



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ CAMPUS
CORRENTE
TECNOLOGIA EM ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS**

RAYLINE PEREIRA MENDES

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS
PARA REDES ÓPTICAS MULTI-NÚCLEOS CONSIDERANDO OS EFEITOS DA
CAMADA FÍSICA**

**CORRENTE, PIAUÍ
2024**

RAYLINE PEREIRA MENDES

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS
PARA REDES ÓPTICAS MULTI-NÚCLEOS CONSIDERANDO OS EFEITOS DA
CAMADA FÍSICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Corrente.

Orientador: Prof. Dr. Jurandir Cavalcante Lacerda Júnior

CORRENTE, PIAUÍ
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Mendes, Rayline Pereira

M538a Avaliação de desempenho de algoritmos de alocação de recursos para redes ópticas multi – núcleos considerando os efeitos da camada física / Rayline Pereira Mendes. - 2024.
38 p.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Análise e Desenvolvimento de Sistemas) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Corrente, 2024.

Orientador : Prof Dr. Jurandir Cavalcante Lacerda Júnior.

1. Analise e Desenvolvimento de Sistemas - estudo e ensino. 2. Redes Ópticas elásticas. 3. Fibras Multi-núcleos. 4. Efeitos da Camada Física. I.Título.

CDD - 004

Elaborado por Tefischer Huanderson Soares e Sousa CRB 3/1251

RESUMO

As Redes ópticas elásticas baseadas em fibra multi-núcleo (MCF-EONs) surgiram como uma solução promissora para lidar com a crescente demanda de tráfego na Internet, proporcionando maior capacidade e flexibilidade nas redes de comunicação. No entanto, apesar de seu grande potencial, as MCF-EONs enfrentam desafios significativos em relação à alocação eficiente de recursos, o que pode impactar diretamente o desempenho e a qualidade do serviço (QoS). O objetivo deste trabalho é analisar e avaliar o desempenho de algoritmos *routing, modulation, core, and spectrum allocation* (RMCSA) propostos na literatura por meio de simulações computacionais, com foco no impacto dos efeitos da camada física (*physical layer impairments* (PLIs)) e na qualidade de transmissão (QoT) dos caminhos ópticos selecionados. A principal abordagem consiste em avaliar esses algoritmos em diferentes cenários, levando em consideração os prejuízos da camada física. Os resultados numéricos apresentam contribuições ao quantificar o impacto desses prejuízos nos algoritmos de alocação de recursos, fornecendo informações valiosas para futuras otimizações em MCF-EONs.

Palavras-chaves: redes ópticas elásticas; fibras multi-núcleos; efeitos da camada física; avaliação de desempenho.

ABSTRACT

Elastic Optical Networks based on Multi-Core Fiber (MCF-EONs) have emerged as a promising solution to address the increasing Internet traffic demand, providing greater capacity and flexibility in communication networks. However, despite their great potential, MCF-EONs face significant challenges regarding the efficient allocation of resources, which can directly impact performance and Quality of Service (QoS). The objective of this work is to analyze and evaluate the performance of **routing, modulation, core, and spectrum allocation** (RMCSA) algorithms proposed in the literature through computational simulations, focusing on the impact of physical layer impairments (PLIs) and the quality of transmission (QoT) of the selected optical paths. The main approach consists of assessing these algorithms in different scenarios, considering physical layer impairments. The numerical results contribute by quantifying the impact of these impairments on resource allocation algorithms, providing valuable insights for future optimizations in MCF-EONs.

Keywords: elastic optical networks; multicore fiber; physical layer impairments; performance evaluation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de mapa de constelação para cinco formatos de modulação para EON.	20
Figura 2 – Exemplo do problema RMCSA.	22
Figura 3 – Topologias com os comprimentos dos enlaces em km.	28
Figura 4 – Probabilidade de bloqueio em um cenário HXT.	29
Figura 5 – Componentes de PBC em um cenário HXT	30
Figura 6 – Probabilidade de bloqueio de circuito cenário LXT	31
Figura 7 – Componentes de PBC em um cenário LXT	32
Figura 8 – Probabilidade de bloqueio em um cenário com ausência de XT	33
Figura 9 – Componentes de PBC em um cenário com ausência de XT	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos trabalhos que investigam o problema RMCSA .	17
Tabela 2 – Limitações de camada física diretamente consideradas nos trabalhos da literatura.	18
Tabela 3 – Limites dos formatos de modulação.....	27
Tabela 4 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações	28
Tabela 5 – Ganho de PBC do CBASBA em comparação aos demais algoritmos avaliados em um cenário com alto XT	30
Tabela 6 – Ganho de PBC do CBASBA em comparação aos demais algoritmos avaliados em um cenário com baixo XT	32
Tabela 7 – Ganho de PBC do RCRF em comparação aos demais algoritmos avaliados em um cenário com ausência XT	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNE	Algoritmo de Balanceamento de Núcleo e Espectro
ADEIN	Algoritmo De Distanciamento Espectral Inter-Núcleos
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
CAS	<i>Crosstalk Avoidance Strategy</i>
CP	<i>Core Prioritization</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
EGN	Ruído Gaussiano Aprimorado
EONS	<i>Elastic Optical Network</i>
GN	Ruído Gaussiano
HXT	<i>High XT</i>
IAFF	<i>Intra-Area First Fit</i>
ICXTAA	<i>Inter-Core Xt-Aware Algorithm</i>
LXT	<i>Low XT</i>
MCF	<i>Multi-Core Fibers</i>
MMF	Fibras Multimodo
NLI	<i>Nonlinear Interference</i>
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>
OSNRN	OSNR Inadequada no Novo Caminho Óptico
OSNRO	OSNR Inadequada nos Outros Caminhos Ópticos já Ativos na Rede
PBC	Probabilidade de Bloqueio de Circuito
PLIs	<i>Physical Layer Impairments</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
QoT	Qualidade De Transmissão
RMCSA	<i>Routing, Modulation, Core, And Spectrum Allocation</i>

RMSA	<i>Routing, Modulation, And Spectrum Assignment</i>
SCF	<i>Single-Core Fiber</i>
SCI	<i>Self-Channel Interference</i>
SDM	Multiplexação por Divisão Espacial
SMF	Fibras Monomodo Padrão
SNetS	<i>Slice Network Simulator</i>
WDM	<i>Wavelength-division multiplexing</i>
XCI	<i>Cross-Channel Interference</i>
XT	<i>Crosstalk</i>
XTN	XT Inadequado no Novo Caminho Óptico
XTO	XT Inadequado nos Outros Caminhos Ópticos já Ativos na Rede

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Atenuação da fibra
γ	Coefficiente não linear da fibra
h_e	Coefficiente de acoplamento
β_2	Dispersão de velocidade de grupo da fibra
ν	Frequência óptica
D	Parâmetro de dispersão da fibra
W_n	Perda do nó
F	Sobrecarga FEC
L_s	Tamanho de um <i>span</i>
dB	Decibéis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contribuições	14
1.2	Publicações.....	15
1.3	Organização do Trabalho	15
2	TRABALHOS RELACIONADOS.....	16
3	REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS MULTI-NÚCLEO.....	20
4	MODELAGEM DE CAMADA FÍSICA.....	23
4.1	Efeitos intra-núcleo.....	23
4.1.1	Ruído ASE	23
4.1.2	Efeitos Não-Lineares.....	24
4.2	Efeitos inter-núcleo.....	25
4.2.1	Crosstalk	25
5	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.....	27
6	CONCLUSÃO.....	36
	REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

A Internet transformou significativamente o estilo de vida da sociedade, transformando a forma de trabalho, estudo e entretenimento. O surgimento de novas aplicações, somado com o rápido crescimento de novos usuários da rede, provoca a necessidade de uma estrutura tecnológica capaz de suprir a atual e futura demanda por tráfego de informações. Nesse sentido, as redes ópticas são consideradas como a principal tecnologia para atender essa demanda, uma vez que são capazes de lidar com altas taxas de *bits* em longas distâncias (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Historicamente, a evolução das tecnologias de rede tem sido impulsionada, principalmente, pela crescente demanda por altas taxas de *bits*. No final do século XX, as redes ópticas baseadas em multiplexação por divisão de comprimento de onda (*wavelength-division multiplexing* (WDM)) tornaram-se predominantes, pois permitiam a transmissão simultânea de múltiplos fluxos de dados sobre uma única fibra óptica. No entanto, apesar das vantagens em termos de capacidade, o modelo WDM apresenta desafios significativos relacionados à alocação fixa de espectro em canais de comprimento de onda (OLIVEIRA; FONSECA, 2020). Essa abordagem levou a uma subutilização do espectro, já que a largura de banda dos canais muitas vezes não correspondia exatamente às necessidades de transmissão dos fluxos dos dados, resultando em desperdício de recursos (OLIVEIRA; FONSECA, 2020).

Nesse contexto de inovação nas tecnologias de rede, as redes ópticas elásticas (*elastic optical networks* (EONs)) surgiram como uma evolução das redes WDM, permitindo uma alocação de espectro mais flexível com uma granularidade variável. Diferentemente das redes WDM, que utilizam canais com frequências centrais fixas (geralmente espaçadas por 50 GHz) (OLIVEIRA; FONSECA, 2020), as EONs utilizam *slots* de frequência de 12,5 GHz para dividir o espectro em pequenas porções espectrais (BRASILEIRO; COSTA; DRUMMOND, 2020).

Essa abordagem resulta em uma melhor utilização dos recursos da rede, proporcionando maior escalabilidade e eficiência em relação às redes ópticas tradicionais de grade fixa (JINNO et al., 2009). Nas EONs, ao receber uma solicitação de conexão, o operador da rede reserva um conjunto de *slots* de frequência para atender a requisição do cliente. Os recursos fim a fim alocados para atender uma dada requisição é conhecido como caminho óptico (AGRAWAL; BHATIA; PRAKASH, 2020).

Apesar dos avanços trazidos pelas EONs, a crescente demanda por capacidade motivou o desenvolvimento da tecnologia de multiplexação por divisão espacial (*spacial division multiplexing* (SDM)), que emergiu como uma solução promissora, ao aumentar a flexibilidade na alocação de recursos e a capacidade geral da rede (OLIVEIRA; FONSECA, 2020). A SDM pode ser implementada por meio de fibras multimodo (MMF) e fibras multi-núcleos (MCF).

Enquanto as MMFs utilizam um único núcleo que suporta múltiplos modos de transmissão, as MCFs utilizam vários núcleos, cada um funcionando como uma fibra monomodo, o que oferece uma capacidade significativamente maior. A integração de componentes em SDM não apenas reduz custos, mas também o consumo de energia, tornando essas redes mais eficientes em comparação às soluções tradicionais de enlace paralelo de único núcleo (OLIVEIRA; FONSECA, 2020).

Nas redes de longa distância, como as que utilizam tecnologia SDM, adota-se a comutação de circuitos como modelo de comunicação. Esse modelo consiste no estabelecimento de caminhos dedicados entre os pontos de origem e de destino antes do início da transmissão de dados. Essa abordagem garante baixa latência e elimina o risco de congestionamento durante a comunicação, características essenciais para enlaces que cobrem grandes distâncias (TANENBAUM; WETHERALL, 2011).

A previsibilidade proporcionada pela comutação de circuitos torna essa

tecnologia ideal para redes ópticas que atravessam continentes e demandam alta confiabilidade. Para realizar a alocação de recursos e ativar novos caminhos ópticos nas faixas de *slots* disponíveis em uma EON, é necessário considerar o problema conhecido na literatura como o problema de *routing, modulation, and spectrum assignment* (RMSA) (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Ao aprofundar-se nos estudos das redes EONs, é possível considerar dois tipos de fibras: as tradicionais, compostas por apenas um núcleo, denominadas *single-core fiber* (SCF) e as fibras multi-núcleos (*multi-core fiber* (MCF)). Este segundo tipo de fibra é composta por geralmente 7 núcleos, cada um possuindo seu próprio conjunto de *slots* (RICHARDSON; FINI; NELSON, 2013).

A utilização das fibras do tipo MCF proporciona benefícios significativos, sendo o principal deles o aumento da quantidade de recursos disponíveis, o que possibilita o atendimento de mais usuários. No entanto, sua adoção introduz uma nova dimensão no problema RMSA, ocasionando o acréscimo de um novo componente, caracterizado pela escolha do núcleo.

Portanto, o problema RMSA passa a ser conhecido como *routing, modulation, core, and spectrum allocation* RMCSA (BRASILEIRO; COSTA; DRUMMOND, 2020). Assim, um algoritmo RMCSA deve selecionar uma rota entre um nó origem e destino, definir um formato de modulação para envio das informações, selecionar um núcleo e uma faixa de *slots* para alocar um novo caminho óptico (ARAUJO; JR; SOARES, 2021).

Para que todos os caminhos ópticos alocados na rede tenham níveis de qualidade de transmissão (QoT) aceitáveis, torna-se necessário considerar os efeitos de camada física da rede, ou *physical layer impairments* (PLIs) (LACERDA-JR et al., 2017). Os PLIs mais proeminentes nesse contexto são divididas em dois tipos (TAKEDA et al., 2022): *i*) os inter-núcleos, que ocorrem entre dois núcleos da fibra, como o *crosstalk* inter-núcleo (XT); e *ii*) os intra-núcleos que ocorrem dentro de um determinado núcleo, como o ruído *amplified spontaneous emission* (ASE), a *self-channel interference* (SCI) e a *cross-channel interference* (XCI).

Portanto, torna-se necessário a avaliação conjuntamente dos efeitos inter e intra núcleos no momento da alocação de um novo caminho óptico na rede (TAKEDA et al., 2022). Essa avaliação dos níveis de PLIs deve ser realizada no momento da alocação de cada caminho óptico. Observando os níveis de QoT deste novo caminho óptico e também dos caminhos ópticos já ativos na rede (LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2024).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho consiste na análise e avaliação do desempenho de nove algoritmos RMCSA propostos na literatura, observando rigorosamente o impacto das PLIs (inter e intra-núcleo) na QoT dos caminhos ópticos selecionados por estes algoritmos. Embora os cenários de avaliação incluam tanto os efeitos inter quanto intra-núcleo, o foco principal deste estudo está em uma análise mais detalhada sobre os efeitos intra-núcleo.

Essa escolha é justificada pelo fato de que, embora o XT seja o efeito mais estudado na literatura (HAYASHI et al., 2011), os efeitos intra-núcleo podem apresentar impacto significativo em fibras com baixo acoplamento entre núcleos (LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2024). Assim, investigar como a variação do acoplamento nas fibras influencia as PLIs intra-núcleo é essencial para compreender de forma mais abrangente os impactos no desempenho dos algoritmos RMCSA.

O objetivo deste trabalho é realizar uma avaliação de desempenho comparando algoritmos de alocação de recursos em redes ópticas elásticas, considerando cenários que levam em conta os efeitos da camada física da rede durante a alocação de novas requisições. Além disso, as principais contribuições deste estudo incluem:

- Avaliação de desempenho de nove algoritmos da literatura considerando diferentes formatos de modulação, o funcionamento em diferentes topologias de redes, em fibras ópticas multi-núcleos com diferentes coeficientes de acoplamento, cenários de tráfego dinâmico e com demandas por taxa de *bits* heterogêneas entre os clientes.
- Considerar conjuntamente os efeitos intra e inter núcleo, o que abrange o XT, o ruído ASE, a SCI e a XCI. Avaliações considerando tais efeitos de forma conjunta ainda é pouco explorado na literatura, como apresentado na Tabela 2, na Seção 2.
- Avaliação do impacto da alocação de novos caminhos ópticos nos caminhos ópticos já ativos na rede. A avaliação destes impactos do ponto de vista dos efeitos inter e intra-núcleo também é pouco explorado na literatura, como apresentado na Tabela 2, na Seção 2.

1.2 PUBLICAÇÕES

Durante a elaboração deste trabalho de conclusão de curso, os resultados obtidos foram disseminados na forma de artigo científico. O artigo que se conecta diretamente com o conteúdo deste trabalho está listado a seguir:

- **MENDES, R. P.**; MORAIS A. G.; LACERDA JÚNIOR J. C.. Performance Evaluation of Resource Allocation Algorithms for Multi-Core Optical Networks Considering Physical Layer Impairments. 50º Latin American Computer Conference (CLEI), Buenos Aires, Argentina, 2024, pp. 1-10, doi: 10.1109/CLEI64178.2024.10700308.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

As demais seções deste trabalho estão organizadas da seguinte forma: A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados ao tema tratado nesse estudo; na Seção 3 são apresentados conceitos fundamentais sobre as Redes Ópticas Elásticas; na Seção 4 é apresentada a modelagem da camada física; a Seção 5 apresenta uma análise de desempenho dos algoritmos avaliados. Por fim, as conclusões e trabalhos futuros são apresentados na Seção 6.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

As redes multi-núcleos têm recebido crescente destaque pela comunidade científica de redes de comunicações (BRASILEIRO; COSTA; DRUMMOND, 2020). Esse destaque tem resultado em um aumento significativo na quantidade de trabalhos dedicados a propor soluções para o problema de alocação de novos caminhos ópticos (JR; CARTAXO; SOARES, 2021). Neste sentido, existem políticas clássicas para a alocação espectral, como a *first fit*, *last fit* e *random fit* (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Na política de alocação de espectro *first fit* (ROSA et al., 2012; WANG; MUKHERJEE, 2014), busca-se sempre selecionar o *slot* de menor frequência da lista de *slots* disponíveis e alocar este *slot* para atender à requisição de conexão. Por outro lado, a política de alocação de espectro *last fit* (FADINI; OKI, 2014) possui uma atuação oposta ao *first fit*, escolhendo o *slot* com maior frequência da lista de *slots* disponíveis. Na política de alocação de espectro *random fit* (ROSA et al., 2012), quando surge uma requisição de conexão, o *random fit* forma o novo caminho óptico a partir de uma escolha aleatória de *slots* da lista de *slots* disponíveis.

Em Fujii et al. (2014) os autores propõem uma estratégia de alocação de núcleo e espectro, nomeada de *core prioritization* (CP). Tal política busca evitar o XT entre núcleos ao balancear o uso de cada núcleo da fibra óptica. Já em Tode e Hirota (2017), os autores propõem um esquema de atribuição de espectro conhecido como *intra-area first fit* (IAFF), que visa classificar as requisições de acordo com o número de *slots* de frequência solicitado em várias áreas priorizadas em cada núcleo. Esse esquema também leva em conta os efeitos do XT na rede, buscando mitigá-lo.

Os autores em Araujo, Jr e Soares (2021) apresentaram um algoritmo de balanceamento espectral entre grupos de núcleos em EONs, conhecido como algoritmo de distanciamento espectral inter-Núcleos (ADEIN). O principal objetivo do ADEIN é evitar o XT por meio do balanceamento no uso de recursos priorizando determinados grupos de núcleos e faixas espectrais.

Em Júnior et al. (2020), os autores apresentam um novo algoritmo voltado para o balanceamento de núcleo e espectro em redes multi-núcleos, sendo denominado algoritmo de balanceamento de núcleo e espectro (ABNE). O propósito central deste algoritmo é realizar a alocação balanceada de núcleo e espectro, visando regiões específicas do espectro, para minimizar o impacto do XT nos caminhos ópticos.

Os autores em Liu, Xiong e Chen (2020) apresentam um algoritmo denominado *crosstalk avoidance strategy* (CAS), cujo principal objetivo é mitigar os efeitos do XT por meio do particionamento do núcleo em grupos onde núcleos adjacentes possuem áreas de priorização distintas. Além disso, os autores também apresentam o algoritmo *inter-core XT-aware algorithm* (ICXTAA) para alocação de caminhos ópticos com menor nível de XT.

A Tabela 1 apresenta um levantamento de trabalhos que propõem soluções para alocação de recursos em redes multi-núcleos. De maneira geral, praticamente todos os trabalhos que estudam redes multi-núcleo consideram efeitos inter-núcleos, como o XT. A avaliação do XT pode ser realizada de duas formas (LOBATO et al., 2019):

- i) *XT-avoid*, quando os algoritmos não possuem ciência do valor real de XT; e
- ii) *XT-aware*, quando os algoritmos possuem ciência do valor real de XT e usam essa informação para a tomada de decisão. De forma geral, algoritmos *XT-aware* possuem maior eficiência, em troca de um custo computacional elevado (LOBATO et al., 2019).

Este estudo foca na avaliação dos algoritmos *XT-avoid*, pois essas estratégias são mais suscetíveis aos efeitos do *crosstalk* em comparação às estratégias *XT-aware* (LOBATO et al., 2019).

Tabela 1 – Características dos trabalhos que investigam o problema RMCSA .

Referência	Abordagem XT	Cenário de Tráfego	Quantidade de Núcleos
(FUJII et al., 2014)	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7, 12 e 19
(TODE; HIROTA, 2017)	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7
(OLIVEIRA; FONSECA, 2018)	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7
(YANG; ZHANG; WU, 2018)	<i>XT-aware</i>	estático	3 e 7
(KLINKOWSKI; ZALEWSKI, 2019)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	3, 7 e 12
(LOBATO et al., 2019)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7
(JÚNIOR et al., 2020)	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7
(LIU; XIONG; CHEN, 2020)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7 e 19
(MOGHADDAM; BEYRANVAND; SALEHI, 2020)	<i>XT-aware</i>	estático	3 e 7
(RODRIGUES et al., 2020)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7
(TANG et al., 2020)	<i>XT-aware</i>	estático	7 e 19
(CHATTERJEE et al., 2021)	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7
(LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2021)	<i>XT-avoid</i>	dinâmico	7
(HALDER et al., 2021)	<i>XT-aware</i>	estático	3 e 7
(HALDER; ACHARYA; BHATTACHARYA, 2022)	<i>XT-aware</i>	estático	3, 4, 5 e 7
(LI et al., 2022)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7
(PETALE; ZHAO; SUBRAMANIAM, 2022)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	3 e 7
(SU et al., 2022)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7
(TAKEDA et al., 2022)	<i>XT-aware</i>	estático	3, 7 e 19
(YANG et al., 2022)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7
(RODRIGUES et al., 2023)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7
(SEKI et al., 2023)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7, 19 e 37
(LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2024)	<i>XT-aware</i>	dinâmico	7

Fonte: (LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2024)

Os trabalhos citados nesta seção podem adotar dois tipos de tráfego: estático ou dinâmico. Trabalhos que adotam uma matriz de tráfego estático utilizam um conjunto de requisições já conhecidas e que permanecem ativas na rede por um longo tempo (HALDER et al., 2021).

Por outro lado, em trabalhos que consideram um cenário de tráfego dinâmico, as requisições surgem e encerram dinamicamente. A Tabela 1 mostra que os trabalhos da literatura utilizam fibras multi-núcleos com diferentes quantidades de núcleos, sendo mais comum o uso de fibras com 7 núcleos. Portanto, este trabalho foca em redes com fibras de 7 núcleos por este ser o tipo de fibra mais recorrente na literatura.

Tabela 2 – Limitações de camada física diretamente consideradas nos trabalhos da literatura.

Referência	XT	ASE	SCI	XCI	Avaliação inter-núcleo nos outros	Avaliação intra-núcleo nos outros
(FUJII et al., 2014)	X					
(TODE; HIROTA, 2017)	X					
(OLIVEIRA; FONSECA, 2018)	X					
(YANG; ZHANG; WU, 2018)	X				X	
(KLINKOWSKI; ZALEWSKI, 2019)	X				X	
(LOBATO et al., 2019)	X	X			X	
(Júnior et al., 2020)	X	X	X	X	X	X
(LIU; XIONG; CHEN, 2020)	X				X	
(MOGHADDAM; BEYRANVAND; SALEHI, 2020)	X				X	
(RODRIGUES et al., 2020)	X					
(TANG et al., 2020)	X				X	
(ARAUJO; JR; SOARES, 2021)	X	X	X	X	X	X
(CHATTERJEE et al., 2021)	X					
(LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2021)	X	X	X	X	X	X
(HALDER et al., 2021)	X				X	
(HALDER; ACHARYA; BHATTACHARYA, 2022)	X				X	
(LI et al., 2022)	X			X		
(PETALE; ZHAO; SUBRAMANIAM, 2022)	X					
(SU et al., 2022)	X	X				
(TAKEDA et al., 2022)	X	X			X	
(YANG et al., 2022)	X	X		X	X	X
(RODRIGUES et al., 2023)	X					
(SEKI et al., 2023)	X				X	
(LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2024)	X	X	X	X	X	X
Este trabalho	X	X	X	X	X	X

Fonte: (LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2024)

A literatura aponta que o XT é possivelmente a interferência que mais degrada a QoT dos caminhos ópticos da rede (HAYASHI et al., 2011). Entretanto, os efeitos intra-núcleos também contribuem para a degradação da QoT, principalmente em fibras com baixo acoplamento. Experimentos que demonstram este ponto são apresentados na Seção 5 deste trabalho. Conforme apresentado na Tabela 2, poucos artigos que tratam o problema RMSCA consideram diretamente (isto é, com avaliação dinâmica) algum tipo de interferência intra-núcleo, sendo que alguns consideram apenas o ruído ASE.

Outra questão importante é a verificação dos níveis de QoT dos caminhos ópticos já ativos na rede a partir da alocação de um novo caminho óptico. A Tabela 2 apresenta a classificação dos trabalhos em relação a como os efeitos de camada física são avaliados nos caminhos ópticos já ativos na rede.

A avaliação dos efeitos de camada física nos caminhos ópticos já ativos pode ser feita através dos níveis de efeitos inter-núcleo e de efeitos intra-núcleos (TAKEDA et al., 2022). A quantidade de trabalhos que consideram este tipo de avaliação dinamicamente é relativamente pequena, principalmente em termos da avaliação de efeitos intra-núcleo. A importância deste tipo de análise é demonstrada numericamente na Seção 5.

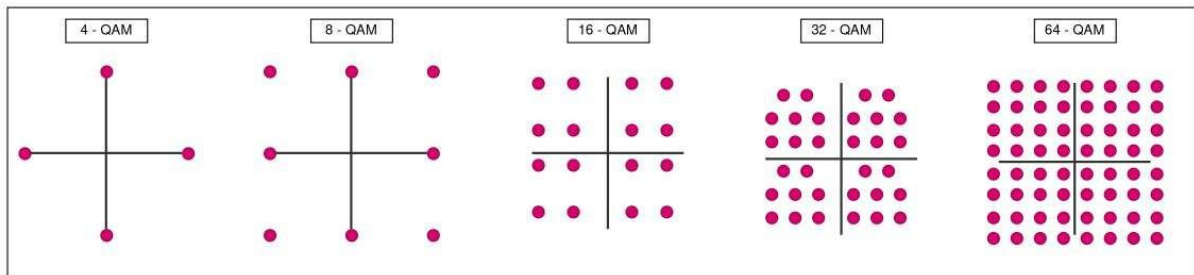
3 REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS MULTI-NÚCLEO

As redes ópticas multi-núcleos integram múltiplos núcleos ópticos em uma mesma fibra, aumentando assim a capacidade de comunicação em comparação com as redes tradicionais de um único núcleo (BRASILEIRO; COSTA; DRUMMOND, 2020). Essa característica não só aumenta a capacidade de transmissão de dados da rede, mas também traz consigo desafios durante o planejamento da sua estrutura.

Uma rede óptica é representada por uma topologia de rede, que por sua vez é definida por um grafo $G = \{N, E\}$, onde N é o conjunto de nós da rede, representando os equipamentos de roteamento e *switches* ópticos, e E é o conjunto de enlaces responsáveis pela conexão entre dois nós na rede. O conjunto de enlaces que interliga um nó de origem O a um nó de destino D é denominado rota (LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2024). Pode haver diferentes rotas para interligar dois nós O e D , sendo a definição da rota entre esses pontos realizada por meio de um algoritmo de roteamento.

Nas EONs, a configuração de cada caminho óptico é fundamental e depende do formato de modulação escolhido para a transferência de informações (LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2024). A modulação é uma técnica essencial em comunicações ópticas e de dados, que determina como os dados são transmitidos através do sinal óptico (TANENBAUM; WETHERALL, 2011). Os formatos de modulação mais utilizados nas EONs incluem a modulação por amplitude em quadratura de 4 (4-QAM), 8 (8-QAM), 16 (16-QAM), 32 (32-QAM), 64 (64-QAM), cada um com suas características únicas, que podem ser visualizadas em um mapa de constelação, conforme exemplificado na Figura 1 (ESSIAMBRE et al., 2010).

Figura 1 – Exemplo de mapa de constelação para cinco formatos de modulação para EON.



Fonte: Adaptado de Essiambre et al. (2010).

Cada um desses formatos de modulação possui uma capacidade específica de transmissão, que é determinada pelo número de símbolos M que eles podem representar. A quantidade máxima de *bits* transmitidos por símbolo é calculada pela fórmula $\log_2(M)$ (ESSIAMBRE et al., 2010). Por exemplo, a taxa de *bits* transportada em um caminho óptico com largura de banda B_m e utilizando um formato de modulação com M símbolos é dada pela equação:

$$R_b = B_m \cdot \log_2(M) \quad (3.1)$$

Essa relação é fundamental, pois indica que, dependendo do formato de modulação escolhido, a largura de banda e, conseqüentemente, a quantidade de *slots* necessários para atender à demanda do cliente podem variar (JINNO et al., 2009; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

É importante ressaltar que, enquanto os formatos de modulação com maior M conseguem transportar mais informações com menos *slots*, eles também se tornam mais vulneráveis a interferências, resultando em um alcance de transmissão reduzido. Essa característica destaca uma das vantagens das EONs, que possibilitam o uso de diferentes formatos de modulação para otimizar o desempenho de diversos caminhos ópticos (JINNO et al., 2009; WALKOWIAK et al., 2020).

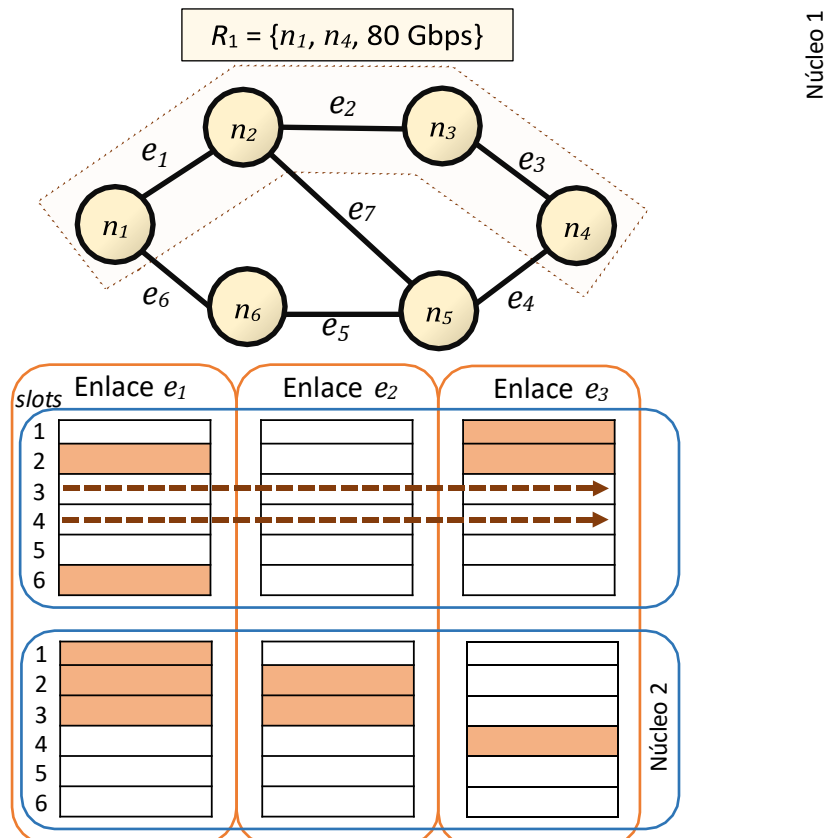
Para resolver o problema RMCSA, um algoritmo RMCSA deve seguir algumas etapas. Inicialmente, é necessário realizar o roteamento entre o nó de origem O e o nó de destino D , e escolher o formato da modulação a ser utilizada. Em seguida, deve-se definir qual dos núcleos de fibra será alocado para o novo caminho óptico (LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2024).

Por fim, é necessário escolher qual conjunto de *slots* será utilizado pelo caminho óptico. A escolha do núcleo e dos *slots* específicos para uma comunicação deve respeitar duas restrições: contiguidade e continuidade. Para atender à contiguidade de espectro, é necessário que os *slots* escolhidos sejam adjacentes, ou seja, vizinhos. A continuidade espectral exige que o mesmo conjunto de *slots* utilizado no primeiro enlace da rota seja mantido nos demais enlaces da mesma rota (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Neste trabalho, uma requisição é representada por $R = (O, D, R_{b,i})$, onde O e D são os nós de origem e destino desejados pelo cliente, e $R_{b,i}$ indica a taxa de *bits* (*bitrate*) solicitada para a transferência de informações na requisição R . A partir dessa definição, uma rota e uma faixa espectral são alocadas para o transporte das informações, estabelecendo um caminho óptico, ou (*lightpath*), para atender à demanda do cliente (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009).

A Figura 2 apresenta um exemplo do problema RMCSA. Neste caso, surge uma requisição R_1 , que deseja uma conexão entre o nó n_1 e nó n_4 , com uma taxa de *bits* de 80 Gbps. No primeiro passo, o algoritmo RMCSA escolhe a rota ($e_1 - e_2 - e_3$) dentre as três opções de menores rotas possíveis. Em seguida, o algoritmo RMCSA seleciona o formato de modulação (ex: 4-QAM) para ser usado pelo caminho óptico a ser alocado. Então, calcula-se a largura de banda (S_m) necessária para atender a taxa de bits requisitada, dada por

Figura 2 – Exemplo do problema RMCSA.



$$\frac{R_b}{S_m} = \frac{2 \log_2 M}{2 \log_2 M} \quad (3.2)$$

em que R_b é a taxa de *bits* pretendida, o fator 2 corresponde as duas polarizações (ESSIAMBRE et al., 2010) e M é o número de pontos de constelação do formato de modulação. Considerando a modulação 4-QAM ($M = 4$) e um $R_b = 80$ Gbps, tem-se que a largura de banda necessária para atender a requisição R_1 é 20 GHz. Portanto, neste exemplo, serão necessários dois *slots* de frequência (12,5 GHz cada) para atender a demanda da requisição. Em seguida, o algoritmo RMCSA escolhe o núcleo 1 dentre os dois núcleos disponíveis. Na etapa de alocação espectral, o algoritmo RMCSA seleciona os *slots* 3 e 4 por estarem livres, contíguos e contínuos ao longo da rota.

4 MODELAGEM DE CAMADA FÍSICA

Neste trabalho, os efeitos de camada física serão verificados em dois grupos: os efeitos intra-núcleo e os efeitos inter-núcleo. Uma forma de verificar os efeitos intra-núcleo 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 (*power spectral density* (PSD)) do caminho óptico e a PSD do ruído ASE e das interferências não-lineares (*nonlinear interference* (NLI)) que o afeta, sendo a NLI é composta pela SCI e XCI. A OSNR é dada por

$$OSNR_m = \frac{G_m}{G_m^{ASE} + G_m^{NLI}} \quad (4.1)$$

onde G_m é a PSD do sinal usado no caminho óptico m . G_m^{ASE} é a PSD total de ruído ASE gerado no caminho óptico m . G_m^{NLI} é a PSD total dos efeitos não lineares (SCI e XCI) que afetam o caminho óptico m . As expressões matemáticas utilizadas para calcular os valores de G_m^{ASE} e G_m^{NLI} são apresentadas nas Subseções 4.1.1 e 4.1.2, respectivamente.

Já os efeitos inter-núcleos, como o XT, ocorrem entre caminhos ópticos que estão em dois núcleos vizinhos, quando estes utilizam os mesmos *slots* de frequência. As expressões matemáticas utilizadas para calcular os valores de XT são apresentadas na Subseção 4.2.1.

4.1 EFEITOS INTRA-NÚCLEO

Os efeitos intra-núcleo ocorrem dentro de um mesmo núcleo de fibra óptica e afetam diretamente a qualidade do sinal transmitido. Nesta seção, serão abordados o ruído ASE e as interferências não-lineares (NLI), cujos impactos são essenciais para avaliar o desempenho da transmissão óptica.

4.1.1 Ruído ASE

O ruído ASE é adicionado quando o sinal óptico passa por amplificadores ópticos, como o (*erbium doped fiber amplifier* (EDFA)) (ESSIAMBRE et al., 2010). Neste contexto, G_m^{ASE} é a PSD do ruído ASE resultante do acúmulo do ruído ASE causado em todos os EDFAs usados no caminho óptico m . O valor de G_m^{ASE} é dado por (HABIBI; BEYRANVAND, 2019)

$$G_m^{ASE} = \sum_{a=1}^{|A_m|} G_{m,a}^{ASE}, \quad (4.2)$$

em que A_m é o conjunto de amplificadores atravessados pelo caminho óptico m , $|A_m|$ é a quantidade de amplificadores atravessados pelo caminho óptico m (número de elementos do conjunto A_m) e a é o índice que identifica a ordem do EDFA ao longo do caminho óptico (isto é, o elemento do conjunto A_m). Assim, $G_{m,a}^{ASE}$ é a PSD do ruído ASE originado no amplificador a , no caminho óptico m , dado por (KUMAR; DEEN, 2014)

$$G_{m,a}^{ASE} = 2n_{sp}h\nu(g_{m,a} - 1), \quad (4.3)$$

em que h é a constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ m²kg/s), ν é a frequência óptica (*optical carrier frequency*) e $g_{m,a}$ é o ganho (*amplifier gain*) do EDFA a do caminho óptico m . n_{sp} é o fator de emissão espontânea (*spontaneous emission factor*), que é relacionado com a figura de ruído F_n (*noise figure*) do amplificador, sendo $F_n = 2n_{sp}$.

4.1.2 Efeitos Não-Lineares

Vários estudos têm sido conduzidos para aprimorar o modelo de ruído Gaussiano (GN), usado para mensurar a NLI (CARENA et al., 2014), (POGGIOLINI; JIANG, 2017). Neste trabalho, a NLI engloba os efeitos não-lineares SCI e XCI. Modelos de camada física baseados em GN, como o apresentado em (JOHANNISSON; AGRELL, 2014), acabam por superestimar o valor da potência da NLI (POGGIOLINI et al., 2015) (HABIBI; BEYRANVAND, 2019). O modelo de ruído Gaussiano aprimorado (EGN) (CARENA et al., 2014) surge como uma evolução do modelo GN, reduzindo a superestimação do modelo GN e levando em consideração o formato de modulação utilizado (HABIBI; BEYRANVAND, 2019). Assim, G_m^{NLI} é a PSD da NLI resultante do acúmulo da NLI em todos os enlaces que compõem a rota usada pelo caminho óptico m , e é dada por (POGGIOLINI; JIANG, 2017)

$$G_m^{NLI} = \sum_{e=1}^{|E_m|} G_{m,e}^{EGN}, \quad (4.4)$$

em que E_m é o conjunto de enlaces atravessados pelo caminho óptico m , $|E_m|$ é a quantidade de enlaces atravessados pelo caminho óptico m e e é o índice que indica a ordem do enlace ao longo do caminho óptico (identifica cada elemento do conjunto E_m). Assim, a PSD da NLI total é dada pelo acúmulo das PSDs da NLI gerada em cada enlace. A PSD da NLI ($G_{m,e}^{EGN}$) gerada no enlace e do caminho óptico m é calculado através do modelo EGN é obtido por (POGGIOLINI; JIANG, 2017)

$$G_{m,e}^{EGN} = G_{m,e}^{GN} - G_{m,e}^{corr}, \quad (4.5)$$

em que $G_{m,e}^{GN}$ é a PSD da NLI obtida pelo modelo GN que é gerada no enlace e do caminho óptico m . $G_{m,e}^{corr}$ é o termo de correção adicionado pelo modelo EGN (POGGIOLINI; JIANG, 2017). O termo de correção ($G_{m,e}^{corr}$) aumenta a precisão do modelo, diminuindo a superestimação da PSD da NLI comum em modelos GN (POGGIOLINI; JIANG, 2017), (HABIBI; BEYRANVAND, 2019). As expressões matemáticas para $G_{m,e}^{GN}$ e $G_{m,e}^{corr}$ podem ser encontradas em (HABIBI; BEYRANVAND, 2019).

4.2 EFEITOS INTER-NÚCLEO

Os efeitos inter-núcleo, por sua vez, ocorrem entre núcleos adjacentes, influenciando a qualidade do sinal ao causar interferências entre diferentes canais. Essa seção se concentrará no *crosstalk*, considerado pela literatura o principal ruído inter-núcleo.

4.2.1 Crosstalk

Em (LOBATO et al., 2019) os autores apresentam um modelo para mensurar a potência média de XT (normalizada pela potência de sinal do caminho óptico) em um determinado caminho óptico m . Esta potência normalizada média de XT é dada por

$$XT_{\mu,m}^{(tot)} = \sum_{e=1}^{|E_m|} XT_{\mu,m,e}, \quad (4.6)$$

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 de *crosstalk* gerada no enlace e do caminho óptico m , dada por (LOBATO et al., 2019)

$$XT_{\mu,m,e} = \frac{P_{XT_{\mu,m,e}}}{P_m}, \quad (4.7)$$

m

em que $P_{XT_{m,e}}$ 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)

$$P_{XT_{m,e}} = \sum_{n=1}^{N_{m,e}} (I_{SO_{m,e,n}} \cdot P_n \cdot h_e \cdot L_e), \quad (4.8)$$

Onde:

- $N_{m,e}$ - 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 .
- n - Índice que identifica o caminho óptico interferente entre os $N_{m,e}$ caminhos possíveis
- $I_{SO_{m,e,n}}$ - Índice de sobreposição de *slots* entre os caminhos ópticos m e n no enlace e .
- P_n - Potência de sinal do n -ésimo caminho óptico adjacente de entre $N_{m,e}$ caminhos ópticos possíveis
- h_e - Comprimento do enlace e
- L_e - Coeficiente de acoplamento de potência da fibra (*power-coupling coefficient*) (admitido o mesmo para todos os núcleos adjacentes).

O valor de $I_{SO_{m,e,n}}$, que é o índice de sobreposição espectral usado na Equação 4.8, é dado por (LOBATO et al., 2019)

$$I_{SO_{m,e,n}} = \frac{S_{SO_{m,e,n}}}{S}, \quad (4.9)$$

 e,n

em que $S_{SO_{m,e,n}}$ 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 no enlace e , e $S_{e,n}$ é a quantidade de *slots* do caminho óptico n no enlace e .

5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para a análise de desempenho dos algoritmos, foi utilizado o método de simulação computacional (JAIN, 1991), através do *slice network simulator* (SNetS) (FONTINELE et al., 2017). Para cada uma das simulações foram geradas 100.000 requisições (JR; CARTAXO; SOARES, 2021), distribuídas uniformemente entre os pares de nós da rede.

A geração de requisições segue uma distribuição de *Poisson* com uma taxa média de λ , enquanto o tempo médio de uso dos circuitos é distribuído exponencialmente com média $1/\mu$. Requisições com demandas de 100, 200, 300 e 400 Gbps foram geradas, com proporções de chegadas de 4, 3, 2 e 1, respectivamente. Cinco simulações foram realizadas com diferentes sementes para geração de variáveis aleatórias.

O nível de confiança adotado foi de 95%. Neste trabalho, são considerados cinco formatos de modulação: 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM e 64-QAM. Os limites de OSNR por símbolo e de XT são apresentados na Tabela 3. Neste caso, para um novo caminho ser alocado, deve-se garantir que os níveis de OSNR e XT deste caminho óptico estejam conforme os valores da Tabela 3 (considerando o formato de modulação utilizado).

Tabela 3 – Limites dos formatos de modulação.

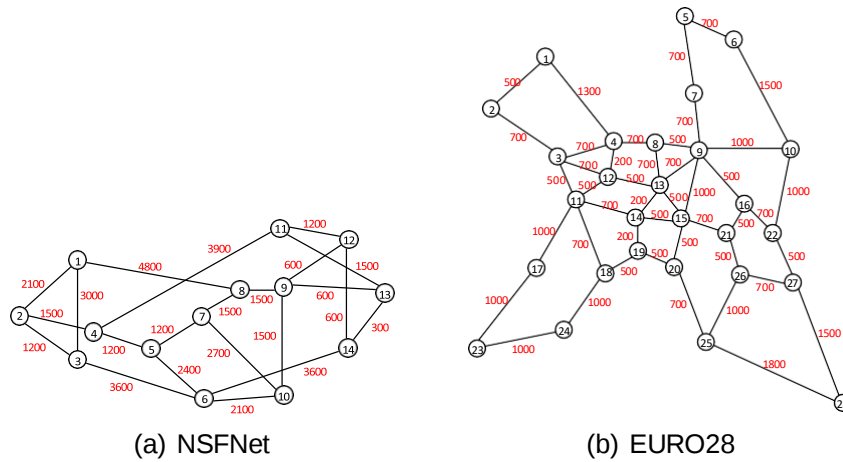
Limite	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
OSNR (dB)	8,95	13,15	15,49	18,51	21,28
XT (dB)	-19,03	-23,23	-25,57	-28,59	-31,36

Fonte: (LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2024)

Nas simulações, cada fibra possui sete núcleos, sendo cada um desses dividido em 320 *slots* de frequência, onde cada *slot* possui 12,5 GHz e a banda de guarda considerada entre cada caminho óptico é de um *slot*. Os ganhos dos amplificadores são ajustados para compensar as perdas dos dispositivos e da fibra. As topologias consideradas nas simulações são a NSFNet e a EURO28, mostradas na Figura 3. Outros parâmetros utilizados estão listados na Tabela 4.

O desempenho dos algoritmos foi observado em diferentes cenários de XT (LOBATO et al., 2019): *i)* sob alta incidência de XT (*high XT* (HXT)); *ii)* sob baixa incidência de XT (*low XT* (LXT)); e *iii)*, sem incidência de XT. A mudança dos cenários de XT esta relacionada a variação do coeficiente de acoplamento (h_e) (LOBATO et al., 2019), de acordo com os valores apresentados na Tabela 4. Quanto maior o acoplamento dos núcleos da fibra, maior a ocorrência da XT. Esta variação é importante para avaliar o desempenho dos algoritmos em diferentes tipos de fibra óptica, em cenários que o XT é o maior fator limitante até cenários sem o impacto de XT. Os algoritmos avaliados neste trabalho são: *i)* o algoritmo ABNE (JÚNIOR et al., 2020);

Figura 3 – Topologias com os comprimentos dos enlaces em km.



Fonte: Adaptado de LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES,(2024, 83).

Tabela 4 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.

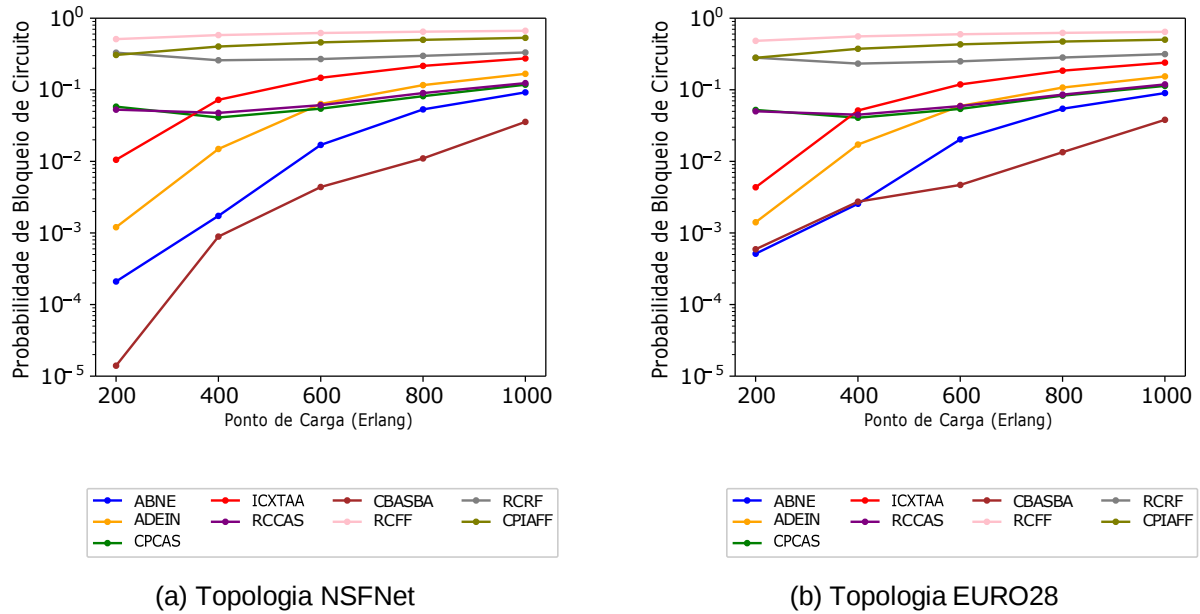
Descrição	Valor
Atenuação da fibra (α)	0,2 dB/km
Coefficiente não linear da fibra (γ)	$1,3 \text{ (W} \cdot \text{km)}^{-1}$
Coefficiente de acoplamento (h_e) (HXT)	$6,4 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$
Coefficiente de acoplamento (h_e) (LXT)	$1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$
Dispersão de velocidade de grupo da fibra (β_2)	-20 ps ² /km
Figura de ruído do amplificador (N_F)	5 dB
Frequência óptica (ν)	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

Fonte: (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015; LOBATO et al., 2019)

ii) o algoritmo ADEIN (ARAUJO; JR; SOARES, 2021); *iii*) o algoritmo ICXTAA (LIU; XIONG; CHEN, 2020); *iv*) o algoritmo CBASBA (LACERDA-JR; CARTAXO; SOARES, 2021); *v*) o algoritmo de escolha de núcleo CP (FUJII et al., 2014) em conjunto com o algoritmo de escolha de espectro CAS (LIU; XIONG; CHEN, 2020); *vi*) o algoritmo de escolha de núcleo CP (FUJII et al., 2014) em conjunto com o algoritmo de escolha de espectro IAFF (TODE; HIROTA, 2017); *vii*) o algoritmo de escolha de núcleo aleatória em conjunto com o algoritmo de escolha de espectro CAS (LIU; XIONG; CHEN, 2020); *viii*) o algoritmo de escolha de núcleo aleatória em conjunto com o algoritmo de escolha de espectro *first fit* (ROSA et al., 2012); e *ix*) o algoritmo de escolha de núcleo aleatória em conjunto com o algoritmo de escolha de espectro *random fit* (ROSA et al., 2012). A Figura 4 mostra o desempenho dos algoritmos em termos de probabilidade de bloqueio de circuito (PBC). A PBC é uma métrica que relaciona a quantidade de requisições bloqueadas (não atendidas) pela quantidade total de requisições que chegaram na

rede.

Figura 4 – Probabilidade de bloqueio em um cenário HXT.



Fonte: Próprio Autor, 2024

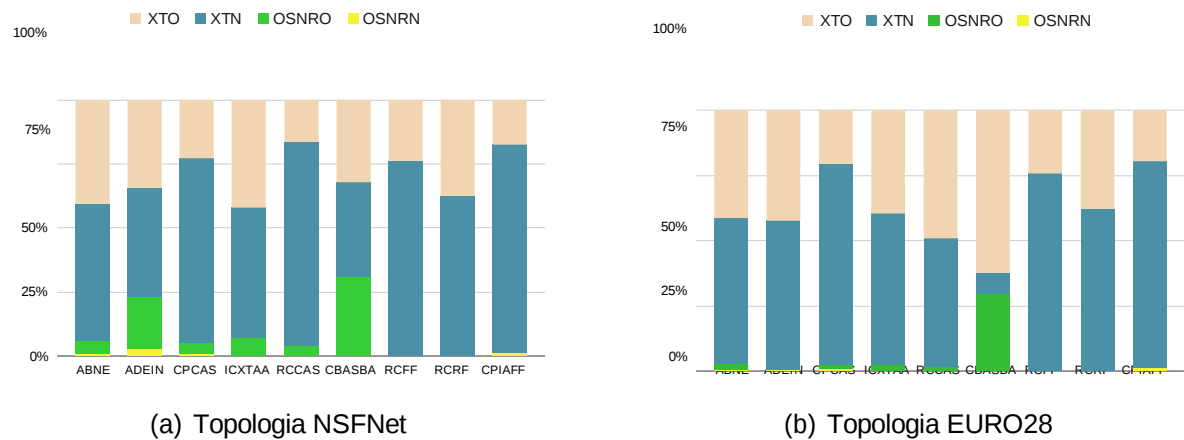
As Figuras 4 (a) e 4 (b) mostram o desempenho dos algoritmos analisados no cenário HXT, nas topologias NSFNet e EURO28, respectivamente. Observa-se que o algoritmo CBASBA apresenta o melhor desempenho em todos os pontos de carga na topologia NSFNet.

Já na topologia EURO28, nos dois primeiros pontos de carga, os algoritmos CBASBA e ABNE apresentam comportamentos semelhantes em relação à quantidade de bloqueios, sendo estes que apresentam melhor desempenho. No entanto, a partir do segundo ponto de carga, observa-se que o ABNE passa a ter um aumento significativo na quantidade de bloqueios, enquanto o CBASBA apresenta uma queda em seus bloqueios. Essa situação se mantém nos demais pontos de carga, destacando assim o CBASBA com o melhor desempenho na topologia em questão.

A Figura 5 revela o fator que causou o bloqueio de uma requisição para os algoritmos no cenário HXT, considerando o maior ponto de carga. Uma requisição é bloqueada quando: o XT é inadequado no novo caminho óptico (XTN), o XT é inadequado nos outros caminhos ópticos já ativos na rede a partir da alocação do novo caminho óptico (XTO); a OSNR é inadequada no novo caminho óptico (OSNRN) e a OSNR é inadequada nos outros caminhos ópticos já ativos na rede a partir da alocação do novo caminho óptico (OSNRO). Se algum destes casos foram satisfeito, a requisição é bloqueada (isto é, não é atendida) e a causa do bloqueio é armazenada para análise posterior.

Em um cenário caracterizado por uma elevada incidência de XT, observa-se que o componente que mais suscita bloqueio de requisições é o XTN, juntamente com o XTO. Tal fenômeno é evidenciado ao analisar os gráficos 5 (a) e 5 (b), constatando-se que essa situação ocorre em ambas as topologias analisadas. Ao comparar a composição dos bloqueios dos algoritmos, nota-se que o CBASBA, que demonstrou melhor desempenho, exibe valores inferiores de XTO e XTN em relação aos demais algoritmos, o que justifica sua menor PBC.

Figura 5 – Componentes de PBC em um cenário HXT.



Fonte: Próprio Autor, 2024

A Tabela 5 exibe o ganho de PBC do CBASBA em relação aos outros algoritmos avaliados no maior ponto de carga, destacando o desempenho superior do CBASBA nesse cenário. O ganho do CBASBA é definido como $GANHO = (Y_n - Y_m)/Y_n$, em que Y_m representa o resultado do CBASBA (PBC) e Y_n é o resultado de outro algoritmo. Como é possível notar, os algoritmos apresentam valores de ganho muito semelhantes nas duas topologias analisadas.

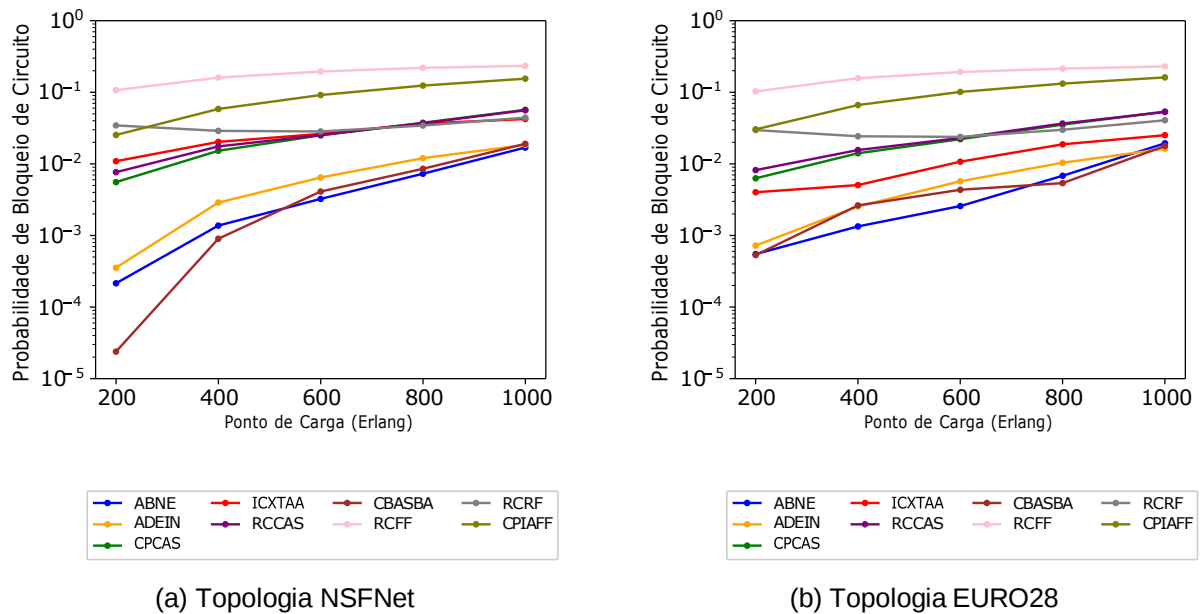
O CBASBA atingiu um ganho de 94,66% e 94,10% em relação ao RCFF nas topologias NSFNet e EURO28, respectivamente, sendo este o que apresentou maior diferença. Em seguida, destaca-se o CPIAFF, com ganhos do CBASBA de 93,31% na topologia NSFNet e 92,40% na EURO28, demonstrando que esses são os dois algoritmos com pior desempenho no cenário em questão.

Tabela 5 – Ganho de PBC do CBASBA em comparação aos demais algoritmos avaliados em um cenário com alto XT.

Algoritmo	NSFNet	EURO28
ABNE	61,30 %	57,69 %
ADEIN	78,69 %	75,24 %
CPCAS	69,77 %	66,40 %
ICXTAA	87,01 %	84,12 %
RCCAS	71,25 %	67,98 %
RCFF	94,66 %	94,10 %
RCRF	89,27 %	87,91 %
CPIAFF	93,31 %	92,40 %

Fonte: Próprio Autor, 2024

Figura 6 – Probabilidade de bloqueio de circuito cenário LXT.



Fonte: Próprio Autor, 2024

As Figuras 6 (a) e 6 (b) ilustram o desempenho dos algoritmos em termos de PBC no cenário LXT, nas topologias NSFNet e EURO28. No início, o CBASBA se destaca na topologia NSFNet, com melhor desempenho em relação aos demais nos pontos de carga 1 e 2 (200 e 400 Erlangs). A partir do terceiro ponto de carga (600 Erlangs), o comportamento muda: o CBASBA apresenta um leve aumento na taxa de bloqueios, enquanto o ABNE apresenta uma redução, tornando-se mais eficiente nos três pontos seguintes (600, 800 e 1000 Erlangs).

No último ponto de carga, os algoritmos CBASBA, ADEIN e ABNE apresentam comportamentos e taxas de bloqueio similares, com o ABNE ainda alcançando os valores mais baixos. Na topologia EURO28, tanto os algoritmos ABNE quanto CBASBA iniciam com valores de bloqueio iguais no primeiro ponto de carga, sendo estes os menores até então.

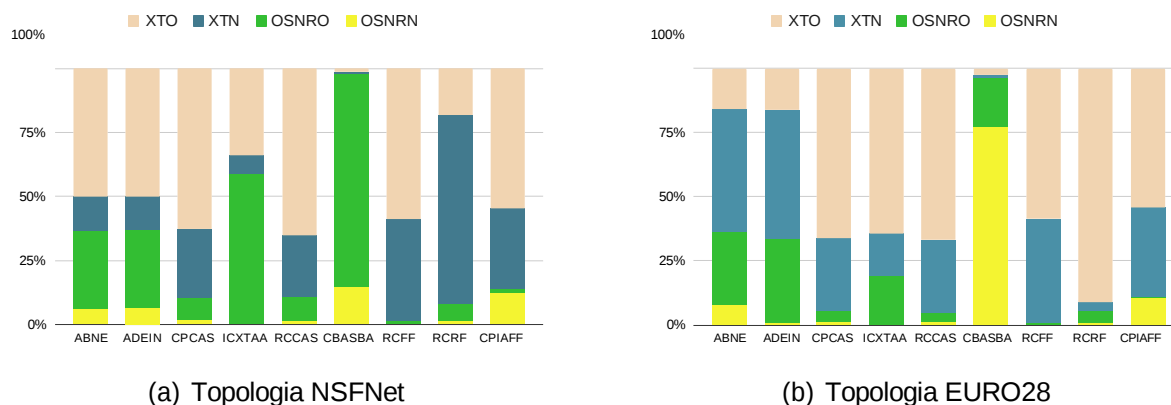
Nos dois pontos seguintes, com 400 e 600 Erlangs respectivamente, o CBASBA apresenta um aumento em seus bloqueios, enquanto o ABNE se mantém, evidenciando sua maior eficiência nesses dois pontos. A partir de 800 Erlangs, há uma alteração no comportamento dos algoritmos: o CBASBA passa a registrar valores menores de bloqueio. No último ponto de carga, os algoritmos ABNE e ADEIN apresentam valores muito semelhantes ao CBASBA; no entanto, o ADEIN registra o menor valor de bloqueio por uma margem muito pequena de diferença.

A Figura 7 ilustra a composição da PBC para os algoritmos no cenário LXT, considerando o pico de carga. Com a redução da incidência de XT, observa-se que seu impacto nas causas dos bloqueios diminui, como evidenciado nas Figuras 7 (a) e 7 (b). As requisições que antes eram bloqueadas majoritariamente por XTN e XTO agora apresentam maior porcentagem de bloqueio por OSNRO e OSNRN, com queda percentual mais acentuada nos bloqueios por XTN.

Analisando os componentes do ABNE, que apresentou o melhor desempenho no cenário LXT, verifica-se que cerca de 40% dos bloqueios são causados por componentes não relacionadas ao XT. Essa situação é bem diferente do que ocorre no cenário HXT, onde esse valor não chega aos 10%. Essa diferença significativa demonstra a capacidade do ABNE de se adaptar a diferentes condições de rede.

Na topologia EURO28, observa-se o mesmo padrão de redução da porcentagem de XTO e XTN como causadores dos bloqueios de requisições, acompanhado por um aumento na participação dos demais componentes.

Figura 7 – Componentes de PBC em um cenário LXT.



Fonte: Próprio Autor, 2024

O XT é considerado a PLI que causa a maior limitação em redes multi-núcleos em vários trabalhos da literatura, como mostrado na Tabela 2. Entretanto, a depender da configuração e do tipo da fibra, os efeitos intra-núcleos podem surgir como o maior fator limitante neste tipo de rede. Estes resultados demonstram a importância da avaliação dos efeitos intra-núcleos em conjunto com os inter-núcleos. Para além disso, demonstra a necessidade de criar algoritmos que busquem reduzir o impacto dos dois grupos de efeitos.

Tabela 6 – Ganho de PBC do CBASBA em comparação aos demais algoritmos avaliados em um cenário com baixo XT.

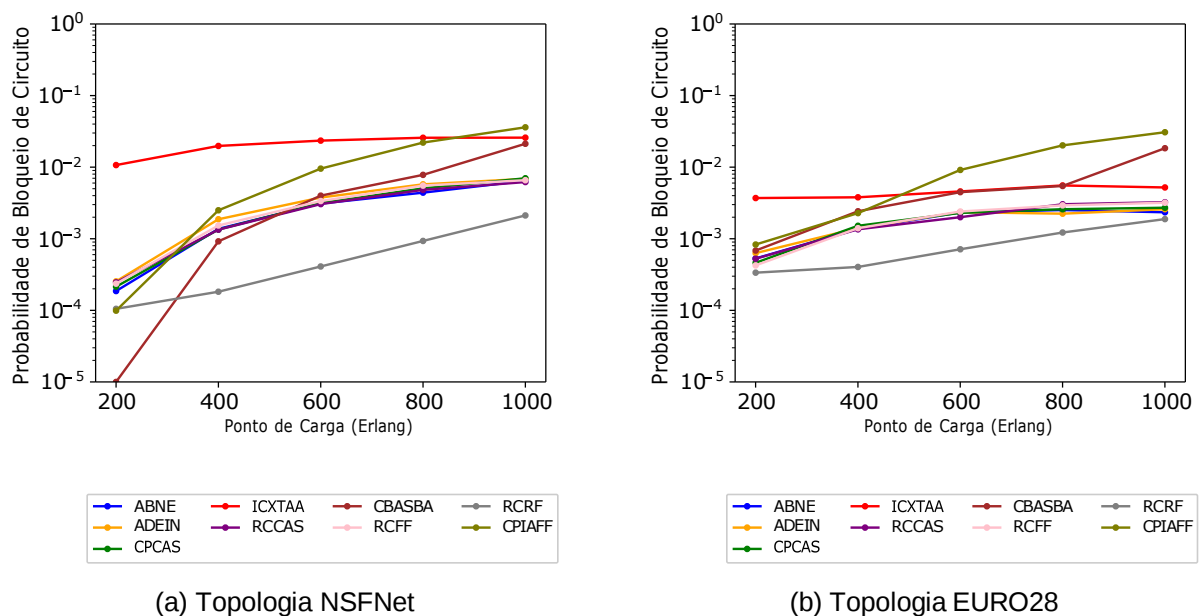
Algoritmo	NSFNet	EURO28
ABNE	-12,75 %	8,20 %
ADEIN	-3,33 %	-9,03 %
CPCAS	66,51 %	66,92 %
ICXTAA	54,89 %	29,28 %
RCCAS	66,02%	66,47 %
RCFF	91,84 %	92,26 %
RCRF	56,94 %	56,23 %
CPIAFF	87,69 %	88,98 %

Fonte: Próprio Autor, 2024

A Tabela 6 apresenta novamente o ganho de PBC do CBASBA em relação aos demais algoritmos no cenário LXT. Observa-se que o padrão de valores de ganho semelhantes em ambas as topologias persiste; no entanto, torna-se evidente uma notável diferença no comportamento dos algoritmos em comparação com os resultados da Tabela 5, onde a incidência de XT é alta.

As principais diferenças observadas dizem respeito ao ganho do CBASBA em comparação com os algoritmos ABNE e ADEIN. Nota-se um ganho de -12,75% na topologia NSFNet e de 8,20% na EURO28 para o ABNE, enquanto o ganho foi de -3,33% na NSFNet e -9,03% na EURO28 para o ADEIN. Isso sugere não apenas uma redução no valor do ganho, mas também uma melhoria no desempenho do ABNE na NSFNet e do ADEIN em ambas as topologias, superando o desempenho do próprio CBASBA. Outra variação significativa a ser mencionada é a redução acentuada no ganho em relação ao ICXTAA na topologia EURO28, onde, no primeiro cenário, o ganho era de 84,12%, caindo para 29,28% no segundo cenário.

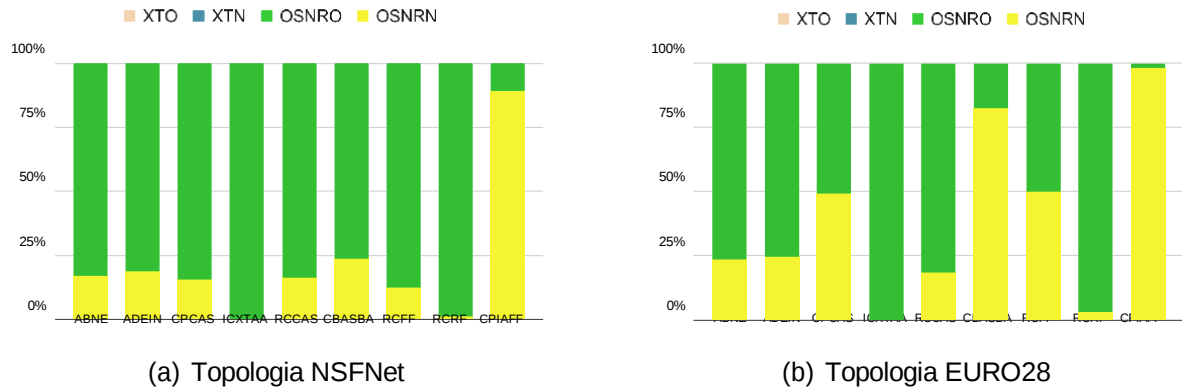
Figura 8 – Probabilidade de bloqueio em um cenário com ausência de XT.



Fonte: Próprio Autor, 2024

Nas Figuras 8 (a) e 8 (b) é mostrado o desempenho dos algoritmos em termos de PBC no cenário sem incidência de XT, nas duas topologias avaliadas. No primeiro ponto de carga, o CBASBA se destaca novamente na topologia NSFNet, como nos cenários anteriores. No entanto, nos demais pontos de carga, ele apresenta um aumento na quantidade de bloqueios, alcançando o terceiro pior desempenho no último ponto de carga. Em contraste, a partir do segundo ponto de carga, o RCRF passa a ter o melhor desempenho em relação aos demais, situação que se mantém nos demais pontos de carga. Já na topologia EURO28, de maneira análoga ao que ocorreu na topologia anterior, o RCRF se destacou como mais eficiente. No entanto, seu bom desempenho em relação aos demais foi observado desde o primeiro ponto de carga.

Figura 9 – Componentes de PBC em um cenário com ausência de XT.



Fonte: Próprio Autor, 2024

A Figura 9 apresenta a composição da PBC para os algoritmos no cenário com ausência de XT, considerando o pico de carga. A ausência de XT leva a um resultado completamente diferente do observado no primeiro cenário, como visto nas Figuras 7 (a) e 7 (b). Os bloqueios de requisições nesse contexto são causados apenas por OSNRN e OSNRO, como é possível verificar em ambas topologias. Essa mudança demonstra como a presença ou ausência de XT pode influenciar nos bloqueios de requisições em redes ópticas principalmente em algoritmos XT-avoid como os avaliados nesse trabalho.

Tabela 7 – Ganho de PBC do RCRF em comparação aos demais algoritmos avaliados em um cenário com ausência XT.

Algoritmo	NSFNet	EURO28
ABNE	67,20 %	19,67 %
ADEIN	69,18 %	27,31 %
CPCAS	69,73 %	30,65 %
ICXTAA	91,81 %	63,87 %
RCCAS	65,82%	41,96 %
RCFF	67,81 %	40,94 %
CBASBA	90,02 %	89,77 %
CPIAFF	94,12 %	93,88 %

Fonte: Próprio Autor, 2024

A Tabela 7 apresenta o ganho de PBC do algoritmo RCRF em relação aos outros algoritmos, destacando seu desempenho superior em ambas as topologias neste último cenário. Diferente dos cenários anteriores, não há uma grande semelhança nas duas topologias em relação aos valores de ganho. Nesta tabela, chama a atenção a disparidade no valor de ganho entre o RCRF e o CBASBA. Nos cenários com alto e

baixo XT, o CBASBA teve um desempenho superior em relação aos outros algoritmos, mas no cenário sem XT, passou a ser o terceiro pior desempenho na topologia NSFNet, com 90,02% de ganho para o RCRF, e o segundo pior na topologia EURO28, com 89,77% de ganho para o RCRF.

6 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi realizada uma análise abrangente do desempenho de algoritmos RMCSA em redes ópticas elásticas, considerando imperfeições da camada física, incluindo cenários com alto, baixo e ausência de XT. Os resultados demonstram que, além do XT, efeitos como ruído ASE, SCI e XCI impactam significativamente o desempenho dos algoritmos RMCSA.

O algoritmo CBASBA se destacou, superando os algoritmos RCRF e CPIAFF em cenários com alto e baixo XT nas topologias NSFNet e EURO28. Em cenários de alto XT, o CBASBA obteve um ganho de 89,27% sobre RCRF e 93,31% sobre CPIAFF na topologia NSFNet, com resultados semelhantes na EURO28. Em cenários de baixo XT, CBASBA manteve sua superioridade, alcançando um ganho de 56,94% sobre RCRF e 87,69% sobre CPIAFF na NSFNet. Entretanto, em cenários sem XT, o RCRF apresentou o melhor desempenho, superando o CBASBA em 90,02% na NSFNet e 89,77% na EURO28.

Esses resultados destacam a importância de considerar diferentes imperfeições da camada física no desenvolvimento de algoritmos RMCSA eficientes. A análise realizada fornece uma base para o desenvolvimento de novas soluções que considerem tanto o XT quanto outras imperfeições, visando um desempenho superior em diferentes cenários de rede óptica.

Para trabalhos futuros pretende-se utilizar as evidências obtidas neste estudo como base para o desenvolvimento de novos algoritmos RMCSA. Esses algoritmos serão projetados com o objetivo de reduzir os efeitos inter e intra-núcleo, buscando assim, promover uma alocação de recursos mais robusta e eficiente em cenários de redes multi-núcleo.

Para alcançar esse objetivo, considera-se a possibilidade de incorporar métodos baseados em inteligência artificial (IA), capazes de analisar e prever, de forma dinâmica e adaptativa, os impactos das imperfeições da camada física, contribuindo para a otimização do desempenho da rede em diferentes cenários.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, A.; BHATIA, V.; PRAKASH, S. Low-crosstalk-margin routing for spectrally-spatially flexible optical networks. *IEEE Communications Letters*, v. 24, n. 4, p. 835–839, 2020.

ARAUJO, P.; JR, J. L.; SOARES, A. 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*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2021. p. 742–755. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbr/article/view/16760>>.

BEYRANVAND, H.; SALEHI, J. A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 18, p. 3043–3054, Sept 2013.

BRASILEIRO, I.; COSTA, L.; DRUMMOND, A. A survey on challenges of spatial division multiplexing enabled elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, v. 38, p. 100584, 2020. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427720300461>>.

CARENA, A.; BOSCO, G.; CURRI, V.; JIANG, Y.; POGGIOLINI, P.; FORGHIERI, F. Egn model of non-linear fiber propagation. *Optics Express*, OSA, v. 22, n. 13, p. 16335–16362, Jun 2014. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-22-13-16335>>.

CHATTERJEE, B.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 3, p. 1776 – 1800, thirdquarter 2015. ISSN 1553-877X.

CHATTERJEE, B. C.; WADUD, A.; AHMED, I.; OKI, E. Priority-based inter-core and inter-mode crosstalk-avoided resource allocation for spectrally-spatially elastic optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, p. 1–14, 2021.

ESSIAMBRE, R.-J.; KRAMER, G.; WINZER, P. J.; FOSCHINI, G. J.; GOEBEL, B. Capacity limits of optical fiber networks. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, OSA, v. 28, n. 4, p. 662–701, Feb 2010. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-28-4-662>>.

FADINI, W.; OKI, E. 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)*. IEEE, 2014. p. 7–12. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:27187418>>.

FONTINELE, A.; SANTOS, I.; NETO, J. N.; CAMPELO, D. R.; SOARES, A. An efficient IA-RMLSA algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, v. 118, p. 1–14, 2017. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128617300634>>.

FUJII, S.; HIROTA, Y.; TODE, H.; MURAKAMI, K. On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 6, n. 12, p. 1059–1071, Dec 2014. ISSN 1943-0639.

HABIBI, M.; BEYRANVAND, H. Impairment-aware manycast routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 11, n. 5, p. 179–189, 2019.

HALDER, J.; ACHARYA, T.; BHATTACHARYA, U. A novel RSCA scheme for offline survivable SDM-EON with advance reservation. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, v. 19, n. 2, p. 804–817, 2022.

HALDER, J.; PAIRA, S.; ACHARYA, T.; BHATTACHARYA, U. Design of a novel XT-aware energy and spectrum efficient RSCA scheme in offline SDM-EON. *Optical Fiber Technology*, v. 63, p. 102502, 2021. ISSN 1068-5200.

HAYASHI, T.; TARU, T.; SHIMAKAWA, O.; SASAKI, T.; SASAOKA, E. Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber. *Optics Express*, v. 19, p. 16576–16592, 08 2011.

JAIN, R. *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. New York: John Wiley Sons, 1991.

JINNO, M.; TAKARA, H.; KOZICKI, B.; TSUKISHIMA, Y.; SONE, Y.; MATSUOKA, S. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, n. 11, p. 66–73, November 2009. ISSN 0163-6804.

JOHANNISSON, P.; AGRELL, E. Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 23, p. 4544–4552, 2014.

JR, J. L.; CARTAXO, A.; SOARES, A. 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*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2021. p. 728–741. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/16759>>.

JÚNIOR, J. L.; FONTINELE, A.; SANTOS, I.; LEÃO, E.; CAMPELO, D.; MONTEIRO, J. A.; SOARES, A. 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*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2020. p. 519–532. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/12306>>.

KLINKOWSKI, M.; ZALEWSKI, G. Dynamic crosstalk-aware lightpath provisioning in spectrally-spatially flexible optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 11, n. 5, p. 213–225, 2019.

KUMAR, S.; DEEN, J. *Fiber Optic Communications: Fundamentals and Applications*. Hoboken: Wiley, 2014.

LACERDA-JR, J. C.; CARTAXO, A.; SOARES, A. New core and spectrum balancing algorithms for space division multiplexed elastic optical networks. In: *2021 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom) (IEEE MeditCom 2021)*. Athens, Greece: IEEE, 2021.

LACERDA-JR, J. C.; CARTAXO, A. V.; SOARES, A. C. Novel dynamic impairment-aware algorithm for modulation, core, and spectrum assignment in SDM-EONs. *Optical Switching and Networking*, v. 51, p. 100763, 2024. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427723000346>>.

LACERDA-JR, J. C.; FONTINELE, A.; MOURA, I.; SOARES, A. Performance evaluation of survivability strategies for elastic optical networks under physical layer impairments. *CLEI Electronic Journal*, v. 20, n. 2, 2017. ISSN 0717- 5000. Disponível em: <<https://doi.org/10.19153/cleiej.20.2.9>>.

LI, X.; YUAN, J.; YANG, L.; ZHANG, Q.; YU, Z. A crosstalk- and fragmentation-aware RMSCA strategy in SDM-EONs based on aligned prime-partition of spectrum resources. *Optical Fiber Technology*, v. 72, p. 102978, 2022. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520022001614>>.

LIU, H.; XIONG, Q.; CHEN, Y. Routing core and spectrum allocation algorithm for inter-core crosstalk and energy efficiency in space division multiplexing elastic optical networks. *IEEE Access*, v. 8, p. 70453–70464, 2020.

LOBATO, F. R.; JACOB, A.; RODRIGUES, J.; CARTAXO, A. V.; COSTA, J. Inter-core crosstalk aware greedy algorithm for spectrum and core assignment in space division multiplexed elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, v. 33, p. 61–73, 2019. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427718301589>>.

MOGHADDAM, E. E.; BEYRANVAND, H.; SALEHI, J. A. 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*, v. 38, n. 6, p. 1095–1102, 2020.

OLIVEIRA, H. M.; FONSECA, N. L. da. Protection in elastic optical networks using failure-independent path protecting p-cycles. *Optical Switching and Networking*, v. 35, p. 100535, 2020. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157342771730245X>>.

OLIVEIRA, H. M. N. S.; FONSECA, N. L. S. D. Protection, routing, modulation, core, and spectrum allocation in SDM elastic optical networks. *IEEE Communications Letters*, v. 22, n. 9, p. 1806–1809, 2018.

PETALE, S.; ZHAO, J.; SUBRAMANIAM, S. TRA: an efficient dynamic resource assignment algorithm for MCF-based SS-FONs. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 14, n. 7, p. 511–523, 2022.

POGGIOLINI, P.; BOSCO, G.; CARENA, A.; CURRI, V.; JIANG, Y.; FORGHIERI, F. A simple and effective closed-form gn model correction formula accounting for signal non-gaussian distribution. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, OSA, v. 33, n. 2, p. 459–473, Jan 2015.

POGGIOLINI, P.; JIANG, Y. Recent advances in the modeling of the impact of nonlinear fiber propagation effects on uncompensated coherent transmission systems. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, v. 35, n. 3, p. 458–480, 2017.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical Networks: A Practical Perspective*. 3. ed. Burlington: Morgan Kaufmann Publishers, 2009.

RICHARDSON, D. J.; FINI, J. M.; NELSON, L. E. Space-division multiplexing in optical fibres. *Nature Photonics*, Springer Science and Business Media LLC, v. 7, n. 5, p. 354–362, Apr 2013. ISSN 1749-4893. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2013.94>>.

RODRIGUES, E.; ROSÁRIO, D.; CERQUEIRA, E.; OLIVEIRA, H. Analysis of routing and resource allocation mechanism for space-division multiplexing elastic optical networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, v. 20, n. 1, p. 762–773, 2023.

RODRIGUES, W. L.; MONTEIRO, N. S.; BORGES, F. A. S.; RABELO, R. de A. L.; SOARES, A. C. B. An adaptive guard band selection based on convolutional neural network. In: *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. Toronto: IEEE, 2020. p. 2814–2821.

ROSA, A.; CAVDAR, C.; CARVALHO, S.; COSTA, J.; WOSINSKA, L. Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks. In: *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*. Istanbul, Turkey: IEEE, 2012. p. 242–246.

SEKI, Y.; TANIGAWA, Y.; HIROTA, Y.; TODE, H. Core and spectrum allocation to achieve graceful degradation of inter-core crosstalk with generalized hierarchical core prioritization on space-division multiplexing elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, v. 15, n. 1, p. 43–56, 2023.

SU, J.; ZHANG, J.; WANG, J.; REN, D.; HU, J.; ZHAO, J. Dynamic impairment-aware RMCSA in multi-core fiber-based elastic optical networks. *Optics Communications*, p. 128361, 2022. ISSN 0030-4018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401822002620>>.

TAKEDA, K.; SATO, T.; CHATTERJEE, B. C.; OKI, E. 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*, p. 1–15, 2022. Disponível em: <www.doi.org/10.1109/TNSM.2022.3157387>.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. *Redes de Computadores*. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2011.

TANG, F.; LI, Y.; SHEN, G.; ROUSKAS, G. N. 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*, v. 38, n. 20, p. 5595–5607, 2020.

TODE, H.; HIROTA, Y. Routing, spectrum, and core and/or mode assignment on space-division multiplexing optical networks [invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 9, n. 1, p. A99–A113, 2017.

WALKOWIAK, K.; KLINKOWSKI, M.; WŁODARCZYK, A.; KASPRZAK, A. Predeployment of transponders for dynamic lightpath provisioning in translucent spectrally–spatially flexible optical networks. *Applied Sciences*, v. 10, n. 8, 2020. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/8/2802>>.

WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks. *Optical Switching and Networking*, v. 11, p. 83–91, 2014. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427713000799>>.

YANG, H.; YAO, Q.; BAO, B.; YU, A.; ZHANG, J.; VASILAKOS, A. V. Multi-associated parameters aggregation-based routing and resources allocation in multi-core elastic optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 30, n. 5, p. 2145–2157, 2022.

YANG, M.; ZHANG, Y.; WU, Q. 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*, v. 10, n. 3, p. 195–208, 2018.

ZHAO, J.; WYMEERSCH, H.; AGRELL, E. Nonlinear impairment aware resource allocation in elastic optical networks. In: *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2015. p. 1–3.