

# Avaliação do Impacto da Utilização do Núcleo Central em SDM-EON com Fibras de 7 Núcleos

Jordana B. França<sup>1</sup>, Uriel P. Mori<sup>1</sup>, Jurandir C. Lacerda Jr<sup>2</sup>, André C. B. Soares<sup>1</sup>

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

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

{jordanafranca,urielmori}@ufpi.edu.br

**Abstract.** *This paper evaluates the utilization of the central core in elastic optical networks with spatial division multiplexing in fibers with 7 cores. It highlights the issue of crosstalk, where signals in neighboring cores interfere with each other. Using algorithms for the RMCSA (Routing, Modulation, Core, and Spectrum Assignment) problem, the study analyzes high and low crosstalk scenarios across different network topologies, measuring the impact through blocking probabilities (PBC) and their causes. Numerical results indicate that not using the central core leads to a reduction in PBC by up to 24% in the topologies and algorithms considered.*

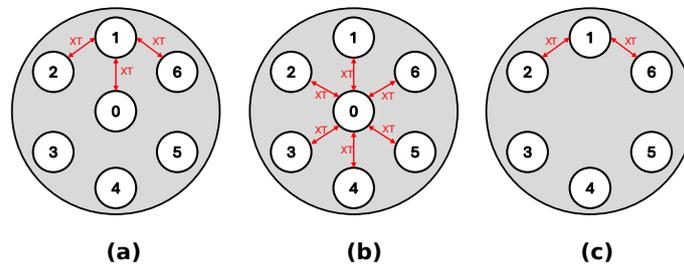
**Resumo.** *Este artigo avalia a utilização do núcleo central em redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial em fibras com 7 núcleos. Destaca-se o problema do crosstalk, onde sinais em núcleos vizinhos interferem entre si. Utilizando algoritmos para o problema RMCSA (Routing, Modulation, Core and Spectrum Assignment), o estudo analisa cenários de alto e baixo crosstalk em diferentes topologias de rede, medindo o impacto através das probabilidades de bloqueio (PBC) e suas causas. Os resultados numéricos indicam que a não utilização do núcleo central proporciona uma diminuição da PBC em até 24% nas topologias e algoritmos considerados.*

## 1. Introdução

À medida que os serviços de Internet evoluíram, tornou-se fundamental implementar mudanças progressivas em sua infraestrutura. O aumento significativo de usuários e a crescente demanda por serviços que ocupam mais espaço nas redes exigiram o desenvolvimento de tecnologias avançadas. Entre essas tecnologias, destacam-se as redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Network* - EON), onde o espectro óptico é segmentado em seções conhecidas como *slots* de frequência [Jinno et al. 2009].

Nas redes tradicionais, os circuitos (conexões) são alocados com largura de banda fixa, o que pode resultar na subutilização de alguns circuitos. Em contrapartida, nas redes EON, são alocados *slots* com frequência flexível conforme a demanda necessária de largura de banda. Com essa abordagem, surgiu o modelo de multiplexação por divisão espacial (*Space Division Multiplexing* - SDM), no qual o espectro óptico é dividido espacialmente, utilizando núcleos distintos dentro de uma única fibra óptica [Klinkowski and Zalewski 2019, Oliveira and Fonseca 2019].

Redes ópticas com fibras multi-núcleo oferecem um potencial significativo para aumentar a capacidade de transmissão de dados em comparação com as redes de núcleo único tradicionais [Brasileiro et al. 2020]. No entanto, um desafio crucial enfrentado pelas SDM-EON é o *crosstalk* (XT) [Hayashi et al. 2011], onde os sinais que trafegam nos diferentes núcleos interferem entre si, resultando na degradação do sinal [Oliveira and Fonseca 2019]. Em fibras com configurações como as de 7 núcleos, por exemplo, onde o núcleo central está cercado por seis vizinhos, o alto nível de *crosstalk* torna impraticável a alocação de *slots* em alguns casos, devido à interferência causada pelos circuitos ativos nos núcleos adjacentes. Essa limitação destaca a necessidade de desenvolver estratégias que minimizem o *crosstalk* entre os núcleos vizinhos, como não utilizar o núcleo central, para viabilizar efetivamente o uso de SDM em redes ópticas elásticas. A Figura 1 mostra uma fibra multi-núcleos com e sem o núcleo central, além da interferência do XT entre os núcleos vizinhos.



**Figura 1. Fibras multi-núcleos com/sem o núcleo central. (a) XT no núcleo 1 com núcleo central. (b) XT no núcleo central. (c) XT no núcleo 1 sem núcleo central.**

À medida que os núcleos se aproximam espacialmente, a interferência causada pelo crosstalk no circuito aumenta [Lacerda-Jr et al. 2020]. Por exemplo, na Figura 1 (a), o núcleo 1 é sofre crosstalk dos núcleos 0, 2 e 6. Na Figura 1 (b), o núcleo 0 sofre interferência de todos os outros núcleos. Sem o núcleo central, representado na Figura 1 (c), a interferência entre os núcleos é reduzida; ocorre no núcleo 1 apenas interferências dos núcleos 2 e 6.

Outro desafio para alocar um circuito na rede SDM-EON se encontra na resolução do problema de Roteamento, escolha do Nível de Modulação e Alocação de Espectro e Núcleo (RMCSA) [Su et al. 2022]. Para estabelecer um circuito, é fundamental: i) determinar uma rota entre nó de origem e nó de destino; ii) adaptar o formato de modulação de maneira adequada, que envolve a aplicação de técnicas para converter sinais óptico em *bits*, representando os dados digitais [Tanenbaum and Wetherall 2011]; iii) selecionar o núcleo da fibra a ser utilizado no circuito; iv) definir o conjunto de *slots* que serão alocados no espectro.

Adicionalmente, na resolução do problema de RMCSA na alocação de *slots*, é essencial assegurar a continuidade e a contiguidade espectral [Chatterjee et al. 2015]. A contiguidade espectral garante que os *slots* do circuito sejam adjacentes em cada enlace da rota. Em relação à continuidade, é imprescindível que os *slots* de um circuito mantenham os mesmos índices ao longo do percurso.

Este artigo tem como objetivo analisar o desempenho de diferentes algoritmos RMCSA em uma fibra multi-núcleos em duas configurações: i) com a utilização do núcleo central; ii) sem a utilização do núcleo central. Os algoritmos foram avaliados em diferen-

tes cenários topológicos e em alto nível de *crosstalk* (*high crosstalk* - HXT) e baixo nível *crosstalk* (*low crosstalk*- LXT) para que fosse possível identificar o impacto da utilização do núcleo central na alocação da fibra. O desempenho dos algoritmos foi analisado com base nas métricas de probabilidade de bloqueio, as causas destes bloqueios e a utilização e bloqueio por núcleo.

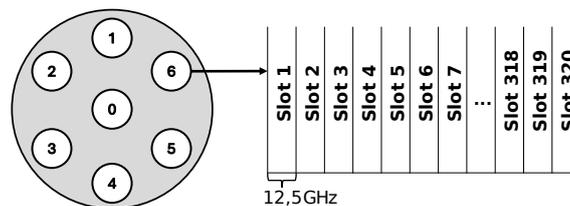
O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 detalha as fibras multi-núcleos e o problema RMCSA . A Seção 3 apresenta os trabalhos relacionados. Na Seção 4 são apresentadas as topologias, configurações de núcleo, parâmetros utilizados nas simulações, e a avaliação dos dados coletados. Por fim a Seção 5 apresenta a conclusão do trabalho.

## 2. Fibras Multi-núcleos e o Problema RMCSA

O problema RMCSA é um dos pontos importantes em SDM-EON, pois através da sua solução é possível iniciar um circuito de comunicação e garantir sua qualidade. Ele é determinado pela escolha da rota, pela definição do formato da modulação e a escolha de alocação de núcleo e espectro. O roteamento pode ser definido por um algoritmo como o *Dijkstra*, para selecionar o menor caminho entre os nós da rede.

O nível de modulação a ser utilizado é determinado de acordo com a Relação Sinal-Ruído Óptico (*Optical Signal to Noise Ratio* – OSNR) da rede. Essa decisão envolve a seleção entre cinco formatos de modulação: 4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM. A modulação escolhida define quantos *slots* deverão ser reservados para a alocação de espectro.

A alocação dos núcleos é baseada em critérios que visam minimizar o bloqueio de requisições. As SDM-EONs podem ser configuradas com diferentes quantidades de núcleos, como 7, 12 ou 19, sendo as de 7 núcleos as mais estudadas [Brasileiro et al. 2020]. Nesse contexto, considera-se que cada núcleo possui 320 *slots*, cada um com largura de banda de 12,5 GHz [Lacerda-Jr et al. 2020, Fujii et al. 2014], conforme demonstrado na Figura 2.



**Figura 2. Fibra de 7 núcleos e a sua distribuição de slots.**

Existem diferentes métodos de alocação de espectro, como *first fit*, *last fit*, *random fit* e *medium fit* [Chatterjee et al. 2015]. No método *first fit*, durante a alocação, os primeiros *slots* disponíveis são escolhidos, os de menor frequência. O método *last fit*, ao contrário do *first fit*, busca alocar nos últimos *slots* do espectro, que possuem maior frequência. No *medium fit*, a alocação é centrada nos *slots* do meio do espectro. Por último, no método *random fit*, os *slots* são escolhidos de forma aleatória para a alocação.

A transmissão do sinal óptico nos equipamentos de rede degradam a sua qualidade por conta dos efeitos da camada física. A OSNR é uma métrica utilizada para determinar

se o circuito está sofrendo algum tipo de impacto de camada física. Caso o valor da OSNR esteja menor que um valor estabelecido, ocorre bloqueio por QoT (*Quality of Transmission*). Existem duas formas de bloqueio por QoT: i) QoTN, quando o QoT é inadequado para o novo circuito; ii) QoTO, quando o QoT é inadequado para os circuitos que já estão ativos na rede. Embora um circuito consiga ser estabelecido por atingir o QoTN ele ainda pode ser bloqueado por impactar nos que foram estabelecidos anteriormente, causando QoTO [Fontinele et al. 2017].

Após a verificação de bloqueio por QoT, a próxima etapa, nas redes SDM, para alocar o circuito é avaliar o valor de *crossstalk*. O bloqueio por XT ocorre quando o nível de XT ao estabelecer um novo circuito é maior do que um limiar estipulado. Se o valor de XT for inadequado nos outros circuitos que já foram alocados na rede, ocorre bloqueio por XTO. Os modelos analíticos para calcular a OSNR e o *crossstalk* estão disponíveis em [Lacerda-Jr et al. 2024]. A Figura 3 apresenta um fluxograma que demonstra como é realizado o estabelecimento de um circuito neste trabalho.

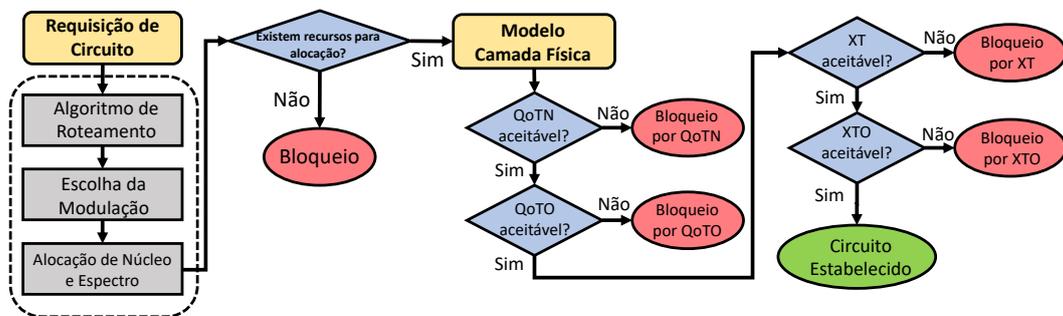


Figura 3. Fluxograma do processo de estabelecimento de um circuito.

### 3. Trabalhos Relacionados

Em [Lacerda-Jr et al. 2020] é proposto o Algoritmo de Balanceamento de Núcleo e Espectro para Redes SDM-EON (ABNE), que emprega técnicas de alocação espectral, incluindo o *first fit*, *last fit* e *medium fit*, a fim de distribuir os *slots* de espectro de forma eficaz. Seu objetivo é minimizar o impacto do *crossstalk* nos circuitos ópticos, resultando em melhorias perceptíveis tanto na probabilidade de bloqueio quanto na eficiência energética. Esses benefícios são observados em cenários caracterizados por diferentes níveis de *crossstalk*, sejam eles altos ou baixos.

Em [Fujii et al. 2014] os autores desenvolveram dois algoritmos baseados na estratégia de priorização de núcleo (*Core Prioritization*). Primeiramente, os núcleos recebem uma classificação de prioridade e o núcleo será escolhido de acordo com o tamanho da largura de banda requisitada para o novo circuito. Para a alocação de espectro são utilizadas as técnicas de *first fit* ou *random fit*.

Os autores em [Lacerda-Jr et al. 2021] desenvolveram o algoritmo ACiNE (Algoritmo Ciente de *Crosstalk* para Alocação de Núcleo e Espectro), que opera em duas fases principais: balanceamento e busca. Na fase de balanceamento, os núcleos da fibra são agrupados em conjuntos não adjacentes para reduzir a sobreposição entre *slots* de núcleos vizinhos e minimizar o *crossstalk*. Durante a fase de busca, o algoritmo percorre as opções

de núcleos e *slots* disponíveis, selecionando o circuito com o menor XT e mais próximo da região de prioridade, com o objetivo de maximizar a eficiência espectral.

Todos os trabalhos abordados têm como um dos principais objetivos minimizar o impacto do *crosstalk* na rede. Existem duas formas de atribuição de núcleo para reduzir o *crosstalk* [Lobato et al. 2019] nesses algoritmos: *XT-avoid*, que evita a sobreposição de *slots* entre núcleos adjacentes sem considerar seus valores reais; e *XT-aware*, que calcula o XT com base na interferência entre núcleos adjacentes ativos que compartilham o mesmo *slot*, usando valores reais de *crosstalk* [Lacerda-Jr et al. 2024]. Os algoritmos *XT-aware* são mais eficientes [Yang et al. 2018], como o ACiNE, enquanto os *XT-avoid* simplificam o problema RMCSA e reduzem a complexidade computacional do algoritmo [Lobato et al. 2019], como o ABNE e CPFF (*Core Prioritization First Fit*).

#### 4. Resultados Numéricos

Para gerar os resultados, foi utilizado o simulador SLICE Network Simulator (SNetS) [Fontinele et al. 2017]. Cada simulação processou 100.000 requisições de circuitos, com carga de tráfego distribuída uniformemente entre os pares de origem e destino. Os resultados, obtidos a partir de 10 replicações utilizando diferentes sementes para geração de variáveis aleatórias, possuem um nível de confiança de 95%. As requisições são geradas de acordo com um processo de Poisson com taxa média  $\lambda$ , e o tempo médio de retenção dos circuitos segue uma distribuição exponencial com média  $1/\mu$ . A distribuição da carga de tráfego é uniforme entre todos os pares de nós de origem e destino. Foram simuladas requisições de 100, 200, 300, 400 e 500 Gbps, com proporções de 5:4:3:2:1, respectivamente. A carga em Erlangs é definida por  $\rho = \lambda/\mu$ . As simulações foram realizadas utilizando as topologias USA e NSFNet, conforme ilustrado na Figura 4.

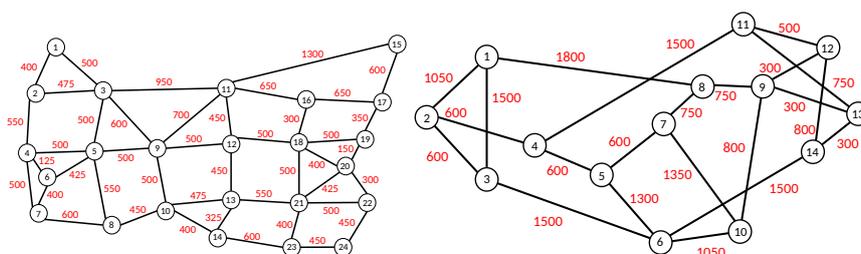


Figura 4. Topologias USA e NSFNet, respectivamente.

Os cinco formatos de modulação disponíveis para uso são: 4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM. Os limiares de OSNR considerados neste trabalho são 8,95 dB, 13,15 dB, 15,49 dB, 18,51 dB e 21,28 dB para as modulações 4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM, respectivamente [Lacerda-Jr et al. 2024]. Já os limites de XT são -19,03 dB, -23,23 dB, -25,57 dB, -28,59 dB e -31,36 dB para as modulações 4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM, respectivamente [Lacerda-Jr et al. 2024].

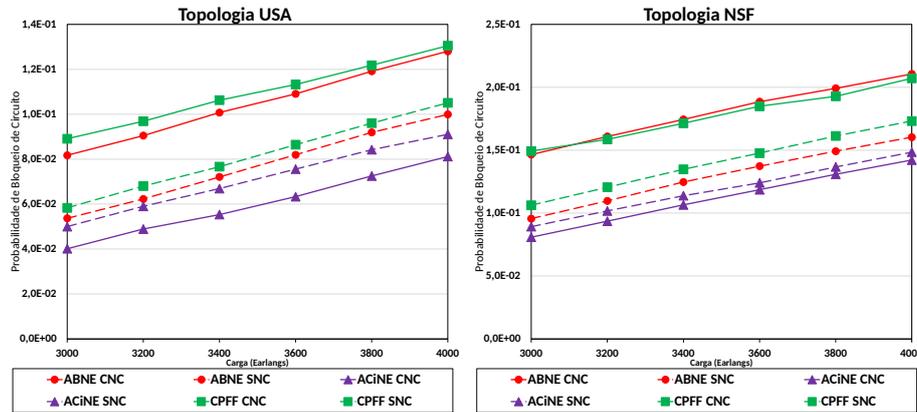
Os experimentos foram conduzidos utilizando fibras multi-núcleos, com duas configurações distintas: uma com a utilização do núcleo central (Com Núcleo Central-CNC) e outra sem (Sem Núcleo Central- SNC). Cada núcleo possui um espectro de 320 *slots* de frequência, cada um com uma largura de banda de 12,5 GHz. Além disso, foi estabelecida uma distância mínima entre os circuitos adjacentes, conhecida como

banda de guarda, correspondente a um *slot* de frequência [Brasileiro et al. 2020]. Outros parâmetros utilizados nas simulações estão detalhados na Tabela 1.

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

A avaliação de desempenho de comportamento dos algoritmos com e sem o núcleo central é feita de acordo com a probabilidade de bloqueio (PBC), suas causas e a utilização e bloqueio por núcleo. O cálculo da PBC é dado por  $PBC = \frac{Q_{\text{Bloqueados}}}{|R|}$ , onde  $Q_{\text{Bloqueados}}$  são as requisições bloqueadas e  $|R|$  corresponde a quantidade total de requisições feitas ao plano de controle da rede [Lacerda-Jr et al. 2020].

O nível de *crosstalk* está fortemente ligado ao coeficiente de acoplamento de potência ( $h_l$ ). Em cenários de alto *crosstalk* (HXT), o  $h_l$  é de  $6,4 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ , enquanto em cenários de baixo *crosstalk* é de  $1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$  [Lobato et al. 2019]. No cenário de baixo *crosstalk* (LXT), um circuito só será bloqueado se houver sobreposição de *slots* com todos os núcleos vizinhos, ou seja, três núcleos no caso dos núcleos periféricos em fibras de 7 núcleos. Já no cenário de HXT, basta uma sobreposição de *slots* com um núcleo vizinho para que ocorra o bloqueio do circuito [Lacerda-Jr et al. 2024].



**Figura 5. Probabilidade de Bloqueio em Baixo XT na Topologia USA e NSFNet.**

A Figura 5 mostra a probabilidade de bloqueio nos algoritmos em cenários de baixo *crosstalk*. O algoritmo ACiNE apresenta o melhor desempenho em ambas as topologias, pois o algoritmo é *XT-aware* e sempre analisa os valores reais de *crosstalk* ao tentar alocar um circuito. Na topologia USA, o algoritmo que não utiliza o núcleo central bloqueia cerca de 9% das requisições no ponto de carga máximo. Enquanto na topologia NSFNet, o bloqueio das requisições é semelhante em ambos os cenários, com ou sem o núcleo central, atingindo mais de 14% no último ponto de carga. Nos algoritmos *XT-avoid*, ABNE e CPFF, a utilização do núcleo central resultou em mais bloqueios, devido

à sua adjacência a todos os outros núcleos, o que causa bloqueio XTO ao tentar alocar uma requisição. Nessas abordagens, a não utilização do núcleo central resulta em menos bloqueios. Na topologia NSFNet, o CPFF apresenta um bloqueio de 20% dos circuitos requisitados. Os ganhos dos algoritmos são calculados pela fórmula  $G = \frac{(R_{CNC} - R_{SNC})}{R_{CNC}}$ , onde  $R_{CNC}$  é o valor da PBC no último ponto de carga dos algoritmos com o núcleo central e  $R_{SNC}$  é o valor da PBC no último ponto de carga dos algoritmos sem o núcleo central. O ABNE sem núcleo central, apresenta um ganho de 24% na topologia NSFNet em comparação com a utilização do núcleo, e na topologia USA, o ganho é de cerca de 16%. O CPFF, também mostra ganhos significativos, com 19% de melhoria na topologia USA e 16% na NSFNet quando configurado sem o núcleo central.

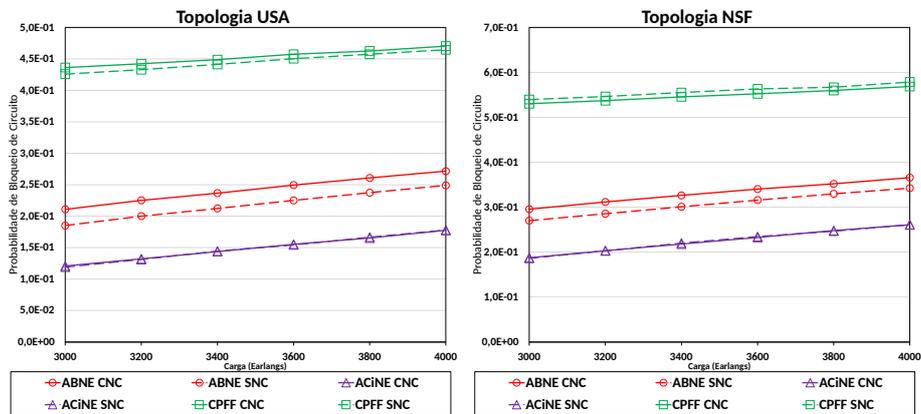


Figura 6. Probabilidade de Bloqueio em Alto XT nas Topologias USA e NSFNet.

A Figura 6 mostra o comportamento dos algoritmos no cenário de alto *crossstalk*. O algoritmo ABNE apresenta um comportamento similar em ambas as topologias, com menor bloqueio quando o núcleo central é utilizado. Em contraste, o algoritmo CPFF exibe comportamentos diferentes nas duas topologias. Na topologia NSFNet, há mais bloqueios quando o núcleo central não é utilizado, enquanto na topologia USA, a probabilidade de bloqueio é maior com o núcleo central. Em ambos os cenários, a porcentagem de bloqueio ultrapassa 40%, resultando na não alocação de grande parte das requisições. O algoritmo ACiNE teve um desempenho semelhante em ambas as topologias, com ou sem o núcleo central, apresentando taxas de bloqueios equivalentes. Em termos de ganho, o ABNE apresenta uma melhora de 8% na topologia USA quando configurado sem o núcleo central, e uma melhora de 6% na NSFNet. O CPFF, mostra um ganho de 1% na topologia USA em comparação com a configuração que utiliza o núcleo central.

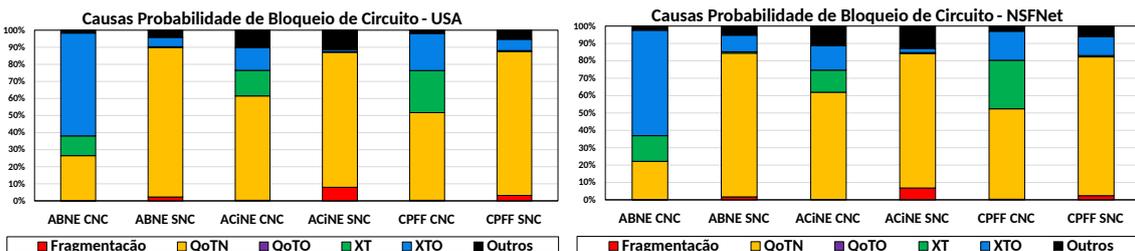
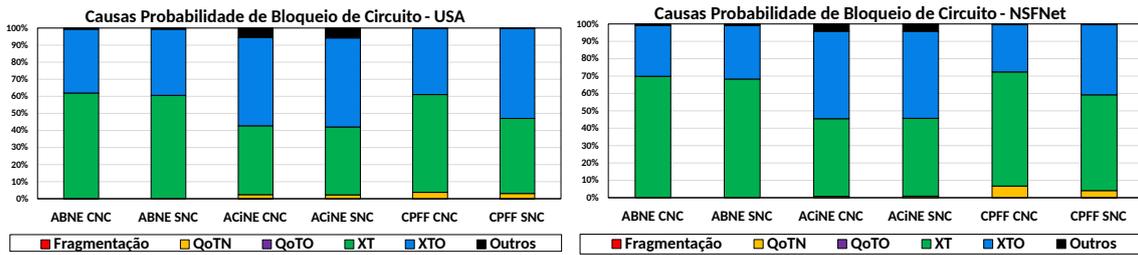


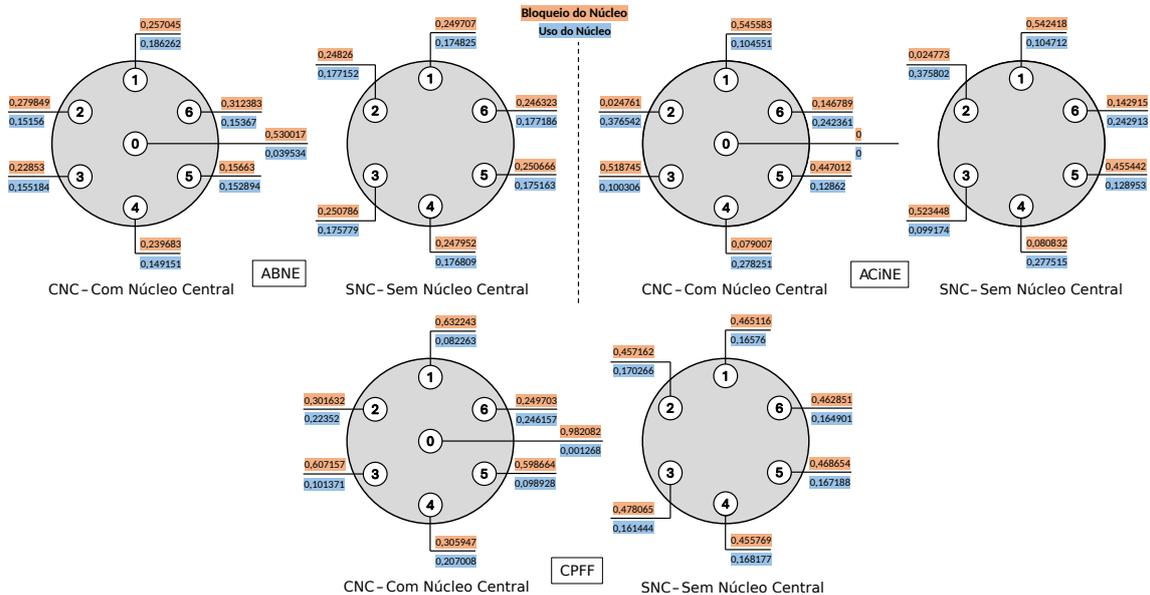
Figura 7. Causas da Probabilidade de Bloqueio de Circuito em Baixo XT na Topologia USA e NSFNet.



**Figura 8. Causas da Probabilidade de Bloqueio de Circuito em Alto XT na Topologia USA e NSFNet.**

A Figura 7 mostra as causas dos bloqueios em cenários de baixo *crosstalk*. Em ambos os casos, o bloqueio por QoTN se destaca. Na configuração de baixo *crosstalk*, o XT e o XTO são mais evidentes nos algoritmos que utilizam o núcleo central, em comparação com os algoritmos que não utilizam o núcleo central.

Diferentemente da Figura 7, a Figura 8 evidencia que, em cenários de alto *crosstalk*, as causas de bloqueio estão predominantemente associadas a XT e XTO, independente da presença ou ausência do núcleo central. Em ambas as topologias, a maioria dos bloqueios é atribuída ao *crosstalk*, com destaque para o algoritmo ABNE, que apresenta aproximadamente 98% dos seus bloqueios relacionados a essa causa.



**Figura 9. Utilização e bloqueio de cada núcleo no cenário Alto XT na topologia USA nos algoritmos ABNE, ACiNE e CPFF.**

Na Figura 9, é exibido a utilização e o bloqueio de cada núcleo pelos algoritmos ABNE, ACiNE e CPFF, respectivamente, no cenário de Alto XT na topologia USA, no último ponto de carga. Em todos os algoritmos e nas duas topologias, o núcleo 0 é o menos utilizado. Observa-se que, tanto no ABNE quanto no CPFF, apesar da sua baixa utilização o núcleo central foi o principal responsável pelos bloqueios nesses dois algoritmos. Por outro lado, no ACiNE, percebe-se maior bloqueio em outros núcleos, indicando que o algoritmo evita utilizar o núcleo central, tendo resultados semelhantes de utilização e

bloqueio nos cenários com ou sem o núcleo central.

No algoritmo ABNE, ocorre uma distribuição equivalente na utilização dos núcleos, sem o núcleo central. No ACiNE, os núcleos pares são os mais utilizados, independentemente da presença do núcleo central. O CPFF, sem o núcleo central, é similar ao ABNE e com o núcleo central utiliza mais os núcleos pares como o ACiNE.

## 5. Conclusão

Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto do núcleo central em um fibra de sete núcleos em algoritmos RMCSA, considerando diferentes cenários topológicos e duas condições de *crosstalk*: alto e baixo. O algoritmo que mais se beneficiou sem a presença do núcleo central foi o ABNE em ambas as topologias e cenários de *crosstalk*. Observou-se um ganho de aproximadamente 24% na probabilidade de bloqueio quando o núcleo central não foi utilizado, no cenário de baixo XT. O Algoritmo ACiNE apresentou comportamento consistente tanto com quanto sem o núcleo central. Por ser *XT-Aware* e adotar a estratégia de utilizar o núcleo central apenas quando estritamente necessário, resulta na baixa alocação nesse núcleo. Por outro lado, o algoritmo CPFF demonstrou comportamentos distintos nas diferentes topologias. Na topologia USA, o algoritmo comportou-se de maneira semelhante ao ABNE, enquanto na topologia NSFNet, não utilizar o núcleo central em HXT resultou em mais bloqueios de requisições do que utilizá-lo.

Embora o núcleo central apresente desafios no estabelecimento de circuitos em SDM-EON, sua não utilização não impactou diretamente na diminuição de bloqueio de circuito dos algoritmos em todos os cenários estudados. No entanto, houve a diminuição de bloqueio por *crosstalk* nos algoritmos que não utilizam o núcleo central em baixo XT. Além disso, a abordagem dos algoritmos em outros aspectos do problema de RMCSA contribuiu significativamente para a alocação de mais circuitos.

Em trabalhos futuros, pretende-se avaliar o comportamento de outros algoritmos *XT-avoid* em cenários com ou sem núcleo central. O ABNE, apresentou o melhor desempenho sem o núcleo central em todos os cenários analisados. O objetivo é determinar se essa característica do *XT-avoid* é determinante na decisão de utilizar ou não o núcleo central. Além disso, será testado o impacto do núcleo central em outros algoritmos *XT-aware*, avaliando se esses algoritmos apresentam comportamento semelhante com ou sem o núcleo central, como observado no caso do ACiNE.

## Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI) pelo apoio financeiro concedido para a realização desta pesquisa.

## Referências

- 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):1776 – 1800.

- 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.
- 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.
- Jinno, M., Takara, H., Kozićki, 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.
- 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., Cartaxo, A., and Soares, A. (2021). Um novo algoritmo ciente de crosstalk para alocação de núcleo e espectro em redes Ópticas elásticas multi-núcleos. In *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Uberlândia, MG, Brasil.
- 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.
- 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.
- Oliveira, H. and Fonseca, N. (2019). Proteção e roteamento multicaminho em redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. pages 487–500.
- Su, J., Zhang, J., Wang, J., Ren, D., Hu, J., and Zhao, J. (2022). Dynamic impairment-aware RMCSA in multi-core fiber-based elastic optical networks. *Optics Communications*, page 128361.
- Tanenbaum, A. S. and Wetherall, D. (2011). *Redes de Computadores: 5ª edição*. Pearson Prentice Hall.
- Yang, M., Zhang, Y., and Wu, Q. (2018). Routing, spectrum, and core assignment in SDM-EONs with MCF: node-arc ILP/MILP methods and an efficient XT-aware heuristic algorithm. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 10(3):195–208.