Chatterjee, B., Sarma, N., and Oki, E. (2015). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(3):1776 – 1800.
- Dijkstra, E. (1959). *A note on two problems in connexion with graphs*, volume 1. Numerische Mathematik.
- Fadini, W. and Oki, E. (2014). A subcarrier-slot partition scheme for wavelength assignment in elastic optical networks. In *2014 IEEE 15th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, pages 7–12.
- 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.
- Habibi, M. and Beyranvand, H. (2019). Impairment-aware manycast routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 11(5):179–189.
- Hayashi, T., Taru, T., Shimakawa, O., Sasaki, T., and Sasaoka, E. (2011). Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber. *Optics Express*, 19:16576–16592.
- Klinkowski, M. and Zalewski, G. (2019). Dynamic crosstalk-aware lightpath provisioning in spectrally-spatially flexible optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 11(5):213–225.
- 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 XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Lacerda-Jr, J. C., Cartaxo, A. V., and Soares, A. C. (2024). Novel dynamic impairment-aware algorithm for modulation, core, and spectrum assignment in SDM-EONs. *Optical Switching and Networking*, 51:100763.
- 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. R., Jacob, A., Rodrigues, J., Cartaxo, A. V., 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*, 33:61–73.

- 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. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 38(6):1095–1102.
- Muhammad, A., Zervas, G., and Forchheimer, R. (2015). Resource allocation for space-division multiplexing: Optical white box versus optical black box networking. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 33(23):4928–4941.
- Poggiolini, P., Bosco, G., Carena, A., Curri, V., Jiang, Y., and Forghieri, F. (2015). A simple and effective closed-form gn model correction formula accounting for signal non-gaussian distribution. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 33(2):459–473.
- Poggiolini, P. and Jiang, Y. (2017). Recent advances in the modeling of the impact of nonlinear fiber propagation effects on uncompensated coherent transmission systems. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 35(3):458–480.
- Ravipudi, J. L. and Brandt-Pearce, M. (2023). Impairment- and fragmentation-aware, energy-efficient dynamic RMSCA for SDM-EONs. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 15(9):D10–D22.
- Rosa, A., Cavdar, C., Carvalho, S., Costa, J., and Wosinska, L. (2012). Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks. In *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, pages 242–246.
- Sillard, P. (2011). New fibers for ultra-high capacity transport. *Optical Fiber Technology*, 17(5):495–502. 100G and Beyond.
- Takeda, K., Sato, T., Chatterjee, B. C., and Oki, E. (2022). Joint inter-core crosstalk- and intra-core impairment-aware lightpath provisioning model in space-division multiplexing elastic optical networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, pages 1–15.
- Tang, F., Li, Y., Shen, G., and Rouskas, G. N. (2020). Minimizing inter-core crosstalk jointly in spatial, frequency, and time domains for scheduled lightpath demands in multi-core fiber-based elastic optical network. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 38(20):5595–5607.
- Tode, H. and Hirota, Y. (2017). Routing, spectrum, and core and/or mode assignment on space-division multiplexing optical networks [invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 9(1):A99–A113.
- Walkowiak, K., Klinkowski, M., Włodarczyk, A., and Kasprzak, A. (2020). Predeployment of transponders for dynamic lightpath provisioning in translucent spectrally–spatially flexible optical networks. *Applied Sciences*, 10(8).
- Yan, L., Agrell, E., Wymeersch, H., Johannisson, P., Taranto, R. D., 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 resource allocation in elastic optical networks. In *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–3.