

# Um Novo Algoritmo Ciente de Crosstalk para Alocação de Núcleo e Espectro em Redes Ópticas Elásticas Multi-Núcleos

Jurandir C. Lacerda Jr<sup>1,2</sup>, Adolfo V. T. Cartaxo<sup>3</sup>, André C. B. Soares<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação em associação UFMA/UFPI  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
Teresina-PI, Brasil

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

<sup>3</sup>Instituto de Telecomunicações, Departamento de Ciências e Tecnologias da  
Informação (DCTI), Iscte - Instituto Universitário de Lisboa  
Lisboa, Portugal

jurandir.cavalcante@ifpi.edu.br

**Abstract.** *Spatial-Division Multiplexing Elastic Optical Network (SDM-EONs) are considered as technology to provide Internet data communication. This paper proposes a crosstalk-aware algorithm for core and spectrum allocation in SDM-EONs, called ACiNE. ACiNE chooses spectral slices with a lower crosstalk value and in a balanced way, thus obtaining better efficiency when compared to other works in the literature. In this context, ACiNE achieved gains of at least 45.62% in terms of circuit blocking probability, at least 37.95% in terms of blocked data ratio and 7.19% of energy efficiency. In addition, ACiNE has less runtime when compared to another crosstalk-aware algorithm.*

**Resumo.** *As redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão de espacial (SDM-EONs) são apontadas como tecnologia para prover comunicação no núcleo da Internet. Este artigo propõe o Algoritmo Ciente de Crosstalk para Alocação de Núcleo e Espectro (ACiNE) em SDM-EONs. O ACiNE escolhe faixas espectrais com menor valor de crosstalk e de forma balanceada, obtendo melhor eficiência quando comparado a outros trabalhos da literatura. Neste contexto, o ACiNE obteve ganhos de pelo menos 45,62% em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, 37,95% em termos de razão de dados bloqueados e 7,19% de eficiência energética. Além disso, o ACiNE possui menor tempo de execução quando comparado a outro algoritmo ciente de crosstalk.*

## 1. Introdução

O crescimento do número de usuários, somado ao surgimento de novas aplicações têm causado um aumento no tráfego de dados na Internet. Para suportar tal demanda, novas tecnologias de comunicação devem ser aprimoradas. As redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Network* - EON) [Jinno et al. 2009] são apontadas como uma solução promissora para compor a infraestrutura da rede de transporte. As EONs possuem alta taxa de transmissão e eficiência na alocação dos recursos ópticos [Brasileiro et al. 2020].

Nas EONs, o espectro óptico é dividido em porções espectrais chamadas de *slots* de frequência. Para ativar um novo circuito óptico, deve-se alocar um conjunto de *slots*

de frequência para atender a demanda por banda exigida por este novo circuito. As redes ópticas elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial (*Spatial-Division Multiplexing Elastic Optical Network* - SDM-EONs) podem utilizar fibras multi-núcleos (*Multi-Core Fiber* - MCF) para aumentar a capacidade. Neste caso, o espectro óptico é dividido em diversos núcleos, onde cada núcleo possui seu próprio domínio espectral e atua como uma fibra de modo único [Oliveira and da Fonseca 2020]. Esta característica acrescenta uma capacidade de atender mais clientes na rede de forma simultânea. Entretanto, o uso de uma SDM-EON apresenta muitos desafios [Brasileiro et al. 2020]. Um desses desafios é o *crosstalk* inter-núcleos (XT) [Hayashi et al. 2011] [Fujii et al. 2014], que consiste em um tipo de interferência que diminui a qualidade de transmissão quando os mesmos *slots* de frequência são usados por núcleos vizinhos.

Para que um novo circuito óptico seja alocado em uma SDM-EON, deve-se resolver o problema de roteamento, escolha de formato de modulação, alocação de núcleo e alocação de espectro (*Routing, Modulation, Spectrum, and Core Allocation* - RMSCA) [Brasileiro et al. 2020]. O problema RMSCA pode ser subdividido em: *i*) roteamento, em que dado uma origem  $s$  e um destino  $d$  na rede, deve-se escolher um caminho  $r$  que conecte  $s$  e  $d$ ; *ii*) Escolher um formato de modulação para a nova conexão. A modulação é a forma de codificação das informações digitais em sinais que representam os *bits* [Tanenbaum and Wetherall 2011]; *iii*) escolher qual dos núcleos da fibra óptica será alocado para o novo circuito; e *iv*) a partir da determinação de qual núcleo será utilizado, escolher o conjunto de *slots* de frequência que serão utilizados pela nova conexão.

No momento de alocação espectral, duas restrições devem ser obedecidas [Chatterjee et al. 2015]: *i*) contiguidade espectral, que exige que todos os *slots* de frequência que fazem parte de uma conexão óptica sejam adjacentes; e *ii*) continuidade espectral, que determina que os índices dos *slots* de frequência usados em um enlace devem ser os mesmos em todos os enlaces do caminho  $r$ . Devido a estas restrições somado ao fator dinâmico da rede, em que circuitos são alocados e finalizados, pequenas lacunas de *slots* de frequência livres podem surgir de forma isolada no espectro. Este problema é conhecido como fragmentação e pode bloquear uma nova conexão caso não exista *slots* contíguos e contínuos para ela.

Neste contexto, o objetivo deste artigo é propor um algoritmo de alocação de núcleo e espectro, ciente de XT, para redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. Como contribuição, o Algoritmo Ciente de *Crosstalk* para Alocação de Núcleo e Espectro (ACiNE) é proposto. O ACiNE realiza a alocação de recursos de modo a diminuir o impacto do XT entre os circuitos. A proposta provê eficiência em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, razão de dados bloqueados, eficiência energética e tempo de execução quando comparada a outros trabalhos da literatura.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 apresenta como o desempenho de uma SDM-EON é avaliado. O algoritmo proposto é apresentado na Seção 4. A Seção 5 apresenta a avaliação de desempenho da proposta. As conclusões deste artigo são apresentadas na Seção 6.

## 2. Trabalhos Relacionados

De forma geral, muitos trabalhos propõem soluções para o problema RMSCA [Brasileiro et al. 2020]. A sigla RMSCA pode sofrer variação a depender da referência.

Também é comum a literatura abordar o problema RMSCA sendo dividido em subproblemas, como o *Spectrum and Core Allocation* (SCA).

Os autores em [Fujii et al. 2014] propõem um método de alocação de núcleo e espectro que usa classificação de núcleos. Os autores apresentam uma política de priorização de núcleo (*Core Prioritization*) para reduzir o XT entre núcleos. Também é proposta uma estratégia para reduzir a fragmentação da rede.

Em [Tang et al. 2020] é proposta uma abordagem para alocar caminhos ópticos em núcleos MCF não adjacentes, para reduzir a interferência do XT entre esses caminhos ópticos. Para este fim, os autores criaram uma métrica para estimar o XT, considerando os domínios espacial, de frequência e de tempo. Também foi abordado o problema *Routing, Spectrum, Core, and Time Assignment* (RSCTA) para EONs multi-núcleos.

Os autores em [Lobato et al. 2019] propõem um algoritmo guloso, ciente de XT, para resolver o problema *Spectrum and Core Assignment* (SCA) para SDM-EONs. Tal algoritmo busca minimizar o impacto do XT tanto nos novos circuitos quanto nos circuitos já estabelecidas. Para isso, o algoritmo busca, no conjunto de soluções possíveis, o circuito candidato com valor de XT mais distante do limiar de XT estabelecido para a rede. Os autores também apresentaram uma nova forma de considerar a sobreposição dos *slots* de frequência no cálculo do XT.

Em [Lacerda Jr et al. 2020] é proposta uma solução que aloca núcleo e espectro de forma balanceada em SDM-EONs. A proposta, denominada de ABNE, busca alocar recursos espectrais usando variações das técnicas *first fit*, *last fit* e *medium fit* de forma a evitar sobreposição espectral entre núcleos vizinhos e, conseqüentemente, mitigar o efeito do XT. A proposta mostrou bom desempenho em termos de probabilidade de bloqueio e eficiência energética para SDM-EONs com sete núcleos. A Tabela 1 apresenta um agrupamento de trabalhos relacionados indicando algumas de suas características.

**Tabela 1. Comparação entre algoritmos para 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
[Yaghubi-Namaad et al. 2018]	<i>XT-avoid</i>	estático	7, 12 e 19
[Klinkowski and Zalewski 2019]	<i>XT-aware</i>	dinâmico	3, 7 e 12
[Moghaddam et al. 2020]	<i>XT-aware</i>	estático	3 e 7
[Lobato et al. 2019]	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7
[Tang et al. 2020]	<i>XT-aware</i>	estático	7 e 19
[Lacerda Jr et al. 2020]	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7

Em todos os trabalhos citados na Tabela 1 é recorrente o estudo do XT. Um algoritmo RMSCA pode ser ciente de XT (*XT-aware*), que usa valores de XT em tempo real para a tomada de decisão, ou *XT-avoid*, em que o algoritmo tenta evitar sobreposição de *slots* em núcleos adjacentes. A quantidade de núcleos usados em trabalhos da literatura pode variar, sendo mais comum o uso de fibras com 7 núcleos. Alguns trabalhos realizam a avaliação de desempenho através de uma matriz de tráfego estático, enquanto outros simulam chegadas e encerramento de requisições dinamicamente. O escopo deste artigo engloba redes com fibras de sete núcleos, *XT-aware* e considerando tráfego dinâmico. A

adoção destes cenários estão em consonância com a literatura de SDM-EONs.

O uso de uma estratégia *XT-aware* é mais eficiente para reduzir o XT quando comparada a uma estratégia *XT-avoid*. Tal eficiência é atrelada a uma maior complexidade computacional. Neste sentido, a principal contribuição deste artigo é a proposta de um algoritmo de alocação de recursos *XT-aware* que apresenta melhor desempenho comparado a outros algoritmos do estado da arte. Além de desempenho superior, outra contribuição é que a proposta apresenta um tempo de execução menor em relação a outro algoritmo *XT-aware*. Neste artigo, a proposta é comparada com dois algoritmos *XT-avoid* [Fujii et al. 2014] [Lacerda Jr et al. 2020] e um algoritmo *XT-aware* [Lobato et al. 2019].

### 3. Avaliação das Limitações da Camada Física em SDM-EONs

Devido a várias imperfeições da camada física, a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) do circuito se degrada enquanto o sinal se propaga ao longo da fibra. A amplificação óptica geralmente é realizada por amplificadores de fibra dopada com érbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier* - EDFA). Os EDFAs adicionam ruído de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* - ASE) [Yan et al. 2015]. Efeitos não-lineares também se manifestam devido à propagação ao longo da fibra óptica, fazendo com que um circuito óptico cause interferência em si mesmo (*Self-Phase Modulation* - SPM) e também em outros circuitos, através da modulação de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation* - XPM) e mistura de quatro ondas (*Four-Wave Mixing* - FWM).

Uma maneira de medir os níveis de QoT é por meio da relação sinal-ruído óptico (*Optical Signal to Noise Ratio* - OSNR). A OSNR estabelece uma relação entre a densidade espectral de potência (PSD) do circuito e a PSD do ruído e da interferência não linear que o afeta. A OSNR é usada como um critério de QoT neste artigo. O modelo apresentado em [Johannisson and Agrell 2014], [Yan et al. 2015] é usado para calcular a OSNR considerando os efeitos ASE, SPM, XPM e FWM.

Outra importante característica de uma SDM-EON é o *crosstalk* inter-núcleos (XT) [Hayashi et al. 2011]. O XT é um fenômeno que ocorre quando a mesma frequência (*slot*) é utilizada entre núcleos próximos. Quanto menor a distância entre os núcleos, maior o efeito do XT. Em [Lobato et al. 2019] é apresentada uma modelagem para mensurar a potência normalizada média de XT em um determinado circuito  $i$ . Esta potência normalizada média de XT é dada por:

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

em que  $N_i$  é a quantidade de enlaces  $l$  que compõem o circuito óptico  $i$  e  $XT_{\mu,i}^{(l)}$  é a potência normalizada média de XT gerada no enlace  $l$  do circuito  $i$  dada por

$$XT_{\mu,i}^{(l)} = \frac{P_{XTi}^{(l)}}{P_{Si}}, \quad (2)$$

onde  $P_{XTi}^{(l)}$  é a potência média de XT no enlace  $l$  e  $P_{Si}$  corresponde a potência do sinal do circuito  $i$ . O valor de  $P_{XTi}^{(l)}$  é calculado por

$$P_{XTi}^{(l)} = \sum_{j=1}^{J_i} (I_{SOij} \cdot P_{Sj} \cdot h_l \cdot L_l), \quad (3)$$

em que  $J_i$  é o número de circuitos alocados em núcleos adjacentes que utilizam o mesmo espectro do circuito  $i$  no enlace  $l$ ,  $P_{S_j}$  é a potência de sinal do circuito adjacente  $j$ ,  $h_l$  representa o coeficiente de acoplamento de potência da fibra (admitido o mesmo para todos os núcleos adjacentes),  $L_l$  é o comprimento do enlace  $l$ , e  $I_{SOij}$  é o índice de sobreposição de *slots* entre os circuitos  $i$  e  $j$ , dado por

$$I_{SOij} = \frac{N_{SOij}}{N_{S_j}} \quad (4)$$

onde  $N_{S_j}$  é a quantidade de *slots* do circuito  $j$  e  $N_{SOij}$  é a quantidade de *slots* sobrepostos entre  $i$  e  $j$ , isto é, quantos dos *slots* do circuito  $i$  possuem *slots* de mesmo índice alocados no circuito  $j$  (desconsiderando banda de guarda).

Tais interferências devem ser consideradas ao alocar um novo circuito em uma SDM-EON. Quando a SDM-EON recebe uma requisição para o estabelecimento de um novo circuito óptico, calcula-se uma rota entre o nó de origem ( $s$ ) e o nó de destino ( $d$ ) juntamente com o núcleo e o conjunto de *slots* a serem usados. Caso não existam recursos livres, a requisição será bloqueada. Existindo disponibilidade de recursos, o modelo de camada física analisa a QoT (através da OSNR) e o nível de XT para o circuito candidato. Caso a QoT do circuito candidato não esteja adequada, ocorrerá um bloqueio por ausência de QoT no novo circuito (QoTN). Caso contrário, será analisado o impacto da possível alocação deste circuito nos circuitos já estabelecidos. Se tal impacto afetar algum dos circuitos já estabelecidos de tal forma que a sua OSNR fique abaixo do limiar estabelecido, o novo circuito sofrerá um bloqueio por ausência de QoT para os outros circuitos (QoTO). Por fim, observa-se o XT para o circuito candidato. Caso o valor de XT seja aceitável, o circuito é estabelecido. Para avaliar se um determinado valor de OSNR ou XT é aceitável, verifica-se se o mesmo está de acordo com os seus limiares pré-estabelecidos de QoT. Tais limiares são listados na Tabela 2 da Seção 5.

#### 4. Algoritmo Proposto

Neste artigo é proposto o Algoritmo Ciente de *Crosstalk* para Alocação de Núcleo e Espectro (ACiNE). O ACiNE é um algoritmo do tipo *XT-aware* que busca alocar os novos circuitos com o menor valor de XT possível. Para isso, o ACiNE é dividido em duas fases: a fase de balanceamento e a fase de busca. O ACiNE agrupa os núcleos da fibra em sua primeira fase (balanceamento), em que cada grupo é composto por núcleos não-adjacentes, sendo que cada grupo deve priorizar a alocação de *slots* em uma determinada região espectral. Tal região de prioridade pode ser o início do espectro ou o final do espectro. Essa estratégia ocasiona um balanceamento na alocação espectral da rede, diminuindo a sobreposição entre *slots* de núcleos vizinhos e, conseqüentemente, a ocorrência de XT. O Algoritmo 1 apresenta um pseudo-código para a fase de busca do ACiNE.

Após definir as regiões de prioridade, o ACiNE percorre todas as opções de núcleo (com exceção do núcleo central) e todos os *slots* disponíveis, contíguos e contínuos de cada núcleo. Durante esse processo, o ACiNE armazena o circuito candidato com menor valor de XT. Um circuito candidato é formado por um núcleo e um conjunto de *slots*. Por fim, o ACiNE aloca, dentre os candidatos com menor nível de XT, aquele mais próximo da região de prioridade. Desta forma, o circuito candidato escolhido tem o menor valor de XT possível e é alocado numa região que minimiza a sobreposição espectral com

---

**Algoritmo 1 : ACiNE**

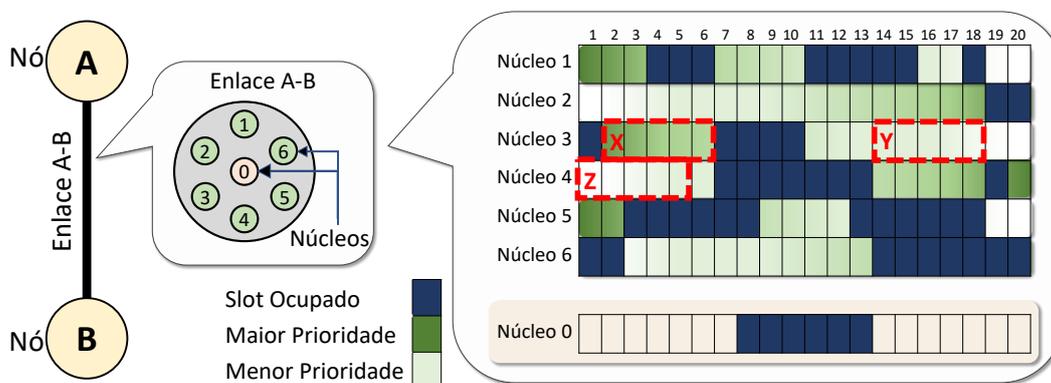
---

**Require:** Rota  $r$ , quantidade de *slots* requeridos  $req$ , regiões de prioridade

```
1: Criar as seguintes variáveis: melhor núcleo  $mN$ ; melhor espectro  $mS$ ; melhor XT  $mXT$ ;
   núcleo candidato  $n$ ; espectro candidato  $s$ ; XT candidato  $xt$ 
2: for Para cada núcleo  $n$  que não seja o núcleo central do
3:   for Para cada solução de espectro  $s$  disponível, contíguo e contínuo do
4:     Calcula  $xt$  para o candidato composto por  $n$  e  $s$ 
5:     if  $xt$  é aceitável considerando seu limiar de QoT then
6:       if ( $mN == null$ )&&( $mS == null$ )&&( $mXT == null$ ) then
7:          $mN \leftarrow n, mS \leftarrow s, mXT \leftarrow xt$ 
8:       end if
9:       if  $n \in (1, 3, 5)$  then
10:        if  $xt$  for menor que  $mXT$  then
11:           $mN \leftarrow n, mS \leftarrow s, mXT \leftarrow xt$ 
12:        end if
13:      end if
14:      if  $n \in (2, 4, 6)$  then
15:        if  $xt$  for menor ou igual que  $mXT$  then
16:           $mN \leftarrow n, mS \leftarrow s, mXT \leftarrow xt$ 
17:        end if
18:      end if
19:    end if
20:  end for
21: end for
22: if ( $mN == null$ )&&( $mS == null$ )&& (Núcleo 0 tem recursos disponíveis) then
23:   Calcula o  $s$  do núcleo 0 com menor valor de XT
24:    $mN \leftarrow 0, mS \leftarrow s$ 
25: end if
26: return  $mN, mS$ 
```

---

seus vizinhos. Durante este processo, o espectro óptico do núcleo central não é avaliado. Como o núcleo central possui a característica de produzir e sofrer interferência em todos os outros núcleos, o núcleo central será usado apenas quando a busca nos demais núcleos não retornar solução. Neste caso, o espectro escolhido no núcleo central será aquele com menor valor de XT. A Figura 1 representa um exemplo do funcionamento do ACiNE.



**Figura 1. Exemplo de funcionamento do algoritmo ACiNE.**

Neste exemplo é apresentada a chegada de uma requisição para um novo circuito entre o Nó  $A$  e o Nó  $B$ , usando o enlace  $A - B$ . A requisição necessita de cinco *slots* contíguos em algum dos sete núcleos do enlace  $A - B$ , dispostos de maneira hexagonal. Os núcleos 1, 3 e 5 têm como prioridade a alocação de circuitos com frequências menores (*slots* com índices menores). Já os núcleos 2, 4 e 6 priorizam as maiores frequências. O ACiNE analisa todas as possibilidades de alocação e verifica o nível de XT em cada uma delas. A Figura 1 mostra, como exemplo, três possíveis soluções:  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ . Em relação a estes três exemplos, verifica-se que  $Z$  não será selecionado pelo ACiNE. Isso ocorre pois a vizinhança de  $Z$  (*slots* 3, 4 e 5 ocupados no núcleo 5) proporciona a  $Z$  um maior nível de XT quando comparado a  $X$  e  $Y$ . Por outro lado, as possíveis soluções  $X$  e  $Y$  tem valores de XT mínimos por não ter sobreposições de *slots* entre os vizinhos. Neste caso, será alocado aquele que está localizado o mais próximo possível da sua região de prioridade. No exemplo, o circuito candidato  $X$  (núcleo 3 e *slots* 2-6) será escolhido e alocado pelo ACiNE. Como citado anteriormente, o núcleo 0 (central) só será utilizado quando os recursos dos demais núcleos se esgotarem. Neste caso, será escolhido a região do núcleo 0 com menor nível de XT.

Apesar de ser apresentado para uma fibra de sete núcleos, o ACiNE pode ser adaptado para fibras com outra quantidade de núcleos. Para isso, deve-se adequar as regiões de prioridades da fase de balanceamento. O ACiNE tem a sua complexidade computacional em função da quantidade de núcleos  $N$  da fibra e da quantidade de *slots*  $S$  do espectro. Como o ACiNE verifica todas as opções disponíveis, contíguas e contínuas do espectro, a sua complexidade computacional no pior caso é da ordem  $O(N \cdot S)$ .

## 5. Avaliação de Desempenho

Para o estudo de avaliação de desempenho deste trabalho, foi utilizado o simulador *SLICE Network Simulator* (SNetS) [Fontinele et al. 2017]. Para as simulações foram geradas 100.000 requisições de circuitos em cada simulação. A geração de requisições é um processo de *Poisson* com taxa média de  $\lambda$  e o tempo médio de retenção dos circuitos 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, 150, 200, 250, 300, 350 e 400 Gbps, seguindo a proporção de chegadas de 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, respectivamente. A carga, em Erlangs, pode ser definida por  $\rho = \lambda/\mu$ . Para cada cenário de avaliação foram realizadas 10 simulações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados possuem nível de confiança de 95%.

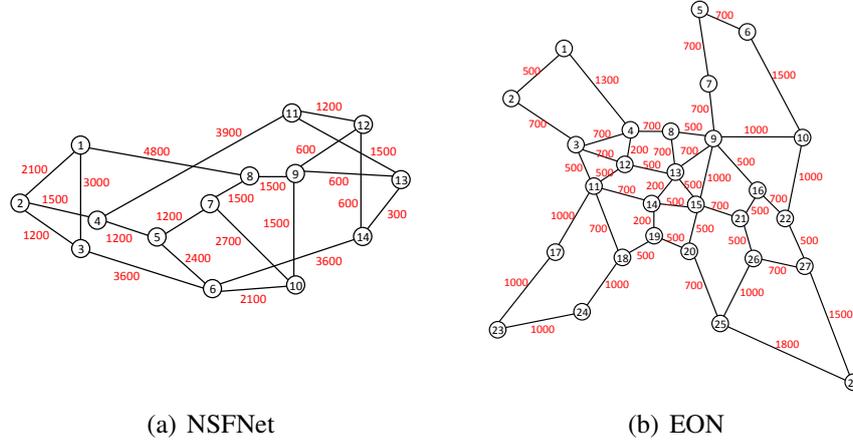
São usados cinco formatos de modulação, sendo eles: BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM e 32-QAM. A distância máxima suportada por cada formato de modulação, juntamente com seus respectivos limiares de OSNR por símbolo e de XT são apresentados na Tabela 2 [Gong et al. 2013], [Ives et al. 2015], [Moghaddam et al. 2020].

**Tabela 2. Parâmetros de modulação e limiares de OSNR e XT.**

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

A largura de banda do circuito  $i$ ,  $B_i$ , com uma determinada taxa de *bits* de

informação  $R_{b,i}$ , nível de modulação  $M$  (número de símbolos distintos do esquema de modulação) e sobrecarga FEC  $F$  é dada por:  $B_i = 1,1R_{b,i}(1 + F)/(2 \log_2 M)$  [Gao et al. 2014]. Assim, um número inteiro de *slots* deve ser atribuído para cobrir este espectro. As topologias consideradas nas simulações são a NSFNet e a EON (Figura 2).



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

No cenário simulado, cada fibra possui sete núcleos. Cada núcleo é dividido em 320 *slots* de frequência, em que cada *slot* possui 12,5 GHz. A banda de guarda possui largura de banda de um *slot*. Os ganhos dos amplificadores são ajustados para compensar as perdas dos dispositivos e da fibra. Outros parâmetros utilizados estão listados na Tabela 3 [Beyranvand and Salehi 2013], [Zhao et al. 2015], [Lobato et al. 2019].

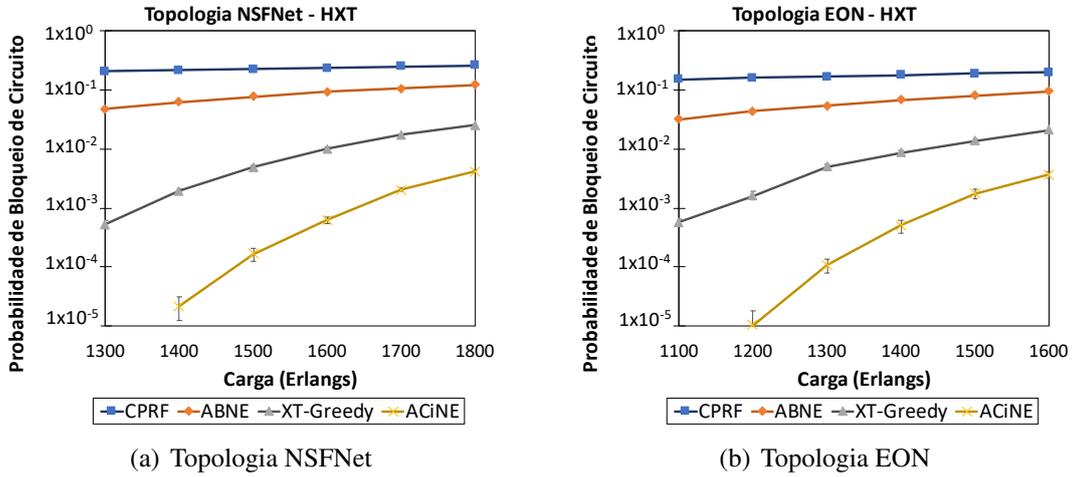
**Tabela 3. Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.**

Descrição	Valor
Atenuação da fibra ( $\alpha$ )	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra ( $D$ )	16 ps/nm/km
Coefficiente não linear da fibra ( $\gamma$ )	$1,3 (\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$
Tamanho de um <i>span</i> ( $L_s$ )	80 km
Figura de ruído do amplificador ( $NF$ )	5 dB
Coefficiente de acoplamento de potência ( $h_l$ )	$6,4 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ ou $1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$

Os algoritmos são avaliados em termos de probabilidade de bloqueio de circuito (PBC), razão de dados bloqueados (RDB) e eficiência energética. A PBC avalia quantos circuitos sofreram bloqueio em relação ao total de requisições. A RDB é dada por  $RDB = (\sum_{i(\text{circuitos bloqueados})} R_{b,i} \cdot T_i) / (\sum_{i(\text{circuitos requisitados})} R_{b,i} \cdot T_i)$ , onde  $R_{b,i}$  é a taxa de bits do  $i$ -ésimo circuito solicitado e  $T_i$  é o tempo de atendimento do  $i$ -ésimo circuito solicitado. A RDB avalia a quantidade de dados que deixaram de ser transportados na rede devido ao bloqueio. Já a eficiência energética é uma métrica que avalia a quantidade de *bits* transmitidos em relação a quantidade de energia consumida. O modelo de consumo de energia adotado considera a soma da energia total consumida pelos *transponders* de largura de banda variável, comutadores ópticos de largura de banda variável e EDFAs usados na rede [Vizcaíno et al. 2012] [Ju et al. 2016].

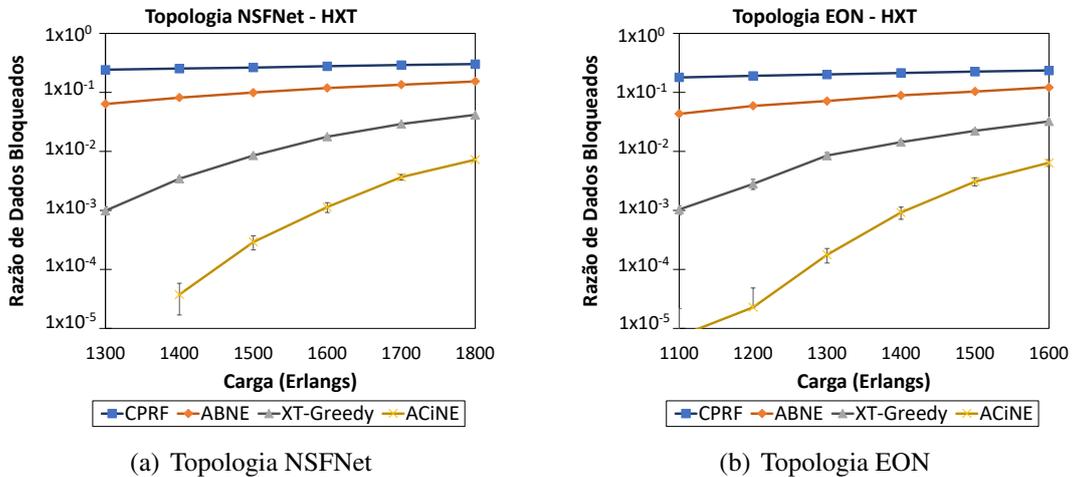
O algoritmo ACiNE foi avaliado e comparado com outras três propostas da literatura: *i*) o Algoritmo *Core Prioritization* [Fujii et al. 2014] com a alocação espectral

*random fit*, tratado a seguir como CPRF; *ii*) o Algoritmo de Balanceamento de Núcleo e Espectro [Lacerda Jr et al. 2020], tratado a seguir como ABNE; e *iii*) o *XT-Aware Greedy Algorithm* proposto em [Lobato et al. 2019] e referenciado a seguir como *XT-Greedy*. Os resultados de PBC são mostrados na Figura 3.



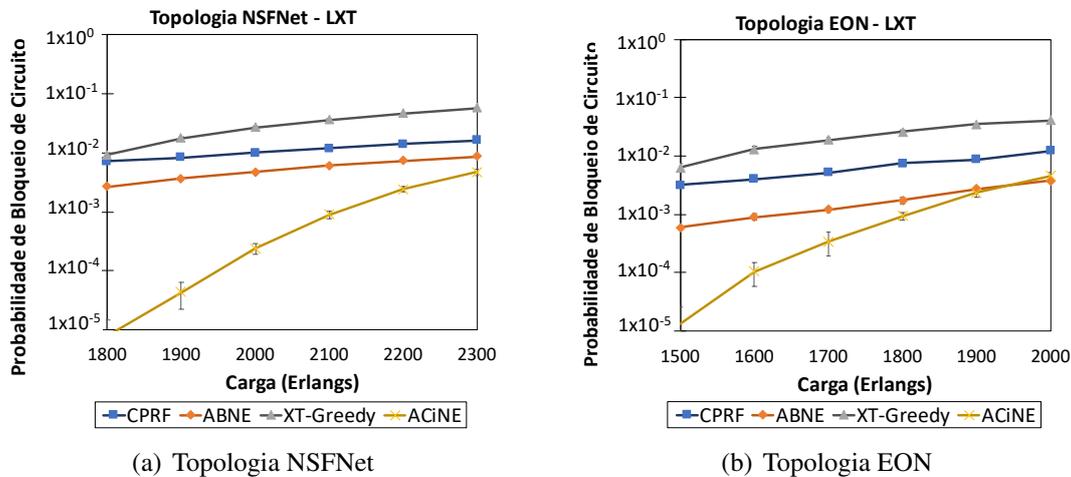
**Figura 3. Probabilidade de bloqueio de circuito com alta incidência de XT.**

No cenário apresentado na Figura 3, as simulações foram conduzidas considerando um valor de coeficiente de acoplamento de potência ( $h_l$ ) de  $6,4 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ . Tal valor constitui um cenário com alta incidência de XT (*High XT - HXT*) [Lobato et al. 2019]. Neste cenário, o algoritmo ACiNE obteve melhores resultados em termos de PBC quando comparado aos concorrentes. No maior ponto de carga da topologia NSFNet (Figura 3 (a)), o ganho de probabilidade de bloqueio do ACiNE foi de 83,39% quando comparado ao *XT-Greedy*, 96,59% quando comparado ao ABNE e 98,39% em relação ao CPRF. Já para o maior ponto de carga da topologia EON (Figura 3 (b)), o ganho de probabilidade de bloqueio do ACiNE foi de 82,52% quando comparado ao *XT-Greedy*, 96,20% quando comparado ao ABNE e 98,17% em relação ao CPRF. Tais resultados indicam a eficiência do ACiNE quando submetido a um cenário com alta incidência de XT.



**Figura 4. Resultado da razão de dados bloqueados com alta incidência de XT.**

Os resultados em termos de RDB são apresentados na Figura 4. Para a métrica de RDB, o desempenho dos algoritmos foi semelhante ao da métrica de PBC. Tal semelhança indica que, neste cenário, os bloqueios ocorreram em proporções similares entre as requisições com demandas diferentes (de 100 Gbps até 400 Gbps). A observação dessa característica justifica o estudo e comparação entre as métricas PBC e RDB. No maior ponto de carga da topologia NSFNet (Figura 4 (a)), o ganho de RDB do ACiNE foi de 82,61% quando comparado ao *XT-Greedy*, 95,30% quando comparado ao ABNE e 97,60% em relação ao CPRF. Já para o maior ponto de carga da topologia EON (Figura 4 (b)), o ganho de RDB do ACiNE foi de 80,18% quando comparado ao *XT-Greedy*, 94,72% quando comparado ao ABNE e 97,28% em relação ao CPRF.



**Figura 5. Probabilidade de bloqueio de circuito com baixa incidência de XT.**

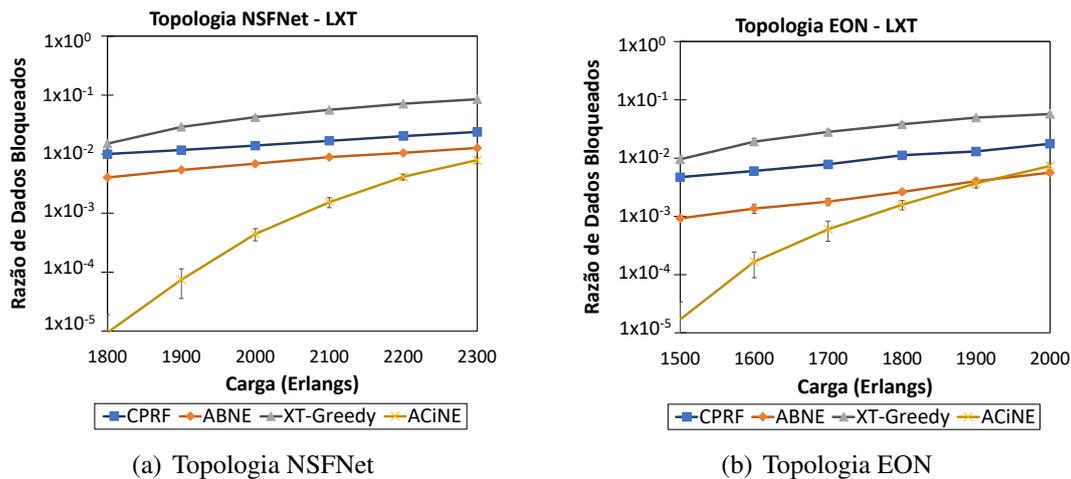
A Figura 5 apresenta o resultado de PBC em um cenário com baixa incidência de XT (*Low XT* - LXT). Para simular um cenário com baixa incidência de XT, o valor do coeficiente de acoplamento de potência ( $h_l$ ) foi ajustado para  $1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$  [Lobato et al. 2019]. Tais variações no coeficiente de acoplamento de potência da fibra tem por objetivo avaliar o comportamento dos algoritmos quando submetidos a diferentes níveis de XT. No maior ponto de carga da topologia NSFNet (Figura 5 (a)), o ganho de PBC do ACiNE foi de 91,70% quando comparado ao *XT-Greedy*, 45,62% quando comparado ao ABNE e 71,01% em relação ao CPRF. Já para o maior ponto de carga da topologia EON (Figura 5 (b)), o ganho de PBC do ACiNE foi de 88,80% quando comparado ao *XT-Greedy* e 62,20% em relação ao CPRF. Neste ponto de carga específico, o ABNE obteve ganho de 17,60% em relação ao ACiNE. Entretanto, este ganho é sobreposto pelo intervalo de confiança. De forma geral, no cenário de baixa incidência de XT o ACiNE também obteve bom desempenho comparado aos concorrentes. Contudo, diferente do cenário de alta incidência de XT, o ganho do ACiNE em relação aos demais diminui quando a rede é submetida a altas cargas. Este estreitamento torna-se visível a partir de 2200 Erlangs de carga na topologia NSFNet e 1800 Erlangs de carga na topologia EON. Nestes pontos há uma convergência entre os algoritmos. Isto ocorre porque o bloqueio por ausência de recursos torna-se mais frequente que o bloqueio por XT. Para demonstrar este comportamento, as causas dos bloqueios são apresentadas na Tabela 4.

Observa-se que, como esperado, os algoritmos *XT-aware* (*XT-Greedy* e ACiNE)

**Tabela 4. Composição da probabilidade de bloqueio de circuito no cenário com baixa incidência de XT no último ponto de carga.**

	NSFNet		EON	
	Bloqueio por XT inadequado	Bloqueio por ausência de recursos	Bloqueio por XT inadequado	Bloqueio por ausência de recursos
CPRF	75,31%	24,69%	36,70%	63,30%
ABNE	95,36%	4,64%	74,38%	25,62%
XT-Greedy	0,39%	99,61%	0,10%	99,90%
ACiNE	0,40%	99,60%	0,02%	99,98%

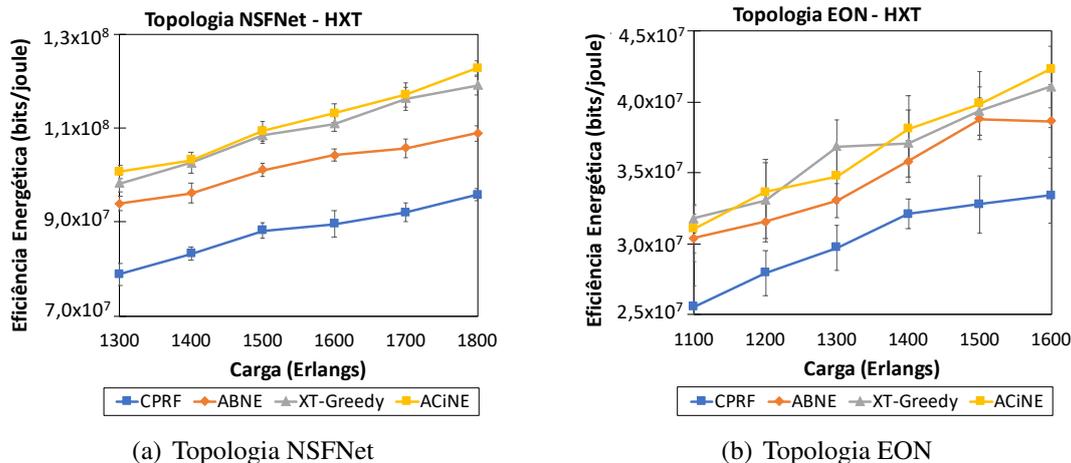
apresentam baixo bloqueio causado por XT em relação aos algoritmos *XT-avoid* (CPRF e ABNE). Entretanto, no maior ponto de carga (2300 Erlangs para NSFNet e 2000 Erlangs para EON), o bloqueio causado por ausência de recursos impactam significativamente nestes algoritmos. Isso ocorre porque os algoritmos *XT-aware* avaliados possuem o foco predominante em redução de XT. Assim, pode ocorrer fragmentação da rede para garantir que os recursos sejam alocados com menor valor de XT possível. A Figura 6 apresenta a RDB para o cenário de baixa incidência de XT.



**Figura 6. Resultado da razão de dados bloqueados com baixa incidência de XT.**

Para a RDB, o comportamento dos algoritmos foi similar ao da métrica de PBC. No maior ponto de carga da topologia NSFNet (Figura 6 (a)), o ganho de RDB do ACiNE foi de 90,70% quando comparado ao XT-Greedy, 37,95% quando comparado ao ABNE e 66,84% em relação ao CPRF. Já para o maior ponto de carga da topologia EON (Figura 6 (b)), o ganho de RDB do ACiNE foi de 87,19% quando comparado ao XT-Greedy e 58,49% quando comparado ao CPRF. Apesar de obter melhores resultados na maioria dos pontos de carga, o ACiNE obteve pior resultado quando comparado ao ABNE na carga de 2000 Erlangs. Para este caso, o ABNE obteve um ganho de 23,27% em relação ao ACiNE. A Figura 7 apresenta o resultado em termos de eficiência energética.

O ACiNE obteve, de maneira geral, melhor resultado em termos de eficiência energética em relação aos demais algoritmos no cenário com alta incidência de XT. Na topologia NSFNet, o ACiNE obteve resultados similares ao XT-Greedy. O ACiNE obteve um aumento de eficiência energética de no mínimo 23,99% em relação ao CPRF (ob-



**Figura 7. Resultado da eficiência energética com alta incidência de XT.**

servado em 1400 Erlangs) e de no mínimo 7,19% em relação ao ABNE (observado em 1300 Erlangs). Na topologia EON, os desempenhos dos algoritmos ACiNE, XT-Greedy e ABNE foram equivalentes. Para esta topologia, o ACiNE obteve um aumento mínimo de eficiência energética de 16,96% em relação ao CPRF, observado na carga de 1300 Erlangs. Este comportamento ocorre porque no cenário de alto nível de XT, os algoritmos mais sensíveis a XT possuem mais bloqueio, o que diminui a quantidade de *bits* transportados e, conseqüentemente, sua eficiência energética. Por esse motivo, no cenário de baixo nível de XT, os algoritmos apresentam resultados semelhantes, com intervalos de confiança sobrepostos. Assim, neste caso, há equivalência de resultados. Por este motivo a eficiência energética para o cenário de baixo nível de XT não é mostrada nesta Seção.

De maneira geral, o ACiNE apresentou melhor desempenho em termos das métricas adotadas quando comparado aos dois algoritmos XT-avoid (CPRF e ABNE) e também ao algoritmo XT-aware (XT-Greedy). Mesmo sendo XT-aware, o ACiNE apresentou um tempo de processamento consideravelmente menor quando comparado ao XT-Greedy. O tempo de processamento do ACiNE durante as simulações foi em média 64,68% menor que o XT-Greedy na topologia NSFNet e 62,19% menor na topologia EON. Esses valores foram obtidos considerando que ambos foram executados no mesmo cenário e utilizando o mesmo hardware para execução das simulações. Esta melhora no tempo de execução ocorre porque o ACiNE verifica o XT apenas para o circuito candidato. Além disso, o ACiNE não analisa o núcleo central em casos que os demais núcleos tenham recursos disponíveis.

## 6. Conclusão

Este artigo apresentou o Algoritmo Ciente de Crosstalk para Alocação de Núcleo e Espectro (ACiNE). O ACiNE é um algoritmo da classe XT-aware que busca escolher recursos que possuam menor incidência de XT e também que estejam em regiões específicas do espectro óptico. Tal estratégia visa diminuir a incidência de XT na rede e, conseqüentemente, aumentar a quantidade de circuitos atendidos.

O ACiNE apresenta bom desempenho em termos de PBC, RDB e eficiência energética quando comparado a outras propostas da literatura. O ACiNE apresentou

ganhos de no mínimo 45,62% em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, no mínimo 37,95% em termos de razão de dados bloqueados e 7,19% de eficiência energética. Assim disso, o tempo de processamento do ACiNE durante as simulações foi pelo menos 62,19% menor que o outro algoritmo *XT-aware* avaliado.

Como trabalhos futuros pretende-se avaliar o desempenho do ACiNE em redes que possuam fibras com um número maior de núcleos. Também pretende-se conduzir uma avaliação do impacto do XT em conjunto com o impacto da fragmentação espectral em redes SDM-EON. Por fim, pretende-se estudar e propor novas estratégias de alocação de núcleo e espectro integradas ao roteamento da rede.

## Referências

- Beyranvand, H. and Salehi, J. (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.
- 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.
- Chatterjee, B., Sarma, N., and Oki, E. (2015). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(3).
- 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.
- Gao, G., Zhang, J., Wang, L., Gu, W., and Ji, Y. (2014). Influence of physical layer configuration on performance of elastic optical OFDM networks. *IEEE Communications Letters*, 18(4):672–675.
- 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.
- 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.
- Ives, D. J., Bayvel, P., and Savory, S. J. (2015). Routing, modulation, spectrum and launch power assignment to maximize the traffic throughput of a nonlinear optical mesh network. *Photonic Network Communications*, 29(3):244–256.
- 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.

- Ju, M., Zhou, F., Xiao, S., and Zhu, Z. (2016). Power-efficient protection with directed  $p$ -cycles for asymmetric traffic in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 34(17):4053–4065.
- Klinkowski, M. and Zalewski, G. (2019). Dynamic crosstalk-aware lightpath provisioning in spectrally–spatially flexible optical networks. *J. Opt. Commun. Netw.*, 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 *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 519–532, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- 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. *Journal of Lightwave Technology*, 38(6):1095–1102.
- Oliveira, H. M. N. S. and da Fonseca, N. L. S. (2020). Uma estratégia de proteção eficiente em EONs-SDM utilizando  $p$ -cycle FIPP. In *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 155–168, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Tanenbaum, A. S. and Wetherall, D. J. (2011). *Redes de Computadores*. Pearson Education - Br, 5th edition.
- 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. *Journal of Lightwave Technology*, 38(20):5595–5607.
- Vizcaíno, J. L., Ye, Y., and Monroy, I. T. (2012). Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks. *Computer Networks*, 56(10):2400 – 2419. Green communication networks.
- Yaghubi-Namaad et al. (2018). Adaptive modulation and flexible resource allocation in space-division-multiplexed elastic optical networks. *J. Opt. Commun. Netw.*, 10(3):240–251.
- 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.