



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
Doutorado em Ciência da Computação Associação
UFMA/UFPI

Jurandir Cavalcante Lacerda Júnior

**Alocação de Recursos em Redes Ópticas Elásticas com
Multiplexação por Divisão Espacial Considerando
Limitações da Camada Física**

Orientador: Dr. André Castelo Branco Soares
Coorientador: Dr. Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo

São Luís - MA
Março, 2024

Jurandir Cavalcante Lacerda Júnior

**Alocação de Recursos em Redes Ópticas Elásticas com
Multiplexação por Divisão Espacial Considerando
Limitações da Camada Física**

TESE DE DOUTORADO

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciência da Computação, ao Doutorado em Ciência da Computação, Associação UFMA/UFPI.

Orientador: Dr. André Castelo Branco Soares
Coorientador: Dr. Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo

São Luís - MA
Março, 2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Lacerda Júnior, Jurandir Cavalcante.

Alocação de Recursos em Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial Considerando Limitações da Camada Física / Jurandir Cavalcante Lacerda Júnior. - 2024.

150 p.

Coorientador(a) 1: Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo.

Orientador(a): André Castelo Branco Soares.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação Doutorado em Ciência da Computação - Associação UFMA/UFPI, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.

1. Fibras multi-núcleos. 2. Limitações de camada física. 3. Multiplexação por divisão espacial. 4. Problema RMCSA. 5. Redes ópticas elásticas. I. Cartaxo, Adolfo da Visitação Tregeira. II. Soares, André Castelo

Jurandir Cavalcante Lacerda Júnior

Alocação de Recursos em Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial Considerando Limitações da Camada Física

A presente Tese de Doutorado foi avaliada e aprovada por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Dr. André Castelo Branco Soares

Presidente da banca - Orientador
Universidade Federal do Piauí - UFPI

Dr. Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo

Coorientador
Instituto Universitário de Lisboa - Iscte

Dr. Anselmo Cardoso de Paiva

Universidade Federal do Maranhão - UFMA

Dr. José Valdemir dos Reis Júnior

Universidade Federal do Piauí - UFPI

Dr. André Costa Drummond

Universidade de Brasília - UnB

Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Dr. André Castelo Branco Soares

Orientador

Dr. Rodrigo de Melo Souza Veras

Coordenador

São Luís - MA, 13 de Março de 2024

*Aos meus pais Jurandir e Sandra,
por sempre estarem comigo em todos os momentos.*

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Jurandir e Sandra, por todo amor e dedicação dado a mim durante a vida. Meus pais são exemplos de bondade, integridade, caridade e compaixão que seguirei até o fim da vida. Agradeço também ao meu irmão José Vítor, a minha avó Delzuith Cavalcante (*in memoriam*) e a todos os meus familiares e amigos que de alguma forma me ajudaram nessa jornada.

A minha esposa, Aline Moraes, pelo companheirismo, amor, carinho, cumplicidade e risadas. Me acalmado nos momentos em que mais precisei e fazendo minha vida mais feliz a cada dia.

Ao meu filho, Vinícius de Moraes Lacerda, que me deu forças e me fez seguir em frente nos momentos difíceis (mesmo sem saber o que significa "dar forças", muito menos o que são momentos difíceis).

Ao meu orientador, professor André Soares, por acreditar no meu trabalho, pelas valiosas contribuições durante toda a minha formação e por me guiar no papel de orientador na graduação, mestrado e doutorado.

Ao meu coorientador, professor Adolfo Cartaxo, pelos ensinamentos, paciência, disponibilidade, dedicação no processo de orientação e pelo apoio durante o ano em que morei em Lisboa.

Aos colegas do Laboratório DiSNeL, em especial aos amigos Alexandre Fontinele, Iallen Santos, Neclyeux Monteiro e Selles Araújo pelas parcerias e escritas de artigos.

Ao Instituto Federal do Piauí e todos os colegas do Campus Corrente, que me deram a oportunidade de me dedicar ao curso de doutorado. Em especial os amigos Anaian Bembem, Carlos Estevão, Felipe Santos, Israel Lobato, Juan Morysson e Marcília Martins.

Aos amigos que a vida me deu e que de alguma forma me ajudaram durante o doutorado: Igo Moura, Thiago Piauilino, Thiago Rodrigues, Filipe Santos, Kássio Rodrigues, Bruna Iwata, Mike Christian, Jairo Lima, Míria Aragão, Claydivan Wesley, Ravenna Galvão, Fernanda Vieira, Nayra Carvalho e Antônia Francisca:.

À CAPES pelo apoio financeiro durante seis dos treze meses em que estudei em Portugal.

*"No presente, a mente, o corpo é diferente
e o passado é uma roupa que não nos serve mais..."*
(Belchior)

Resumo

Nos últimos anos, a comunidade científica tem apontado as redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (*space-division multiplexed elastic optical networks* (SDM-EONs)) para compor a infraestrutura das redes de transporte e atender a crescente demanda de tráfego dos usuários. Nas SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos, a fibra óptica é composta por vários núcleos e cada núcleo possui seu próprio espectro óptico. Uma questão fundamental no funcionamento de uma SDM-EON é a alocação de novos caminhos ópticos a partir de chegadas de requisições para novas conexões. Esta questão está relacionada ao problema de alocação de recursos, conhecido como problema de roteamento, escolha de modulação, alocação de núcleo e espectro (*routing, modulation, core, and spectrum assignment* (RMCSA)). Um dos desafios para resolver o problema RMCSA são as limitações da camada física da rede. As limitações de camada física impactam diretamente na qualidade de transmissão dos caminhos ópticos da rede. Dentre as várias limitações de camada física, destacam-se o *crosstalk* inter-núcleo, o ruído de emissão espontânea amplificada (*amplified spontaneous emission* (ASE)) e as interferências não-lineares. Neste contexto, o objetivo desta tese é propor algoritmos para resolver o problema de alocação de recursos em SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos, considerando as limitações da camada física da rede. Como contribuições são propostos cinco algoritmos: *i*) o algoritmo de balanceamento de espectro (ABE); *ii*) o algoritmo de balanceamento de núcleo (ABN); *iii*) o algoritmo com aprendizado de máquina para escolha de núcleo (AMN); *iv*) o algoritmo ciente de *crosstalk* para alocação de núcleo e espectro (ACiNE); e *v*) o algoritmo ciente de limitações intra e inter núcleo para escolha de modulação, núcleo e espectro (CIA-MCSA). Os algoritmos propostos são submetidos a um processo de avaliação de desempenho que considera 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. Os resultados numéricos mostram que, quando comparados a outras propostas da literatura, os algoritmos propostos apresentam menor probabilidade de bloqueio de circuito e menor probabilidade de bloqueio de banda.

Palavras-chave: redes ópticas elásticas. multiplexação por divisão espacial. fibras multi-núcleos. roteamento, escolha de modulação, alocação de núcleo e espectro. limitações de camada física.

Abstract

In recent years, the scientific community has indicated the space-division multiplexed elastic optical networks (SDM-EONs) to compose the infrastructure of transport networks and satisfy the growing demand for user traffic. In SDM-EONs based on uncoupled multi-core fiber (MCF), the optical fiber is composed of several cores, each with its own optical spectrum. A fundamental issue in the operation of an SDM-EON is the allocation of a new lightpath based on the arrival of requests for new connections. This question is related to the resource allocation problem, known as the routing, modulation, core, and spectrum assignment (RMCSA) problem. One of the challenges in solving the RMCSA problem is the physical layer impairments of the network. Physical layer impairments directly impact the quality of transmission of the network's lightpaths. Among the diverse physical layer impairments, the inter-core crosstalk, the amplified spontaneous emission (ASE) noise, and the non-linear interference stand out. In this context, this thesis proposes algorithms to solve the resource allocation problem in SDM-EONs MCF-based, considering the network's physical layer impairments. As contributions, five algorithms are proposed: *i*) the spectrum balancing algorithm (ABE); *ii*) the core balancing algorithm (ABN); *iii*) the machine learning-based algorithm for core selection (AMN); *iv*) the crosstalk-aware algorithm for core and spectrum allocation (ACiNE); and *v*) the inter-core crosstalk-aware and intra-core impairment-aware algorithm for modulation, core, and spectrum assignment (CIA-MCSA). The proposed algorithms are subjected to a performance evaluation process considering different modulation formats, operation in different network topologies, multi-core fibers with different coupling coefficients, dynamic traffic scenarios, and heterogeneous bit rate demands among customers. The numerical results show that, when compared to other proposals in the literature, the proposed algorithms have a lower circuit blocking probability and a lower bandwidth blocking probability.

Keywords: elastic optical networks. spatial division multiplexing. multicore fiber. routing, modulation, core, and spectrum assignment. physical layer impairments.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Crescimento global do número de usuários na Internet (CISCO 2021).	25
Figura 2 – Crescimento global do tráfego mensal na Internet (CISCO 2019).	26
Figura 3 – Exemplo de topologia com seis nós e sete enlaces.	33
Figura 4 – Exemplo de três rotas para interligar dois nós da rede, sendo a origem no nó n_1 e o destino no nó n_4 .	34
Figura 5 – Arquitetura de uma rede óptica elástica (Chatterjee, Sarma e Oki 2015).	34
Figura 6 – Atenuação em diferentes comprimentos de onda (Tanenbaum e Wetherall 2011) (Luo et al. 2022).	35
Figura 7 – Grade de frequência com espaçamento entre canais de 100 GHz (ITU) com base em uma frequência central de referência de 193,1 THz (Ramaswami, Sivarajan e Sasaki 2009).	36
Figura 8 – Representação dos <i>spans</i> em uma rota composta por dois enlaces.	37
Figura 9 – Exemplo da ocupação espectral dentro de uma fibra óptica de uma EON.	38
Figura 10 – Exemplo de formatos de modulação para <i>elastic optical network</i> (EON). (a) Exemplo de mapa de constelação para cinco formatos de modulação. (b) Gráfico de eficiência versus alcance de transmissão para cinco formatos de modulação.	38
Figura 11 – Ilustração de uma fibra com sete núcleos. (a) Perspectiva para ilustrar o posicionamento de cada núcleo; (b) Corte transversal da MCF para ilustrar a distância entre núcleos.	39
Figura 12 – Tipos de fibras ópticas considerando a quantidade de modos e núcleos.	40
Figura 13 – Fibras monomodo de multi-núcleos. (a) MCF com 7 núcleos. (b) MCF com 12 núcleos. (c) MCF com 19 núcleos.	41
Figura 14 – Representação do <i>crosstalk</i> em uma fibra multi-núcleo.	41
Figura 15 – Restrições de contiguidade e continuidade espectral em três enlaces com dois núcleos cada.	43
Figura 16 – Exemplo de resolução do problema RMCSA a partir da chegada de uma requisição R_1 .	44
Figura 17 – Representação da adição de bits de <i>overhead</i> de FEC.	46
Figura 18 – Representação da (a) SNR e (b) OSNR. u.l: unidades lineares, AWGN: <i>additive white Gaussian noise</i> , ASE: <i>amplified spontaneous emission</i> (Essiambre et al. 2010).	49
Figura 19 – Exemplo de uma requisição bloqueada por OSNRO.	52
Figura 20 – Exemplo de grade de 33,6 GHz, com 9 canais, apresentando a frequência central do canal sob teste f_m .	56

Figura 21 – Potência normalizada de NLI acumulada <i>vs</i> número de spans.	58
Figura 22 – Potência normalizada de NLI acumulada <i>vs</i> número de spans para os experimentos feitos no teste de mesa e no SNetS.	59
Figura 23 – Sobreposição espectral parcial entre dois caminhos ópticos <i>m</i> e <i>n</i> , que estão alocados em núcleos vizinhos.	61
Figura 24 – Caminho óptico composto por dois enlaces e com diferentes valores de sobreposição espectral em cada enlace.	62
Figura 25 – Exemplo do funcionamento do ABE. (a) Disposição dos núcleos. (b) Regras de alocação espectral de cada núcleo.	78
Figura 26 – Organização do SNetS.	81
Figura 27 – Tipos de bloqueios de requisições considerados pelo SNetS.	81
Figura 28 – Topologias com os comprimentos dos enlaces em km.	83
Figura 29 – Algoritmos de alocação de espectro em termos de PBC em cenário LXT.	86
Figura 30 – Algoritmos de alocação de espectro em termos de PBB em cenário LXT.	87
Figura 31 – Algoritmos de alocação de espectro em termos de PBB em cenário HXT.	88
Figura 32 – Componentes da PBB dos algoritmos de alocação de espectro.	89
Figura 33 – Exemplo de funcionamento do ABN em uma situação com dois enlaces e três núcleos em cada enlace.	93
Figura 34 – Fluxo de funcionamento do algoritmo AMN.	95
Figura 35 – Arquitetura da rede neural artificial do AMN.	97
Figura 36 – Algoritmos de alocação de núcleo em termos de PBC em cenário HXT.	99
Figura 37 – Algoritmos de alocação de núcleo em termos de PBC em cenário LXT.	100
Figura 38 – Algoritmos de alocação de núcleo em termos de PBB em cenário HXT.	101
Figura 39 – Algoritmos de alocação de núcleo em termos de PBB em cenário LXT.	102
Figura 40 – Exemplo de funcionamento do ACiNE, com a descrição das regiões de prioridade de cada núcleo.	108
Figura 41 – Algoritmos de alocação de núcleo e espectro em termos de PBC em cenário HXT.	109
Figura 42 – Algoritmos de alocação de núcleo e espectro em termos de PBB em cenário HXT.	110
Figura 43 – Algoritmos de alocação de núcleo e espectro em termos de PBC em cenário LXT.	111
Figura 44 – Algoritmos de alocação de núcleo e espectro em termos de PBB em cenário LXT.	113
Figura 45 – Exemplo da fase de balanceamento do CIA-MCSA para fibras de sete e dezenove núcleos.	117

Figura 46 – Exemplo do uso do σ pelo algoritmo CIA-MCSA.	119
Figura 47 – Probabilidade de bloqueio de circuito para o CIA-MCSA com diferentes cargas e valores de σ , na Topologia NSFNet com HXT.	123
Figura 48 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBC em cenário HXT.	124
Figura 49 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBC em cenário LXT.	125
Figura 50 – Porcentagem de cada causa de bloqueio para os algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBC e cenário HXT.	127
Figura 51 – Porcentagem de cada causa de bloqueio para os algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBC e cenário LXT.	128
Figura 52 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBB em cenário HXT.	129
Figura 53 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBB em cenário LXT.	130
Figura 54 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de UE em cenário HXT.	131
Figura 55 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de UE em cenário LXT.	132

Lista de tabelas

Tabela 1 – Histórico global da evolução do tráfego na Internet (CISCO 2019).	26
Tabela 2 – Exemplo de SNR requerida obtida a partir da expressão 3.4 (4-QAM, 16-QAM e 64-QAM), da expressão 3.6 (8-QAM) e da expressão 3.7 (32-QAM).	49
Tabela 3 – Exemplo de OSNR requerida em condições reais, em dB, para cada formato de modulação. Considerando $\Delta OSNR_m = 1$ dB e $\Delta OSNR_p = 1$ dB.	50
Tabela 4 – Limites dos formatos de modulação considerando uma BER de $1,3 \times 10^{-2}$	51
Tabela 5 – Valores do parâmetro Φ para cada formato de modulação.	56
Tabela 6 – Parâmetros do experimento e seus valores (Poggiolini e Jiang 2017).	57
Tabela 7 – Detalhamento dos caminhos ópticos interferentes em m_1 no exemplo da Figura 24.	63
Tabela 8 – Parâmetros de camada física para definição do alcance de transmissão.	64
Tabela 9 – Alcance de transmissão máximo aproximado, para cada formato de modulação, considerando uma BER= $1,3 \times 10^{-2}$, conexões com bitrate de 100 Gbps, FEC de 25% (125 Gbps na linha) a uma potência de -3 dBm.	64
Tabela 10 – Alcance de transmissão máximo aproximado, para cada formato de modulação, considerando uma BER= $1,3 \times 10^{-2}$, conexões com bitrate de 100 Gbps, FEC de 25% (125 Gbps na linha) a uma potência de -1 dBm.	65
Tabela 11 – Características gerais dos trabalhos que investigam o problema RMCSA.	73
Tabela 12 – Limitações de camada física diretamente consideradas nos trabalhos da literatura.	74
Tabela 13 – Classificação dos trabalhos da literatura quanto a avaliação direta das limitações de camada física em caminhos ópticos já ativos.	75
Tabela 14 – Limites dos formatos de modulação considerando uma BER de $1,3 \times 10^{-2}$	82
Tabela 15 – Informações sobre as topologias NSFNet e EURO28.	84
Tabela 16 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.	84
Tabela 17 – Resultados das métricas avaliativas da rede neural do AMN.	98
Tabela 18 – Matriz de confusão dos testes da rede neural do algoritmo AMN.	98
Tabela 19 – Ganho médio do AMN em relação aos outros algoritmos avaliados.	103

Tabela 20 – Composição da probabilidade de bloqueio de circuito no cenário com baixa incidência de <i>crossstalk</i> no último ponto de carga.	112
Tabela 21 – Ganho de probabilidade de bloqueio de circuito do CIA-MCSA comparados com outros algoritmos no maior ponto de carga de cada cenário. . .	125
Tabela 22 – Ganho de probabilidade de bloqueio de banda do CIA-MCSA comparados com outros algoritmos no maior ponto de carga de cada cenário. . .	129
Tabela 23 – Utilização de espectro adicional do CIA-MCSA comparado com outros algoritmos e considerando a média de todos os pontos de carga.	132

Lista de abreviaturas e siglas

- 4-QAM** *4-quadrature amplitude modulation*
- 8-QAM** *8-quadrature amplitude modulation*
- 16-QAM** *16-quadrature amplitude modulation*
- 32-QAM** *32-quadrature amplitude modulation*
- 64-QAM** *64-quadrature amplitude modulation*
- ABE** algoritmo de balanceamento de espectro
- ABN** algoritmo de balanceamento de núcleo
- ACiNE** algoritmo ciente de *crosstalk* para alocação de núcleo e espectro
- ADEIN** algoritmo de distanciamento espectral inter-núcleos
- AMN** algoritmo com aprendizado de máquina para escolha de núcleo
- ARD** ausência de recursos disponíveis
- ASE** *amplified spontaneous emission*
- BER** *bit error-rate*
- BVT** *bandwidth-variable transponder*
- BV-WXC** *bandwidth-variable cross-connect*
- CAS** *crosstalk avoidance strategy*
- CIA-MCSA** *XT-aware and intra-core impairment-aware algorithm for modulation, core, and spectrum assignment*
- CP** *core prioritization*
- CP-IAFF** *core prioritization com intra-area FF*
- CP-FF** *core prioritization com first fit*
- CP-RF** *core prioritization com random fit*
- CSA** *core and spectrum allocation*
- CUT** *channel under test*
- DI-RMCSA** *dynamic impairment-aware routing, modulation, core and spectrum allocation (RMCSA) algorithm*
- EDFA** *erbium doped fiber amplifier*

EGN *enhanced Gaussian-noise*

EON *elastic optical network*

FEC *forward error correction*

FM-MCF *few-mode multi-core fiber*

FM-SCF *few-mode single-core fiber*

FWM *four-wave mixing*

GN *gaussian-noise*

HXT *high crosstalk*

IC-XT *inter-core crosstalk*

ICXT-AA *intercore crosstalk aware algorithm*

ILP *integer linear programming*

IM-XT *inter-mode crosstalk*

IAFF *intra-area first fit assignment from highest rank core*

ITU *International Telecommunications Union*

KNN *k-nearest neighbors*

KSP *k-shortest path*

LXT *low crosstalk*

MCF *multi-core fiber*

MCSA *modulation, core, and spectrum assignment*

MILP *mixed integer linear programming*

ML *modulation level*

MMF *multi-mode fiber*

MPMN *multipath protection for multi-core network*

NLI *non-linear interference*

OSNR *optical signal-to-noise ratio*

OSNR-LA *optical signal to noise ratio aware lightpath allocation algorithm*

OSNRN *optical signal-to-noise ratio (OSNR) inadequado no novo caminho óptico*

OSNRO *OSNR inadequado nos outros caminhos ópticos já ativos na rede*

PANORAMIC *hybrid routing, modulation, spectrum and core allocation based on the mapping scheme in spatial division multiplexing elastic optical networks (SDM-EONs)*

PBC *probabilidade de bloqueio de circuito*

PBB *probabilidade de bloqueio de banda*

PERFECTA *protecting, routing, modulation format, core and spectrum allocation algorithm*

PGNIE *algoritmo de priorização de grupos de núcleos e intervalos de espectro*

PLI *physical layer impairment*

PSD *power spectral density*

QoT *quality of transmission*

RC-FF *random core com first fit*

RC-RF *random core com random fit*

RCMLSA *routing, core, modulation level, and spectrum assignment*

RMCSA *routing, modulation, core and spectrum allocation*

RMLCSA *routing, modulation level, core and spectrum allocation*

RMLSCA *routing, modulation level, spectrum and core allocation*

RMLSSA *routing, modulation level, space, and spectrum assignment*

RMSCA *routing, modulation, spectrum and core allocation*

RMLSA *routing, modulation level, and spectrum allocation*

RMSA *routing, modulation, and spectrum allocation*

RSCA *routing, spectrum and core assignment*

RSCTA *routing, spectrum, core, and time assignment*

SCA *spectrum and core allocation*

SCF *single-core fiber*

SCI *self-channel interference*

SDM *space division multiplexing*

SDM-EON *spatial division multiplexing elastic optical network*

SGA *stepwise greedy algorithm*

SMF *single-mode fiber*

SM-MCF *single-mode multi-core fiber*

SM-SCF *single-mode single-core fiber*

SNetS *SLICE network simulator*

SNR *signal-to-noise ratio*

SOFM *self-organizing feature mapping*

SPM *self-phase modulation*

SXA-RMCSA-HP *strictly XT-Aware RM-CSA with hybrid protection scheme*

TUN *total use in neighbors*

UC *use in the candidate core*

UE *utilização do espectro*

WCC-XT *worst-case-per-core XT*

WDM *wavelength division multiplexing*

WUN *weighted use of neighbors*

XCI *cross-channel interference*

XPM *cross-phase modulation*

XT *crosstalk*

XTgreedy *XT-aware greedy algorithm*

XTN *crosstalk (XT) inadequado no novo caminho óptico*

XTO *XT inadequado nos outros caminhos ópticos já ativos na rede*

Lista de símbolos

α	Atenuação de campo da fibra (<i>optical field fiber loss</i>), dado em m^{-1}
β	Constante de propagação (<i>propagation constant</i>), dado em m^{-1}
β_2	Dispersão de velocidade de grupo da fibra (<i>group-velocity dispersion</i>), em s^2/m
$\beta_{c,m}$	Varição longitudinal da constante de propagação no núcleo m
γ	Coeficiente não linear da fibra (<i>fiber nonlinearity coefficient</i>), dado em $1/(\text{W}\cdot\text{m})$
$\Delta OSNR_m$	Margem de OSNR a ser adicionada a $OSNR_{req,ideal}$
$\Delta OSNR_p$	Penalidade de OSNR (referente ao XT) a ser adicionada a $OSNR_{req,ideal}$
ϵ	Número de Euler ($\epsilon = 2,718$)
Λ	Distância entre núcleos (<i>core pitch</i>), dado em m
λ	Comprimento de onda (<i>wavelength of the optical field</i>), dado em m
λ'	Taxa média de chegada
μ	Tempo médio de retenção de um caminho óptico
ν	Frequência óptica (<i>optical carrier frequency</i>), dado em Hz
ξ	Igual a $(8\gamma^2 L_{eff}^2 (2\alpha)) / (27\pi \beta_2)$, dado em $1/(\text{W}^2\cdot\text{s}^2)$
Φ	Constante relacionada com o formato de modulação
Φ_m	Constante relacionada com o formato de modulação do caminho óptico m
Φ_n	Constante relacionada com o formato de modulação do n -ésimo caminho óptico no enlace e
ρ	Carga da rede, em Erlangs
σ	Incremento de OSNR do algoritmo CIA-MCSA
ψ	Parâmetro para quantificar a PSD da NLI do modelo GN

$\psi_{m,m}$	Parâmetro para quantificar a interferência no próprio canal (SCI) para o modelo GN
$\psi_{m,n}$	Parâmetro para quantificar a interferência entre canais (XCI) para o modelo GN
ω	Parâmetro para quantificar o termo de correção do modelo EGN
$\omega_{m,m}$	Parâmetro para quantificar o termo de correção do modelo EGN no próprio canal
$\omega_{m,n}$	Parâmetro para quantificar o termo de correção do modelo EGN entre canais
A_m	Conjunto de amplificadores usados no caminho óptico m
a	Um amplificador do conjunto A_m
B_m	Largura de banda do caminho óptico m (sob teste), dado em Hz
$B_{e,n}$	Largura de banda do n -ésimo caminho óptico no enlace e , dado em Hz
B_{ref}	Largura de banda de um <i>slot</i> , dado em Hz
C_e	Conjunto de caminhos ópticos ativos no enlace e
c	Velocidade da luz no vácuo, dado em m/s
D	Nó de destino em uma rota
D_λ	Parâmetro de dispersão da fibra (<i>fiber dispersion parameter</i>), dado em ps/nm/km
E	Conjunto de enlaces de uma topologia
E_m	Conjunto de enlaces atravessados pelo caminho óptico m
e	Um enlace do conjunto E_m
F	<i>Overhead</i> da FEC
F_n	Figura de ruído (<i>noise figure</i>), dado em dB
f	Frequência de onda, dado em Hz
f_m	Frequência central do caminho óptico m (sob teste), dado em Hz
$f_{e,n}$	Frequência central do n -ésimo caminho óptico no enlace e , dado em Hz

G_m	PSD do caminho óptico m (sob teste), dado em W/Hz
$G_{e,n}$	PSD do n -ésimo caminho óptico no enlace e , dado em W/Hz
G_m^{ASE}	PSD total do ruído ASE gerado no caminho óptico m (sob teste), dado em W/Hz
$G_{m,a}^{ASE}$	PSD do ruído ASE gerado em um amplificador a do caminho óptico m , em W/Hz
G_m^{NLI}	PSD total dos NLIs gerados no caminho óptico m , dado em W/Hz
$G_{m,e}^{EGN}$	PSD dos NLI gerados em um enlace e do caminho óptico m , com frequência central f , dado em W/Hz
$G_{m,e}^{GN}$	PSD dos NLI gerados, através do modelo GN, em um enlace e do caminho óptico m , com frequência central f , dado em W/Hz
$G_{m,e}^{corr}$	PSD do termo de correção (modelo EGN) dos NLIs gerados em um enlace e do caminho óptico m , com frequência central f , dado em W/Hz
$g_{m,a}$	Ganho do amplificador (<i>amplifier gain</i>)
h	Constante de Planck (<i>Planck's constant</i>), dado em J · s
h_e	Coefficiente de acoplamento de potência (<i>power-coupling coefficient</i>), em m^{-1}
$I_{SO_{m,e,n}}$	Índice de sobreposição de espectro entre os caminhos ópticos m e n
K_m	Número de núcleos adjacentes que são a origem do <i>crossstalk</i> para um dado caminho óptico m
$K_{m,e,s}$	Número de núcleos adjacentes que são a origem do <i>crossstalk</i> para um dado caminho óptico m , no enlace e e <i>slots</i> s
k	Coefficiente de acoplamento (<i>coupling coefficient</i>), dado em m^{-1}
L_e	Comprimento do enlace e (<i>link length</i>), dado em m
L_r	Comprimento da rota r , dado em m
L_s	Comprimento do <i>span</i> s (<i>span length</i>), dado em m
L_{eff}	Comprimento efetivo do <i>span</i> (<i>span effective length</i>), dado em m
l_c	Comprimento de correlação (<i>correlation length</i>), dado em m

M	Número de símbolos de um formato de modulação
N	Conjunto de nós de uma topologia
$N_{e,s}$	Quantidade de spans no enlace e
$N_{m,e}$	Conjunto de caminhos ópticos alocados em núcleos adjacentes ao núcleo do caminho óptico m , que utilizam o mesmo espectro de m no enlace e
n_{sp}	Fator de emissão espontâneo (<i>spontaneous emission factor</i>)
O	Nó de origem em uma rota
$OSNR_m$	Relação sinal-ruído óptico do caminho óptico m
$OSNR_{req}$	Relação sinal-ruído óptico requerida em condições de operações reais da rede
$OSNR_{req,ideal}$	Relação sinal-ruído óptico requerida em condições ideais de operação
P_m	Potência do sinal do caminho óptico m (sob teste), dado em W
P_m^{ASE}	Potência do ruído ASE no caminho óptico m
P_n	Potência do sinal do caminho óptico n , dado em W
P_{NLI}	Potência das interferências não lineares, dado em W
\tilde{P}_{NLI}	Potência normalizada das interferências não lineares
P_m^{NLI}	Potência das NLI no caminho óptico m
$P_{XTm,e}$	Potência média de <i>crosstalk</i> no enlace e do caminho óptico m
Q_{slot_m}	Quantidade de <i>slots</i> utilizados por um caminho óptico m
$Q(x)$	Função Q , que denota a probabilidade de que uma variável aleatória gaussiana exceder o valor de x
R	Raio de curvatura (<i>bending radius</i>) da fibra, dado em m
R	Requisição
R_b	Taxa de <i>bits</i> transmitida na fibra, em bps
$R_{b,i}$	Taxa de <i>bits</i> solicitada pelo cliente, em bps
r	Rota entre o nó de origem O e o nó de destino D

S_m	Taxa de símbolo (<i>symbol rate</i>), dada em Baud
$S_{SOm,e,n}$	Quantidade de <i>slots</i> sobrepostos entre os caminhos ópticos m e n no enlace e
$S_{e,n}$	Quantidade de <i>slots</i> do caminho óptico n no enlace e
S_n	Quantidade de <i>slots</i> do caminho óptico n
W_n	perda do nó, dado em dB
$XT_{\mu,m,e}$	Potência normalizada média de <i> Crosstalk</i> no enlace e do caminho óptico m
$XT_{\mu,m}^{(tot)}$	Potência normalizada média total de <i> Crosstalk</i> no caminho óptico m
$XT_{\mu,req}$	<i> Crosstalk</i> requerido (<i>threshold</i>)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Motivação	25
1.2	Objetivos	28
1.3	Contribuições	28
1.4	Publicações Relacionadas a Tese	30
1.5	Demais Publicações	30
1.6	Organização da Tese	31
2	REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	33
2.1	Conceitos Básicos	33
2.2	Redes Ópticas Elásticas Com Multiplexação Espacial	39
2.3	O Problema RMCSA	42
2.4	Considerações Finais do Capítulo	45
3	MODELAGEM DA CAMADA FÍSICA	46
3.1	Limitações da Camada Física	46
3.1.1	Modelo de Ruído ASE	53
3.1.2	Modelo de Efeitos Não-Lineares	54
3.1.3	Modelo de Crosstalk	59
3.2	Alcance de Transmissão x Avaliação Dinâmica	63
3.3	Considerações Finais do Capítulo	66
4	REVISÃO DA LITERATURA SOBRE SDM-EON	67
4.1	Alocação de Recursos em SDM-EON	67
4.1.1	Soluções XT-avoid	67
4.1.2	Soluções XT-aware	69
4.1.3	Visão Geral dos Trabalhos da Literatura	72
4.2	Classificação Quanto aos Efeitos de Camada Física	73
4.3	Considerações Finais do Capítulo	76
5	ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM SDM-EON	77
5.1	Trabalhos Relacionados	77
5.2	O Algoritmo de Balanceamento de Espectro (ABE)	78
5.3	Avaliação de Desempenho	80
5.3.1	Ferramenta de Avaliação de Desempenho	80
5.3.2	Cenários de Avaliação de Desempenho	82

5.3.3	Resultados Numéricos e Discussões	85
5.4	Considerações Finais do Capítulo	90
6	ALOCAÇÃO DE NÚCLEO EM SDM-EON	91
6.1	Trabalhos Relacionados	91
6.2	O Algoritmo de Balanceamento de Núcleos (ABN)	92
6.3	O Algoritmo com Aprendizado de Máquina para Escolha de Núcleo (AMN)	95
6.4	Avaliação de Desempenho	98
6.4.1	Resultados Numéricos e Discussões	99
6.5	Considerações Finais do Capítulo	103
7	ALOCAÇÃO INTEGRADA DE NÚCLEO E ESPECTRO EM SDM-EON	105
7.1	Trabalhos Relacionados	105
7.2	O Algoritmo Ciente de Crosstalk para Alocação de Núcleo e Espectro (ACiNE)	106
7.3	Avaliação de Desempenho	108
7.3.1	Resultados Numéricos e Discussões	109
7.4	Considerações Finais do Capítulo	114
8	ALOCAÇÃO INTEGRADA DE MODULAÇÃO, NÚCLEO E ESPECTRO EM SDM-EON	115
8.1	Trabalhos Relacionados	115
8.2	O Algoritmo Ciente de Limitações Intra e Inter Núcleo para Escolha de Modulação, Núcleo e Espectro (CIA-MCSA)	116
8.3	Avaliação de Desempenho	122
8.3.1	Ajuste de Sigma para o CIA-MCSA	122
8.3.2	Resultados Numéricos e Discussões	123
8.4	Considerações Finais do Capítulo	133
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	134
9.1	Conclusões Sobre os Trabalhos Realizados	134
9.2	Propostas de Trabalhos Futuros	136
	REFERÊNCIAS	138

1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os conceitos introdutórios desta tese, que abrangem o estudo de redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial considerando as limitações da camada física da rede. Tais conceitos introdutórios envolvem a motivação, os objetivos, as contribuições, as publicações científicas e a organização geral da tese.

1.1 Motivação

Nos dias de hoje, o uso da Internet está cada vez mais comum no cotidiano da sociedade. A cada dia surgem novas tecnologias como computação em nuvem, *stream* de vídeo em ultra resolução (4K ou 8K), videoconferência, telemedicina, dentre outras aplicações. Estas aplicações proporcionam uma alta demanda por taxa de bits na rede. Em paralelo ao aumento no número de aplicações, também aumenta o número de usuários que fazem uso destas aplicações. A Figura 1 apresenta o crescimento no número de usuários na Internet nos últimos anos.

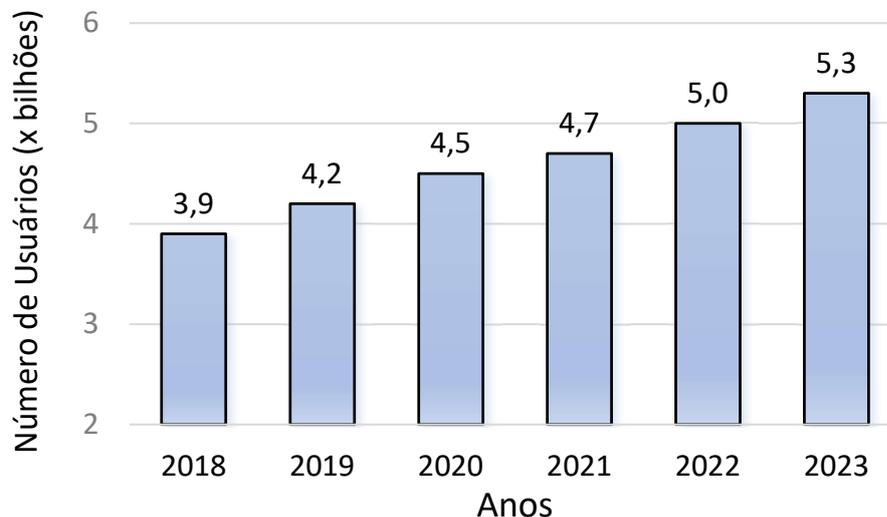


Figura 1 – Crescimento global do número de usuários na Internet (CISCO 2021).

De acordo com a Figura 1, observa-se que o número global de usuários da Internet atingiu a marca de 5,3 bilhões no ano de 2023 (CISCO 2021), o que corresponde a aproximadamente 66% da população mundial. Isso representa um aumento de aproximadamente 36% no número de usuários em relação ao ano de 2018. Apenas na América Latina, o número de usuários foi de 470 milhões em 2023 (CISCO 2021), o que corresponde a 70% da população desta região. Vale destacar que também cresce a quantidade de equipamentos conectados sendo utilizados por cada usuário,

sejam *smartphones*, TVs, computadores, *tablets* ou mesmo relógios. Estima-se que no ano de 2023, a média per capita global seja de 3,6 dispositivos conectados por cada usuário (CISCO 2021). Logicamente, ao aumentar o número de usuários, de dispositivos usados por cada usuário e de aplicações que executam nestes dispositivos, também aumenta o volume de tráfego na Internet. O volume total de tráfego na Internet vêm crescendo drasticamente nas últimas décadas (CISCO 2019), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Histórico global da evolução do tráfego na Internet (CISCO 2019).

Ano	Tráfego global na Internet
1992	100 GB por dia
1997	100 GB por hora
2002	100 GB por segundo
2007	2.000 GB por segundo
2017	46.600 GB por segundo
2022	150.700 GB por segundo

A Tabela 1 apresenta um histórico do crescimento do tráfego na Internet nos últimos trinta anos. No ano de 1992, o volume de tráfego mundial era de aproximadamente 100 GB por dia (CISCO 2019). Dez anos depois, em 2002, este volume chegou a 100 GB por segundo (CISCO 2019). Tal crescimento continuou nos últimos anos, atingindo 150.700 GB por segundo em 2022 (CISCO 2019). Isto representa um aumento de 150.600% de tráfego em 20 anos. A Figura 2 apresenta informações sobre o volume global de tráfego transportado mensalmente na Internet.

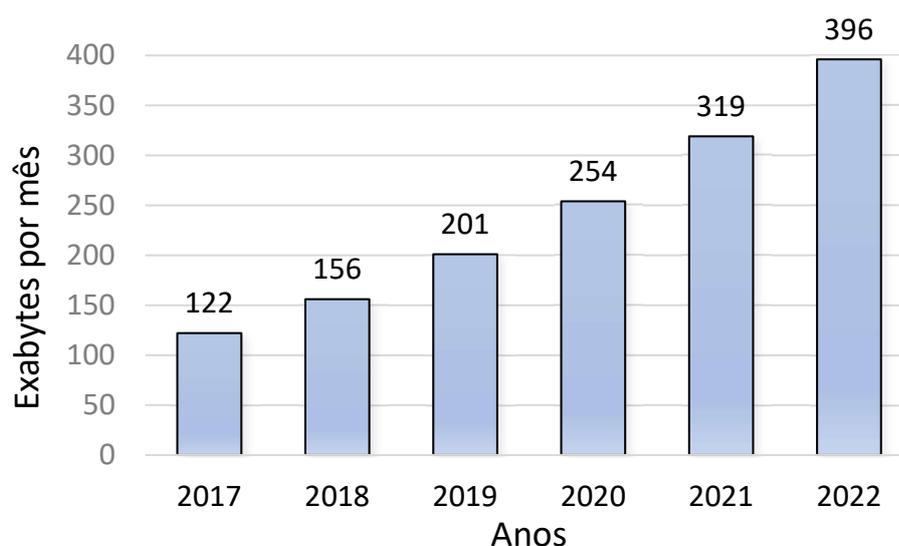


Figura 2 – Crescimento global do tráfego mensal na Internet (CISCO 2019).

De acordo com a Figura 2 observa-se que no ano de 2017 eram transportados cerca de 122 Exabytes (EB) de dados por mês na Internet. Este valor mais que dobrou

três anos depois, quando chegou a 254 EB em 2020 (CISCO 2019). A tendência de crescimento continua, chegando a 396 EB em 2022 (CISCO 2019).

Neste cenário, caso a infraestrutura de transporte da rede não evolua, o uso das atuais e também das futuras aplicações estaria comprometido. Assim, torna-se fundamental a evolução da atual infraestrutura de rede para suprir a demanda das aplicações e dos usuários. A rede óptica é uma tecnologia que oferece desempenho satisfatório para este tipo de infraestrutura. Neste sentido, o desenvolvimento de tecnologias que usam a comunicação óptica vêm sendo estimulada a cada dia (Jinno et al. 2009), (Gerstel et al. 2012), (Chatterjee, Sarma e Oki 2015). Neste contexto, existe um esforço da comunidade científica para melhorar, cada vez mais, este tipo de rede.

Para redes ópticas, diferentes técnicas de multiplexação podem ser usadas para viabilizar a comunicação. Tais técnicas possibilitam que vários usuários consigam usar uma única fibra óptica de forma simultânea. As redes ópticas elásticas (EON) (Jinno et al. 2009) suportam a alocação flexível da largura de banda e proporcionam uma utilização eficiente do espectro, sendo implantadas para atender demandas cada vez maiores por capacidade de transporte óptico (Jinno et al. 2009), (Tang, Shen e Rouskas 2021). Neste tipo de rede, o espectro óptico é dividido em pequenos segmentos ópticos denominados de *slots* de frequência. Neste caso, cada cliente da rede pode usufruir de um conjunto destes *slots* para prover comunicação, sendo a quantidade de *slots* variável de acordo com a demanda do cliente. Assim, as EONs oferecem eficiência na alocação espectral quando comparado a outros modelos de rede, como os tradicionais modelos de grade fixa (Jinno et al. 2009), (Chatterjee, Sarma e Oki 2015). As EONs tratadas neste trabalho estão no contexto de comutação de circuito, em que os recursos necessários ao longo de um caminho para prover comunicação entre os sistemas finais são reservados, pelo período de comunicação, entre estes sistemas finais.

Mesmo apresentando diversos benefícios para a comunicação óptica, as redes ópticas baseadas em fibras de único núcleo estão atingindo o seu limite de capacidade (Ravipudi e Brandt-Pearce 2023), (Behera et al. 2023). Neste sentido, o conceito de multiplexação por divisão espacial (*space division multiplexing* (SDM)) foi introduzido há alguns anos e atualmente é objeto de investigação para ampliar a capacidade de transmissão de sistemas ópticos (Sillard 2011). Assim, nos últimos anos, a literatura apresentou uma variação para a EON, que faz uso da multiplexação por divisão espacial (SDM) (Sillard 2011), (Brasileiro, Costa e Drummond 2020). Neste tipo de multiplexação, o espectro óptico é dividido espacialmente, possibilitando a divisão espectral em vários modos (multi-modos) ou vários núcleos (multi-núcleos) distintos dentro de uma única fibra óptica. Desta forma, as redes ópticas elásticas que usam a multiplexação por divisão espacial (SDM-EON) podem suportar maiores volumes de tráfego a longas distâncias (Sillard 2011), (Yousefi e Rahbar 2020).

O estudo e melhoramento das **SDM-EONs** apresentam desafios, como o processo de alocação de recursos e as limitações da camada física da rede (*physical layer impairments (PLIs)*). O processo de alocação de recursos deve ser realizado de forma eficiente, isto é, atender a maior quantidade de clientes na rede garantindo níveis aceitáveis de qualidade de transmissão (*quality of transmission (QoT)*). Para garantir níveis aceitáveis de **QoT**, deve-se considerar as limitações da camada física da rede, que tendem a degradar o sinal óptico durante a sua propagação. Os efeitos de camada física, de modo geral, aumentam conforme à distância de propagação do sinal. Portanto, tais efeitos atuam como um dos principais desafios para o planejamento de redes ópticas de longas distâncias (ex: redes com rotas maiores que 1.000 km), que são o foco desta tese.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta tese é o estudo e desenvolvimento de novas soluções algorítmicas cientes das limitações de camada física para a alocação de recursos em **SDM-EON** baseadas em fibras multi-núcleos.

São objetivos específicos desta pesquisa:

- Investigar as limitações da camada física da rede e identificar um conjunto de modelos matemáticos para mensurar o impacto que estas limitações causam no sinal óptico;
- Identificar os principais trabalhos da literatura que propõem soluções algorítmicas para o provisionamento de recursos em **SDM-EONs** baseadas em fibras multi-núcleos;
- Propor soluções algorítmicas para os principais problemas de alocação de recursos em **SDM-EON** baseadas em fibras multi-núcleos, sendo estes problemas: a escolha do formato de modulação, a alocação de núcleo e a alocação de espectro óptico;
- Avaliar o desempenho dos algoritmos propostos comparando-os com algoritmos propostos por outros autores, levando em conta os impactos da camada física da rede.

1.3 Contribuições

Como principais contribuições desta tese, são propostos cinco algoritmos de alocação de recursos em **SDM-EON**. As propostas são focadas nos problemas: *i*) alocação de espectro; *ii*) alocação de núcleo; *iii*) alocação integrada de núcleo e

espectro; e *iv*) alocação integrada de modulação, núcleo e espectro. Os algoritmos propostos nesta tese são descritos a seguir:

- O algoritmo de balanceamento de espectro (ABE) (Lacerda-Jr et al. 2020). Tal algoritmo é proposto para tratar especificamente o problema de alocação de espectro em SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos.
- O algoritmo de balanceamento de núcleo (ABN) (Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2021). Tal algoritmo é proposto para tratar especificamente o problema de alocação de núcleo em SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos.
- O algoritmo com aprendizado de máquina para escolha de núcleo (AMN) (Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2022). Tal algoritmo é proposto para tratar especificamente o problema de alocação de núcleo em SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos.
- O algoritmo ciente de *crosstalk* para alocação de núcleo e espectro (ACiNE) (Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2021). Tal algoritmo é proposto para tratar, de forma integrada, os problemas de alocação de núcleo e de alocação de espectro em SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos.
- O algoritmo ciente de limitações intra e inter núcleo para escolha de modulação, núcleo e espectro (*XT-aware and intra-core impairment-aware algorithm for modulation, core, and spectrum assignment (CIA-MCSA)*) (Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2023). Tal algoritmo é proposto para tratar, de forma integrada, os problemas de alocação de modulação, núcleo e espectro em SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos.

Além dos algoritmos propostos, também são contribuições desta tese:

- Investigação das principais limitações da camada física como o ruído *amplified spontaneous emission (ASE)*, os efeitos não-lineares (*non-linear interference (NLI)*) e o *crosstalk* inter-núcleos. Para isto, foi realizado um levantamento para analisar e definir os conjuntos de modelos mais adequados para serem usados nesta tese. Uma modelagem baseada no modelo de ruído Gaussiano aprimorado (*enhanced Gaussian-noise (EGN)*) é adotada para mensurar os efeitos não-lineares, enquanto um modelo que considera a sobreposição parcial do espectro é utilizado para calcular o *crosstalk* inter-núcleos. A verificação das limitações de camada física não são realizadas dinamicamente (isto é, em tempo de execução dos algoritmos de alocação de recursos) na maioria dos trabalhos da literatura (como apontado no Capítulo 4), mas contribuem para que a pesquisa reflita o comportamento de um sistema real.

- Avaliação de desempenho das propostas 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.

1.4 Publicações Relacionadas a Tese

Durante o desenvolvimento desta tese, os resultados foram publicados em forma de artigos científicos. Os artigos publicados que são diretamente ligados ao conteúdo desta tese estão listados a seguir:

- **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; FONTINELE, A.; SANTOS, I.; LEÃO, E.; CAMPELO, D.; SURUAGY, J.; SOARES, A.. Algoritmo de Balanceamento Inter-Núcleos para Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Rio de Janeiro - RJ, Brasil. 2020.
- **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; CARTAXO, A.; SOARES, A.. Um Novo Algoritmo Ciente de Crosstalk para Alocação de Núcleo e Espectro em Redes Ópticas Elásticas Multi-Núcleos. XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Uberlândia - MG, Brasil. 2021 (**Prêmio de menção honrosa nos melhores artigos do SBRC 2021**).
- **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; CARTAXO, A.; SOARES, A.. New Core and Spectrum Balancing Algorithms for Space Division Multiplexed Elastic Optical Networks. IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom). Atenas, Grécia. 2021.
- **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; CARTAXO, A.; SOARES, A.. Algoritmo Baseado em Aprendizado de Máquina para Alocação de Núcleo em Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação Espacial. XL Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Fortaleza - CE, Brasil. 2022 (**Prêmio de menção honrosa nos melhores artigos do SBRC 2022**).
- **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; CARTAXO, A.; SOARES, A.. Novel Dynamic Impairment-Aware Algorithm for Modulation, Core, and Spectrum Assignment in SDM-EONs. *Optical Switching and Networking*, v. 51, p. 100763, 2023.

1.5 Demais Publicações

Outros trabalhos no âmbito das redes ópticas também foram desenvolvidos durante a pesquisa de doutorado e estão citados abaixo. Tais trabalhos não compõem

diretamente esta tese, ou por não estarem no escopo de redes multi-núcleos ou por serem trabalhos de coautoria. Entretanto, todos estes trabalhos contribuíram para o desenvolvimento científico do autor desta tese.

- **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; FONTINELE, A.; CAMPELO, D.; SOARES, A.. Dedicated Protection Considering Physical Layer Impairments in Elastic Optical Networks. 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Bari, Itália. 2020.
- FONTINELE, A.; SANTOS, I.; **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; SOARES, A.; CARTAXO, A.; CAMPELO, D.. Novo Algoritmo para Atribuição de Potência por Circuito em Redes Ópticas Elásticas. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Rio de Janeiro - RJ, Brasil. 2020.
- COSTA, I.; **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; SOARES, A.. Estratégia de Priorização para Alocação de Núcleo e Espectro em Redes Ópticas Elásticas SDM. XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Uberlândia - MG, Brasil. 2021.
- ARAUJO, P.; **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; SOARES, A.. Um Novo Algoritmo de Balanceamento Espectral Entre Grupos de Núcleos para Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial. XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Uberlândia - MG, Brasil. 2021.
- ARAUJO, S.; **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; FONTINELE, A.; LEÃO, E.; REIS JÚNIOR, J. V.; SOARES, A.. Physical Layer-Aware Circuit Reallocation to Prevent Request Blocking in Elastic Optical Networks. XLI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Brasília - DF, Brasil. 2023.
- **LACERDA JÚNIOR, J. C.**; MORAIS, A.; CARTAXO, A.; SOARES, A.. Um Novo Algoritmo Para Mitigar Crosstalk e Fragmentação em Redes Ópticas Elásticas Multi-Núcleos. XLII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC). Niterói - RJ, Brasil. 2024.

1.6 Organização da Tese

O conteúdo desta tese está organizado em nove capítulos. Os próximos três capítulos focam na apresentação das redes ópticas, sua modelagem e os trabalhos relacionados ao tema da tese. Em seguida, cada capítulo apresenta um problema ligado a alocação de recursos em redes ópticas elásticas multi-núcleos, sendo que cada um desses capítulos apresenta uma solução para o problema seguido de um

estudo de avaliação de desempenho. Um resumo de cada um dos nove capítulos é apresentado a seguir.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos fundamentais de redes ópticas elásticas. Neste capítulo é discutido sobre os componentes de uma rede óptica elástica e as diferenças entre os tipos de rede. Também é apresentada a **SDM-EON** e o principal problema deste tipo de rede: o problema de roteamento, escolha do formato de modulação, alocação de núcleo e espectro (*routing, modulation, core and spectrum allocation* (**RMCSA**)).

O Capítulo 3 apresenta e discute como o sistema é representado em termos das limitações de camada física no âmbito desta tese. Os principais efeitos de camada física como o ruído **ASE**, os **NLIs** e o *crosstalk* são apresentados. Neste capítulo também são apresentados os modelos matemáticos usados para mensurar estes efeitos de camada física e como eles impactam na qualidade de transmissão do sinal óptico.

O Capítulo 4 apresenta um levantamento do estado da arte. Neste contexto, um levantamento bibliográfico é realizado com as principais propostas da literatura que abordam as redes ópticas elásticas multi-núcleos e que propõem soluções para a alocação de recursos neste tipo de rede. Tais trabalhos são categorizados em relação a como as limitações de camada física são tratadas em cada trabalho.

O Capítulo 5 discute o problema de alocação espectral em **SDM-EONs**. Neste contexto é proposto o algoritmo **ABE** (**Lacerda-Jr et al. 2020**). Ao final do capítulo, uma avaliação de desempenho é conduzida para comparar o algoritmo proposto com outros algoritmos da literatura.

O Capítulo 6 discute o problema de alocação de núcleo em **SDM-EONs**. Neste contexto são propostos os algoritmos **ABN** (**Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2021**) e **AMN** (**Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2022**). Ao final do capítulo, uma avaliação de desempenho é conduzida para comparar os algoritmos propostos com outros algoritmos da literatura.

O Capítulo 7 discute, de forma integrada, o problema de alocação de núcleo e espectro em **SDM-EONs**. Neste contexto é proposto o algoritmo **ACiNE** (**Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2021**). Ao final do capítulo, uma avaliação de desempenho é conduzida para comparar o algoritmo proposto com outros algoritmos da literatura.

O Capítulo 8 discute, de forma integrada, o problema de alocação de modulação, núcleo e espectro em **SDM-EONs**. Neste contexto é proposto o algoritmo **CIA-MCSA** (**Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2023**). Ao final do capítulo, uma avaliação de desempenho é conduzida para comparar o algoritmo proposto com outros algoritmos da literatura.

Por fim, as considerações finais desta tese bem como as perspectivas para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 9.

2 Redes Ópticas Elásticas

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais em redes ópticas elásticas. Os conceitos iniciais sobre redes ópticas elásticas são apresentados na Seção 2.1. Uma variação das redes ópticas elásticas, que são as redes ópticas elásticas que usam a multiplexação por divisão espacial, são apresentadas na Seção 2.2. Na Seção 2.3 é apresentado o problema **RMCSA** e seus subproblemas. Por fim, as considerações finais do capítulo são apresentadas na Seção 2.4.

2.1 Conceitos Básicos

Uma rede óptica em um meio guiado usa a tecnologia de fibra óptica para realizar o transporte de informações. Usualmente, as redes são representadas nos trabalhos científicos através de topologias de rede. Basicamente, uma topologia de rede é representada por um grafo $G = \{N, E\}$, em que N representa o conjunto de nós (*nodes*) da rede, que correspondem aos equipamentos de roteamento e *switches* ópticos. Já E representa o conjunto de enlaces (*links*) da rede. A Figura 3 mostra um exemplo de topologia, com o conjunto $N = \{n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6\}$ e o conjunto $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\}$.

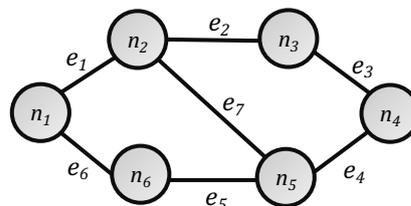


Figura 3 – Exemplo de topologia com seis nós e sete enlaces.

Um enlace conecta dois nós em uma rede e seu comprimento varia de acordo com a localização destes nós. Um conjunto de enlaces que interliga um nó de origem O a um nó de destino D é conhecido como rota (*route*). Em uma topologia de rede, pode existir diferentes rotas para interligar dois nós O e D . Definir uma rota para dois nós O e D é um processo conhecido como roteamento (*routing*). Muitos trabalhos tratam esta questão através do clássico algoritmo de menor caminho de Dijkstra (Dijkstra 1959). Outras técnicas como o *k-shortest path (KSP)* (Yen 1971), que apresenta um conjunto de k -menores caminhos, também são usadas nos mais diversos trabalhos sobre roteamento. A Figura 4 apresenta um exemplo em que são mostradas três formas de interligar o nó de origem n_1 ao nó de destino n_4 , através das rotas $(e_1 - e_2 - e_3)$, $(e_1 - e_7 - e_4)$ e $(e_6 - e_5 - e_4)$.

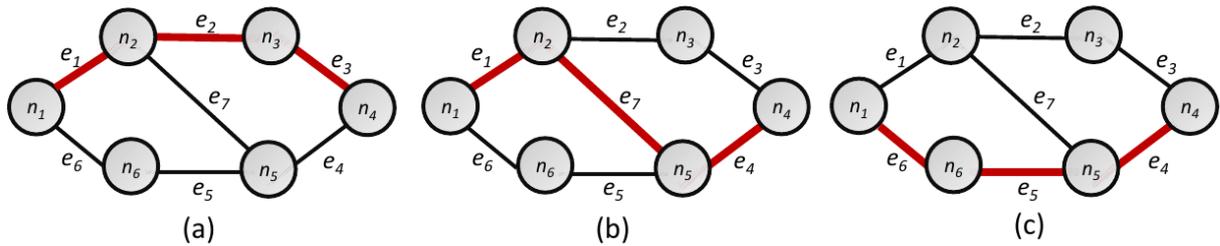


Figura 4 – Exemplo de três rotas para interligar dois nós da rede, sendo a origem no nó n_1 e destino no nó n_4 .

Em um sistema em operação, um cliente realiza uma solicitação ao operador da rede para usar os recursos desta rede. Tal solicitação de recursos é conhecida como requisição (*request*) e é feita ao plano de controle da rede. O plano de controle é o responsável por implementar dinamicamente o conjunto de protocolos responsáveis pela alocação e liberação dos recursos da rede. Cada requisição segue o formato $R = (O, D, R_{b,i})$, que considera os nós O e D pretendidos pelo cliente e a taxa de bits (*bitrate*) $R_{b,i}$ de informação solicitada na requisição R . Assim, a partir da definição de uma rota e de uma porção espectral para que as informações sejam transportadas, forma-se um caminho óptico (*lightpath*) para atender a demanda do cliente. Os caminhos ópticos são conexões ópticas realizadas de ponta a ponta de um nó de origem O para um nó de destino D em um comprimento de onda em cada enlace intermediário (Ramaswami, Sivarajan e Sasaki 2009). Em nós intermediários na rede, os caminhos ópticos são roteados e comutados de um enlace para outro enlace (Ramaswami, Sivarajan e Sasaki 2009). No exemplo da Figura 4 (a), a partir do nó n_2 , o caminho óptico é comutado do enlace e_1 para o enlace e_2 , ao invés do enlace e_7 . Um exemplo de como o cliente se conecta ao núcleo da rede é apresentado na Figura 5 (Chatterjee, Sarma e Oki 2015).

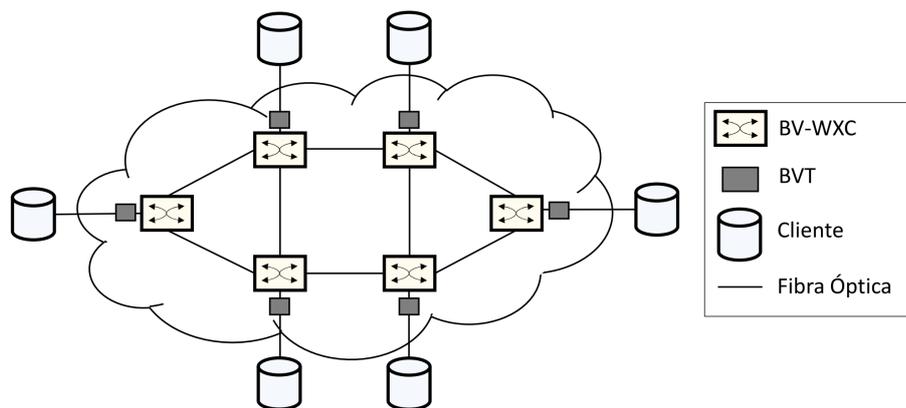


Figura 5 – Arquitetura de uma rede óptica elástica (Chatterjee, Sarma e Oki 2015).

No exemplo da Figura 5 observa-se que um cliente conecta-se à rede através de um *bandwidth-variable transponder* (BVT). Os BVTs são usados para ajustar a largura de banda (*bandwidth*) de cada caminho óptico (Zhang et al. 2013). Outro equipamento mostrado na Figura 5 é o *bandwidth-variable cross-connect* (BV-WXC) (Jinno et al.

2009). Os BV-WXC são usados para realizar a conexão cruzada entre os nós da rede. Para isso, um BV-WXC precisa configurar sua janela de comutação de maneira flexível de acordo com a largura espectral do sinal óptico de entrada (Chatterjee, Sarma e Oki 2015). Assim, com uso dos BVTs e dos BV-WXCs, o caminho óptico cruza os nós da rede desde a sua origem até o seu destino.

Os caminhos ópticos são estabelecidos em canais (*channels*) de transmissão dentro da fibra óptica. Tais canais são dispostos com um espaçamento entre canais (*channel spacing*), que pode ser relacionado com o comprimento de onda (*wavelengths*) ou com a frequência (*frequency*) do sinal. Assim, o espaçamento entre canais é o espaçamento entre dois comprimentos de onda ou duas frequências em um sistema óptico (Ramaswami, Sivarajan e Sasaki 2009). O comprimento de onda λ e a frequência f são relacionados pela equação (Ramaswami, Sivarajan e Sasaki 2009)

$$c = \lambda f, \quad (2.1)$$

em que c corresponde a velocidade da luz no vácuo, que é aproximadamente 3×10^8 m/s. Como o valor de c é constante, a frequência f aumenta quando o comprimento de onda λ diminui, e vice e versa. Atualmente, a banda centralizada em $1,55 \mu\text{m}$ é utilizada por muitos sistemas de comunicação (Tanenbaum e Wetherall 2011). Este valor, que corresponde a uma frequência central de 193,1 THz, é a região do espectro com a menor atenuação do sinal óptico, como mostrado na Figura 6.

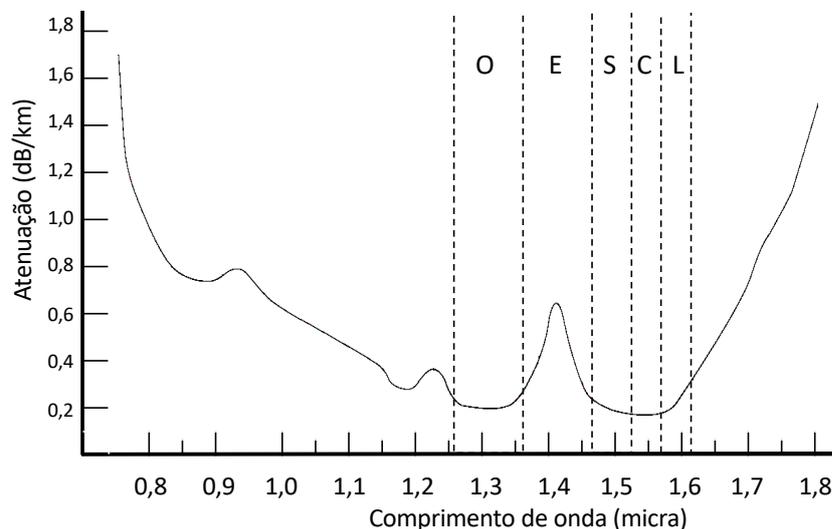


Figura 6 – Atenuação em diferentes comprimentos de onda (Tanenbaum e Wetherall 2011) (Luo et al. 2022).

O comprimento de onda com a menor perda de transmissão está contido na Banda C (Figura 6). A Banda C é utilizada em muitos trabalhos da literatura (Brasileiro, Costa e Drummond 2020), principalmente em estudos que lidam com transmissões de longa distância, apesar de existirem trabalhos que exploram o uso de multi-bandas (Luo et al. 2022). A partir de um ponto de frequência central (ex: 193,1 THz), os canais

podem ser espaçados de 12,5 GHz, 25 GHz, 50 GHz ou 100 GHz (ITU-T G.694.1 2020). Um caminho óptico possui a sua largura de banda de sinal, que deve ocupar um dos canais da banda passante. É importante ressaltar que a largura de banda do sinal deve ser suficientemente menor que o espaçamento entre canais (Ramaswami, Sivarajan e Sasaki 2009). Caso contrário, ocorreria interferência entre canais adjacentes. A Figura 7 apresenta um exemplo do espaçamento entre canais de 100 GHz, considerando o padrão *International Telecommunications Union* (ITU).

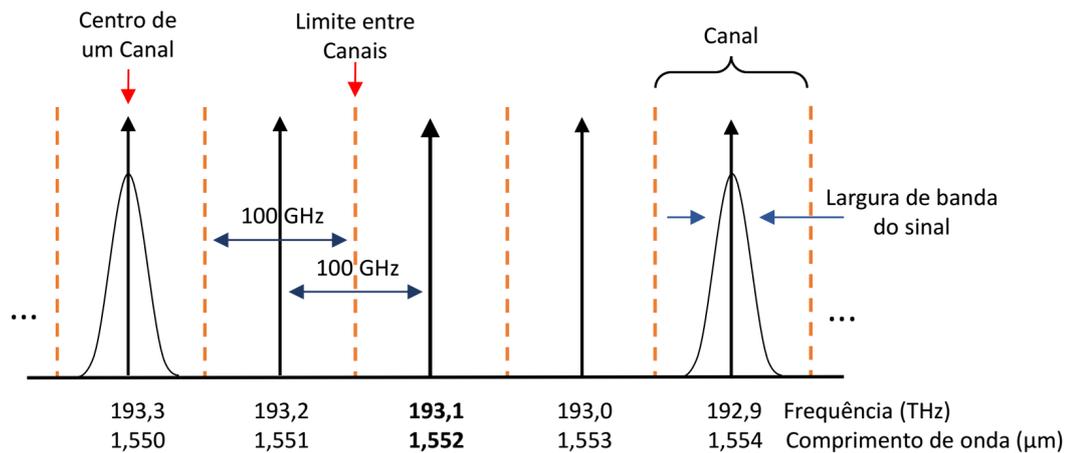


Figura 7 – Grade de frequência com espaçamento entre canais de 100 GHz (ITU) com base em uma frequência central de referência de 193,1 THz (Ramaswami, Sivarajan e Sasaki 2009).

Devido à atenuação que o sinal óptico sofre durante sua propagação, torna-se necessário a amplificação deste sinal óptico ao longo da rota. Tal amplificação usualmente é feita pelos amplificadores de fibra dopada com érbio (*erbium doped fiber amplifier* (EDFA)). Na fibra óptica, os EDFAs são posicionados estrategicamente após uma porção de fibra, conhecida como segmento de fibra. Assim, a fibra é subdividida em um ou mais segmentos de fibra. O conjunto de um EDFA mais um segmento de fibra é conhecido como *span*. Um enlace possui quantos *spans* sejam necessários para cobrir o seu comprimento de forma a mitigar a atenuação do sinal óptico. O comprimento de um *span* pode variar, sendo usualmente de 60 km para sistemas submarinos e 100 km para sistemas terrestres (Poggiolini e Jiang 2017). Também é comum o uso de *spans* de 80 km em trabalhos na literatura (Ives, Bayvel e Savory 2015), (Lobato et al. 2019). A Figura 8 apresenta o exemplo de uma rota de n_1 para n_3 . Esta rota é composta pelo enlace e_1 com comprimento de 272 km (dividido em três *spans*) e pelo enlace e_2 com comprimento de 140 km (dividido em dois *spans*).

Conforme apresentado na Figura 8, os EDFAs são posicionados ao final de cada *span* para compensar as perdas do segmento de fibra que compõe aquele *span* (Ives, Bayvel e Savory 2015). Também existem EDFAs após cada um dos nós, para compensar as perdas dos nós. Estes amplificadores são conhecidos como pós-

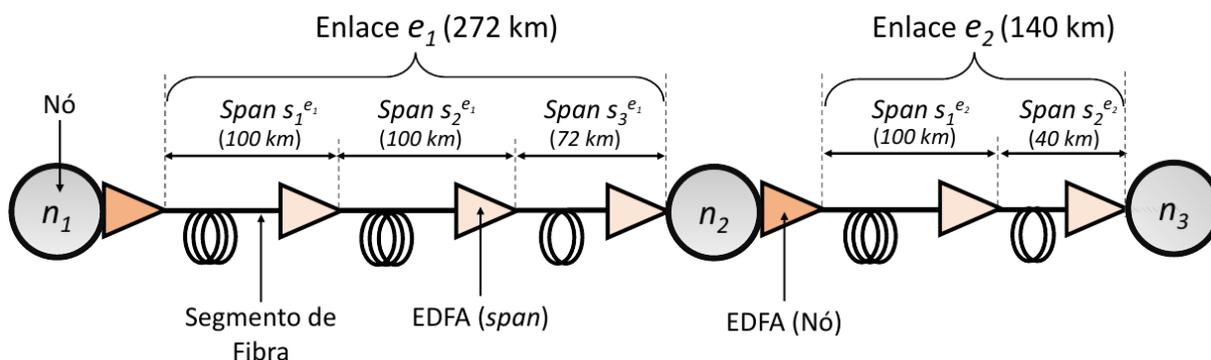


Figura 8 – Representação dos *spans* em uma rota composta por dois enlaces.

amplificadores ou *boosters*. Apesar de amplificar o sinal óptico, os EDFAs adicionam ruído de emissão espontânea amplificada (*amplified spontaneous emission (ASE)*) ao sinal óptico (Essiambre et al. 2010), (Bosco et al. 2011), (Yan et al. 2015). Efeitos não-lineares (NLI) também se manifestam devido à propagação ao longo da fibra óptica, fazendo com que um caminho óptico cause interferência em si mesmo (*self-phase modulation (SPM)*) e também em outros caminhos ópticos, através da modulação de fase cruzada (*cross-phase modulation (XPM)*) e mistura de quatro ondas (*four-wave mixing (FWM)*). Estes efeitos não-lineares afetam a QoT do sinal na fibra óptica. O ruído ASE e os efeitos não-lineares são apresentados com detalhes no Capítulo 3.

Em uma rede óptica elástica (EON), o espectro óptico é dividido em porções espectrais denominadas *slots* de frequência, em que cada *slot* de frequência possui 12,5 GHz. Fibras com uma C-band de 4 THz e 320 *slots* de frequência são comumente estudadas na literatura (Muhammad, Zervas e Forchheimer 2015) (Walkowiak, Klinkowski e Lechowicz 2018), sendo também utilizadas nesta tese. Assim, ao estabelecer um novo caminho óptico na rede, torna-se necessário que este caminho óptico possua um conjunto de *slots* de frequência alocados em toda a sua rota. A quantidade de *slots* de frequência usados varia de caminho óptico para caminho óptico, dependendo da demanda por taxa de bits de cada um. Esta capacidade de expandir ou contrair a quantidade de *slots* usados em diferentes caminhos ópticos é uma das principais características de uma rede óptica elástica (Jinno et al. 2009). Para diminuir a interferência entre os caminhos ópticos, cada caminho óptico deve ser alocado com uma distância mínima para o seu vizinho. Esta distância mínima é conhecida como banda de guarda (*guard band*). Usualmente a banda de guarda corresponde a um *slot* de frequência. Entretanto, existem modelos de banda de guarda adaptativa que consideram mais de um *slot* de frequência para a banda de guarda (Takeshita et al. 2016), (Monteiro et al. 2020). Devido a variação na quantidade de *slots* usados por cada caminho óptico, a ocupação espectral segue um padrão heterogêneo em cada enlace da rede. A Figura 9 apresenta um exemplo da divisão espectral em vinte *slots*, em que quatro caminhos ópticos distintos estão alocados de forma simultânea.

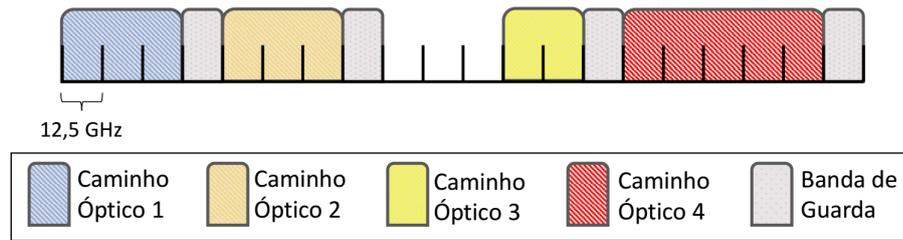


Figura 9 – Exemplo da ocupação espectral dentro de uma fibra óptica de uma EON.

Nas EONs, cada caminho óptico é configurado para usar um formato de modulação para a transferência de informação. A modulação é a forma de codificação das informações digitais em sinais que representam os bits (Tanenbaum e Wetherall 2011). São exemplos de formato de modulação a *4-quadrature amplitude modulation (4-QAM)*, a *8-quadrature amplitude modulation (8-QAM)*, a *16-quadrature amplitude modulation (16-QAM)*, a *32-quadrature amplitude modulation (32-QAM)* e a *64-quadrature amplitude modulation (64-QAM)*. Cada um destes formatos de modulação possui uma representação em um mapa de constelações, como mostrado na Figura 10 (a).

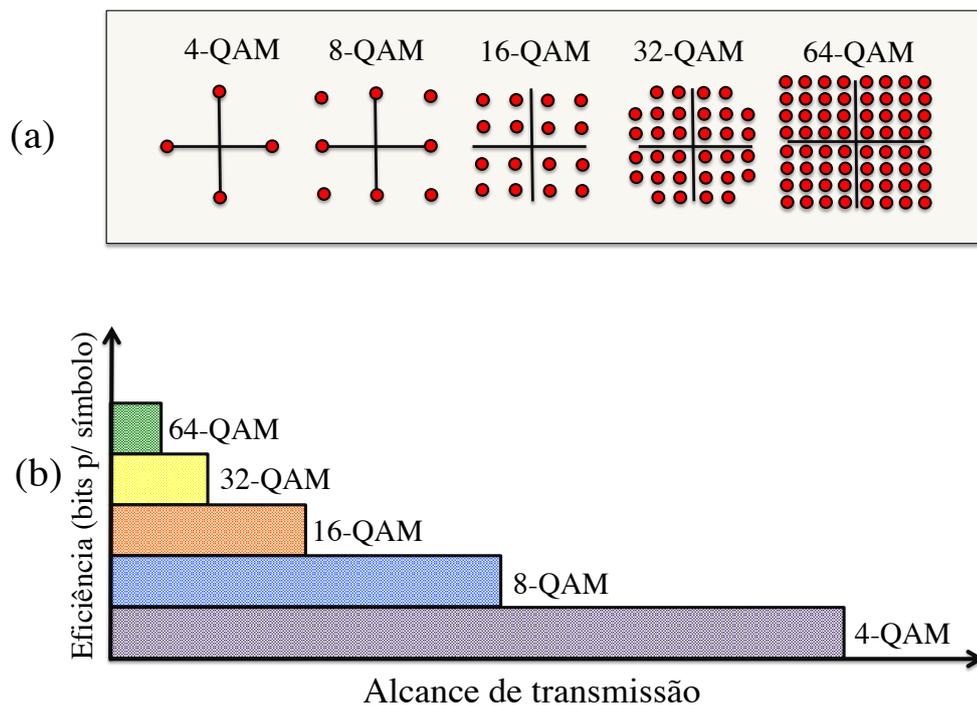


Figura 10 – Exemplo de formatos de modulação para EON. (a) Exemplo de mapa de constelação para cinco formatos de modulação. (b) Gráfico de eficiência versus alcance de transmissão para cinco formatos de modulação.

Cada constelação carrega um número diferente de bits por símbolo, dependendo do número de símbolos M do formato de modulação (Essiambre et al. 2010). Uma constelação pode transportar no máximo $\log_2(M)$ bits por símbolo de informação (Essiambre et al. 2010). Assim, a taxa de bits transportada em um caminho óptico m , com largura de banda B_m , que use um determinado formato de modulação com

número de símbolos M é dada por $R_b = B_m \cdot \log_2(M)$. Portanto, dependendo do formato de modulação usado no caminho óptico, a quantidade de largura de banda (e conseqüentemente de *slots*) necessária para suprir a demanda do cliente pode variar (Jinno et al. 2009) (Chatterjee, Sarma e Oki 2015). Isso ocorre porque existem formatos de modulação que conseguem transportar mais informação em menos *slots*. Entretanto, formatos de modulação com maior valor de M tornam-se mais suscetíveis a interferências, tendo um menor alcance de transmissão. Uma rede óptica elástica permite o uso de diferentes formatos de modulação para diferentes caminhos ópticos (Jinno et al. 2009) (Walkowiak et al. 2020). A Figura 10 apresenta uma exemplificação do alcance de transmissão destas modulações, além de informações sobre a codificação de alguns formatos de modulação (Essiambre et al. 2010).

2.2 Redes Ópticas Elásticas Com Multiplexação Espacial

Dentro de uma fibra óptica, a luz se propaga em um meio guiado de transmissão, constituído de sílica (Tanenbaum e Wetherall 2011). Durante a propagação dentro da fibra, diversos raios de luz podem ser conduzidos em meios independentes de transmissão, conhecidos como modos (*mode*). Fibras ópticas podem ser classificadas em mono-modo (*single-mode fiber (SMF)*) ou multi-modo (*multi-mode fiber (MMF)*) (Tanenbaum e Wetherall 2011). Além da distinção entre fibras mono-modos e multi-modos, a fibra óptica também pode possuir núcleos distintos, sendo que cada um dos núcleos possui o seu próprio espectro óptico. Neste sentido, a fibra pode ser classificada como de único núcleo (*single-core fiber (SCF)*) ou de multi-núcleos (*multi-core fiber (MCF)*). A Figura 11 apresenta um exemplo de MCF, com a indicação da distância entre os centros dos núcleos Λ (*core pitch*).

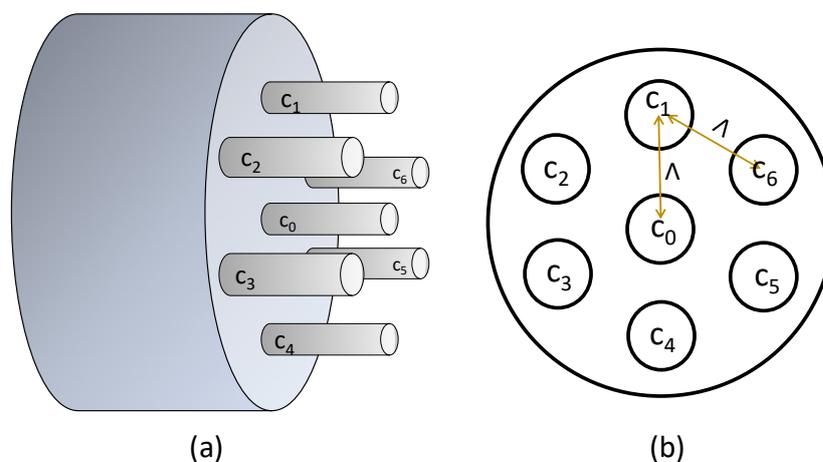


Figura 11 – Ilustração de uma fibra com sete núcleos. (a) Perspectiva para ilustrar o posicionamento de cada núcleo; (b) Corte transversal da MCF para ilustrar a distância entre núcleos.

A multiplexação por divisão espacial (*SDM*) é uma solução promissora para

escalar o potencial de transmissão de uma rede óptica (Richardson, Fini e Nelson 2013), (Klinkowski, Lechowicz e Walkowiak 2018), (Tang et al. 2020). Apesar da ideia de aumentar a capacidade da fibra com a SDM datar do final da década de 1970 (Inao et al. 1979), o uso desta tecnologia vêm ganhando mais força nos últimos anos (Richardson, Fini e Nelson 2013). Este tipo de solução habilita variações na quantidade de modos e núcleos da fibra (Richardson, Fini e Nelson 2013), (Oliveira e Fonseca 2020). As EONs que fazem uso de SDM são conhecidas como redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (*spatial division multiplexing elastic optical network* (SDM-EON)) (Fujii, Hirota e Tode 2013) (Brasileiro, Costa e Drummond 2020). Existem vários tipos de fibras para as SDM-EONs. Os tipos de fibras citados de forma mais frequente na literatura são apresentadas na Figura 12 (Richardson, Fini e Nelson 2013), (Nakajima et al. 2015), (Klinkowski, Lechowicz e Walkowiak 2018).

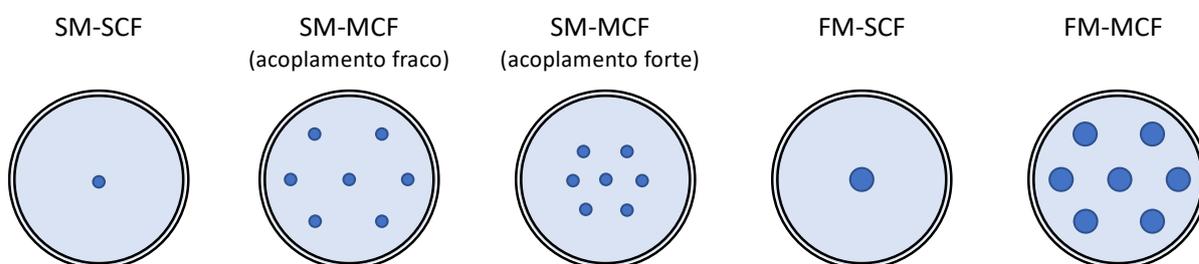


Figura 12 – Tipos de fibras ópticas considerando a quantidade de modos e núcleos.

O tipo de fibra mais usado atualmente em redes ópticas é a fibra monomodo de núcleo único (*single-mode single-core fiber* (SM-SCF)) (Sasaki et al. 2016) (Klinkowski e Zalewski 2019) (Puttnam et al. 2019). Ainda no campo de fibras monomodos, existem as fibras monomodo multi-núcleo (*single-mode multi-core fiber* (SM-MCF)), que podem ter um fraco acoplamento ou um forte acoplamento entre os seus núcleos. Já as fibras multimodo mais estudadas são do tipo poucos modos de único núcleo (*few-mode single-core fiber* (FM-SCF)) e poucos modos de multi-núcleos (*few-mode multi-core fiber* (FM-MCF)). As SM-MCF são o escopo deste trabalho por serem amplamente estudadas na literatura (Sasaki et al. 2016) (Klinkowski e Zalewski 2019) (Puttnam et al. 2019). Neste tipo de fibra, a quantidade de núcleos pode variar. A Figura 13 apresenta um corte transversal da SM-MCF de sete, doze e dezenove núcleos (Fujii et al. 2014) (Brasileiro, Costa e Drummond 2020). Dentre estas variações de quantidade de núcleos, a fibra de sete núcleos é a adotada nesta tese por ser comumente considerada na literatura (como apresentado na Seção 4).

Um dos desafios encontrados no planejamento de SDM-EON é o XT (Hayashi et al. 2011). O *crosstalk* pode ser do tipo inter-modos (*inter-mode crosstalk* (IM-XT)) ou inter-núcleos (*inter-core crosstalk* (IC-XT)) (Tode e Hirota 2017), (Chatterjee et al. 2021). Para SM-MCFs, o *crosstalk* inter-núcleos é um efeito que ocorre quando a mesma frequência é utilizada entre núcleos próximos. Quanto menor a distância entre

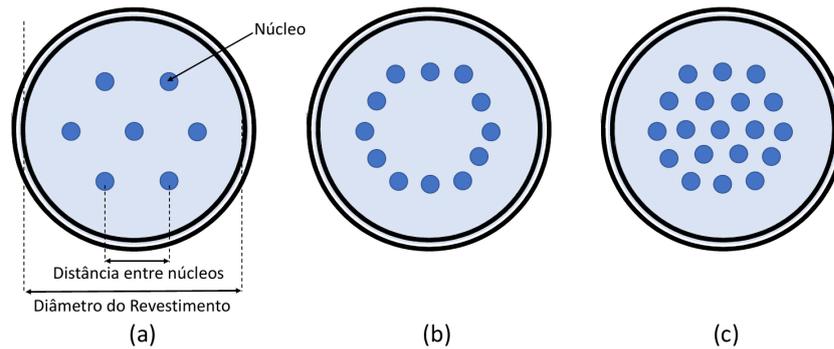


Figura 13 – Fibras monomodo de multi-núcleos. (a) MCF com 7 núcleos. (b) MCF com 12 núcleos. (c) MCF com 19 núcleos.

os núcleos, maior o efeito do *Crosstalk*. Além disso, o nível de *Crosstalk* aumenta em função do comprimento do enlace, tornando-se um fator limitante em redes de longo alcance.

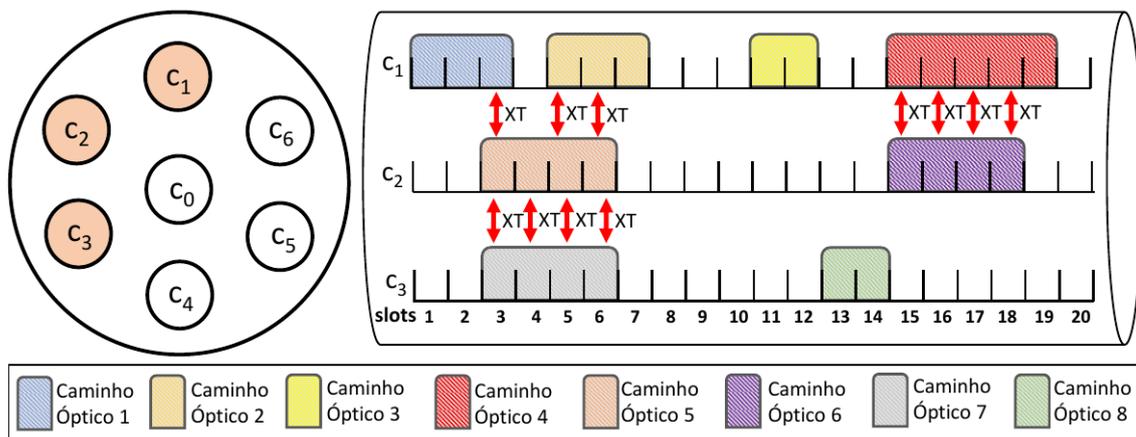


Figura 14 – Representação do *Crosstalk* em uma fibra multi-núcleo.

De acordo com a Figura 14, observa-se o *Crosstalk* inter-núcleos ocorrendo entre um caminho óptico que usa os mesmos *slots* de frequência que também são usados por outro caminho óptico em um núcleo vizinho. Esta sobreposição entre caminhos ópticos pode ser parcial (entre o caminho óptico 1 e caminho óptico 5) ou total (entre caminho óptico 5 e caminho óptico 7). Neste exemplo, o caminho óptico 5 (alocado no núcleo 2) é seriamente afetado pelo *Crosstalk*, pois sofre (e causa) *Crosstalk* em relação aos caminhos ópticos vizinhos 1 e 2 no núcleo 1 e ao caminho óptico vizinho 7 no núcleo 3. No mesmo exemplo, o espectro alocado no caminho óptico 3 não se sobrepõe com o espectro alocado em nenhum núcleo vizinho, por isso não sofre com o *Crosstalk* inter-núcleos. A Figura 14 também destaca que mesmo que dois caminhos ópticos usem o mesmo *slot* de frequência, o *Crosstalk* inter-núcleos não é considerado caso os núcleos usados por estes dois caminhos ópticos não sejam adjacentes. Um exemplo deste caso pode ser observado entre os caminhos ópticos 1 e 7, em que ambos usam o *slot* 3 em núcleos não adjacentes. Isso ocorre porque, apesar de existir, os valores

de *crosstalk* entre núcleos não adjacentes é considerável desprezível, podendo ser negligenciável (Hayashi et al. 2011).

Um algoritmo de provisionamento de recursos pode tratar o *crosstalk* de dois modos (Yang, Zhang e Wu 2018) (Lobato et al. 2019): *XT-aware*, que usa valores em tempo real de *crosstalk* para a tomada de decisão, ou *XT-avoid*, em que o algoritmo tenta evitar sobreposição de *slots* em núcleos adjacentes sem ter em conta os valores reais de *crosstalk*. Entre estas duas formas de considerar o *crosstalk*, os algoritmos *XT-aware* conseguem reduzir o *crosstalk* de forma mais eficiente ao alocar os recursos quando comparado a algoritmos *XT-avoid* (Yang, Zhang e Wu 2018). Isto porque os algoritmos *XT-aware* possuem os valores de *crosstalk* verificados em relação ao estado atual da rede. Entretanto, esta maior eficiência vêm atrelada a uma maior complexidade computacional, pois exige que se verifique constantemente os níveis de *crosstalk* de cada caminho óptico, tornando o processo computacionalmente custoso e desafiador (Yang, Zhang e Wu 2018). Um modelos matemático para o cálculo do *crosstalk* e modos de estimativa de *crosstalk* são apresentados na Seção 3.1.3 desta tese.

2.3 O Problema RMCSA

Um problema clássico para alocação de recursos em EON é o problema de roteamento, escolha de formato de modulação e alocação de espectro (*routing, modulation level, and spectrum allocation (RMLSA)*). O uso de fibras multi-núcleo adiciona uma nova dimensão ao problema RMLSA: a alocação de núcleo. Assim, para redes que usam este tipo de fibra, o problema de provisionamento de recursos é conhecido como roteamento, escolha de formato de modulação, alocação de núcleo e espectro (*routing, modulation, core and spectrum allocation (RMCSA)*) (Su et al. 2022), (Seki et al. 2023). O termo RMCSA pode sofrer variação a depender da referência, podendo também ser citado como: *routing, modulation, spectrum and core allocation (RMSCA)* (Muhammad, Zervas e Forchheimer 2015); *routing, spectrum and core assignment (RSCA)* (Lobato et al. 2019); *routing, modulation level, spectrum and core allocation (RMLSCA)* (Rodrigues et al. 2020); ou mesmo *routing, core, modulation level, and spectrum assignment (RCMLSA)* (Moura e Fonseca 2018). Também é comum a literatura abordar o problema RMCSA sendo dividido em subproblemas, como o *spectrum and core allocation (SCA)* (Lobato et al. 2019) ou o problema *modulation level (ML)* (Klinkowski et al. 2020).

Os dois primeiros passos para tratar o problema RMCSA, assim como no problema RMLSA, consiste em realizar o roteamento entre o nó de origem O e o nó de destino D e escolher o formato de modulação adequado para esta rota. A terceira fase do problema RMCSA (que não existe no problema RMLSA) é definir qual dos

núcleos da fibra será alocado para o novo caminho óptico. A escolha do núcleo impacta diretamente na interferência entre os caminhos ópticos da rede, sendo necessário uma escolha de forma eficiente (Oliveira e Fonseca 2018), (Rumipamba-Zambrano et al. 2018), (Moghaddam, Beyranvand e Salehi 2020).

Por fim, é necessário definir qual conjunto de *slots* o caminho óptico vai usar. Esta definição deve obedecer a duas restrições espectrais (Behera, George e Das 2018): *i*) contiguidade espectral, que exige que todos os *slots* de um caminho óptico devam ser adjacentes entre si (isto é, estarem em frequências adjacentes); *ii*) continuidade espectral, que exige que a frequência de cada *slot* deve ser a mesma em todos os enlaces do caminho óptico. Além disso, também existe a restrição de continuidade espacial, que exige que um caminho óptico use o mesmo núcleo em todos os enlaces da rota (Brasileiro, Costa e Drummond 2020). A Figura 15 mostra como acontece as restrições de continuidade e contiguidade espectral em um exemplo de rota com três enlaces, em que cada enlace possui dois núcleos.

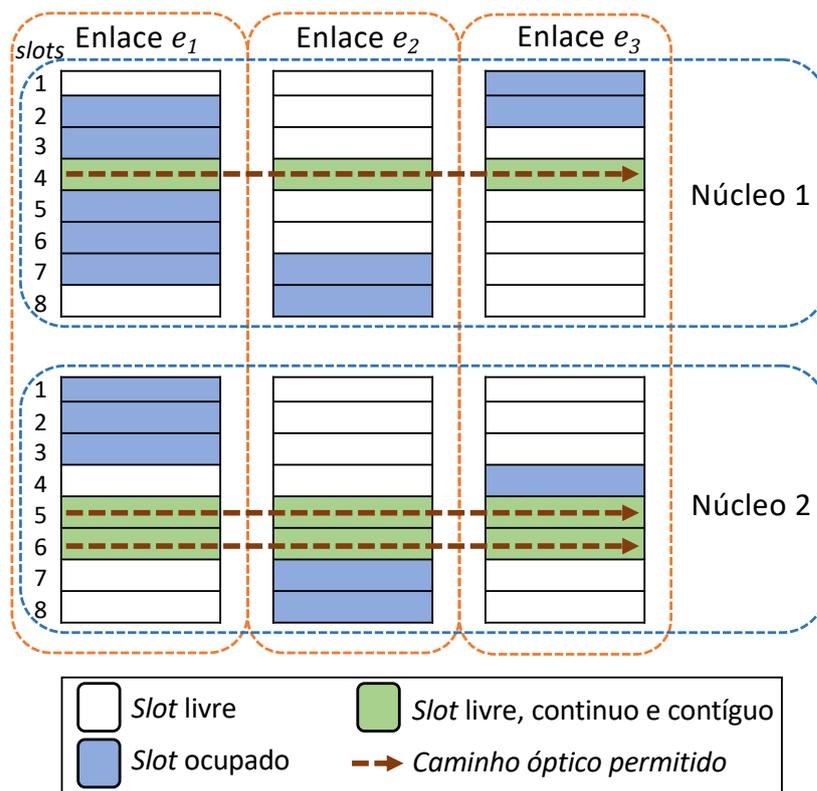


Figura 15 – Restrições de contiguidade e continuidade espectral em três enlaces com dois núcleos cada.

Em uma rede óptica elástica, os caminhos ópticos possuem quantidades de *slots* diferentes entre si. Além disso, os caminhos ópticos são alocados e liberados durante o funcionamento da rede. Neste contexto, surgem situações em que os *slots* livres fiquem separados em pequenos grupos não-contíguos. Portanto, nem sempre o algoritmo RMCSA tem a disposição *slots* livres e que obedecem as restrições de

continuidade e contiguidade espectral (Yousefi e Rahbar 2020). Este fenômeno é conhecido como fragmentação da rede e é um desafio para a alocação espectral. No exemplo da Figura 15, mesmo que existam *slots* livres nos três enlaces da rota ($e_1 - e_2 - e_3$), uma nova requisição que tenha que passar por estes três enlaces e que precise de dois *slots* de frequência não pode ser atendida no núcleo 1. Já uma requisição que necessite de mais de dois *slots* não poderá ser atendida em nenhum dos núcleos deste exemplo. Isso ocorre pois não existem três *slots* livres, contínuos e contíguos neste exemplo. Tal situação acarreta o bloqueio do serviço para a nova requisição. Logo, a forma que a alocação de espectro é feita deve considerar o aumento da eficiência da rede, diminuindo a sua fragmentação. A Figura 16 apresenta o passo a passo de um algoritmo para resolver o problema RMCSA.

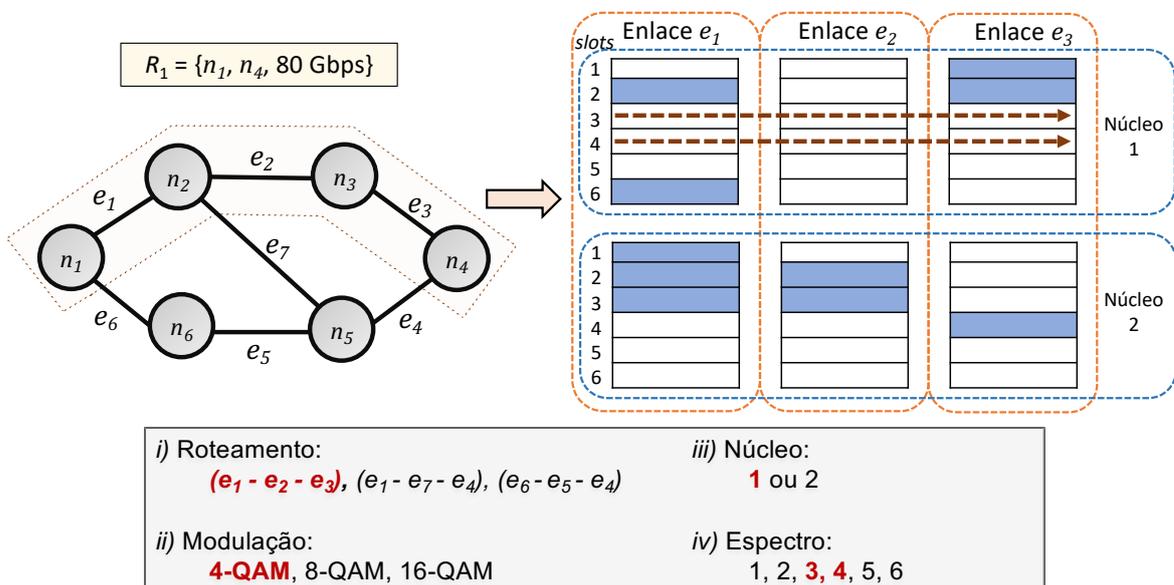


Figura 16 – Exemplo de resolução do problema RMCSA a partir da chegada de uma requisição R_1 .

Na Figura 16 ilustra-se a chegada de uma requisição R_1 , que precisa conectar o nó n_1 ao 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 menores rotas possíveis. Em seguida, o algoritmo RMCSA seleciona o formato de modulação 4-QAM para ser usado pelo caminho óptico a ser alocado. Então, calcula-se a largura de banda necessária para atender a taxa de bits requisitada, que neste exemplo é 22,4 GHz para a requisição R_1 . A expressão que relaciona a taxa de bits requisitada e a largura de banda necessária para atender à demanda é detalhada no Capítulo 3, na Equação (3.2). 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.

Por fim, o algoritmo **RMCSA** informa ao plano de controle as informações para que um novo caminho óptico, oriundo da requisição R_1 , seja alocado na rede.

2.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os conceitos fundamentais em redes ópticas elásticas. Tais conceitos envolvem as redes ópticas elásticas de forma geral e também as que usam a multiplexação por divisão espacial. As **SDM-EONs** possibilitam a utilização de fibras multi-núcleos na rede, o que proporciona um aumento da capacidade de transmissão da rede.

Também foi apresentado o problema **RMCSA**, principal desafio ligado a alocação de recursos em **SDM-EONs** baseadas em fibras multi-núcleos. No contexto do problema **RMCSA** também foram mostradas as restrições de espectro e espaço, além de como estas restrições se relacionam com a fragmentação do espectro. Os subproblemas que compõem o problema **RMCSA** são investigados nesta tese, sendo explorados nos Capítulos 5, 6, 7 e 8.

No próximo capítulo são descritas as características do cenário de camada física adotado neste trabalho.

3 Modelagem da Camada Física

Neste capítulo são apresentados os modelos de representação da camada física utilizados nesta tese. Tais modelos tem como objetivo mensurar os níveis de relação entre o sinal óptico e os ruídos e interferências que afetam este sinal. Em específico, os efeitos de camada física que são abordados neste capítulo são de dois tipos: *i*) limitações intra-núcleo, que ocorrem dentro do núcleo da fibra, como o ruído ASE e os NLIs; e *ii*) limitações inter-núcleo, que ocorrem entre os núcleos da fibra óptica, como o *crosstalk*. Além disso, neste capítulo são analisadas as duas principais formas de se considerar as limitações de camada física no processo de avaliação de algoritmos RMCSA: a avaliação via alcance de transmissão e a avaliação via verificação dinâmica.

No início deste capítulo, na Seção 3.1, são definidos os conceitos básicos sobre comunicação óptica. Em seguida, os modelos de ruído ASE, NLIs e *crosstalk* inter-núcleos são apresentados nas Seções 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3, respectivamente. Na Seção 3.2 são discutidas as diferenças entre o alcance máximo de transmissão e a verificação dinâmica. Por fim, as considerações finais do capítulo são apresentadas na Seção 3.3.

3.1 Limitações da Camada Física

Para alocar um novo caminho óptico, a taxa de bits de informação $R_{b,i}$ pretendida pelo cliente deve ser acrescida de um *overhead* de *forward error correction* (FEC) para garantir a integridade das informações no processo de transmissão. A FEC é um mecanismo usado para mitigar a degradação da qualidade do sinal óptico devido à transmissão, particularmente em longas distâncias. Para isso, bits redundantes de *overhead* são anexados aos bits de informação para viabilizar o processo de correção de erros (Grover 1988), (Din e Zhan 2020), como representado na Figura 17.

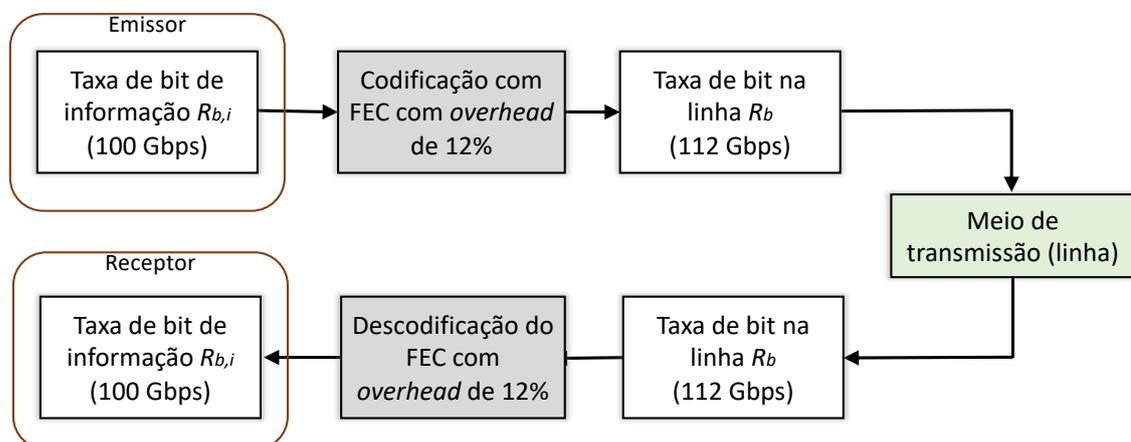


Figura 17 – Representação da adição de bits de *overhead* de FEC.

No exemplo da Figura 17, um *overhead* de 12% é adicionado aos bits de informação antes que esse seja enviado pelo meio de transmissão. Desta forma, o receptor é capaz de decodificar corretamente a informação, mesmo com os erros de bits oriundos do meio de transmissão. A quantidade de bits de *overhead*, tal qual o nível de resistência a erros que a transmissão na linha (Pós-FEC) passa a ter, depende do modelo de FEC utilizado. Portanto, a taxa de transmissão de bits na linha, Pós-FEC, é dada por

$$R_b = R_{b,i}(1 + F), \quad (3.1)$$

em que R_b é a taxa de bits que de fato é transmitida na linha, $R_{b,i}$ é a taxa de bits de informação solicitada pelo cliente através de uma requisição e F é a fração de bits adicionais (*overhead*) transportados no caminho óptico devido a utilização da FEC. A partir da chegada de uma requisição, deve-se calcular a largura de banda B_m (*bandwidth*) que o novo caminho óptico m usará. A largura de banda do sinal é igual à taxa de símbolo S (*symbol rate*) carregada pela portadora em cada estado de polarização (Essiambre et al. 2010). O valor de S de um caminho óptico m , dado em Baud, é calculado por

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

em que o fator 2 corresponde as duas polarizações (Essiambre et al. 2010) e M é o número de pontos de constelação de cada formato de modulação. Assim, a largura de banda total usada pelo caminho óptico m é igual a sua taxa de símbolos, $B_m = S_m$ (Essiambre et al. 2010). Portanto, seguindo a Equação 3.2, a quantidade de *slots* utilizados pelo caminho óptico será definido com base na largura de banda necessária para atender a requisição. A quantidade de *slots* utilizada pelo caminho óptico m é dada pela seguinte divisão inteira

$$Q_{slot_m} = \left\lceil \frac{B_m}{B_{ref}} \right\rceil + 1, \quad (3.3)$$

em que B_{ref} é a largura de banda de um *slot* e a expressão entre parenteses corresponde a uma divisão inteira, com o resultado sendo arredondado para o primeiro número inteiro superior. Por exemplo, caso uma requisição necessite de 20 GHz de largura de banda (B_m), três *slots* serão necessários para atender a esta requisição. Pois, considerando a largura de banda do *slot* B_{ref} igual a 12,5 GHz, serão necessários dois *slots* para o tráfego de informação ($20 / 12,5 = 1,6$), acrescido de um *slot* de banda de guarda.

A taxa de erros de bits (*bit error-rate* (BER)) é uma das principais métricas usadas para mensurar a QoT de um caminho óptico (Ramaswami, Sivarajan e Sasaki 2009). Inicialmente, o valor máximo aceitável de BER era da ordem de 10^{-9} , considerando

uma época em que a FEC não era utilizada em sistemas de comunicação óptica (Essiambre et al. 2010). Com o início do uso da FEC em sistemas de comunicação óptica, em meados dos anos de 1990, os valores aceitáveis para a BER na linha (meio de transmissão) foram se modificando (Essiambre et al. 2010). Os valores mínimos de BER na linha passaram a ser de 6×10^{-5} com uso da FEC de primeira geração ou mesmo de $3,8 \times 10^{-3}$ para FEC de segunda geração (Essiambre et al. 2010). Já esquemas de Super FECs permitem uma BER na linha na ordem de $1,3 \times 10^{-2}$, com uma BER de saída variando entre 10^{-9} e 10^{-15} a depender do esquema de Super FEC utilizado (ITU-T G.975.1 2004).

Outra maneira de medir os níveis de qualidade de transmissão é por meio da relação sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* (SNR)). A SNR estabelece uma relação entre a potência de um sinal e a soma das potências de ruídos e interferências que afetam este sinal. A SNR é usada como um critério de QoT em diversos trabalhos (Essiambre et al. 2010), (Ives, Bayvel e Savory 2015), (Fontinele et al. 2017). Existe uma relação entre os valores de BER e SNR em um sinal digital. Logo, a BER pode ser descrita como (Ip et al. 2008)

$$BER = \frac{2}{\log_2 M} \left(\frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \log_2(M) \cdot snr_b}{2(M - 1)}} \right), \quad (3.4)$$

em que erfc corresponde à função erro complementar e snr_b corresponde à relação sinal-ruído por bit em valores lineares. A snr_b (unidades lineares) relaciona-se com a relação sinal-ruído por bit, em dB, (SNR_b) através da equação

$$snr_b = 10^{SNR_b/10}. \quad (3.5)$$

A Equação 3.4 é válida quando o valor de $M = 2^{2n}$, sendo n um número inteiro. Isto é, para os formatos de modulação 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM e assim por diante. Para o valor de $M = 8$ (8-QAM), a relação entre BER e snr_b é dada por (Ip et al. 2008)

$$BER = \frac{11}{16} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3 \cdot snr_b}{3 + \sqrt{3}}} \right). \quad (3.6)$$

Quando o valor de $M = 32$ (32-QAM), a relação entre BER e snr_b é dada por (Ip et al. 2008).

$$BER = \frac{91}{240} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{snr_b}{4}} \right). \quad (3.7)$$

Portanto, pode-se definir os limites de SNR por bit requeridos ($SNR_{b,req}$) para cada formato de modulação ao considerar-se um limiar de BER específico. A Tabela 2 apresenta os limiares de SNR requerida ($SNR_{b,req}$), para cada formato de modulação, para valores de BER distintos.

Tabela 2 – Exemplo de SNR requerida obtida a partir da expressão 3.4 (4-QAM, 16-QAM e 64-QAM), da expressão 3.6 (8-QAM) e da expressão 3.7 (32-QAM).

Formato de Modulação	$SNR_{b,req}$ (dB) BER = 10^{-3}	$SNR_{b,req}$ (dB) BER = $3,8 \times 10^{-3}$	$SNR_{b,req}$ (dB) BER = 4×10^{-3}	$SNR_{b,req}$ (dB) BER = 10^{-2}
4-QAM	6,79	5,52	5,46	4,32
8-QAM	9,03	7,83	7,78	6,73
16-QAM	10,52	9,17	9,11	7,88
32-QAM	12,57	11,23	11,17	9,94
64-QAM	14,77	13,34	13,28	11,95

Em comunicação óptica, a literatura considera uma relação sinal-ruído conhecida como relação sinal-ruído óptico (OSNR). Diferente da SNR, que contempla o sinal digital, a OSNR contempla o sinal no domínio óptico. Uma representação da SNR e da OSNR é apresentada na Figura 18 (Essiambre et al. 2010).

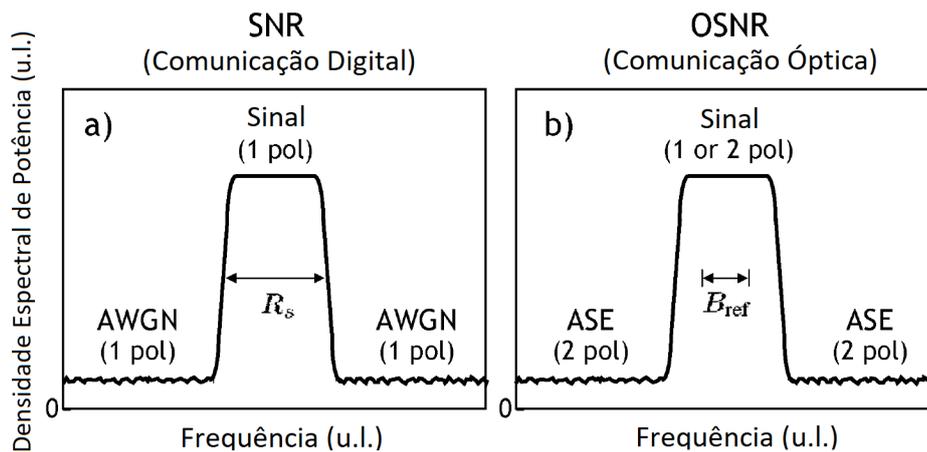


Figura 18 – Representação da (a) SNR e (b) OSNR. u.l.: unidades lineares, AWGN: *additive white Gaussian noise*, ASE: *amplified spontaneous emission* (Essiambre et al. 2010).

Existe uma relação entre a SNR e a OSNR. Então, através de valores de $snr_{b,req}$ pode-se definir valores limites de OSNR para cada formato de modulação. Tais valores limites, ou limiares, servem para definir o nível mínimo requisitado de OSNR para um determinado valor máximo de BER. O valor de limiar de OSNR requerido em um cenário ideal, em unidades lineares ($osnr_{req,ideal}$), é dado por (Essiambre et al. 2010)

$$osnr_{req,ideal} = \frac{R_b}{2 \cdot R_s} snr_{b,req}, \quad (3.8)$$

em que R_b é a taxa de bits transmitidas na linha e R_s é o ritmo de símbolo. Nesta tese considera-se a largura de banda total (B_{tot}) de cada caminho óptico igual ao ritmo de símbolo, $B_{tot} = R_s$. Existe uma relação entre R_b e R_s , dada por

$$R_b = (p \cdot \log_2(M)) \cdot R_s, \quad (3.9)$$

em que $p = 1$ para um *singly polarized signal* e $p = 2$ para um *polarization-multiplexed signal*. Assim, substituindo a Equação 3.9 na Equação 3.8 e considerando um valor de $p = 2$, obtém-se o valor da **OSNR** requerida, dada por

$$osnr_{req,ideal} = \log_2(M) \cdot snr_{b,req}. \quad (3.10)$$

Os valores de $osnr_{req,ideal}$ estão em unidades lineares. Portanto, a **OSNR** requerida em um sistema ideal $OSNR_{req,ideal}$, em dB, é dada por

$$OSNR_{req,ideal} = 10 \cdot \log_{10}(osnr_{req,ideal}). \quad (3.11)$$

O valor de $OSNR_{req,ideal}$ corresponde a um valor limite de **OSNR** em uma rede funcionando em um cenário de sistema ideal. Entretanto, devido às variáveis decorrentes das condições reais de funcionamento da rede (como temperatura e estresse), o projeto da rede deve considerar uma margem razoável para que, mesmo nas piores condições de operação, as conexões da rede operem em **BER** inferior ao **BER** máximo aceitável (Fidler et al. 2013). Portanto, uma margem de **OSNR** ($\Delta OSNR_m$) deve ser adicionada na **OSNR** requerida em um sistema real. Além disso, deve-se considerar o impacto da degradação de *crosstalk* na **OSNR**. Tal degradação é controlada e mantida em um limite de *crosstalk* definido para a rede (Seção 3.1.3). Dentro deste limite, uma penalidade de **OSNR** ($\Delta OSNR_p$) é adicionada à **OSNR** requerida sob condições ideais (Lobato et al. 2019). Portanto, a **OSNR** requerida ($OSNR_{req}$) em condições de operação real na presença de *crosstalk* é dada por (Lobato et al. 2019)

$$OSNR_{req} = OSNR_{req,ideal} + \Delta OSNR_m + \Delta OSNR_p, \quad (3.12)$$

sendo todas as grandezas estão em dB. Os valores adotados nesta tese são $\Delta OSNR_m = 1$ dB e $\Delta OSNR_p = 1$ dB (Lobato et al. 2019). A Tabela 3 apresenta exemplos de limites de **OSNR** requerido para diferentes valores de **BER**.

Tabela 3 – Exemplo de **OSNR** requerida em condições reais, em dB, para cada formato de modulação. Considerando $\Delta OSNR_m = 1$ dB e $\Delta OSNR_p = 1$ dB.

Formato de Modulação	$OSNR_{req}$ (dB) BER = 10^{-3}	$OSNR_{req}$ (dB) BER = $3,8 \times 10^{-3}$	$OSNR_{req}$ (dB) BER = 4×10^{-3}	$OSNR_{req}$ (dB) BER = 10^{-2}
4-QAM	11,80	10,53	10,47	9,33
8-QAM	15,80	14,60	14,55	13,50
16-QAM	18,54	17,19	17,13	15,90
32-QAM	21,56	20,22	20,16	18,93
64-QAM	24,55	23,12	23,06	21,73

No contexto da penalidade de **OSNR** referente ao *crosstalk* ($\Delta OSNR_p$), é necessário definir um conjunto de limites de *crosstalk* para cada caminho óptico. Estes

limites correspondem a penalidade específica adicionada ao limite de OSNR. O nível de *crosstalk*, em dB, para uma penalidade de OSNR ($\Delta OSNR_p$), é dada por (Lobato et al. 2019, Puttnam et al. 2016)

$$XT(\Delta OSNR_p) = 10 \log_{10} \left(1 - 10^{-\Delta OSNR_p/10} \right) - OSNR_{req,ideal}, \quad (3.13)$$

em que $\Delta OSNR_p$ corresponde a penalidade de OSNR adicionada a $OSNR_{req}$ na Equação (3.12). Assim, para um $\Delta OSNR_p = 1$ dB e usando a Equação (3.13), pode-se obter os limites de *crosstalk* (normalizados pela potência de sinal óptica), em dB, dados por (Puttnam et al. 2016)

$$XT_{\mu,req} = XT(1 \text{ dB}) - 10 \log_{10} \left[0.4431 - \ln P_0^{1/4} \right], \quad (3.14)$$

em que P_0 corresponde a probabilidade de interrupção, que é 10^{-5} (Lobato et al. 2019, Puttnam et al. 2016). Portanto, todo caminho óptico m na rede deve possuir um valor de OSNR ($OSNR_m$) maior que o valor de $OSNR_{req}$ e um nível de *crosstalk* ($XT_{\mu,m}$) menor que $XT_{\mu,req}$. Esta tese adota uma BER de $1,3 \times 10^{-2}$ (ITU-T G.975.1 2004). Logo, os valores de $OSNR_{req}$ e $XT_{\mu,req}$ para cada formato de modulação são os apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Limites dos formatos de modulação considerando uma BER de $1,3 \times 10^{-2}$.

Limite	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
OSNR em dB ($OSNR_{req}$)	8,95	13,15	15,49	18,51	21,28
XT em dB ($XT_{\mu,req}$)	-19,03	-23,23	-25,57	-28,59	-31,36

Baseado no modelo de camada física descrito em (Poggiolini e Jiang 2017) e (Habibi e Beyranvand 2019), a OSNR de um caminho óptico m é obtida pelo acúmulo de ruído ASE e de efeitos não lineares, dado por

$$OSNR_m = \frac{G_m}{G_m^{ASE} + G_m^{NLI}}, \quad (3.15)$$

em que G_m é a densidade espectral de potência (*power spectral density* (PSD)) do sinal do caminho óptico m , G_m^{ASE} é a PSD do ruído ASE dado pela Equação 3.16 (Seção 3.1.1) e G_m^{NLI} é a PSD das NLIs dada pela Equação 3.21 (Seção 3.1.2). Já o nível total de *crosstalk* acumulado em um caminho óptico m ($XT_{\mu,m}^{(tot)}$) pode ser obtido através das expressões apresentadas na Seção 3.1.3.

Portanto, a verificações dos níveis de QoT no âmbito desta tese é realizada da seguinte forma: Após a chegada de uma nova requisição e da seleção (pelo algoritmo RMCSA) de uma rota, formato de modulação, núcleo e conjunto de *slots*, o operador da rede avalia a viabilidade para criação deste novo caminho óptico, conhecido como caminho óptico candidato. Para isto, observa-se a existência de recursos disponíveis, com *slots* livres, contíguos e contínuos. Caso não existam recursos livres, a requisição

será bloqueada por ausência de recursos. Existindo disponibilidade de recursos, o operador da rede, com base em um modelo de camada física, analisa a **QoT** do caminho óptico candidato através da **OSNR** e do nível de *crossstalk*. Caso a **OSNR** do caminho óptico candidato não esteja adequada, ocorrerá um bloqueio por **OSNR** inadequado no novo caminho óptico (**OSNRN**). Caso contrário, será analisado o impacto da possível alocação do caminho óptico candidato nos caminhos ópticos já ativos na rede. Se tal impacto afetar algum dos caminhos ópticos já estabelecidos de tal forma que a **OSNR** deste fique abaixo de $OSNR_{R_{req}}$, o caminho óptico candidato sofrerá um bloqueio por **OSNR** inadequado nos outros caminhos ópticos já ativos na rede (**OSNRO**). Um exemplo de como acontece um bloqueio por **OSNRO** é apresentado na Figura 19.

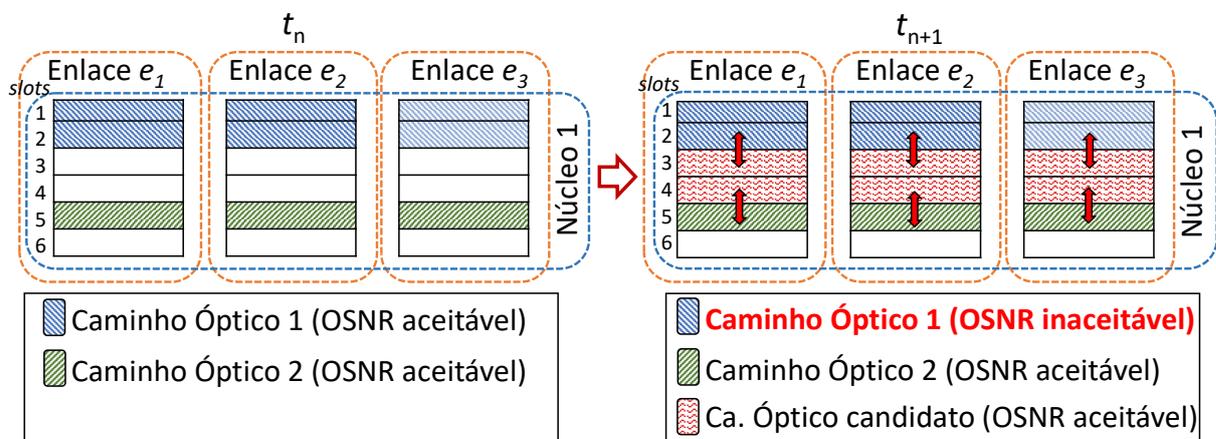


Figura 19 – Exemplo de uma requisição bloqueada por OSNRO.

No exemplo da Figura 19, em um instante t_n , existem dois caminhos ópticos já ativos na rede e que usam os enlaces e_1 , e_2 e e_3 . Estes caminhos ópticos possuem níveis de **OSNR** aceitáveis em relações aos limiares de **QoT** estabelecidos para a rede. A Figura mostra a tentativa de alocação de um novo caminho óptico no instante t_{n+1} . Este caminho óptico candidato, que foi criado para atender a uma requisição R_n , possui um nível de **OSNR** aceitável. Entretanto, a possível alocação deste caminho óptico candidato causa interferência nos caminhos ópticos 1 e 2. Como a interferência causada no caminho óptico 1 faz com que este fique com um valor de **OSNR** inaceitável, o operador da rede não permite a alocação do caminho óptico candidato. Assim, a requisição R_n , que originou o caminho óptico candidato, será bloqueada por **OSNRO**.

Por fim, assim como os bloqueios por **OSNRN** e **OSNRO**, existem os bloqueios por **XT** inadequado no novo caminho óptico (**XTN**) e por **XT** inadequado nos outros caminhos ópticos já ativos na rede (**XTO**). O bloqueio por **XTN** ocorre quando os níveis de *crossstalk* do caminho óptico candidato é maior que os níveis de *crossstalk* permitidos para a rede ($XT_{\mu, req}$). Por outro lado, o bloqueio por **XTO** ocorre quando o caminho óptico candidato afeta os caminhos ópticos já ativos na rede e faz com que pelo menos um deles fique com o nível de *crossstalk* acima do permitido para a rede.

3.1.1 Modelo de Ruído ASE

O ruído ASE é adicionado quando o sinal óptico passa por amplificadores, como o EDFA (Essiambre et al. 2010). Neste contexto, G_m^{ASE} é a densidade espectral de potência (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 e Beyranvand 2019)

$$G_m^{ASE} = \sum_{a=1}^{|A_m|} G_{m,a}^{ASE}, \quad (3.16)$$

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 e Deen 2014)

$$G_{m,a}^{ASE} = 2n_{sp}h\nu(g_{m,a} - 1), \quad (3.17)$$

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 $F_n = 2n_{sp}$. Neste sentido, também é comum alguns trabalhos calcularem o ruído ASE em função de F_n (Fontinele et al. 2017), (Ferrari, Virgillito e Curri 2020), através da equação

$$G_{m,a}^{ASE} = F_n h \nu (g_{m,a} - 1), \quad (3.18)$$

em que F_n é a figura de ruído (*noise figure*) do amplificador. h é a constante de Planck, ν é a frequência óptica (*optical carrier frequency*) e $g_{m,a}$ é o ganho (*amplifier gain*) do EDFA a do caminho óptico m , dado por

$$g_{m,a} = e^{\alpha_l L_s}, \quad (3.19)$$

em que L_s é o comprimento do *span* s . α_l é calculado pelo coeficiente de perda da fibra α , através da expressão

$$\alpha_l = \frac{\alpha}{10^4 \cdot \log_{10}(e)}. \quad (3.20)$$

Nesta tese, considera-se que as perdas de cada nó e enlace são totalmente compensadas pelos EDFAs. Também admite-se que todas as fibras ópticas utilizadas na rede possuem as mesmas características físicas.

3.1.2 Modelo de Efeitos Não-Lineares

Nos últimos anos, vários estudos têm sido conduzidos para aprimorar o modelo de ruído Gaussiano (*gaussian-noise* (GN)), usado para mensurar a NLI (Carena et al. 2014), (Poggiolini e Jiang 2017). Nesta tese, a NLI engloba os efeitos não-lineares SPM, XPM e FWM. Modelos de camada física baseados em GN, como o apresentado em (Johannisson e Agrell 2014), acabam por superestimar o valor da potência da NLI (Poggiolini et al. 2015) (Habibi e Beyranvand 2019). O modelo de ruído Gaussiano aprimorado (*enhanced Gaussian-noise* (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 e 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 . A G_m^{NLI} é dada por (Poggiolini e Jiang 2017)

$$G_m^{NLI} = \sum_{e=1}^{|E_m|} G_{m,e}^{EGN}, \quad (3.21)$$

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 e calculado através do modelo EGN é obtido por (Poggiolini e Jiang 2017)

$$G_{m,e}^{EGN} = G_{m,e}^{GN} - G_{m,e}^{corr}, \quad (3.22)$$

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 e 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 e Jiang 2017), (Habibi e Beyranvand 2019). A $G_{m,e}^{GN}$ é dada por (Poggiolini et al. 2014)

$$G_{m,e}^{GN} \approx N_{e,s} \sum_{n=1}^{|C_e|} G_m G_{e,n} G_{e,n} \psi_{m,n}, \quad (3.23)$$

em que C_e é o conjunto de caminhos ópticos ativos no enlace e (incluindo o caminho óptico sob teste m), $|C_e|$ é a quantidade de caminhos ópticos ativos no enlace e (incluindo o caminho óptico sob teste m), $N_{e,s}$ é a quantidade de *spans* que compõem o enlace e , G_m é a PSD do sinal do caminho óptico m (sob teste), $G_{e,n}$ é a PSD do sinal do n -ésimo caminho óptico no enlace e e $\psi_{m,n}$ é um parâmetro para quantificar a PSD da NLI. O parâmetro ψ ocorre de duas formas: quando o caminho óptico m (sob teste) causa interferência em si mesmo (*self-channel interference* (SCI)), representado por $\psi_{m,m}$; e quando o caminho óptico n causa interferência no caminho

óptico m , configurando a interferência entre canais (*cross-channel interference (XCI)*), representada por $\psi_{m,n}$. Assim, o valor do parâmetro ψ na Equação 3.23 é substituído por $\psi_{m,m}$ quando o elemento analisado no conjunto C_e , para efeitos de cálculo do termo da soma apresentada na Equação 3.23, é o próprio caminho óptico m . Quando o elemento analisado do conjunto C_e é qualquer outro que não o caminho óptico m , o parâmetro usado é $\psi_{m,n}$. O valor de $\psi_{m,m}$ é dado por (Poggiolini et al. 2014)

$$\psi_{m,m} = \xi \operatorname{asinh} \left(\frac{\pi^2}{2} (2\alpha)^{-1} |\beta_2| B_m^2 \right), \quad (3.24)$$

em que α é atenuação de “campo” da fibra (*optical field fiber loss*), β_2 é a dispersão de velocidade de grupo da fibra (*group-velocity dispersion*), B_m é a largura de banda do caminho óptico m , e ξ é dado por

$$\xi = \frac{8\gamma^2 L_{eff}^2 (2\alpha)}{27\pi |\beta_2|}, \quad (3.25)$$

em que γ é o coeficiente de não-linearidade da fibra (*fiber nonlinearity coefficient*) e L_{eff} é o comprimento efetivo do *span* (*span effective length*), dado por

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-2\alpha L_s}}{2\alpha}, \quad (3.26)$$

em que L_s é o comprimento do *span* e ϵ é o número de Euler ($\epsilon = 2,718$). O parâmetro β_2 usado na Equação 3.24 e no cálculo de ξ (Equação 3.25) não é referenciado de forma explícita em alguns trabalhos (Poggiolini e Jiang 2017). Entretanto, o valor de β_2 pode ser obtido a partir do parâmetro de dispersão da fibra (*fiber dispersion parameter*) D_λ . Assim, o valor de β_2 é dado por (Agrawal 2002)

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2 D_\lambda}{2\pi c}, \quad (3.27)$$

em que D_λ é o parâmetro de dispersão da fibra, c é a velocidade da luz no vácuo ($c = 299.792,458$ km/s) e λ é o comprimento da onda correspondente ao centro do espectro óptico, $\lambda = c/f_c$, em que f_c é a frequência óptica do centro do espectro. O parâmetro $\psi_{m,n}$ é dado por

$$\begin{aligned} \psi_{m,n} = \xi & (\operatorname{asinh}(\pi^2 (2\alpha)^{-1} |\beta_2| [f_{e,n} - f_m + B_{e,n}/2] B_m) \\ & - \operatorname{asinh}(\pi^2 (2\alpha)^{-1} |\beta_2| [f_{e,n} - f_m - B_{e,n}/2] B_m)), \end{aligned} \quad (3.28)$$

em que f_m é a frequência central do caminho óptico m (sob teste) e $f_{e,n}$ é a frequência central do n -ésimo caminho óptico no enlace e . $B_{e,n}$ é a largura de banda do n -ésimo caminho óptico no enlace e . O termo de correção do modelo EGN $G_{m,e}^{corr}(f)$ (que aparece na Equação 3.22) é dado por (Poggiolini e Jiang 2017)

$$G_{m,e}^{corr}(f) \approx N_{e,s} \sum_{n=1}^{|C_e|} G_m G_{e,n} G_{e,n} \omega_{m,n}, \quad (3.29)$$

em que $\omega_{m,n}$ é um parâmetro usado para quantificar o termo de correção do modelo EGN para a NLI. De forma análoga ao cálculo de ψ na Equação 3.23, o parâmetro ω pode assumir duas formas na Equação 3.29: $\omega_{m,n}$ ou $\omega_{m,m}$. O valor de $\omega_{m,m}$ é dado por (Poggiolini e Jiang 2017)

$$\omega_{m,m} = \xi \frac{5\Phi_m}{3\alpha L_s}, \quad (3.30)$$

em que Φ_m é uma constante que depende do formato de modulação utilizado pelo caminho óptico m . O valor de $\omega_{m,n}$ é dada por (Poggiolini e Jiang 2017)

$$\omega_{m,n} = \xi \frac{5\Phi_n B_{e,n}}{6\alpha |f_{e,n} - f_m| L_s}, \quad (3.31)$$

em que Φ_n é uma constante que depende do formato de modulação utilizado pelo n -ésimo caminho óptico. A Tabela 5 apresenta os valores do parâmetro Φ , usados em Φ_m e Φ_n , para cada formato de modulação (Poggiolini e Jiang 2017).

Tabela 5 – Valores do parâmetro Φ para cada formato de modulação.

Formato de Modulação	Φ
4-QAM	1,0
8-QAM	0,6667
16-QAM	0,68
32-QAM	0,69
64-QAM	0,619

A seguir, o modelo EGN apresentado nesta seção é testado. O objetivo dos testes é confirmar o correto funcionamento do modelo nesta tese (ambiente de simulação) em relação ao artigo que apresentou o modelo. Primeiramente, foi conduzido um estudo (teste de mesa) para refazer o experimento realizado em (Poggiolini e Jiang 2017). Para isto, o modelo adotado é aplicado considerando o mesmo cenário e os mesmos valores de parâmetros adotados por (Poggiolini e Jiang 2017). A Figura 20 apresenta como o espectro óptico é dividido na análise de (Poggiolini e Jiang 2017).

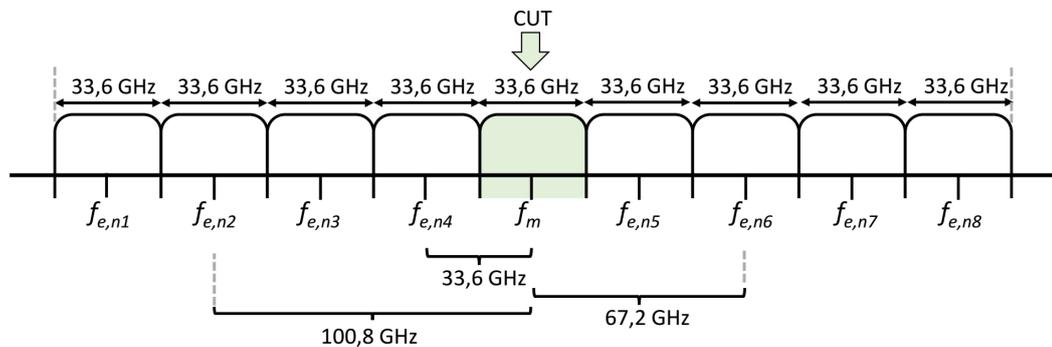


Figura 20 – Exemplo de grade de 33,6 GHz, com 9 canais, apresentando a frequência central do canal sob teste f_m .

No exemplo da Figura 20, observa-se que o espectro óptico é dividido em nove canais com espaçamento fixo de 33,6 GHz. A análise é realizada em relação ao canal central, referenciado de canal sob teste (*channel under test (CUT)*). Neste exemplo, o espaçamento entre canais (*channel spacing*) corresponde a distância entre o centro do canal sob teste f_m (coincidente com o centro de frequência do caminho óptico m) para centro de frequência do n -ésimo canal $f_{e,n}$ (coincidente com o centro de frequência do n -ésimo caminho óptico n), pertencente ao conjunto C_e .

De forma análoga ao exemplo da Figura 20, o cenário de avaliação de (Poggiolini e Jiang 2017) realiza a divisão do espectro em 15 canais de largura de banda fixa, sendo o CUT o canal que encontra-se na posição central entre estes canais. Todos os canais possuem um espaçamento entre canais de 33,6 GHz. Os caminhos ópticos alocados possuem taxa de símbolos de 32 GBaud e usam o formato de modulação 4-QAM. O formato de modulação 4-QAM possui o valor do parâmetro $\Phi = 1$ (usados para Φ_n e Φ_m). A Tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros usados no experimento desta seção. Nesta tabela são mostrados os valores em unidades comumente apresentadas na literatura (valor referência) e os valores nas unidades padrões, que são utilizados nas equações apresentadas nesta seção.

Tabela 6 – Parâmetros do experimento e seus valores (Poggiolini e Jiang 2017).

Parâmetro	Valor referência	Valor S.I.
Coef. de atenuação de campo da fibra, α	0,1 dB/km	$2,302 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$
Coeficiente de não-linearidade da fibra, γ	1,3 1/(W·km)	0,0013 1/(W·m)
Parâmetro de dispersão da fibra, D_λ	16,7 ps/nm/km	$1,67 \times 10^{-5} \text{ s/m/m}$
Dispersão de velocidade de grupo, β_2	-21,3 ps ² /km	$-2,13 \times 10^{-26} \text{ s}^2/\text{m}$
Comprimento do span, L_s	100 km	100.000 m
Comprimento efetivo do span, L_{eff}	21,49 km	21.497,57 m
Parâmetro relacionado com a DEP da NLI, ξ	$1,67 \times 10^{23} \text{ 1}/(\text{W}^2 \cdot \text{s}^2)$	$1,67 \times 10^{23} \text{ 1}/(\text{W}^2 \cdot \text{s}^2)$
Número de canais	15	15
Quantidade de caminhos ópticos ativos, $ C_e $	15	15
Espaçamento entre canais	33,6 GHz	$3,36 \times 10^{10} \text{ Hz}$
Largura de banda dos caminhos, B_m e $B_{e,n}$	32 GHz	$3,2 \times 10^{10} \text{ Hz}$
Taxa de símbolos, S_m	32 GBaud	$3,2 \times 10^{10} \text{ Baud}$
Velocidade da luz no vácuo, c	299.792,458 km/s	299.792.458 m/s
Comprimento de onda, λ	1,55 μm	$1,55 \times 10^{-6} \text{ m}$
Número de enlaces	1	1

O primeiro experimento realizado visa avaliar a potência da NLI em função da quantidade de *spans* atravessados pelo caminho óptico m . Assim, quanto maior a quantidade de *spans*, maior a potência acumulada de NLI no caminho óptico m . Para avaliar a potência da NLI de forma independente da potência utilizada, deve-se calcular a potência NLI normalizada (\tilde{P}_{NLI}) (Poggiolini e Jiang 2017). Tal potência pode ser ajustada, para cada caminho óptico, pelo operador da rede e é dada por (Poggiolini e

Jiang 2017)

$$\tilde{P}_{NLI} = \frac{P_{NLI}}{P_m^3}, \quad (3.32)$$

em que P_{NLI} é a potência da NLI e P_m é a potência do sinal do caminho óptico sob teste. A potência NLI normalizada (\tilde{P}_{NLI}) é utilizada para comparar o resultados entre os dois estudos.

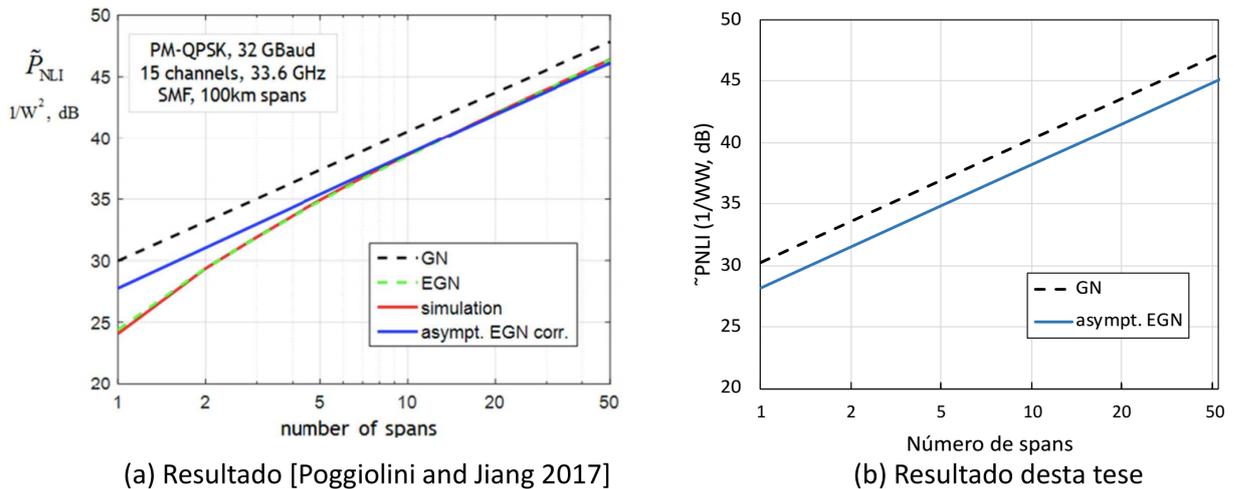


Figura 21 – Potência normalizada de NLI acumulada *vs* número de spans.

A Figura 21 apresenta uma comparação dos resultados obtidos por (Poggiolini e Jiang 2017) e os obtidos neste trabalho através do uso das equações descritas nesta seção. Percebe-se a partir da Figura 21 que os valores encontrados por este estudo são similares aos resultados do estudo de (Poggiolini e Jiang 2017). Em ambos os gráficos, a curva GN (tracejada) corresponde ao cálculo de NLI baseado apenas no modelo GN. Para chegar a este valor, desconsidera-se o termo de correção ($G_{m,e}^{corr}$) da Equação 3.22. Já a curva que representa o modelo EGN (em azul) corresponde ao modelo EGN aproximado, no qual baseia-se o modelo apresentado em (Habibi e Beyranvand 2019) e baseado no modelo de (Poggiolini e Jiang 2017). O modelo usado na análise de (Poggiolini e Jiang 2017) (Figura 21 (a)) usa expressões mais rigorosas e de maior custo computacional. Já o modelo aproximado apresentado nesta tese, também descrito em (Poggiolini e Jiang 2017) e em (Habibi e Beyranvand 2019), produz uma estimativa diferente, podendo chegar a cerca de 1,5 dB de diferença. Esta variação pode ser observada entre os gráficos da Figura 21 (a) e Figura 21 (b), no ponto de 50 spans.

A partir do estudo do funcionamento do modelo de efeitos não lineares, é verificado se este modelo está adequadamente implementado no simulador *SLICE network simulator (SNetS)*, que é utilizado na avaliação de desempenho desta tese. Esta etapa é feita através de técnicas de verificação de modelos como a *structured walk-through*, o *trace* e o *on-line graphic displays* (Jain 1991). Tais técnicas visam

avaliar se um determinado algoritmo está corretamente implementado em relação ao modelo e se os resultados são confiáveis. Além disso, o módulo que realiza os cálculos do modelo de camada física no **SNetS** foi isolado, testado separadamente e comparado com o resultado do teste de mesa (Figura 21). A Figura 22 apresenta os resultados do módulo de camada física do **SNetS** comparado com o resultado do teste de mesa.

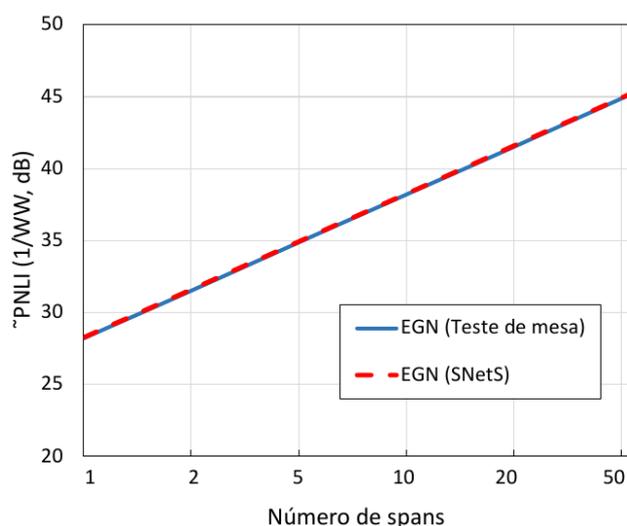


Figura 22 – Potência normalizada de NLI acumulada vs número de spans para os experimentos feitos no teste de mesa e no **SNetS**.

Neste experimento, os valores usados em (Poggiolini e Jiang 2017) foram passados como parâmetros para o módulo de camada física do **SNetS**. Tais valores são os mesmos usados para o primeiro experimento (Figura 21). Na Figura 22 observa-se que a potência normalizada de **NLI** obtida pelo simulador (curva vermelha) coincide com os valores obtidos através do teste de mesa (curva azul). Isso indica que o **SNetS** é capaz de chegar a resultados equivalentes aos testes de mesa do modelo de (Poggiolini e Jiang 2017). Por indução, os resultados do simulador também equivalem, observando a margem de erro de 1,5 dB, aos apresentados nas análises de (Poggiolini e Jiang 2017) (discutidos na Figura 21). Assim, verifica-se o correto funcionamento do simulador usado nesta tese em relação à estimativa da potência dos efeitos não lineares. Uma apresentação mais detalhada do **SNetS** é realizada na Seção 5.3.1.

3.1.3 Modelo de Crosstalk

O *crosstalk* inter-núcleos é uma limitação física importante no provisionamento de recursos em **EONs** que utilizam **SM-MCFs** (Hayashi et al. 2011), (Koshiya et al. 2012), (Puttnam et al. 2017), (Moghaddam, Beyranvand e Salehi 2020). Isso porque este tipo de interferência afeta a qualidade de transmissão de um caminho óptico m , quando outros caminhos ópticos alocados em núcleos vizinhos usam *slots* de mesmo índice dos *slots* usados por m . Vários modelos analíticos para mensurar o *crosstalk*

em uma MCF têm sido propostos na literatura (Hayashi et al. 2011), (Koshiba et al. 2012), (Cartaxo e Morgado 2021).

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

$$XT_{\mu,m}^{(tot)} = \sum_{e=1}^{|E_m|} XT_{\mu,m,e}, \quad (3.33)$$

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

$$XT_{\mu,m,e} = \frac{P_{XT_{m,e}}}{P_m}, \quad (3.34)$$

em que $P_{XT_{m,e}}$ é a potência média de *crossstalk* (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)

$$P_{XT_{m,e}} = \sum_{n=1}^{N_{m,e}} (I_{SO_{m,e,n}} \cdot P_n \cdot h_e \cdot L_e), \quad (3.35)$$

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

$$h_e = \frac{2 \cdot k^2 \cdot R}{\beta \cdot \Lambda}, \quad (3.36)$$

em que k é o coeficiente de acoplamento (*coupling coefficient*), R é o raio de curvatura (*bending radius*), β é a constante de propagação (*propagation constant*) e Λ é a distância entre núcleos (*core pitch*). Atualmente a Equação 3.36 é amplamente adotada na literatura (Klinkowski e Zalewski 2019), (Lobato et al. 2019), (Agrawal, Bhatia e Prakash 2020), (Xiong et al. 2020), (Tang, Shen e Rouskas 2021). Entretanto, a Equação 3.36 possui algumas limitações relacionadas a dependência do valor do raio de curvatura R , que supõe a fibra óptica disposta em uma bobina. Em (Cartaxo e Morgado 2021) é apresentada uma análise sobre estas limitações. Uma alternativa

para o cálculo de h_e em MCFs sem curvatura é dada por (Cartaxo e Morgado 2021)

$$h_e = \frac{2 \cdot k^2 \cdot l_c}{1 + l_c^2 \cdot \Delta\beta_{m,n}^2}, \quad (3.37)$$

em que l_c é o comprimento de correlação (*correlation length*), sendo l_c geralmente muito menor que L_e , $l_c \ll L_e$ (Cartaxo e Morgado 2021). $\Delta\beta_{m,n}$ corresponde a $\Delta\beta_{m,n} = \beta_m - \beta_n$, sendo β_m a constante de propagação no núcleo m e β_n a constante de propagação no núcleo n (Cartaxo e Morgado 2021). O valor de $I_{SO_{m,e,n}}$, que é o índice de sobreposição espectral usado na Equação 3.35, é dado por (Lobato et al. 2019)

$$I_{SO_{m,e,n}} = \frac{S_{SO_{m,e,n}}}{S_{e,n}}, \quad (3.38)$$

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 (desconsiderando banda de guarda) no enlace e , e $S_{e,n}$ é a quantidade de *slots* do caminho óptico n no enlace e .

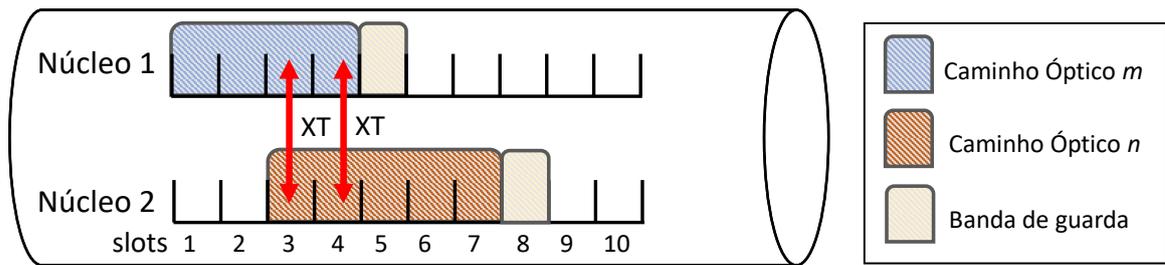


Figura 23 – Sobreposição espectral parcial entre dois caminhos ópticos m e n , que estão alocados em núcleos vizinhos.

Um exemplo de como é calculado o índice de sobreposição de espectro ($I_{SO_{m,e,n}}$) é apresentado na Figura 23. Neste exemplo, observa-se que o caminho óptico m , alocado no núcleo 1, possui quatro *slots* transportando sinal óptico e um *slot* de banda de guarda. Já o caminho óptico n , alocado no núcleo 2, possui cinco *slots* transportando sinal óptico e um *slot* de banda de guarda. Os espectros dos caminhos ópticos m e n estão parcialmente sobrepostos. Neste caso, a sobreposição espectral parcial acontece em dois *slots* (*slot* 3 e *slot* 4). É importante ressaltar que a banda de guarda não influi na potência de *crossstalk*, pois não existe potência de sinal transportada neste *slot* de frequência. Assim, o índice de sobreposição $I_{SO_{m,e,n}}$ (Lobato et al. 2019), calculado através da Equação 3.38, é de 0,40. Isso porque a quantidade de *slots* sobrepostos entre m e n ($S_{SO_{m,n}}$) é igual a 2 e a quantidade de *slots* do caminho óptico n (S_n) é igual a 5. É importante ressaltar que o índice de sobreposição varia de acordo com a utilização de cada enlace ao longo da rota usada pelo caminho óptico sob teste.

No exemplo da Figura 24 observa-se o caminho óptico m_1 , com início no nó n_1 e destino no nó n_3 e que usa o núcleo 3 nos enlaces e_1 e e_2 . Na Figura 24 são mostrados

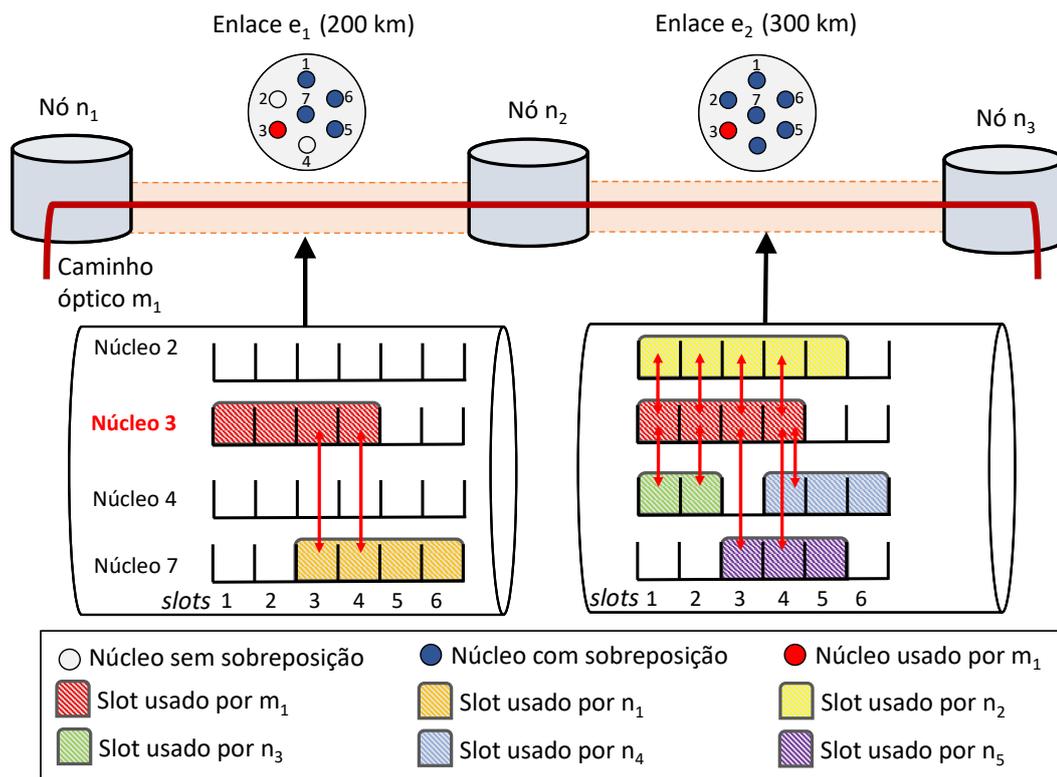


Figura 24 – Caminho óptico composto por dois enlaces e com diferentes valores de sobreposição espectral em cada enlace.

apenas os núcleos adjacentes ao núcleo 3, isto é, os núcleos 2, 4 e 7. Neste exemplo é possível ver que o índice de sobreposição varia de enlace para enlace e também depende da quantidade de *slots* sobrepostos. No enlace e_1 , o caminho óptico m_1 possui apenas uma sobreposição espectral, que ocorre com o caminho óptico n_1 que está alocado no núcleo 7 e, assim como m_1 , também usa os *slots* de índice 3 e 4. Neste caso, o valor de $I_{SO_{m_1,e,n_1}}$ corresponde a 0,50. Já no enlace e_2 ocorre sobreposição espectral entres os *slots* usados pelo caminho óptico m_1 e os caminhos ópticos n_2 , n_3 , n_4 e n_5 . Neste enlace e_2 , tem-se os índices de sobreposição, calculados a partir da Equação 3.38, de $I_{SO_{m_1,e,n_2}} = 0,80$; $I_{SO_{m_1,e,n_3}} = 1,00$; $I_{SO_{m_1,e,n_4}} = 0,33$ e $I_{SO_{m_1,e,n_5}} = 0,67$. Assim, o $P_{XT_{m,e}}$ do caminho óptico m_1 é calculado a partir do somatório do *crosstalk* gerado por cada caminho óptico que afeta m_1 . Portanto, considerando uma potência de sinal igual a -3 dBm e um valor de h_e igual a 10^{-9} m^{-1} (Klinkowski e Zalewski 2019) para todos os caminhos ópticos, tem-se os resultados apresentados na Tabela 7.

A Tabela 7 apresenta os aspectos de cada caminho óptico que afeta o caminho óptico m_1 . Assim, com base na Equação 3.35 e considerando o *crosstalk* gerado por cada um dos caminhos óptico interferentes, tem-se que a $P_{XT_{m,e}}$ do caminho óptico m_1 é de -43,0 dBm no enlace e_1 e -33,3 dBm no enlace e_2 . O índice de sobreposição $I_{SO_{m,e,n}}$ implementado no modelo de (Lobato et al. 2019) é um diferencial quando comparado a outros modelos de *crosstalk* (Klinkowski e Zalewski 2019), (Liu, Xiong e

Tabela 7 – Detalhamento dos caminhos ópticos interferentes em m_1 no exemplo da Figura 24.

Caminho óptico	Enlace	Comprimento	Núcleo	$I_{SO_{m,e,n}}$	$P_{XT_{m,e,n}}$
n_1	e_1	200 km	7	0,50	-43,0 dBm
n_2	e_2	300 km	2	0,80	-39,2 dBm
n_3	e_2	300 km	4	1,00	-38,2 dBm
n_4	e_2	300 km	4	0,33	-43,0 dBm
n_5	e_2	300 km	7	0,67	-39,9 dBm

Chen 2020). Isso porque tal índice torna o modelo ciente das sobreposições parciais que ocorrem entre os núcleos de uma fibra óptica. Portanto, este é o modelo de *crosstalk* inter-núcleos adotado nesta tese.

3.2 Alcance de Transmissão x Avaliação Dinâmica

O estudo de redes ópticas apresenta inúmeros desafios e, como apresentado nesta seção, um dos desafios é garantir a **QoT** dos caminhos ópticos a partir das limitações de camada física. Uma das formas de considerar as limitações de camada física é a partir do alcance máximo de transmissão. O alcance máximo de transmissão consiste na distância máxima que um caminho óptico pode ter dependendo do formato de modulação utilizado. Este método de verificação da camada física é muito utilizado na literatura (Gong et al. 2013), (Tode e Hirota 2017), (Rottondi et al. 2018), (Moghaddam, Beyranvand e Salehi 2020), (Halder et al. 2021), principalmente devido a baixa complexidade computacional necessária para empregá-lo. Isso porque os cálculos de alcance de transmissão são realizados em um momento *off-line* da rede. Entretanto, o alcance de transmissão possui algumas fragilidades que são apresentadas nesta seção.

A seguir, realiza-se um experimento para definir os alcances máximos para cada formato de modulação em um determinado cenário. Tal experimento considera um cenário otimista, isto é, um cenário de baixa carga no qual a **OSNR** é afetada apenas pelo ruído ASE. Como apresentado na Seção 3.1.1, o ruído ASE é adicionado quando o sinal óptico passa por amplificadores, como o EDFA (Essiambre et al. 2010). Neste experimento, ao desconsiderar as **NLIs**, tem-se que a **OSNR** de um caminho óptico m é dada por

$$osnr_m = \frac{G_m}{G_m^{ASE}}, \quad (3.39)$$

enquanto a **PSD** do ruído ASE (G_m^{ASE}) é dado pela Equação 3.16, a **PSD** do caminho óptico m (G_m), em W/Hz, é dada por

$$G_m = \frac{10^{P_m/10} \cdot 10^{-3}}{B_m}, \quad (3.40)$$

em que P_m é a potência do caminho óptico m , em dBm. B_m é a largura de banda do caminho óptico m , em Hz. Os parâmetros utilizados neste experimento são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de camada física para definição do alcance de transmissão.

Parâmetro	Valor
Figura de ruído do amplificador F_n	5 dB
Constante de Planck h	$6,626 \times 10^{-34}$ m ² kg/s
Frequência óptica ν	$1,9385 \times 10^{14}$ Hz
BER	1×10^{-2}
Sobrecarga de FEC	25%
Comprimento do $span$	60, 80 e 100 km
Potência da conexão	-3 e -1 dBm
Coefficiente de perda da fibra α	0,2 dB/km
Taxa de bits de informação	100 Gbps
Taxa de bits na linha	125 Gbps
Número de símbolos da modulação M	4, 8, 16, 32 e 64
Largura de banda (bitrate de 125 Gbps)	31,3; 20,8; 15,6; 12,5 e 10,4 GHz

No experimento realizado, considera-se que todos os $spans$ possuem o mesmo comprimento. Neste sentido, foram calculados os alcances máximos em três cenários: *i*) com todos os $spans$ com comprimento igual a 100 km; *ii*) com todos os $spans$ com comprimento igual a 80 km; e *iii*) com todos os $spans$ com comprimento igual a 60 km. Além disso, nos experimentos considera-se que a potência de todas as conexões são iguais. A Tabela 9 apresenta o resultado de um cenário em que as conexões possuem uma potência de -3 dBm. Assim, para atender uma requisição que solicite 100 Gbps e considerando $S_m = R_b / (2 \cdot \log_2 M)$ e $B_m = S_m$, tem-se a tabela a seguir.

Tabela 9 – Alcance de transmissão máximo aproximado, para cada formato de modulação, considerando uma BER= $1,3 \times 10^{-2}$, conexões com bitrate de 100 Gbps, FEC de 25% (125 Gbps na linha) a uma potência de -3 dBm.

Formato de Modulação	$OSNR_{req}$ (dB)	Largura de banda	Span 100 km	Span 80 km	Span 60 km
4-QAM	8,95 dB	31,3 GHz	4.600 km	9.520 km	20.340 km
8-QAM	13,15 dB	20,8 GHz	2.900 km	5.920 km	11.580 km
16-QAM	15,49 dB	15,6 GHz	2.200 km	4.560 km	9.000 km
32-QAM	18,51 dB	12,5 GHz	1.400 km	2.800 km	5.580 km
64-QAM	21,28 dB	10,4 GHz	800 km	1.760 km	3.540 km

A Tabela 9 mostra que o maior alcance de transmissão possível é obtido com a modulação 4-QAM e $spans$ de 60 km. Entretanto é possível observar que o alcance máximo de transmissão sofre variação a depender do comprimento do $span$. Por exemplo: ao utilizar a modulação 8-QAM, o alcance máximo de transmissão é de

11.580 km com *spans* de 60 km. Tal alcance máximo diminui para 5.920 km com *spans* de 80 km e para 2.900 km com *spans* de 100 km. Além do comprimento do *span*, outro fator determinante para o alcance máximo de transmissão é a potência de transmissão. Para ilustrar esta questão, a Tabela 10 apresenta o mesmo experimento com uma potência maior (-1 dBm).

Tabela 10 – Alcance de transmissão máximo aproximado, para cada formato de modulação, considerando uma BER= $1,3 \times 10^{-2}$, conexões com bitrate de 100 Gbps, FEC de 25% (125 Gbps na linha) a uma potência de -1 dBm.

Formato de Modulação	$OSNR_{req}$ (dB)	Largura de banda	Span 100 km	Span 80 km	Span 60 km
4-QAM	8,95 dB	31,3 GHz	7.300 km	16.400 km	29.400 km
8-QAM	13,15 dB	20,8 GHz	4.600 km	9.360 km	18.360 km
16-QAM	15,49 dB	15,6 GHz	3.500 km	7.280 km	14.280 km
32-QAM	18,51 dB	12,5 GHz	2.200 km	4.480 km	8.880 km
64-QAM	21,28 dB	10,4 GHz	1.400 km	2.880 km	5.640 km

A Tabela 10 mostra que, em termos do ruído ASE, quanto maior a potência maior o alcance de transmissão. Por exemplo: O alcance máximo com a modulação 4-QAM e *spans* de 100 km passou de 4.600 km (com potência de -3 dBm) para 7.300 km (com potência de -1 dBm). Já o alcance máximo com a modulação 8-QAM e *spans* de 80 km passou de 5.920 km (com potência de -3 dBm) para 9.360 km (com potência de -1 dBm). Portanto, neste experimento conclui-se que o aumento da potência de transmissão acarreta um maior alcance de transmissão. Entretanto, o ruído ASE é linear e não gera impacto entre caminhos ópticos vizinhos. Por outro lado, limitações como as NLIs e o *crosstalk* ocorrem entre caminhos ópticos alocados na mesma fibra e os níveis destas limitações elevam-se com o aumento da potência de transmissão dos caminhos ópticos envolvidos.

Neste sentido, o alcance de transmissão máximo em uma rede óptica varia não somente com o formato de modulação, o comprimento do *span* ou com a potência do sinal, mas também com a quantidade de caminhos ópticos já ativos na rede (devido aos NLIs e o *crosstalk*). A quantidade de caminhos ópticos já ativos na rede é dinâmica, variando com a carga na rede. Assim, o alcance máximo de transmissão sofre inúmeras variações de rede para rede e mesmo considerando uma mesma rede, também sofre variações a depender do estado (nível de utilização) desta rede. Portanto, apesar de bastante usado na literatura, definir um alcance máximo de transmissão torna-se um método impreciso caso estas distâncias não sejam definidas considerando as especificidades da rede ou caso estas distâncias não sejam atualizadas dinamicamente.

A atualização dinâmica das tabelas de alcances máximos pode ser substituída por uma avaliação única, considerando o cenário de pior caso (isto é, considerando a

carga total da rede). Esta abordagem superestima as limitações de camada física, o que gera uma imprecisão em casos de carga baixa. Neste sentido, esta tese propõe o uso de uma verificação das limitações de camada física dinâmica em detrimento do uso de tabelas de alcance máximo de transmissão (Costa, Brasileiro e Drummond 2020). Tal abordagem garante uma maior precisão no processo de verificação das limitações de camada física e é realizada através dos modelos matemáticos apresentados neste capítulo. O uso de uma avaliação dinâmica das limitações de camada física é pouco adotada na literatura e é uma das contribuições deste trabalho.

3.3 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada a modelagem de camada física adotada nesta tese. Os efeitos de camada física contemplados nesta tese são o ruído ASE, os efeitos não-lineares (SPM, XPM e FWM) e o *crosstalk* inter-núcleo. Também foi discutido as diferenças entre a avaliação via tabelas de alcance e transmissão e avaliação das limitações dinamicamente. Neste sentido, foi justificado o porquê do uso de uma avaliação dinâmica nesta tese.

No próximo capítulo é realizada uma revisão da literatura sobre SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos. Nesta revisão, os trabalhos são classificados, dentre outros aspectos, em como os efeitos de camada física são considerados por cada trabalho.

4 Revisão da Literatura sobre SDM-EON

O objetivo deste capítulo é apresentar os principais trabalhos relacionados ao escopo desta tese e como estes trabalhos lidam com as limitações de camada física da rede. A alocação de recursos em redes ópticas é um campo de pesquisa que vem sendo desenvolvido há anos, com diversas propostas para resolver o problema em redes com fibras de único núcleo (Ruan e Zheng 2014) (Wang et al. 2014) (Abedifar et al. 2018) (Lacerda-Jr et al. 2020). Com o advento das fibras multi-núcleos, o problema obteve uma nova dimensão, configurando assim o problema RMCSA. Neste capítulo são discutidas as soluções propostas na literatura para resolver o problema RMCSA.

A seguir, na Seção 4.1, são apresentados trabalhos que propõem soluções para o problema RMCSA em SDM-EON. A Seção 4.2 apresenta uma classificação de como os principais trabalhos lidam com as limitações de camada física. E, por fim, a Seção 4.3 apresenta as considerações finais deste capítulo.

4.1 Alocação de Recursos em SDM-EON

Diversos trabalhos na literatura investigam formas eficientes de alocação de recursos em SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos. A alocação de recursos pode ser tratada como o problema RMCSA completo, ou dividido em subproblemas como a alocação espectral e a alocação de núcleos. De maneira geral, o *crosstalk* inter-núcleos é tratado como o principal fator limitante neste tipo de rede. Neste sentido, os algoritmos RMCSA podem ser classificados como *XT-avoid* ou *XT-aware*. As subseções 4.1.1 e 4.1.2 aglutinam os trabalhos que propõem soluções *XT-avoid* e *XT-aware*, respectivamente. Para concluir esta seção, um resumo dos trabalhos citados nas subseções 4.1.1 e 4.1.2 é apresentado na subseção 4.1.3.

4.1.1 Soluções XT-avoid

Considerando os métodos *XT-avoid*, os autores em (Fujii et al. 2014) propõem um método dinâmico da classificação de núcleos com base nas larguras de banda necessárias para redes multi-núcleos. O método proposto busca a priorização de determinados núcleos com objetivo de balancear o uso dos núcleos e assim diminuir o *crosstalk* na rede.

Já os autores em (Tode e Hirota 2017) apresentam soluções para o problema de roteamento, alocação de espectro e alocação de núcleo e/ou modo em SDM-EON.

Os autores propõem o *intra-area first fit assignment from highest rank core (IAFF)*, um algoritmo que realiza a divisão do espectro óptico em áreas de prioridade dependendo da quantidade de *slots* de cada caminho óptico. A partir da definição das áreas de prioridade, cada caminho óptico que necessite de f *slots* é alocado em uma área do espectro destinada à caminhos ópticos com f *slots*. Dessa forma, o **IAFF** minimiza a fragmentação dos espectro e reduz a probabilidade de bloqueio.

Os autores em (Oliveira e Fonseca 2018) apresentam um algoritmo para o problema de roteamento, escolha de modulação, alocação de núcleo e espectro *routing, modulation level, core and spectrum allocation (RMLCSA)*. A proposta, conhecida como *protecting, routing, modulation format, core and spectrum allocation algorithm (PERFECTA)*, propõe alocação de recursos de modo a garantir sobrevivência da rede em caso de falha única de enlace. Para isso, o **PERFECTA** escolhe os caminhos mais curtos como caminhos primários e emprega *p-cycles* como caminhos de *backup* para garantir a proteção da rede.

Os autores em (Yaghubi-Namaad, Rahbar e Alizadeh 2018) formularam uma solução para o problema de roteamento, nível de modulação, espaço e atribuição de espectro (*routing, modulation level, space, and spectrum assignment (RMLSSA)*). Os autores apresentaram um modelo de programação linear inteira (*integer linear programming (ILP)*) e utilizaram uma matriz de tráfego estático para as simulações. Além disso, os autores apresentaram o *stepwise greedy algorithm (SGA)*. Quatro políticas de classificação diferentes para iniciar o algoritmo são propostas como um método heurístico para encontrar uma solução quase ótima para o problema **RMLSSA**. Por fim, o artigo avalia a eficácia das políticas de classificação e do algoritmo **SGA** através de diferentes métricas de avaliação de desempenho.

Os autores em (Oliveira e Fonseca 2019) apresentam o algoritmo *multipath protection for multi-core network (MPMN)*. Tal algoritmo foi proposto para garantir sobrevivência em redes ópticas elásticas **SDM**. Para garantir sobrevivência, o **MPMN** emprega a estratégia de proteção de caminho. Além disso, a proposta usa roteamento multi-caminhos para diminuir o bloqueio gerado pela fragmentação do espectro.

Em (Araujo, Lacerda-Jr e Soares 2021) é abordado o problema de alocação de núcleo e espectro, em um cenário de tráfego dinâmico, em uma **SDM-EON**. A proposta busca a redução dos níveis de *crosstalk* na rede utilizando um método de escolha de núcleo por pontuação, dividindo o espectro óptico em diferentes regiões prioritárias. O algoritmo obteve menor probabilidade de bloqueio de circuito e de banda devido a diminuição da ocorrência de *crosstalk*.

Os autores em (Costa, Lacerda-Jr e Soares 2021) propõem o algoritmo de priorização de grupos de núcleos e intervalos de espectro (**PGNIE**) para o subproblema de alocação de núcleo e espectro em uma **SDM-EON**. O **PGNIE** baseia-se na ideia

de dividir os núcleos e espectros em grupos, onde cada grupo possui uma prioridade para ser utilizado na alocação de recursos. O **PGNIE** agrupa núcleos e intervalos de espectro, no qual os grupos são ordenados segundo um critério de prioridade de modo a diminuir o *crosstalk* gerado na rede.

4.1.2 Soluções XT-aware

Por outro lado, considerando os métodos *XT-aware*, os autores em (Yang, Zhang e Wu 2018) apresentam uma solução estática para o problema **RSCA** em **SDM-EON**. As principais contribuições são a proposta de uma solução com modo de estimativa de *crosstalk* do tipo *worst-case-per-core XT* (**WCC-XT**) e uma solução com modo de estimativa de *crosstalk* precisa e do tipo *XT-aware*. Para isso, os autores propõem uma **ILP** para a abordagem de pior caso e uma *mixed integer linear programming* (**MILP**) para a abordagem *XT-aware*.

Em (Klinkowski e Zalewski 2019) os autores desenvolveram um algoritmo de provisionamento de caminho óptico ciente de *crosstalk* para redes **SDM-EON**. A proposta realiza uma estimativa precisa de *crosstalk* em um cenário dinâmico, com o uso de múltiplos formatos de modulação. Também foi avaliado o impacto do *crosstalk* em cenário estático, considerando o pior caso de interferência.

Os autores em (Lobato et al. 2019) propõem um algoritmo guloso, ciente de *crosstalk*, para resolver o problema **SCA** em **SDM-EONs**. Tal algoritmo busca minimizar o impacto do *crosstalk* tanto nos novos caminhos ópticos quanto nos caminhos ópticos já estabelecidas. Os autores também apresentaram um novo modelo para considerar a sobreposição dos *slots* de frequência no cálculo do *crosstalk*. Tal modelos é apresentado na Seção 3.1.3 desta tese.

Em (Arpanaei et al. 2020), os autores propõem algoritmos para resolver uma variação do problema **RMCSA**: a alocação de recursos considerando a seleção de modos em fibras multi-modos. Neste contexto, os algoritmos propostos devem observar não apenas o *crosstalk* inter-núcleo, mas também o *crosstalk* inter-modo. O *crosstalk* inter-núcleo e o *crosstalk* inter-modo também são investigados conjuntamente em (Chatterjee et al. 2021).

Os autores em (Liu, Xiong e Chen 2020) apresentaram uma estratégia *XT-avoid* e outra *XT-aware* para **SDM-EON**. A estratégia *XT-avoid*, particiona o espectro em grupos onde núcleos adjacentes possuem áreas de priorização diferentes. O algoritmo *XT-aware* verifica o *crosstalk* para o bloco de *slots* do caminho óptico candidato e dos caminhos ópticos já ativos na rede. Para isso, o algoritmo rotula os blocos de *slots* candidatos com o nível de *crosstalk* do *slot* mais afetado (por *crosstalk*) dentro do bloco (ou o *slot* do núcleo adjacente mais afetado por *crosstalk*). Então, o algoritmo

seleciona o bloco de *slots* que é contíguo, contínuo, situado na região de prioridade definida pela estratégia *XT-avoid* e com um nível de *crosstalk* (baseado em rótulos) menor que o limite de *crosstalk* estabelecido para a rede.

Em (Moghaddam, Beyranvand e Salehi 2019) é proposto um modelo de ILP que busca garantir sobrevivência para redes SDM-EON. Para garantir sobrevivência, a proposta usa tanto proteção dedicada, quanto proteção compartilhada (a depender da classe de serviço). Além disso, é proposto o algoritmo *strictly XT-Aware RM-CSA with hybrid protection scheme* (SXA-RMCSA-HP) para resolver problemas de larga escala. As propostas mostram eficiência e baixa complexidade computacional.

Os autores em (Rodrigues et al. 2020) apresentam um algoritmo RMSCA denominado *hybrid routing, modulation, spectrum and core allocation based on the mapping scheme in SDM-EONs* (PANORAMIC). O algoritmo proposto visa reduzir o número de solicitações bloqueadas usando roteamento híbrido e modulação adaptativa. O PANORAMIC usa o esquema de mapeamento de espectro para encontrar caminhos que podem acomodar solicitações que usam modulação adaptativa.

Em (Tang et al. 2020) é proposta uma abordagem para alocar caminhos ópticos simultâneos em núcleos MCF não adjacentes, de modo a reduzir a interferência do *crosstalk* inter-núcleos entre esses caminhos ópticos. Para este fim, os autores definiram uma nova métrica para estimar o *crosstalk* inter-núcleo, considerando os domínios espacial, de frequência e de tempo. Também foi abordamos o problema *routing, spectrum, core, and time assignment* (RSCTA) para SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos.

Em (Halder et al. 2021) é proposto um esquema RSCA ciente de *crosstalk* que aloca o espectro dos vários núcleos minimizando o consumo de energia, bem como a utilização do espectro em uma SDM-EON estática. Também é proposto outro algoritmo RSCA, ciente de *crosstalk*, para minimizar a utilização do espectro em SDM-EON. Os autores também apresentam uma MILP para comparar com os algoritmos propostos.

Os autores em (Halder, Acharya e Bhattacharya 2022) apresentaram dois novos esquemas RSCA para SDM-EON, com capacidade de sobrevivência e suportando tráfego multi-classe no domínio temporal. O esquema de proteção baseado em múltiplos caminhos é aplicado para garantir a capacidade de sobrevivência contra falhas de *link* único, permitindo assim que o tráfego de cada conexão seja dividido entre esses caminhos. Os autores também apresentam modelos MILPs para lidar com os esquemas de reservas antecipadas de recursos.

Os autores em (Klinkowski e Jaworski 2022) apresentam o *optical signal to noise ratio aware lightpath allocation algorithm* (OSNR-LA) para redes ópticas multi-núcleos. O OSNR-LA verifica todas as possibilidades de caminhos ópticos candidatos em cada

núcleo e garante níveis aceitáveis de **QoT** para todos os caminhos ópticos. Para isso, a verificação de **QoT** é realizada para cada caminho óptico candidato e também para todos os caminhos ópticos já ativos na rede. Dentre os caminhos ópticos candidatos com nível aceitável de **QoT**, o **OSNR-LA** escolhe aquele em que o primeiro *slot* possui o menor índice dentre os demais.

Os autores em (Li et al. 2022) apresentam um método de representação de *crosstalk* e, em seguida, apresentam um algoritmo **RMSCA** que considera conjuntamente os problemas de *crosstalk* e fragmentação. O algoritmo proposto, denominado *aligned-prime-partition RMSCA algorithm*, utiliza de mecanismos que reduzem os níveis de *crosstalk* e fragmentação, o que se traduz em baixos níveis de probabilidade de bloqueio de banda para as requisições que chegam na rede.

Em (Petale, Zhao e Subramaniam 2022) são propostos dois algoritmos **RMCSA** para selecionar novos caminhos ópticos considerando a capacidade disponível da rede (limitada pelo *crosstalk*), a requisição de espectro e a fragmentação do espectro. O primeiro algoritmo proposto é focado em redes ópticas transparentes, isto é, sem regeneração do sinal nos nós intermediários. Já o segundo algoritmo proposto é focado em redes translúcidas, isto é, com a possibilidade de regeneração de sinal em nós intermediários.

Em (Su et al. 2022) é proposto um algoritmo para diminuir a degradação da qualidade de transmissão, considerando a minimização de efeitos de camada física acumulados no caminho óptico. Para isso, os autores consideram parâmetros baseados no *crosstalk* e na **XCI**. Em seguida, o algoritmo classifica os caminhos ópticos candidatos e seleciona o primeiro caminho óptico candidato que satisfaça os limites de **QoT** da rede.

Os autores em (Takeda et al. 2022) propõem um modelo **RMSCA** para **SDM-EONs** para considerar conjuntamente o *crosstalk* inter-núcleo e as limitações de camada física de natureza intra-núcleo. Para cada formato de modulação, o modelo define diferentes limites de *crosstalk* e alcances de transmissão de acordo com as limitações inter e intra núcleos. Os autores formulam o problema através de uma **ILP** e mostram que o modelo proposto é capaz de aumentar a eficiência espectral da rede.

Em (Yang et al. 2022) os autores exploram as vantagens do *self-organizing feature mapping* (**SOFM**) para processar dados multidimensionais. Então, os autores propõem um esquema de roteamento, núcleo e alocação de espectro, visando o núcleo com maior **QoT**. Ao longo do núcleo selecionado, os *slots* disponíveis serão classificados pelo número de núcleos adjacentes e pelo nível de *crosstalk* para encontrar um conjunto de *slots* com maior **QoT**.

Os autores em (Behera et al. 2023) apresentam uma proposta ciente de limitações

de camada física para o problema [RMCSA](#). A proposta considera a comutação de núcleo independente, onde os *slots* de frequência de entrada podem ser comutados para qualquer núcleo de saída. Além disso, os autores levam em consideração o conceito de *bit-loading*, que assume diferentes formatos de modulação para a mesma requisição.

Os autores em ([Ravipudi e Brandt-Pearce 2023](#)) apresentaram um algoritmo para roteamento, escolha de formato de modulação, alocação de núcleo e espectro para [SDM-EON](#). A rota é selecionada dependendo do estado da rede. Já o método de seleção de núcleo usa uma tomada de decisão multi-atributo baseado no processo de hierarquia analítica e também em um método de organização ranqueada. A proposta melhora as decisões de roteamento e foca no aspecto do consumo de energia.

Os autores em ([Seki et al. 2023](#)) propuseram um modelo de *CoreMaps* hierárquico que considera uma degradação razoável de *crosstalk* incorporada na alocação de núcleo e espectro. Esses *CoreMaps* hierárquicos tornam o esquema proposto mais flexível e escalável ao tamanho das redes. Os autores então apresentam um algoritmo *XT-aware* para resolver o problema [RMCSA](#) a partir do modelo de *CoreMaps* proposto.

4.1.3 Visão Geral dos Trabalhos da Literatura

Além de tratar o problema [RMCSA](#), alguns trabalhos citados neste capítulo investigam outras questões relacionadas às [SDM-EONs](#). Um exemplo destas questões é o estudo de técnicas de sobrevivência abordadas em ([Oliveira e Fonseca 2018](#)), ([Oliveira e Fonseca 2019](#)), ([Moghaddam, Beyranvand e Salehi 2019](#)) e ([Halder, Acharya e Bhattacharya 2022](#)). Garantir sobrevivência em redes ópticas significa garantir que a rede continua em operação mesmo após a ocorrência de falhas em enlaces ou nós. Outros trabalhos investigam [SDM-EON](#) baseadas em fibras multi-modos, como ([Arpanaei et al. 2020](#)) e ([Chatterjee et al. 2021](#)). Neste caso, além do *crosstalk* inter-núcleos, os autores precisam considerar o *crosstalk* inter-modo (como mencionado na Seção 2.2). Há também trabalhos que realizam uma avaliação de desempenho aprofundada de outros algoritmos, como a análise feita em ([Rodrigues et al. 2023](#)). A seguir, na Tabela 11, é apresentado um resumo dos trabalhos citados neste capítulo.

Os trabalhos citados neste capítulo 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. Esta tese adota um cenário de tráfego dinâmico, pois este assemelha-se com um cenário real. Como mostrado na Tabela 11, os trabalhos da literatura utilizam fibras multi-núcleos com diferentes quantidades de núcleos, sendo mais comum o uso de fibras com 7 núcleos.

Tabela 11 – Características gerais dos trabalhos que investigam o problema RMCSA.

Referência	Abordagem de XT	Cenário de Tráfego	Quantidade de núcleos
(Fujii et al. 2014)	XT-avoid	dinâmico	7, 12 e 19
(Tode e Hirota 2017)	XT-avoid	dinâmico	7
(Oliveira e Fonseca 2018)	XT-avoid	dinâmico	7
(Yaghubi-Namaad, Rahbar e Alizadeh 2018)	XT-avoid	estático	7, 12 e 19
(Yang, Zhang e Wu 2018)	XT-aware	estático	3 e 7
(Klinkowski e Zalewski 2019)	XT-aware	dinâmico	3, 7 e 12
(Lobato et al. 2019)	XT-aware	dinâmico	7
(Oliveira e Fonseca 2019)	XT-avoid	dinâmico	7
(Arpanaei et al. 2020)	XT-aware	dinâmico	7
(Liu, Xiong e Chen 2020)	XT-aware	dinâmico	7 e 19
(Moghaddam, Beyranvand e Salehi 2020)	XT-aware	estático	3 e 7
(Rodrigues et al. 2020)	XT-aware	dinâmico	7
(Tang et al. 2020)	XT-aware	estático	7 e 19
(Araujo, Lacerda-Jr e Soares 2021)	XT-avoid	dinâmico	7
(Chatterjee et al. 2021)	XT-avoid	dinâmico	7
(Costa, Lacerda-Jr e Soares 2021)	XT-avoid	dinâmico	7
(Halder et al. 2021)	XT-aware	estático	3 e 7
(Halder, Acharya e Bhattacharya 2022)	XT-aware	estático	3, 4, 5 e 7
(Klinkowski e Jaworski 2022)	XT-aware	estático	6 e 7
(Li et al. 2022)	XT-aware	dinâmico	7
(Petale, Zhao e Subramaniam 2022)	XT-aware	dinâmico	3 e 7
(Su et al. 2022)	XT-aware	dinâmico	7
(Takeda et al. 2022)	XT-aware	estático	3, 7 e 19
(Yang et al. 2022)	XT-aware	dinâmico	7
(Behera et al. 2023)	XT-aware	estático	7
(Ravipudi e Brandt-Pearce 2023)	XT-aware	dinâmico	7 e 12
(Rodrigues et al. 2023)	XT-aware	dinâmico	7
(Seki et al. 2023)	XT-aware	dinâmico	7, 19 e 37

Entretanto, fibras com 3 núcleos, 12 núcleos e 19 núcleos também são utilizados na literatura. Esta tese realiza os estudos em redes com fibras de 7 núcleos por este ser o tipo de fibra mais recorrente na literatura.

4.2 Classificação Quanto aos Efeitos de Camada Física

Como mostrado no Capítulo 3, os efeitos de camada física são importantes limitadores de uma SDM-EON (Hayashi et al. 2011) (Poggiolini e Jiang 2017) (Habibi e Beyranvand 2019). Os efeitos intra e inter núcleo podem afetar drasticamente a QoT de um caminho óptico. A seguir, na Tabela 12, os trabalhos citados neste capítulo são classificados em relação a quais efeitos de camada física são considerados dinamicamente por cada um deles.

De maneira geral, praticamente todos os trabalhos que estudam redes multi-

Tabela 12 – Limitações de camada física diretamente consideradas nos trabalhos da literatura.

Referência	XT	ASE	SCI	XCI
(Fujii et al. 2014)	✓			
(Tode e Hirota 2017)	✓			
(Oliveira e Fonseca 2018)	✓			
(Yaghubi-Namaad, Rahbar e Alizadeh 2018)	✓			
(Yang, Zhang e Wu 2018)	✓			
(Klinkowski e Zalewski 2019)	✓			
(Lobato et al. 2019)	✓	✓		
(Oliveira e Fonseca 2019)	✓			
(Arpanaei et al. 2020)	✓	✓	✓	✓
(Liu, Xiong e Chen 2020)	✓			
(Moghaddam, Beyranvand e Salehi 2020)	✓			
(Rodrigues et al. 2020)	✓			
(Tang et al. 2020)	✓			
(Araujo, Lacerda-Jr e Soares 2021)	✓	✓	✓	✓
(Chatterjee et al. 2021)	✓			
(Costa, Lacerda-Jr e Soares 2021)	✓	✓	✓	✓
(Halder et al. 2021)	✓			
(Halder, Acharya e Bhattacharya 2022)	✓			
(Klinkowski e Jaworski 2022)	✓	✓	✓	✓
(Li et al. 2022)	✓			
(Petale, Zhao e Subramaniam 2022)	✓			
(Su et al. 2022)	✓	✓		✓
(Takeda et al. 2022)	✓	✓		
(Yang et al. 2022)	✓	✓		✓
(Behera et al. 2023)	✓	✓	✓	✓
(Ravipudi e Brandt-Pearce 2023)	✓	✓	✓	✓
(Rodrigues et al. 2023)	✓			
(Seki et al. 2023)	✓			

núcleo consideram efeitos inter-núcleos, como o *crosstalk*. De fato, a literatura aponta que o *crosstalk* é possivelmente a interferência que mais degrada a QoT dos caminhos ópticos da rede. Entretanto, os efeitos intra-núcleos como o ruído ASE e as NLIs também contribuem para a degradação da QoT, principalmente em fibras com baixo acoplamento. Experimentos que demonstram este ponto são apresentados nos próximos capítulos desta tese. Apenas 33% dos trabalhos citados neste capítulo consideram diretamente (isto é, com avaliação dinâmica) algum tipo de interferência intra-núcleo, sendo que alguns consideram apenas o ruído ASE. Portanto, uma das contribuições desta tese é a investigação do problema RMCSA considerando as principais limitações de camada física intra e inter núcleo.

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

Tabela 13 – Classificação dos trabalhos da literatura quanto a avaliação direta das limitações de camada física em caminhos ópticos já ativos.

Referência	Avaliação de XTO	Avaliação de OSNRO
(Fujii et al. 2014)		
(Tode e Hirota 2017)		
(Oliveira e Fonseca 2018)		
(Yaghubi-Namaad, Rahbar e Alizadeh 2018)		
(Yang, Zhang e Wu 2018)	✓	
(Klinkowski e Zalewski 2019)	✓	
(Lobato et al. 2019)	✓	
(Oliveira e Fonseca 2019)		
(Arpanaei et al. 2020)		
(Liu, Xiong e Chen 2020)	✓	
(Moghaddam, Beyranvand e Salehi 2020)	✓	
(Rodrigues et al. 2020)		
(Tang et al. 2020)	✓	
(Araujo, Lacerda-Jr e Soares 2021)		
(Chatterjee et al. 2021)		
(Costa, Lacerda-Jr e Soares 2021)		
(Halder et al. 2021)	✓	
(Halder, Acharya e Bhattacharya 2022)	✓	
(Klinkowski e Jaworski 2022)	✓	✓
(Li et al. 2022)	✓	
(Petale, Zhao e Subramaniam 2022)		
(Su et al. 2022)		
(Takeda et al. 2022)	✓	
(Yang et al. 2022)	✓	✓
(Behera et al. 2023)	✓	✓
(Ravipudi e Brandt-Pearce 2023)	✓	✓
(Rodrigues et al. 2023)		
(Seki et al. 2023)	✓	

13 apresenta a classificação dos trabalhos em relação a como os efeitos de camada física são avaliados nos caminhos ópticos já ativos na rede. Como apresentado na Seção 3.1, a avaliação dos efeitos de camada física nos caminhos ópticos já ativos pode ser feita através dos níveis de *crosstalk* e da OSNR, que podem gerar bloqueios de XTO e OSNRO, respectivamente. A quantidade de trabalhos que consideram este tipo de avaliação dinamicamente (sem abordagens de pior caso) é relativamente pequena, principalmente em termos de OSNRO. A importância deste tipo de análise é demonstrada numericamente no Capítulo 8 desta tese.

4.3 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou um levantamento da literatura dos principais trabalhos que investigam SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos. Também foi mostrado como cada trabalho considera as limitações de camada física da rede. Neste ponto, é possível destacar contribuições desta tese ao investigar cenários ainda pouco explorados na literatura, como: *i*) a avaliação dos efeitos intra e inter núcleo, considerando conjuntamente o *crosstalk*, ruído ASE e NLIs (SCI e XCI); e *ii*) avaliação dinâmica dos efeitos intra e inter núcleo nos outros caminhos ópticos já ativos na rede em relação ao impacto da possível alocação de um novo caminho óptico.

Os próximos capítulos abordarão os subproblemas do problema RMCSA. Em cada um destes capítulos, a seção de trabalhos relacionados eventualmente reapresenta alguns dos trabalhos citados aqui que estão ligados ao tema do capítulo. Caso isso ocorra, a apresentação do trabalho terá um outro ponto de vista, com foco no funcionamento do algoritmo.

5 Alocação de Espectro em SDM-EON

Neste capítulo é discutido o problema de alocação de espectro, um dos quatro subproblemas do RMCSA. Na Seção 5.1 são mostrados alguns trabalhos relacionados ao tema. Na Seção 5.2 é apresentada a proposta desta tese para lidar com o problema de alocação de espectro. Na Seção 5.3 é realizada uma avaliação de desempenho para comparar o algoritmo proposto com outros algoritmos da literatura. Na Seção 5.3 também são apresentados os cenários e a ferramenta de simulação usada nesta tese. Por fim, as considerações finais deste capítulo são mostradas na Seção 5.4.

5.1 Trabalhos Relacionados

O problema de alocação espectral começou a ser investigado antes mesmo do estudo de redes multi-núcleos, quando o foco eram redes de único núcleo. Neste sentido, existem políticas clássicas para a alocação espectral, como a *first fit*, *last fit*, *random fit* e *exact fit* (Chatterjee, Sarma e Oki 2015).

Na política de alocação de espectro *first fit* (Rosa et al. 2012, Wang e Mukherjee 2014), os *slots* são indexados em uma lista de *slots* disponíveis. Esta política sempre tenta escolher o *slot* de índice mais baixo da lista de *slots* disponíveis e, em seguida, alocar este *slot* para atender à requisição de conexão. Ao selecionar o espectro desta maneira, os caminhos ópticos existentes serão agrupadas em um número menor de *slots* no início do espectro, deixando um número maior de *slots* disponíveis para uso futuro. Uma das vantagens do *first fit* é não necessitar de informações globais da rede. Além disso, o *first fit* é considerado uma das melhores políticas de alocação de espectro devido à sua menor probabilidade de bloqueio e baixa complexidade computacional (Chatterjee, Sarma e Oki 2015).

A política de alocação de espectro *last fit* (Fadini e Oki 2014) possui uma atuação oposta ao *first fit*, escolhendo o *slot* com maior índice da lista de *slots* disponíveis. Portanto, os *slots* ocupados ficam concentrados no final do espectro, enquanto a porção inicial do espectro permanece livre para atender a novas requisições.

Na política de alocação de espectro *random fit* (Rosa et al. 2012), uma lista de *slots* disponíveis é criada. Quando uma requisição de conexão chega na rede, o *random fit* seleciona aleatoriamente um *slot* da lista de *slots* disponíveis e o aloca ao caminho óptico usado para atender a requisição de conexão. Após atribuir um *slot* a um caminho óptico, a lista de *slots* disponíveis é atualizada excluindo o *slot* recém alocado.

A política de alocação de espectro *exact fit* (Rosa et al. 2012) busca, a partir

do início do espectro, encontrar um bloco disponível de tamanho exato em termos do número de *slots* requisitados. Se houver um bloco disponível com o tamanho exato do requisitado, o *exact fit* utilizará este bloco. Caso contrário, o espectro será escolhido pela política *first fit*.

Além dos algoritmos clássicos, existem outras técnicas para a alocação de espectro, como as apresentadas no Capítulo 4. Estas técnicas, de modo geral, são pensadas de forma integrada com outros subproblemas do problema RMCSA. Portanto, estas técnicas são discutidas nos próximos capítulos desta tese, em passagens focadas em soluções integradas.

5.2 O Algoritmo de Balanceamento de Espectro (ABE)

Nesta seção é apresentado o algoritmo de balanceamento de espectro para SDM-EON (ABE) (Lacerda-Jr et al. 2020). O ABE busca um balanceamento na escolha de espectro para mitigar o efeito do *crosstalk* na rede. Considerando que o *crosstalk* afeta *slots* de mesmo índice em núcleos vizinhos, a ideia é priorizar porções de *slots* distintos entre os núcleos adjacentes. A Figura 25 apresenta a ideia geral do algoritmo.

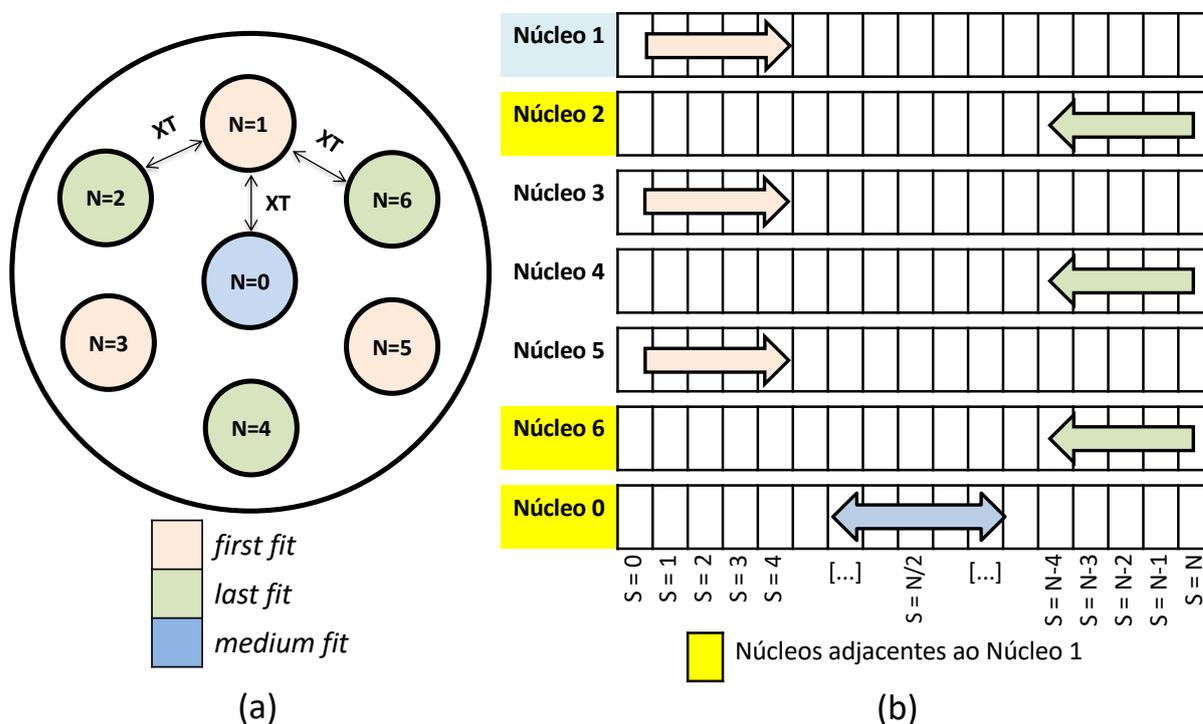


Figura 25 – Exemplo do funcionamento do ABE. (a) Disposição dos núcleos. (b) Regras de alocação espectral de cada núcleo.

Na Figura 25 (a) é exemplificado como é a disposição dos núcleos em uma SDM-EON de sete núcleos. De maneira geral, o algoritmo ABE busca ocupar os *slots* de núcleos vizinhos em sentidos opostos. Tomando como exemplo a Figura 25 (b), o algoritmo ABE ocupa o núcleo 1 utilizando os *slots* disponíveis de menor índice

(política *first fit*). Por outro lado, os *slots* dos núcleos 2 e 6 (vizinhos do núcleo 1) são alocados do maior para o menor índice (política *last fit*). Vale ressaltar que o núcleo 0 (ver Figura 25) é ao mesmo tempo vizinho de todos os outros núcleos. Portanto, para o núcleo 0 (central), o algoritmo ABE aloca os *slots* utilizando uma terceira política, aqui denominada de *medium fit*. A *medium fit* parte do centro do espectro para as extremidades. O centro do espectro é calculado a partir de um *slot* de referência S_{ref} , dado por

$$S_{ref} = \begin{cases} \lceil Q_{s,0,tot}/2 \rceil, & \text{se } Q_{s,0,tot} \text{ é ímpar} \\ \lceil Q_{s,0,tot}/2 \rceil + 1, & \text{se } Q_{s,0,tot} \text{ é par} \end{cases} \quad (5.1)$$

em que $Q_{s,0,tot}$ representa o número total de *slots* no núcleo central. Portanto, para alocar um caminho óptico no núcleo central deve-se calcular o ΔS_{ref} do caminho óptico candidato. O ΔS_{ref} consiste em

$$\Delta S_{ref} = |S_{ref} - s_m|, \quad (5.2)$$

em que s_m é o índice do *slot* do caminho óptico candidato m mais próximo de S_{ref} . Assim, o caminho óptico candidato alocado no núcleo central deve ser aquele com menor valor de ΔS_{ref} , seja pelos *slots* com índices menores que S_{ref} (a esquerda de S_{ref}) ou pelos *slots* de índices maiores que S_{ref} (a direita de S_{ref}). Em caso de existir dois caminhos ópticos candidatos com ΔS_{ref} iguais, o priorizado será aquele à esquerda de S_{ref} .

Esse comportamento diferenciado para a alocação no núcleo central visa diminuir a sua interferência (*crosstalk*) em todos os outros núcleos da fibra. Portanto, a estratégia do algoritmo ABE evita a alocação de *slot* de mesmo índice em núcleos vizinhos. O Algoritmo 1 apresenta o pseudocódigo do algoritmo ABE.

Algoritmo 1 : ABE

Entrada: Rota r , Núcleo c , *slots* requeridos s

- 1: Compute o conjunto de faixas de espectro livres L , considerando r , s e c
 - 2: **if** $L \neq null$ **then**
 - 3: **if** c é o núcleo central **then**
 - 4: $spectrum \leftarrow$ Conjunto de *slots* $\in L$ mais próximo do meio do espectro
 - 5: **else if** $c \in \{1, 3, 5\}$ **then**
 - 6: $spectrum \leftarrow$ Conjunto de *slots* de L mais próximo do início do espectro
 - 7: **else if** $c \in \{2, 4, 6\}$ **then**
 - 8: $spectrum \leftarrow$ Conjunto de *slots* de L mais próximo do final do espectro
 - 9: **end if**
 - 10: **return** $spectrum$
 - 11: **end if**
 - 12: **return** requisição bloqueada
-

Considerando o pseudocódigo do ABE, os núcleos 1, 3 e 5 buscam os *slots* mais próximos do início do espectro (política *first fit*), enquanto os núcleos 2, 4 e 6

priorizam os *slots* do final do espectro (política *last fit*). Já o núcleo 0 (núcleo central), que influencia no *crosstalk* de todos os outros, prioriza os *slots* distantes do início e do final do espectro concomitantemente. Assim, a alocação espectral é feita visando diminuir a sobreposição espectral e o *crosstalk* na rede. O conceito de balanceamento espectral do ABE pode ser generalizado e adaptado para outras configurações de fibra, com outras quantidades de núcleos.

5.3 Avaliação de Desempenho

Nesta seção é apresentada a avaliação de desempenho de sistemas relacionada ao problema de alocação de espectro. Tal seção é dividida em três subseções, sendo elas: *i*) apresentação da ferramenta de simulação na Seção 5.3.1; *ii*) apresentação do cenário de avaliação de desempenho na Seção 5.3.2; e *iii*) apresentação dos resultados numéricos e discussões sobre a comparação do algoritmo proposto em relação a outros algoritmos.

5.3.1 Ferramenta de Avaliação de Desempenho

Para realizar a avaliação de desempenho de sistemas, três técnicas podem ser utilizadas (Jain 1991): *i*) medição, que consiste em avaliar o desempenho em um sistema real; *ii*) modelagem analítica, que faz uso de arcabouços matemáticos para mensurar o desempenho do sistema; e *iii*) simulação computacional, que utiliza um programa de computador para simular o desempenho do sistema. No contexto desta tese, a avaliação de desempenho é conduzida através de simulação computacional, com uso do simulador *SLICE network simulator* (SNetS). O uso da simulação em detrimento de outras técnicas justifica-se devido ao fato da dificuldade de acesso a um sistema real para realização de medição e a não existência de um modelo matemático, completo suficiente, para realização da modelagem analítica no cenário desta tese.

O SNetS é um simulador de eventos discretos para redes ópticas desenvolvido na linguagem de programação Java. O SNetS é proposto para simular redes ópticas elásticas com fibras monomodos de um ou sete núcleos. O SNetS foi validado em (Fontinele et al. 2017) e é usado por diversos trabalhos na literatura (Fontinele et al. 2017), (Brasileiro, Valdemir e Soares 2019), (Monteiro et al. 2020), (Santos et al. 2021).

Como apresentado na Figura 26, o simulador é composto por quatro módulos principais. O gerador de requisições cria novas requisições e também encerra requisições já alocadas na rede. No módulo de componentes da rede estão as classes que representam cada um dos objetos que compõem a rede, como o nó, o enlace, o núcleo, a rede, o espectro e assim por diante. O módulo do plano de controle contém a classe que gerencia o funcionamento da rede, além das classes dos algoritmos de

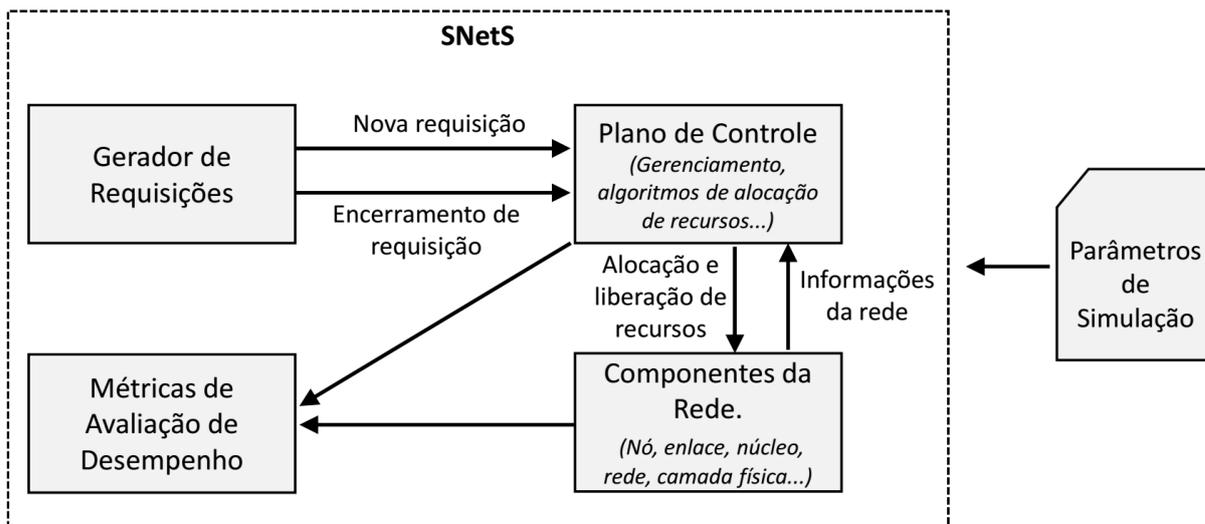


Figura 26 – Organização do SNetS.

alocação de recursos. O módulo de métricas de avaliação de desempenho contém as classes que avaliam a rede durante o seu funcionamento, em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, probabilidade de bloqueio de banda, consumo energético, eficiência energética e assim por diante. Os parâmetros de simulação são carregados a partir de quatro arquivos de texto. Nestes arquivos são definidos os parâmetros da topologia (quantidade de nós, enlaces e comprimentos dos enlaces), parâmetros de tráfego (em que nós são geradas as requisições, qual a taxa de *bits* solicitada), parâmetros de camada física (valores de camada física como a atenuação de campo da fibra α , a constante de propagação β , o coeficiente não linear da fibra γ , o parâmetro de dispersão da fibra D_λ dentre muitos outros) e outros parâmetros de simulação (qual algoritmo de alocação de recurso é usado, quais métricas são avaliadas, quantas replicações são feitas dentre outros parâmetros).

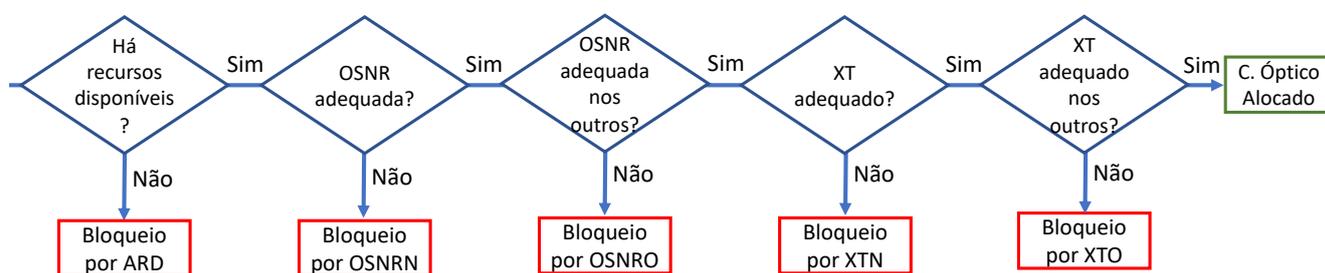


Figura 27 – Tipos de bloqueios de requisições considerados pelo SNetS.

A Figura 27 apresenta os cinco tipos de bloqueios de requisições considerados pelo simulador SNetS. Neste caso, após o retorno de um caminho óptico candidato pelo algoritmo RMCSA, o simulador verifica se tal caminho óptico candidato pode ser alocado em termos de ausência de recursos disponíveis (ARD), OSNRN, OSNRO, XTN e XTO. O bloqueio por ARD ocorre quando não há *slots* de frequência livres,

contíguos e contínuos para serem reservados para o caminho óptico candidato. Já os bloqueios por OSNRN, OSNRO, XTN e XTO estão relacionados aos níveis de OSNR e XT no caminho óptico candidato e nos caminhos ópticos já ativos na rede, conforme discutido na Seção 3.1.

5.3.2 Cenários de Avaliação de Desempenho

Para a avaliação de desempenho, são geradas 100.000 requisições em cada simulação. A geração de requisições é um processo de *Poisson* com taxa média de chegada λ' e o tempo médio de retenção dos caminhos ópticos é distribuído exponencialmente com média $1/\mu$. A carga de tráfego é distribuída uniformemente entre todos os pares de nós origem e destino. São geradas requisições de 100, 200, 300, 400 e 500 Gbps, seguindo a proporção de chegadas de 5, 4, 3, 2, 1, respectivamente. Isto é, para cada requisição solicitando uma taxa de *bits* de 500Gbps, surgem cinco requisições solicitando uma taxa de *bits* de 100 Gbps. A carga, em Erlangs, pode ser definida por $\rho = \lambda'/\mu$. Para cada cenário de avaliação são realizadas cinco simulações (replicações) com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados apresentados possuem nível de confiança de 95%.

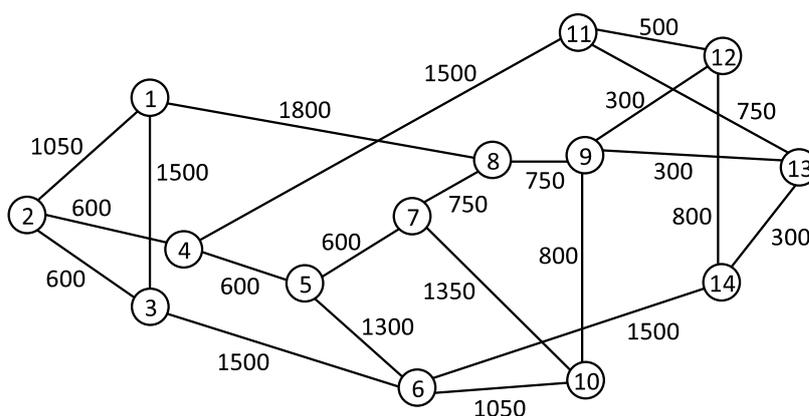
São usados cinco formatos de modulação, sendo eles: 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM e 64-QAM. Os limites de OSNR por símbolo e de *crosstalk* são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Limites dos formatos de modulação considerando uma BER de $1,3 \times 10^{-2}$.

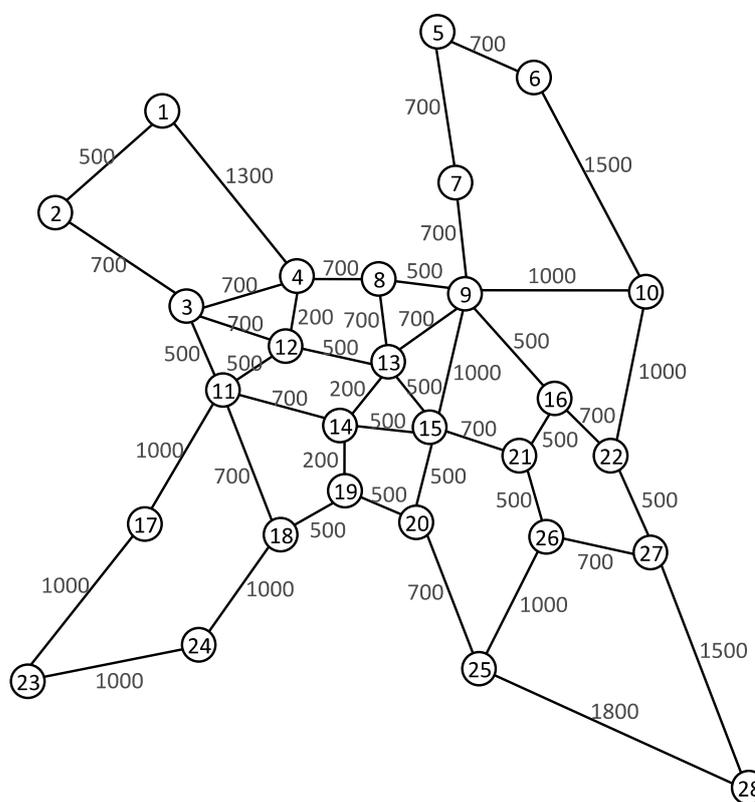
Limite	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
OSNR em dB ($OSNR_{req}$)	8,95	13,15	15,49	18,51	21,28
XT em dB ($XT_{\mu,req}$)	-19,03	-23,23	-25,57	-28,59	-31,36

Nos cenários simulados, cada fibra possui sete núcleos. Cada núcleo é dividido em 320 *slots* de frequência, em que cada *slot* possui 12,5 GHz. A banda de guarda possui largura de banda de um *slot*. Os ganhos dos amplificadores são ajustados para compensar as perdas dos dispositivos e da fibra. As topologias utilizadas são a NSFNet e a EURO28, mostradas na Figura 28.

A topologia NSFNet possui 14 nós e 22 enlaces, enquanto a topologia EURO28 possui 28 nós e 44 enlaces. O grau de conectividade médio de ambas as topologias é de aproximadamente 3,14 enlaces por nó. Entretanto, a topologia EURO28 possui uma maior heterogeneidade entre os graus de conectividade dos seus nós, com um desvio padrão de 1,11 contra 0,36 da topologia NSFNet. Em geral, a topologia EURO28 possui rotas mais longas que a topologia NSFNet. A rota de comprimento máximo na topologia EURO28 possui 5.700 km, contra 3.350 km da topologia NSFNet. O comprimento médio das rotas na topologia EURO28 é de 2.222,22 km, com desvio



(a) NSFNet



(b) EURO28

Figura 28 – Topologias com os comprimentos dos enlaces em km.

padrão de 1.126,84 km. Já na topologia NSFNet, o comprimento médio das rotas é de de 1.840,11 km, com desvio padrão de 846,16 km. Portanto, as rotas mais longas na topologia EURO28 sofrem com maior incidência de *Crosstalk* quando comparado com as rotas mais longas da topologia NSFNet. Isso ocorre pois o comprimento da rota impacta diretamente no nível de *Crosstalk*, como apresentado na Equação 3.35. A Tabela 15 apresenta informações sobre as topologias adotadas nesta seção.

Tabela 15 – Informações sobre as topologias NSFNet e EURO28.

	NSFNet	EURO28
Maiores rotas	(1-10) e (3-9)	(6-23)
Distância das maiores rotas	3.350,00 km	5.700,00 km
Menores rotas	(9-12), (9-13) e (13-14)	(4-12), (13-14) e (14-19)
Distância das menores rotas	300,00 km	200,00 km
Distância média das rotas	1.840,11 km	2.222,22 km
Desvio padrão das rotas	846,16 km	1.126,84 km
Grau mínimo em um nó	3	2
Grau máximo em um nó	4	6
Grau de conectividade médio	3,14	3,14

Outros parâmetros utilizados estão listados na Tabela 16 (Beyranvand e Salehi 2013), (Zhao, Wymeersch e Agrell 2015), (Lobato et al. 2019).

Tabela 16 – 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 de potência (h_e)	$6,4 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ ou $1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$
Dispersão de velocidade de grupo da fibra (β_2)	-20 ps ² /km
Figura de ruído do amplificador (F_n)	5 dB
Frequência óptica (ν)	193 THz
Largura de banda de um <i>slot</i> (B_{ref})	12,5 GHz
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

Durante a condução dos experimentos, os algoritmos avaliados foram submetidos a dois cenários com níveis de *crossstalk* distintos: um cenário com alta incidência de *crossstalk* (*high crossstalk* (HXT)) e um cenário com baixa incidência de *crossstalk* (*low crossstalk* (LXT)). A diferença entre estes dois cenários consiste na variação do coeficiente de acoplamento de potência (h_e). Para simular o cenário HXT, o h_e é ajustado para $6,4 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ (Lobato et al. 2019). Enquanto que para simular o cenário LXT, o h_e é ajustado para $1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ (Lobato et al. 2019). Estes valores significam que, no cenário HXT, as requisições que utilizam uma rota longa (ex: uma rota com um comprimento maior que o comprimento médio da rota para a topologia) podem ser bloqueadas por *crossstalk* inadequado com apenas uma sobreposição com um núcleo vizinho. No cenário LXT, para que uma requisição seja bloqueada por *crossstalk* inadequado, ela deve ter sobreposições com caminhos ópticos em todos os núcleos adjacentes (três núcleos, considerando um núcleo periférico da fibra de sete núcleos). Esta variação no acoplamento da fibra permite uma avaliação dos algoritmos propostos

em cenários distintos, proporcionando entender os seus comportamentos em diferentes tipos de fibra óptica.

5.3.3 Resultados Numéricos e Discussões

Nesta seção, as métricas de avaliação adotadas para mensurar o desempenho dos algoritmos propostos são a probabilidade de bloqueio de circuito (**PBC**) e a probabilidade de bloqueio de banda (**PBB**).

A métrica de **PBC** avalia quantas requisições sofreram bloqueio em relação ao total requisições que chegaram ao plano de controle, sendo dada por

$$PBC = \frac{Q_{\text{bloqueados}}}{|R|}, \quad (5.3)$$

em que $Q_{\text{bloqueados}}$ é a quantidade de requisições bloqueadas e $|R|$ é a quantidade total de requisições feitas ao plano de controle da rede. A probabilidade de bloqueio de circuito é uma métrica clássica no estudo de avaliação de redes ópticas. A **PBC** é usada por muitos trabalhos da área, desde os trabalhos que estudam redes *wavelength division multiplexing* (**WDM**) até os mais recentes, que investigam as redes **MCF**.

A métrica **PBB** avalia a quantidade de dados que deixaram de ser transportados na rede devido ao bloqueio. Enquanto a **PBC** avalia a quantidade de requisições bloqueadas, a **PBB** avalia taxa de bits solicitada por estas requisições e o tempo em que os caminhos ópticos gerados estariam ativos. Assim, a **PBB** é dada por

$$PBB = \frac{\sum_{i(\text{bloqueados})} R_i \cdot T_i}{\sum_{i(\text{total})} R_i \cdot T_i}, \quad (5.4)$$

em que R_i é a informação de taxa de bits do i -ésimo caminho óptico requisitado (requisição) e T_i é o tempo de atendimento do i -ésimo caminho óptico.

Para avaliação de desempenho, o **ABE** é comparado com quatro outros algoritmos: *i*) escolha aleatória de núcleo (*random core*) com alocação espectral *first fit*, nomeada *random core* com *first fit* (**RC-FF**); *ii*) escolha aleatória de núcleo com alocação espectral *random fit*, nomeada de *random core* com *random fit* (**RC-RF**); *iii*) escolha de núcleo através do algoritmo *core prioritization* (**CP**) (Fujii et al. 2014) e com alocação espectral *first fit*, nomeada *core prioritization* com *first fit* (**CP-FF**); e *iv*) escolha de núcleo através do algoritmo **CP** (Fujii et al. 2014) e com alocação espectral *random fit*, nomeada de *core prioritization* com *random fit* (**CP-RF**). O algoritmo de Dijkstra (Dijkstra 1959) é utilizado para escolha da rota em todos os algoritmos avaliados. A partir da definição de rota, o formato de modulação é selecionado considerando os níveis de **OSNR** para todos os algoritmos. A escolha de núcleo para o algoritmo **ABE** é feita de forma cíclica, isto é, o núcleo escolhido é sempre o núcleo usado a mais tempo. O primeiro cenário de avaliação considera um baixo nível de *crosstalk*. Para isso, o

coeficiente de acoplamento de potência (h_e) é ajustado para $1,5 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ (Lobato et al. 2019). O resultado em termos de probabilidade de PBC é apresentado na Figura 29. A janela de observação (carga) é disposta para uma PBC de até 0,1.

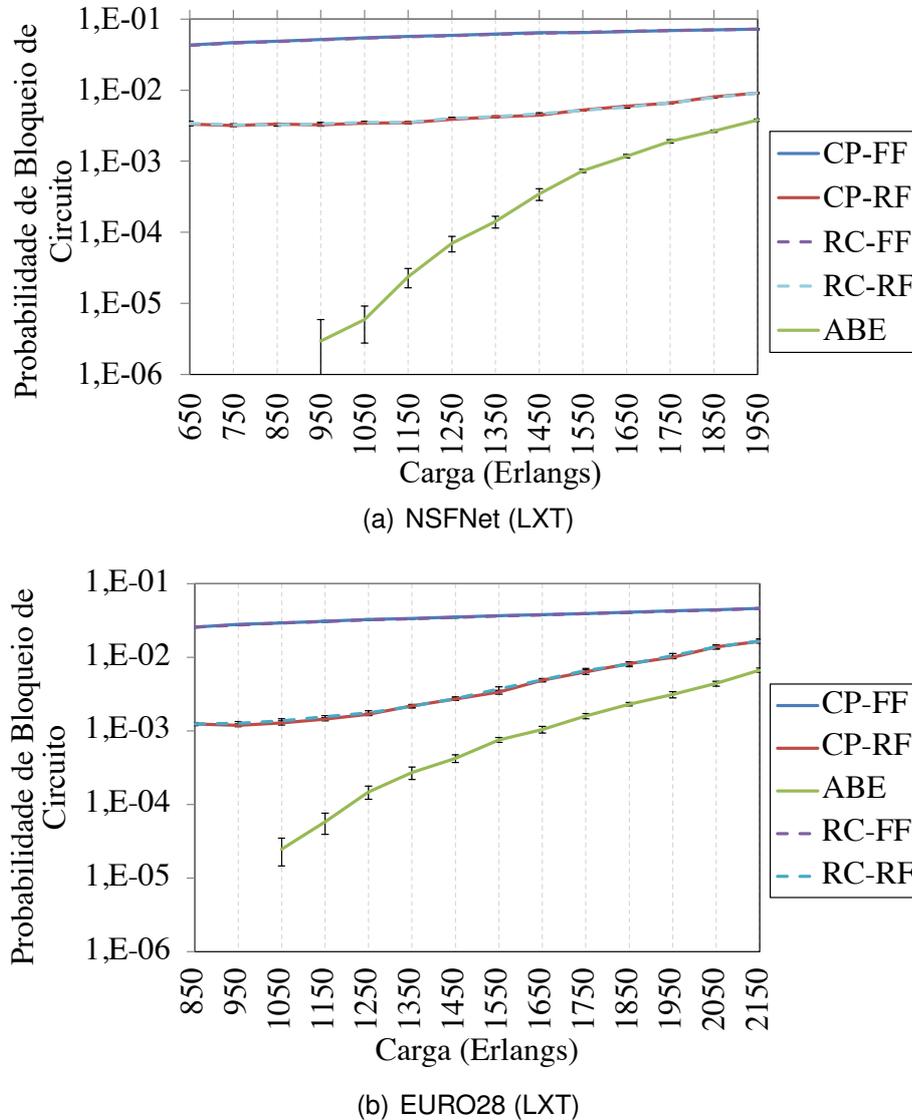
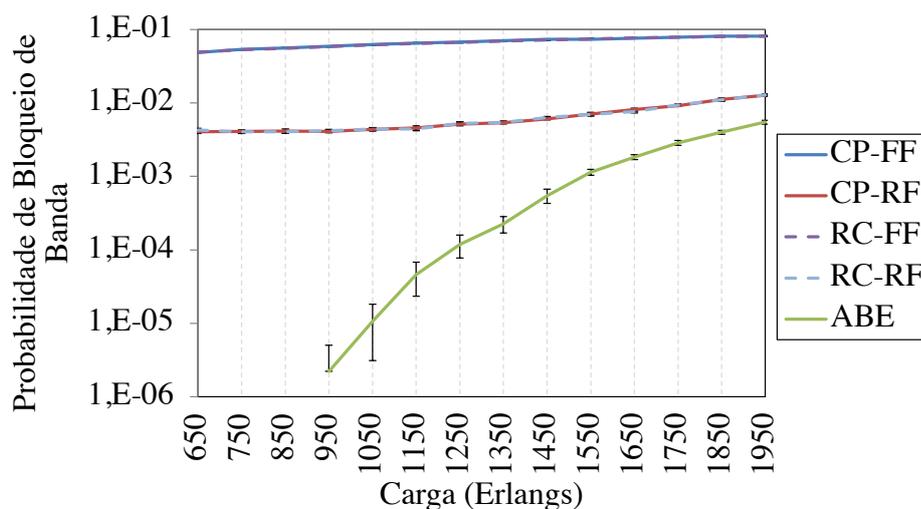


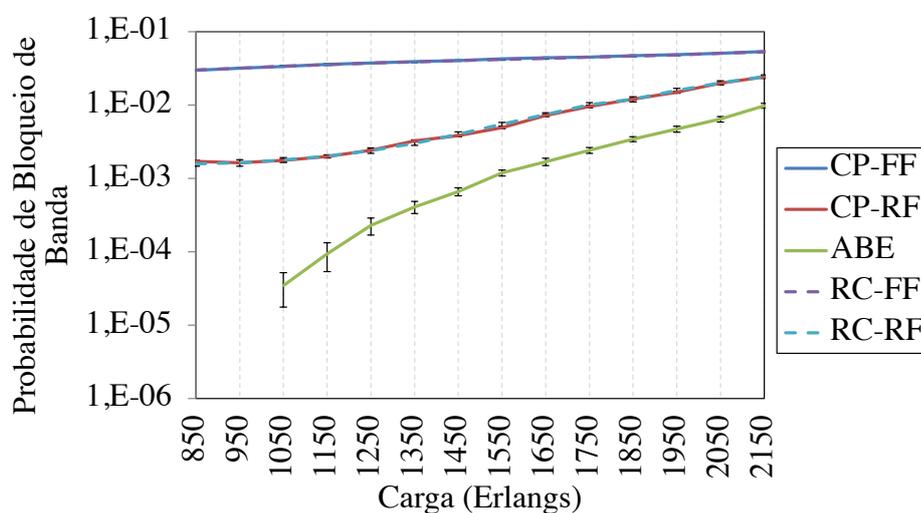
Figura 29 – Algoritmos de alocação de espectro em termos de PBC em cenário LXT.

De acordo com a Figura 29, observa-se que o algoritmo ABE obteve o melhor resultado em termos de probabilidade de bloqueio de circuito nas duas topologias. Os algoritmos CP-FF e RC-FF obtiveram resultados similares, tal qual os algoritmos CP-RF e RC-RF. Isso indica que, no cenário estudado, a estratégia de alocação espectral têm maior influência no bloqueio do que a estratégia de alocação de núcleo. Tal comportamento apresenta-se em outros trabalhos (Lobato et al. 2019). Valores de probabilidade de bloqueio de banda são apresentados na Figura 30.

A Figura 30 mostra um comportamento similar ao da Figura 29, onde o algoritmo ABE obteve um melhor desempenho quando comparado aos concorrentes. Considerando todas as cargas analisadas na topologia NSFNet, o algoritmo ABE reduziu a probabilidade



(a) NSFNet (LXT)



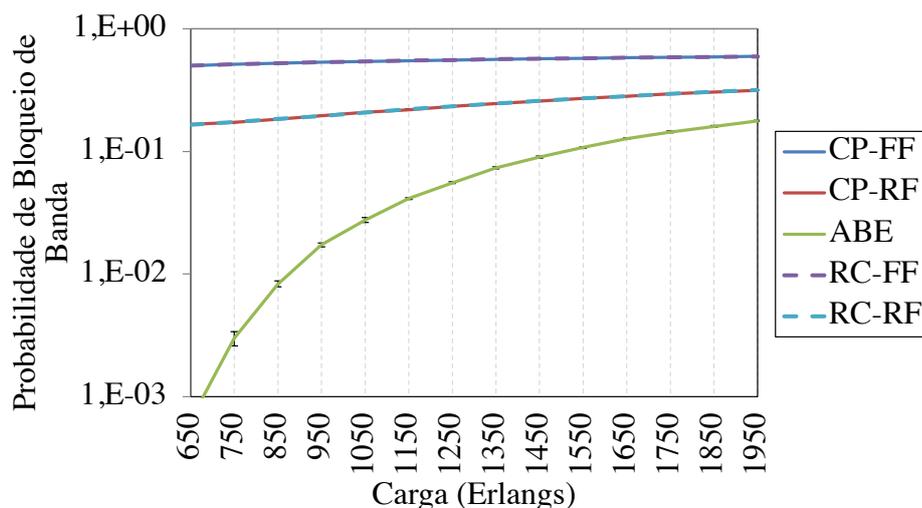
(b) EURO28 (LXT)

Figura 30 – Algoritmos de alocação de espectro em termos de PBB em cenário LXT.

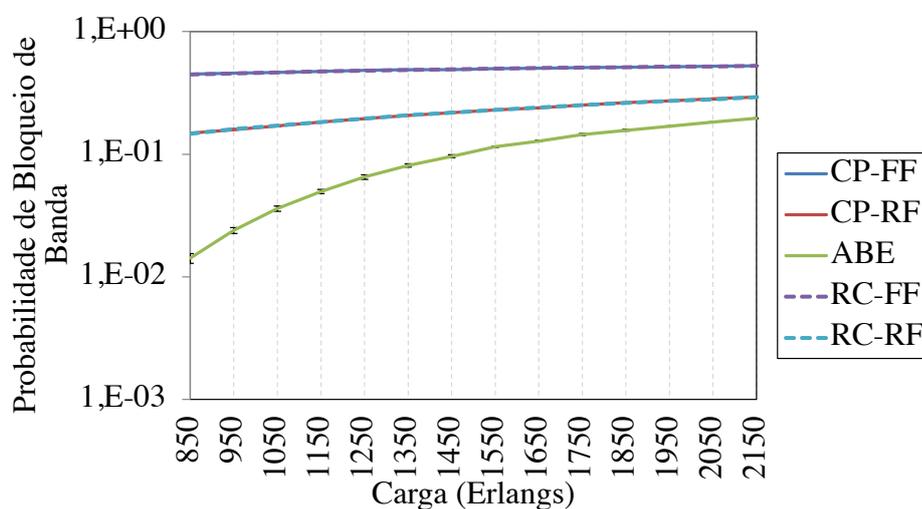
de bloqueio de banda em pelo menos 93% em relação aos algoritmos **CP-FF** e **RC-FF**, e 57% em relação aos algoritmos **CP-RF** e **RC-RF**. Na topologia EURO28, também considerando todas as cargas analisadas, o algoritmo **ABE** reduziu a probabilidade de bloqueio de banda em pelo menos 82% em relação aos algoritmos **CP-FF** e **RC-FF**, e 59% em relação aos algoritmos **CP-RF** e **RC-RF**.

O segundo cenário de avaliação considera um alto nível de *crosstalk*. Para isso, o coeficiente de acoplamento de potência (h_e) é ajustado para $6,4 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1}$ (Lobato et al. 2019). Neste caso, os valores de probabilidade de bloqueio aumentaram consideravelmente em relação ao cenário anterior. A Figura 31 apresenta a probabilidade de bloqueio de banda dos algoritmos no cenário de alto *crosstalk*.

De acordo com a Figura 31 observa-se que o **ABE** obteve menores valores de probabilidade de bloqueio de banda quando comparado aos concorrentes em



(a) NSFNet (HXT)

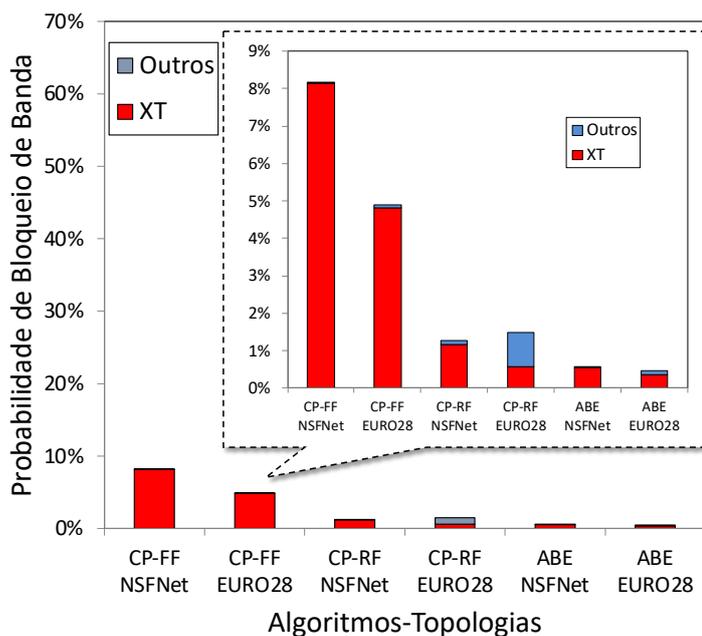


(b) EURO28 (HXT)

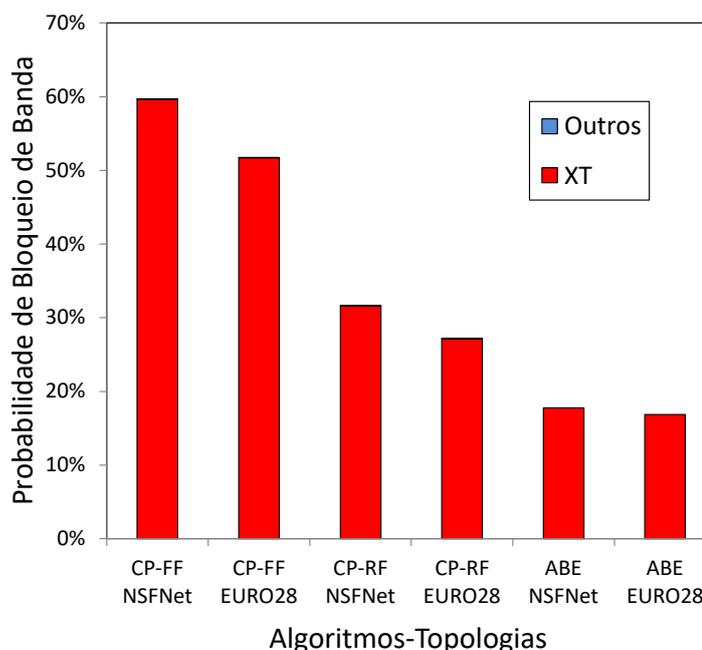
Figura 31 – Algoritmos de alocação de espectro em termos de PBB em cenário HXT.

ambas as topologias. No entanto, o cenário de alto *crosstalk* trouxe um aumento considerável no nível de requisições bloqueadas. Considerando todas as cargas analisadas na topologia NSFNet, o algoritmo **ABE** reduziu a probabilidade de bloqueio de banda em pelo menos 70% em relação aos algoritmos **CP-FF** e **RC-FF**, e 44% em relação aos algoritmos **CP-RF** e **RC-RF**. Na topologia EURO28, também considerando todas as cargas analisadas, o algoritmo **ABE** reduziu a probabilidade de bloqueio de banda em pelo menos 63% em relação aos algoritmos **CP-FF** e **RC-FF**, e 33% em relação aos algoritmos **CP-RF** e **RC-RF**. A Figura 32 apresenta os componentes de bloqueio para os algoritmos avaliados. Buscando melhor visualização e considerando a similaridade entre os algoritmos **CP-FF/RC-FF** e **CP-RF/RC-RF**, apenas os resultados dos algoritmos **ABE**, **CP-FF** e **CP-RF** são exibidos.

A Figura 32 mostra a decomposição do bloqueio geral em suas causas específicas



(a) Cenário LXT



(b) Cenário HXT

Figura 32 – Componentes da PBB dos algoritmos de alocação de espectro.

considerando as duas topologias, para o ponto de carga de 1950 Erlangs (maior ponto para a topologia NSFNet). Na Figura 32, o termo “Outros” compreende aos bloqueios causados por ausência de recursos, OSNRN e OSNRO. A Figura 32 (a) apresenta a probabilidade de bloqueio de banda no cenário de baixo *crossstalk*. Neste caso, o bloqueio causado por *crossstalk* influencia a maior parte dos algoritmos, sendo o CP-FF o mais afetado pelo *crossstalk*. Esta sensibilidade ao *crossstalk* do algoritmo *first fit* dar-se a sua alocação espectral priorizar *slots* de índice menor, provocando uma concentração

de circuitos nesta região e, conseqüentemente, alto *crosstalk* nestes circuitos. Evitar este tipo de situação é a proposta do ABE, que consegue valores menores de *crosstalk* devido ao seu balanceamento espectral. A Figura 32 (b) mostra a composição do bloqueio no cenário de alto *crosstalk*. Neste caso, o bloqueio causado por *crosstalk* é predominante em todos os algoritmos, sendo 99% da causa de seus bloqueios.

5.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o algoritmo ABE. Além disso, o desempenho do ABE foi verificado em relação a outras políticas de alocação de espectro. O ABE foi comparado com outros quatro algoritmos (RC-FF, RC-RF, CP-FF e CP-RF), sendo superior a todos em termos de probabilidade de bloqueio de circuito e probabilidade de bloqueio de banda. O ABE alcançou uma redução na probabilidade de bloqueio de banda de pelo menos 44% na topologia NSFNet e 33% na topologia EURO28. Políticas de alocação espectral como o *first fit* ou *last fit* tendem a povoar sempre a mesma porção do espectro, aumentando assim o *crosstalk* entre os caminhos ópticos da rede. Entretanto, o uso das políticas *first fit* e *last fit* de forma conjunta e sincronizada diminui a sobreposição espectral e, conseqüentemente, o *crosstalk* inter-núcleo.

Verificar a eficiência do balanceamento de espectro do ABE de forma independente é pertinente no âmbito desta tese. Isso porque o conceito do algoritmo ABE serve como base para outros algoritmos mais eficientes propostos nesta tese, como os algoritmos ACiNE e CIA-MCSA apresentados nos Capítulos 7 e 8, respectivamente.

No próximo capítulo é discutido um outro subproblema do problema RMCSA: o subproblema de alocação de núcleo.

6 Alocação de Núcleo em SDM-EON

Neste capítulo é discutido o problema de alocação de núcleo, um dos quatro subproblemas do problema [RMCSA](#). Na Seção [6.1](#) são mostrados trabalhos relacionados ao tema de alocação de núcleo em [SDM-EONs](#) baseadas em fibras multi-núcleos. Na Seção [6.2](#) é apresentada a primeira proposta desta tese para lidar com o problema de alocação de núcleo. Na Seção [6.3](#) é apresentada a segunda proposta desta tese para lidar com o problema de alocação de núcleo. Na Seção [6.4](#) é realizada uma avaliação de desempenho para comparar os algoritmos propostos com outros algoritmos. Por fim, as considerações finais deste capítulo são mostradas na Seção [6.5](#).

6.1 Trabalhos Relacionados

O problema de alocação de núcleo surgiu a partir do início dos estudos de fibras multi-núcleos. Neste sentido, o conhecido problema *routing, modulation, and spectrum allocation* ([RMSA](#)) ganhou mais uma dimensão e evoluiu para o problema [RMCSA](#). Assim, alguns autores apresentam soluções para escolha de núcleo em [SDM-EON](#).

Fujii *et al.* propôs uma estratégia *XT-avoid* de alocação de núcleo e espectro ([Fujii et al. 2014](#)). Os autores propõem uma política de priorização de núcleo, nomeada de *core prioritization* ([CP](#)). A estratégia [CP](#) atrela pesos aos núcleos da fibra. Inicialmente, todos os pesos iniciam com valor 0. Em seguida o primeiro núcleo é escolhido, então o peso deste núcleo passa a ser ∞ e o peso de cada núcleo adjacente é incrementado em +1. Em seguida, o núcleo com menor peso é escolhido, seu peso passa a ser ∞ e o peso de cada núcleo adjacente é incrementado em +1. O processo se repete até todos os núcleos possuírem pesos igual a ∞ , então todos os pesos são zerados e o ciclo se repete. Tal política busca evitar o *crosstalk* entre núcleos ao balancear o uso de cada núcleo da fibra óptica.

Araújo *et al.* propôs o algoritmo de distanciamento espectral inter-núcleos ([ADEIN](#)) ([Araujo, Lacerda-Jr e Soares 2021](#)). Com o objetivo de evitar o *crosstalk*, o [ADEIN](#) realiza um balanceamento no uso dos recursos através do uso de um sistema de pontuação e divisão de grupos de prioridades. Tal sistema de pontuação consiste na criação de uma tabela atualizada a cada alocação de um novo caminho óptico, onde tal tabela serve como referência para a escolha dos futuros caminhos ópticos candidatos. Na pontuação inicial dos núcleos, o núcleo central inicia com peso $p = 15$ enquanto os demais iniciam com $p = 10$. A cada escolha de núcleo, o núcleo escolhido recebe um incremento no peso de +1, enquanto os demais núcleos recebem decrementos de peso, variando de -1 até -3 dependendo a posição relativa do núcleo. O [ADEIN](#)

continua a execução escolhendo o núcleo de menor peso e atualizando os pesos a cada iteração.

Uma das propostas deste capítulo é o algoritmo **AMN**, que é baseado em aprendizado de máquina. Nos últimos anos, a comunidade científica vem utilizando técnicas de aprendizado de máquina nas mais diversas áreas. Em redes ópticas elásticas, o uso de técnicas de aprendizado de máquina também vem mostrando-se promissora. Em (Monteiro et al. 2020) redes neurais artificiais são utilizadas para o dimensionamento da banda de guarda. Em (Klinkowski et al. 2020) a técnica *k-nearest neighbors* (**KNN**) é utilizada para auxiliar na escolha do formato de modulação utilizado. Já em (Yao et al. 2018) técnicas como a rede neural e a regularização Bayesiana são utilizadas para a predição de *crosstalk*. Redes neurais foram usadas para realização de estimativa de tráfego em (Xiong et al. 2019), (Xiong et al. 2019) e (Xiong et al. 2020). Já os autores em (Trindade e Fonseca 2020) apresentam uma abordagem de desfragmentação baseada em aprendizado não supervisionado.

Entretanto, segundo o conhecimento do autor desta tese, ainda é escasso o uso de aprendizado de máquina para o problema específico de escolha de núcleo em **SDM-EON**. A investigação desta oportunidade de pesquisa é uma das contribuições do algoritmo **AMN** (apresentado na Seção 6.3), que propõe o uso de redes neurais para definir o melhor núcleo a ser usado, sem o conhecimento dos níveis de *crosstalk* (isto é, *XT-avoid*), em **SDM-EONs**.

6.2 O Algoritmo de Balanceamento de Núcleos (**ABN**)

Nesta seção é apresentado o algoritmo de balanceamento de núcleo para **SDM-EON** (**ABN**) (Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2021). O **ABN** é um algoritmo *XT-avoid* proposto para evitar o impacto do *crosstalk* inter-núcleos na rede. O **ABN** avalia o estado espectral de cada núcleo considerando a utilização do núcleo avaliado e também a utilização dos núcleos vizinhos ao núcleo avaliado. A ideia principal do **ABN** é escolher um núcleo que tenha núcleos vizinhos com baixa ocupação espectral. Em geral, quando a utilização dos núcleos vizinhos de um determinado núcleo aumenta, a probabilidade de sobreposição entre os *slots* desse núcleo e os *slots* de seus vizinhos também aumenta. Assim, o **ABN** procura evitar a escolha de um núcleo em que os núcleos adjacentes têm uma alta taxa de utilização. O critério para selecionar um núcleo depende da análise de três métricas propostas, que estão descritas a seguir:

1) Utilização total nos vizinhos (*total use in neighbors* (**TUN**)): esta métrica calcula o número total de *slots* de frequência usados nos núcleos adjacentes em

relação ao núcleo sob teste. O TUN do núcleo c é dado por

$$TUN_c = \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{j=1}^{J_{tot}} q_{l,j}, \quad (6.1)$$

em que N_l é o número de enlaces da rota, J_{tot} é o número de núcleos adjacentes do núcleo c e $q_{l,j}$ é o número de slots em uso no enlace l e núcleo j .

2) Utilização ponderada dos vizinhos (*weighted use of neighbors (WUN)*): ao contrário do TUN, o WUN verifica o uso da vizinhança de forma mais específica, utilizando como base o balanceamento dos grupos do ABE (Seção 5.2). Ele divide o espectro óptico em três regiões: início (primeiro terço), meio (segundo terço) e fim (último terço). Cada região tem um peso associado α_i ($1 \leq i \leq 3$). O valor de α_i depende do modo de alocação espectral em cada núcleo, apresentado no algoritmo ABE (Seção 5.2). O valor WUN é dado por

$$WUN_c = \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{j=1}^{J_{tot}} q_{1,l,j} \cdot \alpha_1 + q_{2,l,j} \cdot \alpha_2 + q_{3,l,j} \cdot \alpha_3, \quad (6.2)$$

em que $q_{n,l,j}$ é o número de slots em uso na região n , enlace l e núcleo j .

3) Utilização no núcleo candidato (*use in the candidate core (UC)*): calcula o número de todos os slots ocupados no núcleo em teste. Essa métrica evita que o mesmo núcleo seja escolhido sucessivamente, proporcionando um equilíbrio na escolha do núcleo.

Essas três métricas medem a utilização do núcleo avaliado em relação aos seus vizinhos. As métricas TUN, WUN e UC têm igual influência para ABN. Portanto, o ABN considera a soma dos valores obtidos por cada uma das três métricas como critério de decisão, escolhendo o núcleo com o menor valor de soma.

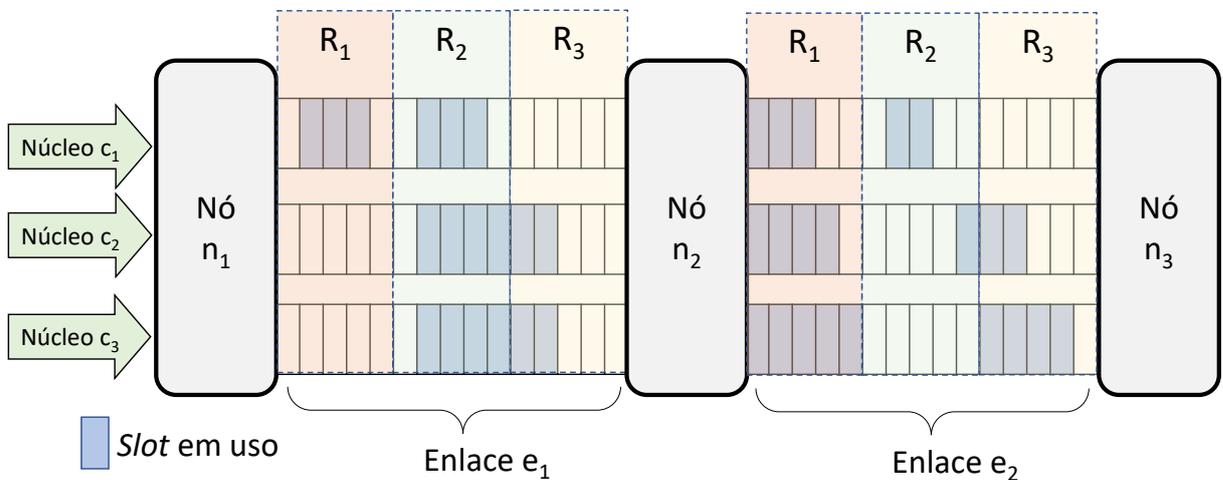


Figura 33 – Exemplo de funcionamento do ABN em uma situação com dois enlaces e três núcleos em cada enlace.

A Figura 33 ilustra o uso das métricas TUN, WUN e UC. Quando o ABN avalia o núcleo c_2 , as métricas TUN, WUN e UC são calculadas. Para calcular o valor da métrica TUN, o algoritmo conta todos os *slots* em uso nos núcleos adjacentes ao núcleo c . Para a Figura 33, o TUN de c_2 é 26, pois existem 11 *slots* de frequência alocados no núcleo c_1 e 15 *slots* de frequência alocados no núcleo c_3 . Para calcular o valor da métrica WUN, o algoritmo conta quantos *slots* estão em uso em cada uma das três regiões (R_1, R_2 , e R_3). Então, o algoritmo associa o número de *slots* em cada região com o peso apropriado (α_1, α_2 , ou α_3). O peso é definido, em cada caso, de acordo com o método de alocação da estratégia ABE (Seção 5.2), em que pesos maiores estão associados à região priorizada pelo núcleo analisado ($\alpha_i \in \{1, 2, 3\}$). As atribuições ponderadas fazem com que o WUN dê mais ou menos importância a uma dada região, considerando sua prioridade. Para a Figura 33, o valor da métrica WUN de c_2 é 57, considerando $\alpha_1 = 3$, $\alpha_2 = 2$ e $\alpha_3 = 1$. Tal valor deve-se ao fato da região R_1 ter o valor de 33 (11 *slots* usados em c_1 e c_3 , aplicando o peso $\alpha_1=3$), a região R_2 ter o valor de 18 (9 *slots* usados em c_1 e c_3 , aplicando o peso $\alpha_2=2$) e a região R_3 ter o valor 6 (6 *slots* usados em c_1 e c_3 , aplicando o peso $\alpha_3=1$). Por fim, a métrica de UC é calculada a partir do número de *slots* usados pelo núcleo avaliado. Para a Figura 33, o UC de c_2 é 13. Assim, neste exemplo o núcleo c_2 possui o peso total igual a 96, obtido a partir das somas das métricas TUN, WUN e UC. O algoritmo ABN escolhe, dentre todos os núcleos, aquele com o menor valor de peso total. O pseudocódigo ABN é apresentado no Algoritmo 2.

Algoritmo 2 : ABN

Entrada rota r

- 1: **for** cada núcleo $c \in$ conjunto de núcleos **do**
 - 2: calcule TUN de c
 - 3: calcule WUN de c
 - 4: calcula UC de c
 - 5: $pesoC \leftarrow TUN_c + WUN_c + UC_c$
 - 6: **end for**
 - 7: $nucleoEscolhido \leftarrow$ núcleo com menor valor de $pesoC$
 - 8: **return** $nucleoEscolhido$
-

A complexidade de tempo do ABN é calculada como $O(|E| \cdot |S| \cdot |C|)$, em que $|E|$ é o número de enlaces na rota r , $|S|$ é o número de *slots* em cada link e $|C|$ é o número de núcleos no enlace.

6.3 O Algoritmo com Aprendizado de Máquina para Escolha de Núcleo (AMN)

Nesta seção é apresentado o algoritmo com aprendizado de máquina para escolha de núcleo (AMN) (Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2022). O AMN utiliza uma rede neural artificial para aprender o comportamento de outros algoritmos e extrair características chaves para alcançar melhores resultados. As redes neurais são técnicas de inteligência artificial com inspirações biológicas do funcionamento do cérebro humano (Russell e Norvig 2009). Em uma rede neural, a unidade básica é o neurônio artificial, que é interligado com outros neurônios para a formação de uma rede. Um neurônio recebe um valor de entrada e, dependendo de uma função de ativação, gera uma saída para o próximo neurônio. A rede neural do AMN é treinada para aprender com históricos de sucesso de outros algoritmos e produzir resultados melhores sem necessidade de execução destes algoritmos. O fluxo de funcionamento do AMN é composto de três passos: o primeiro passo constitui a criação de uma base de dados, o segundo passo corresponde ao treinamento da rede neural e o terceiro passo constitui a execução do AMN durante o funcionamento da rede. O fluxo do AMN é mostrado na Figura 34.

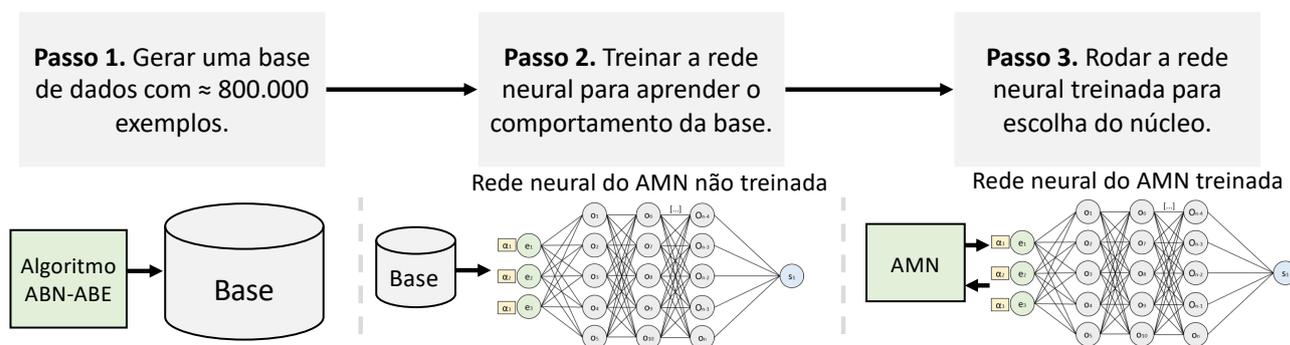


Figura 34 – Fluxo de funcionamento do algoritmo AMN.

No processo de criação da base de dados, outro algoritmo é executado (via simulação) e os valores de alguns atributos são salvos para cada requisição de conexão que surge na rede. O algoritmo utilizado para a criação da base de dados é o **ABN** em conjunto com o algoritmo **ABE**, apresentados nas Seções 6.2 e 5.2, respectivamente. Já os atributos considerados, em um total de dezessete, são: *i*) comprimento da rota, representado por um valor numérico; *ii*) número de saltos da rota, representado por um valor numérico; *iii*) formato de modulação utilizado, representado por um valor numérico; *iv*) a utilização espectral absoluta dos vizinhos de cada um dos sete núcleos (métrica **TUN** do algoritmo **ABN**), representado por sete valores numéricos; e *v*) a utilização espectral ponderada dos vizinhos de cada um dos sete núcleos (métrica **WUN** do algoritmo **ABN**), representado por sete valores numéricos. Estas duas formas

de utilização (**TUN** e **WUN**) são descritas no algoritmo **ABN** (Seção 6.2) e podem ser ajustadas para fibras com outras quantidades de núcleos. Tais atributos, como o comprimento da rota e a utilização espectral de cada núcleo, possuem ligação com a ocorrência de *crosstalk*. Portanto, a escolha destes atributos justifica-se para que a rede neural seja capaz de identificar situações propícias à ocorrência de *crosstalk*, sem recorrer ao custoso processo de calcular o *crosstalk*. Destaca-se que a base de dados é formada apenas com os casos em que a requisição é estabelecida, isto é, os casos em que não houve bloqueio. Esta característica busca garantir que futuramente a rede neural aprenda apenas os casos de sucesso do algoritmo **ABN-ABE**. A rede neural do algoritmo **AMN** foi desenvolvida na linguagem de programação Python. Para integração da rede neural com o simulador **SNetS**, foi utilizada uma comunicação via *socket*. Assim, durante o processo de escolha de núcleo, o **AMN** (executando no **SNetS**) envia as informações dos dezessete atributos para a rede neural, que retorna um núcleo escolhido.

A base gerada a partir do **ABN-ABE** possui 844.631 registros, que correspondem as requisições não bloqueadas de um total de 1.000.000 de requisições geradas em diferentes pontos de carga da rede (desconsiderando os registros repetidos). Cada registro salvo é composto pelos dezessete atributos em um determinado estado da rede (chegada da requisição) mais o núcleo escolhido pelo **ABN** para aquele estado da rede. O uso do **ABN** para criação da base de dados justifica-se devido aos critérios bem definidos de escolha de núcleo do algoritmo **ABN**, através das métricas **TUN**, **WUN** e **UC**. Assim, o **AMN** alcança melhores níveis de acurácia no processo de treinamento.

O passo dois é onde a rede é treinada a partir da base de dados gerada pelo algoritmo **ABN-ABE**. A rede neural utilizada possui uma camada de entrada composta por dezessete neurônios, em que cada um representa um dos dezessete atributos. A rede neural também possui três camadas ocultas de 128, 64 e 32 neurônios (Monteiro et al. 2020) com o modo de ativação *ReLU* (LeCun, Bengio e Hinton 2015). A última camada (camada de saída) é composta por sete neurônios com o modo de ativação *softmax* (Ghazijahani et al. 2019) (Monteiro et al. 2020), em que cada um dos neurônios correspondem a um dos núcleos da fibra. A Figura 35 apresenta a arquitetura da rede neural do **AMN**.

O processo de treinamento consiste no ajuste dos pesos ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$) da rede. Durante o treinamento, a base de dados é dividida na proporção de 80% dos dados para treinamento e 20% para testes. Isto é, os pesos são ajustados com um conjunto de 675.704 registros da base de dados. Durante o processo de aprendizado, o otimizador ADAM foi utilizado para a atualização dos pesos da rede neural, enquanto a função de entropia cruzada (*cross-entropy*) foi utilizada para cálculo da perda. O processo de aprendizado consiste em 2.000 épocas, sendo interrompido caso a perda não atinja

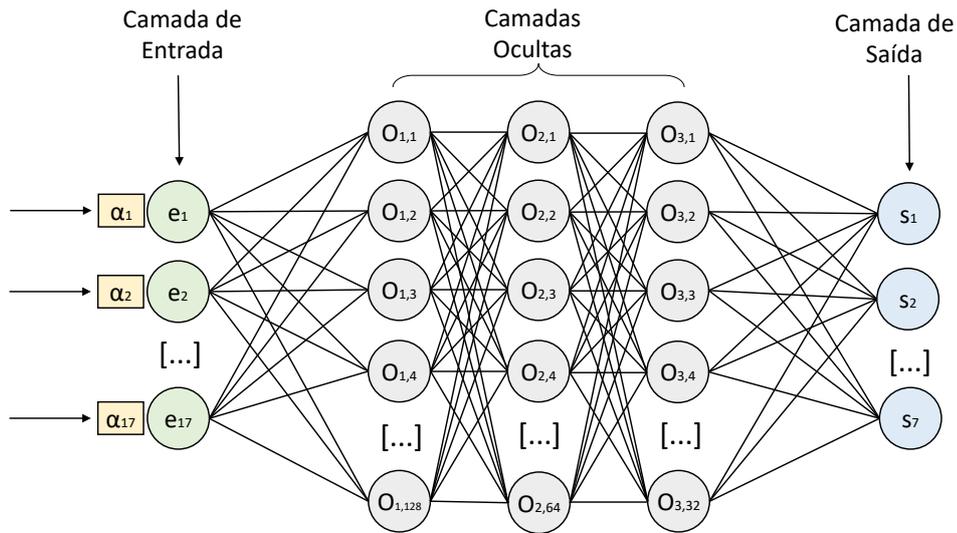


Figura 35 – Arquitetura da rede neural artificial do AMN.

uma variação de 0,0002 em 20 épocas consecutivas. Neste contexto, o treinamento da rede neural do AMN durou 406 épocas. Após o treinamento, a performance da rede neural do algoritmo AMN é verificada com o conjunto de teste (168.926 registros) para apurar se a rede neural é capaz de prever os núcleos em condições reais de utilização. No processo de teste, a rede neural do algoritmo AMN atingiu uma acurácia de 98,93%. A acurácia é uma métrica tradicional para verificação de modelos que aprendizado de máquina, que representa a proporção de acertos do modelo, independente da classe, sendo expressa por

$$Acurácia = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}, \quad (6.3)$$

em que VP são os casos verdadeiros positivos, VN são os casos verdadeiros negativos, FP são os casos falsos positivos e FN são os casos falsos negativos. Além da acurácia, a rede neural do algoritmo AMN também pode ser avaliada em termos das métricas de precisão (*precision*), sensibilidade (*recall*) e F1-score. Tais métricas são expressas pelas equações a seguir

$$Precisão = \frac{VP}{VP + FP}, \quad (6.4)$$

$$Sensibilidade = \frac{VP}{VP + FN}, \quad (6.5)$$

$$F1\text{-score} = 2 \cdot \frac{Precisão \cdot Sensibilidade}{Precisão + Sensibilidade}. \quad (6.6)$$

A seguir, na Tabela 17, são apresentados os valores de precisão, sensibilidade e F1-score referentes aos testes da rede neural do algoritmo AMN, observando o resultados de cada classe (núcleo).

Tabela 17 – Resultados das métricas avaliativas da rede neural do AMN.

	Precisão	Sensibilidade	F1-score
Núcleo 1	0,98	0,98	0,98
Núcleo 2	0,98	0,96	0,97
Núcleo 3	0,97	0,99	0,98
Núcleo 4	0,99	0,97	0,98
Núcleo 5	0,97	0,99	0,98
Núcleo 6	0,98	0,99	0,98

Os valores mostrados na Tabela 17 indicam que a rede neural é capaz de identificar os casos positivos corretamente, além de apresentar um equilíbrio entre a precisão e a sensibilidade (demonstrada pelo F1-score). Portanto, o AMN é capaz de selecionar núcleos para uma rede óptica multi-núcleo com base no histórico de sucesso do algoritmo ABN-ABE. A matriz de confusão gerada a partir dos testes da rede neural é apresentada na Tabela 18. Na matriz de confusão, a diagonal principal representa os algoritmos que foram classificados corretamente, ou seja, os casos de verdadeiros positivos e verdadeiros negativos.

Tabela 18 – Matriz de confusão dos testes da rede neural do algoritmo AMN.

		Valor predito					
		Núcleo 1	Núcleo 2	Núcleo 3	Núcleo 4	Núcleo 5	Núcleo 6
Valor verdadeiro	Núcleo 1	27.687	231	167	52	141	87
	Núcleo 2	280	26.886	346	143	130	201
	Núcleo 3	22	75	27.974	4	64	4
	Núcleo 4	98	75	266	27.237	227	125
	Núcleo 5	82	34	59	34	28.213	52
	Núcleo 6	124	46	79	4	174	28.193

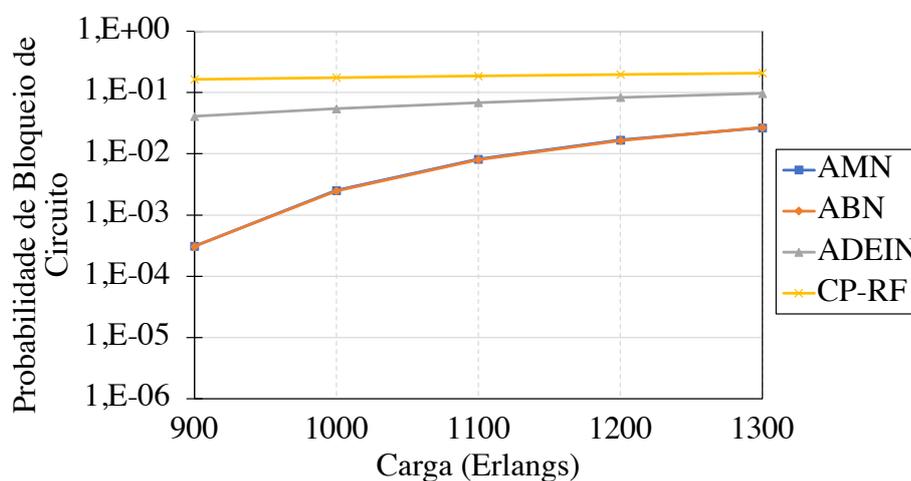
6.4 Avaliação de Desempenho

Nesta seção é realizada a avaliação de desempenho dos dois algoritmos propostos neste capítulo: o algoritmo ABN e o algoritmo AMN. A Seção 6.4.1 apresenta os resultados numéricos e discussões sobre a comparação dos algoritmos propostos em relação a outros algoritmos.

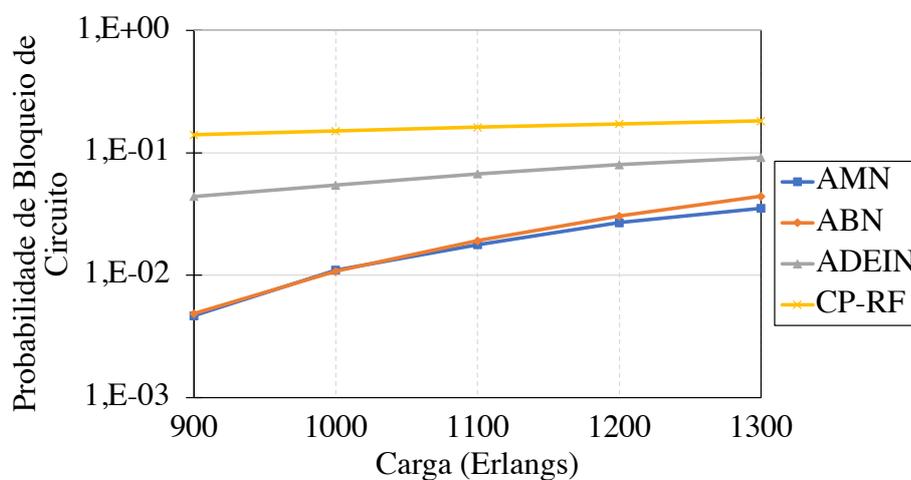
A ferramenta de simulação e o cenário de avaliação de desempenho são os mesmos apresentadas na Seção 5.3.1 e na Seção 5.3.2, respectivamente. Para evitar redundância, tais informações não são rerepresentadas neste capítulo.

6.4.1 Resultados Numéricos e Discussões

Os algoritmos propostos são comparados com outros dois algoritmos *XT-avoid*: *i*) a estratégia de alocação de núcleo CP (Fuji et al. 2014) com a estratégia de alocação de espectro *random fit*, denominada CP-RF, que obteve o melhor desempenho entre os algoritmos concorrentes da avaliação de desempenho do capítulo anterior (Capítulo 5); e *ii*) com o algoritmo ADEIN (Araujo, Lacerda-Jr e Soares 2021). O algoritmo de Dijkstra (Dijkstra 1959) é utilizado para escolha da rota em todos os algoritmos avaliados. A partir da definição de rota, o formato de modulação é selecionado considerando os níveis de OSNR para todos os algoritmos. A escolha de espectro para os algoritmos ABN e AMN é realizada pelo algoritmo ABE. A Figura 36 apresenta a métrica probabilidade de bloqueio de circuito para o cenário com alta incidência de *crosstalk*.



(a) NSFNet (HXT)

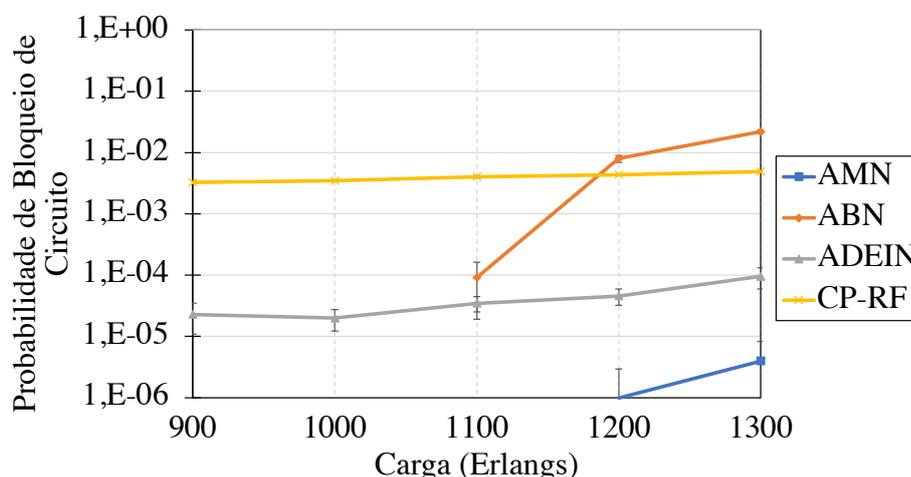


(b) EURO28 (HXT)

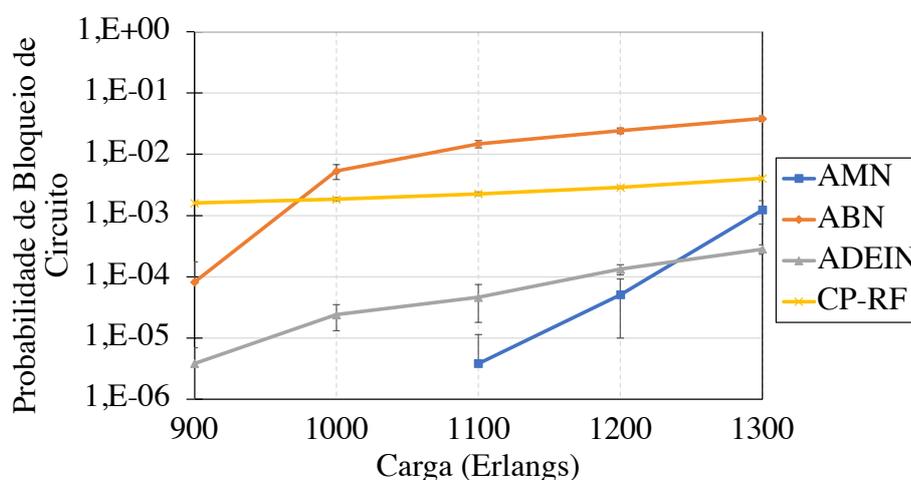
Figura 36 – Algoritmos de alocação de núcleo em termos de PBC em cenário HXT.

Os algoritmos ABN e AMN apresentam melhores resultados em termos de PBC

quando comparado aos algoritmos **CP-RF** e **ADEIN** em ambas as topologias. O ganho dos algoritmos é calculado por $GANHO_{m,n} = (\Upsilon_n - \Upsilon_m)/\Upsilon_n$, em que Υ_m é o resultado do algoritmo referido (**PBC** ou **PBB**) e Υ_n é o resultado de outro algoritmo avaliado (concorrente). O ganho do **AMN** em relação ao **CP-RF** com uma carga de 1300 Erlangs (último ponto de carga) foi de 87,19% na topologia NSFNet (Figura 36 (a)) e 80,64% na topologia EURO28 (Figura 36 (b)). Em relação ao **ADEIN**, o **AMN** atingiu um ganho de 72,56% no último ponto de carga na topologia NSFNet e 61,42% na topologia EURO28. No cenário de alta incidência de **XT**, os resultados do **AMN** foram similares ao **ABN**. Na topologia NSFNet, os resultados são equivalentes considerando a margem de intervalo de confiança. Já na topologia EURO28, o **AMN** obteve um ganho em relação ao **ABN** de 20,19% no ponto de 1300 Erlangs. O ganho do **AMN** em relação ao **ABN** aumentou no cenário de baixo **XT**, como apresentado na Figura 37.



(a) NSFNet (LXT)

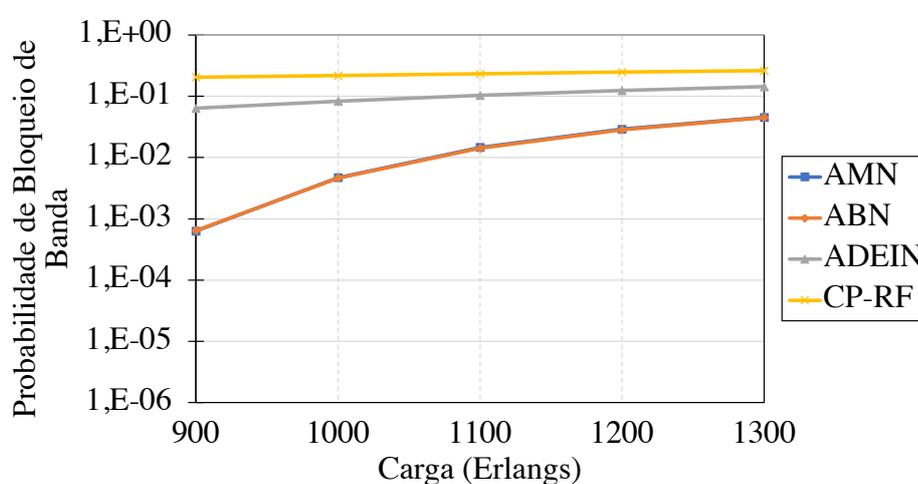


(b) EURO28 (LXT)

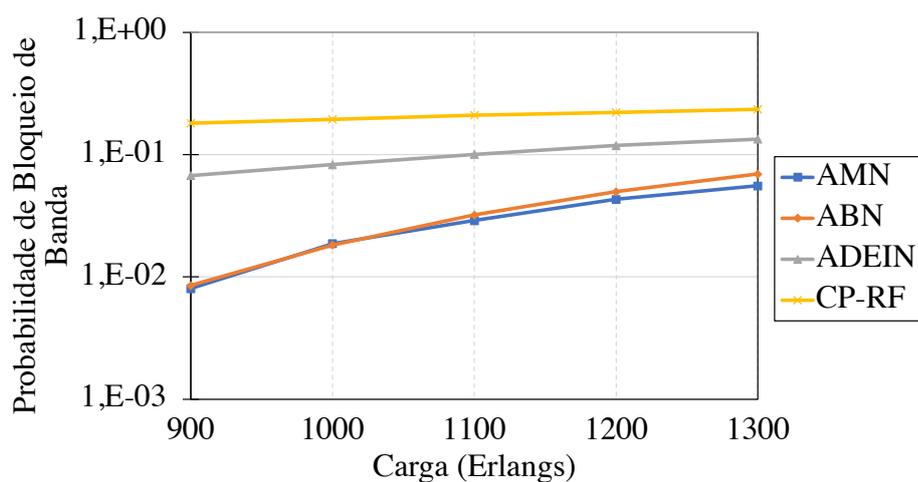
Figura 37 – Algoritmos de alocação de núcleo em termos de PBC em cenário LXT.

Na Figura 37 observa-se uma melhora do **AMN** em relação aos demais algoritmos,

na mesma janela de cargas da Figura 36. O ganho do AMN em relação ao CP-RF com uma carga de 1300 Erlangs (último ponto de carga) foi de 99,91% na topologia NSFNet (Figura 37 (a)) e 69,26% na topologia EURO28 (Figura 37 (b)). Em relação ao ABN, o AMN atingiu um ganho de 99,98% no último ponto de carga na topologia NSFNet e 96,75% na topologia EURO28. O ganho do AMN em relação ao ADEIN foi de 95,83% no último ponto de carga da topologia NSFNet. O algoritmo ADEIN obteve, de forma geral, o segundo melhor desempenho entre os algoritmos avaliados, chegando a obter melhor resultado que o AMN no ponto de 1300 Erlangs da topologia EURO28. Entretanto, o AMN alcançou melhor resultado médio em relação aos demais algoritmos no cenário LXT em termos de PBC. A PBB em cenário HXT é exibida na Figura 38.



(a) NSFNet (HXT)

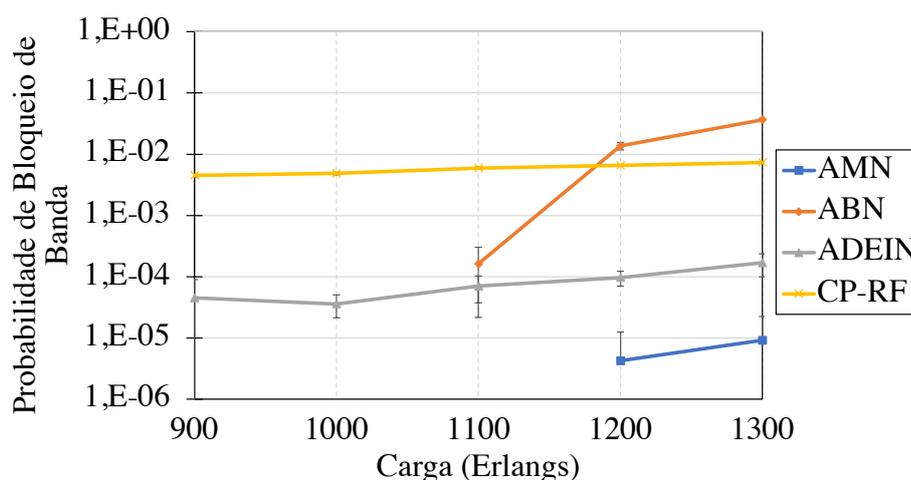


(b) EURO28 (HXT)

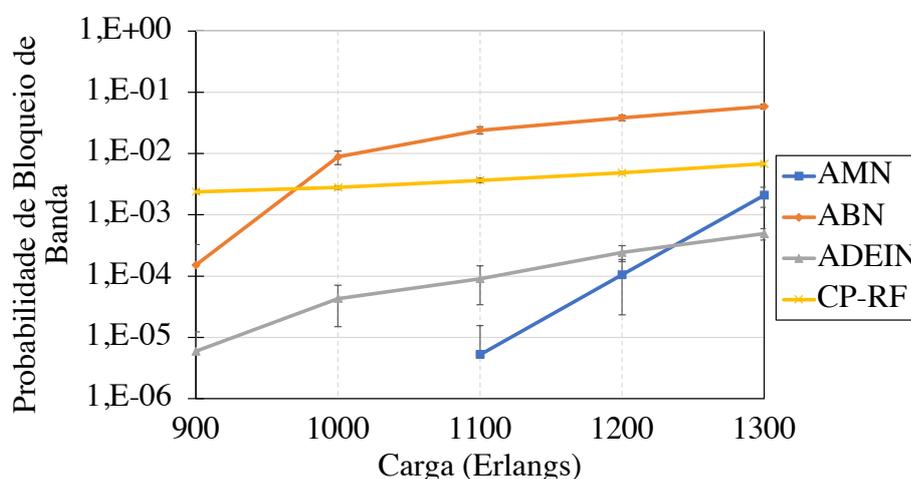
Figura 38 – Algoritmos de alocação de núcleo em termos de PBB em cenário HXT.

O algoritmo AMN apresenta melhores resultados em termos de PBB quando comparado aos algoritmos CP-RF e ADEIN em ambas as topologias. O ganho do AMN em relação ao CP-RF com uma carga de 1300 Erlangs (último ponto de carga) foi de

82,56% na topologia NSFNet (Figura 38 (a)) e 76,37% na topologia EURO28 (Figura 38 (b)). Em relação ao ADEIN, o AMN atingiu um ganho de 68,32% no último ponto de carga na topologia NSFNet e 58,51% na topologia EURO28. Na métrica de PBB, assim como na métrica de PBC, os resultados do AMN foram similares ao ABN no cenário de alto XT. Entretanto, o AMN obteve um ganho em relação ao ABN de 20,05% no ponto de 1300 Erlangs da topologia EURO28. Em termos de PBB, o ganho do AMN em relação ao ABN aumentou no cenário de baixo XT, como mostrado na Figura 39.



(a) NSFNet (LXT)



(b) EURO28 (LXT)

Figura 39 – Algoritmos de alocação de núcleo em termos de PBB em cenário LXT.

Na Figura 39 observa-se uma melhora do AMN em relação aos demais algoritmos, na mesma janela de cargas da Figura 38. O ganho do AMN em relação ao CP-RF com uma carga de 1300 Erlangs foi de 99,87% na topologia NSFNet (Figura 39 (a)) e 69,33% na topologia EURO28 (Figura 39 (b)). Em relação ao ABN, o AMN atingiu um ganho de 99,97% no último ponto de carga na topologia NSFNet e 96,46% na topologia EURO28. O ganho do AMN em relação ao ADEIN foi de 94,57% no último

ponto de carga da topologia NSFNet. Novamente, o algoritmo ADEIN obteve um melhor resultado que o AMN no ponto de 1300 Erlangs da topologia EURO28 (no cenário LXT). Entretanto, o AMN alcançou melhores resultados nos demais pontos de carga. A Tabela 19 apresenta o ganho médio do AMN em relação ao CP-RF, ADEIN e ABN. O ganho médio consiste na média entre os ganhos obtidos nos cinco pontos de carga de cada gráfico (900, 1000, 1100, 1200 e 1300 Erlangs).

Tabela 19 – Ganho médio do AMN em relação aos outros algoritmos avaliados.

	PBC NSFNet HXT	PBC NSFNet LXT	PBC EURO28 HXT	PBC EURO28 LXT	PBB NSFNet HXT	PBB NSFNet LXT	PBB EURO28 HXT	PBB EURO28 LXT
CP-RF	94,52%	99,94%	88,70%	89,10%	92,40%	99,90%	85,81%	89,01%
ADEIN	86,98%	96,82%	74,11%	25,35%	84,82%	95,57%	71,76%	24,87%
ABN	1,17%*	99,98%	8,16%	98,83%	1,36%*	99,97%	9,28%	98,72%

De maneira geral, o AMN obteve melhores resultados quando comparado com todos os demais algoritmos. Nos cenários com alta incidência de XT, o desempenho do AMN é equivalente ao ABN na topologia NSFNet. Neste caso específico, os resultados estão sobrepostos pelo intervalo de confiança (marcado com um “*” na Tabela 19). Na topologia EURO28, o ganho médio do AMN (em relação ao ABN) é de 8,16% em termos de PBC. A similaridade entre o AMN e o ABN neste cenário dar-se pelo fato do AMN ser treinado a partir do ABN, o que acarreta em uma convergência de desempenho no cenário de HXT. Esta convergência de desempenho não ocorre no cenário de LXT, onde o ganho médio do AMN em relação ao ABN torna-se maior que 98% em todas as métricas e topologias. Tal melhora deve-se, entre outras razões, ao fato de que o treinamento do AMN considera atributos da rota e da modulação, que são negligenciados pelo ABN. Assim, a rede neural do AMN identifica padrões relacionados a estes atributos e aos casos de sucesso do ABN, melhorando o resultado geral do AMN em cenários de baixa incidência de XT. Além disso, outra questão que influencia o melhor desempenho do AMN é o fato deste ser treinado apenas com os casos bem-sucedidos do algoritmo ABN.

6.5 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os algoritmos ABN e AMN, ambos XT-avoid. O desempenho dos algoritmos propostos mostrou-se superior em relação a outras políticas de alocação de núcleo. O bom desempenho do algoritmo ABN deve-se ao fato deste avaliar a utilização espectral dos núcleos em uma fibra. A partir desta avaliação, a escolha do núcleo ocorre de forma a evitar sobreposições espectrais entre núcleos vizinhos, o que acarreta uma diminuição do crosstalk. Por outro lado, o algoritmo AMN usa uma rede neural para aprender com históricos de execução do algoritmo ABN. Por ser baseado apenas nos casos de sucesso e analisar variáveis não consideradas

pelo **ABN** (ex: comprimento da rota e formato de modulação), o **AMN** é capaz de obter desempenhos superiores ao **ABN**. Os algoritmos propostos foram comparados com outros dois algoritmos (**CP-RF** e **ADEIN**), sendo superior a todos em termos de probabilidade de bloqueio de circuito e probabilidade de bloqueio de banda. Dentre os dois algoritmos propostos, o **AMN** alcançou o melhor desempenho no cenário avaliado. O **AMN**, em um cenário com alta incidência de *crosstalk*, apresentou ganhos médios em relação a outros algoritmos **XT-avoid** de pelo menos 8,16% em termos de **PBC** e de pelo menos 9,28% em termos de **PBB**. Já no cenário de baixa incidência de *crosstalk*, o **AMN** atingiu um ganho médio de pelo menos 25,35% em termos de **PBC** e 24,87% em termos de **PBB** em relação a outros algoritmos.

O aprofundamento na investigação do uso de técnicas de aprendizado de máquina não é o foco principal desta tese. Porém, devido as evidências apresentadas neste capítulo de que o uso de técnicas de aprendizado de máquina são promissoras para a alocação de recursos em redes ópticas multi-núcleos, pretende-se explorar esta área de pesquisa em trabalhos futuros, como discutido no Capítulo 9.

No próximo capítulo é discutido um outro subproblema do problema **RMCSA**: A alocação integrada de núcleo e espectro.

7 Alocação Integrada de Núcleo e Espectro em SDM-EON

Neste capítulo é discutido de forma integrada o problema de alocação de núcleo e o problema de alocação de espectro (*core and spectrum allocation (CSA)*), dois dos quatro subproblemas do **RMCSA**. Na Seção 7.1 são mostrados alguns trabalhos relacionados ao tema. Na Seção 7.2 é apresentada a proposta desta tese para lidar com o problema de alocação de núcleo e espectro. Na Seção 7.3 é realizada uma avaliação de desempenho para comparar o algoritmo proposto com outros algoritmos. Por fim, as considerações finais deste capítulo são mostradas na Seção 7.4.

7.1 Trabalhos Relacionados

Um algoritmo **RMCSA** pode ser ciente de *crosstalk (XT-aware)*, que usa valores de *crosstalk* dinamicamente para a tomada de decisão, ou *XT-avoid*, em que o algoritmo tenta evitar sobreposição de *slots* em núcleos adjacentes. Os algoritmos propostos nesta tese e apresentados nos dois últimos capítulos adotam estratégias *XT-avoid*, assim como em (Fujii et al. 2014), (Tode e Hirota 2017), (Yaghubi-Namaad, Rahbar e Alizadeh 2018), (Oliveira e Fonseca 2019), (Araujo, Lacerda-Jr e Soares 2021). O algoritmo proposto neste capítulo usa a estratégia *XT-aware*. Tal mudança de paradigma ocorre para buscar algoritmos que retornem soluções mais eficientes para redução de *crosstalk*. Como mostrado no Capítulo 4, a abordagem *XT-aware* é adotada por vários trabalhos da literatura (Lobato et al. 2019), (Liu, Xiong e Chen 2020), (Su et al. 2022), (Seki et al. 2023).

No âmbito de algoritmos para a alocação de núcleo e espectro, Lobato *et al.* propôs um algoritmo guloso, ciente de *crosstalk*, para resolver o problema **SCA** em **SDM-EON**, denominado *XT-aware greedy algorithm (XTgreedy)* (Lobato et al. 2019). Tal algoritmo busca minimizar o impacto do *crosstalk* tanto nos novos caminhos ópticos quanto nos caminhos ópticos já estabelecidos na rede. Para isso, o **XTgreedy** percorre todas as possíveis soluções verificando se o nível de *crosstalk* ($XT_{\mu,m}^{(tot)}$) do caminho óptico candidato e dos caminhos ópticos já ativos na rede são menores que o limite de *crosstalk* (XT_{req}) estabelecido para a rede. Além disso, o algoritmo busca, no conjunto de soluções possíveis, a solução com maior valor de ΔXT , sendo $\Delta XT = \sum_{n=1}^{N_{m,e}} (XT_{req} - XT_{\mu,m}^{(tot)})$. Isto é, o **XTgreedy** sempre escolhe o caminho óptico candidato com valor de *crosstalk* mais distante do limiar de *crosstalk* estabelecido para a rede.

Liu *et al.* propôs uma estratégia *XT-avoid* para **SDM-EONs** (Liu, Xiong e Chen

2020). Esta estratégia *XT-avoid* é denominada *crosstalk avoidance strategy* (**CAS**) e classifica os núcleos da fibras em grupos, em que cada grupo é formado por núcleos não adjacentes entre si. O espectro óptico de cada núcleo é dividido em várias partições. Cada partição possui uma quantidade de *slots* diferente, a depender da arquitetura da fibra. O algoritmo define que os núcleos do grupo 1 começam a preencher o espectro a partir da partição 1, passando para partição 2, até a partição n . Já os núcleos do grupo 2 começam a preencher o espectro a partir da partição 2, passando para partição 3, partição n , até a partição 1. Este padrão repete-se para todos os grupos de núcleos. Desta forma, o algoritmo **CAS** reduz os níveis de *crosstalk* ao evitar sobreposição espectral, já que dois núcleos adjacentes começam a preencher o espectro em regiões espectrais distintas.

Além da estratégia *XT-avoid*, Liu *et al.* também propôs uma estratégia *XT-aware* para **SDM-EONs** (Liu, Xiong e Chen 2020). Esta estratégia *XT-aware* é denominada *intercore crosstalk aware algorithm* (**ICXT-AA**) e verifica o *crosstalk* para o bloco de *slots* do caminho óptico candidato e dos caminhos ópticos já ativos na rede. Para isso, o **ICXT-AA** rotula os blocos de *slots* candidatos a partir de dois parâmetros: *i*) XT_{self} que possui o valor do *slot* mais afetado por *crosstalk* dentro do bloco candidato; e *ii*) $XT_{adjacente}$ que possui o valor do *slot* do núcleo adjacente mais afetado por *crosstalk*. O rótulo para o bloco de *slots* candidatos obedecerá a expressão $XT_{MAX}^{FS} = \max\{XT_{self}, XT_{adjacente}\}$. Então, o **ICXT-AA** seleciona o bloco de *slots* candidato que é contíguo, contínuo, situado na região de prioridade definida pela estratégia *XT-avoid* **CAS** e com um nível de *crosstalk* (baseado no rótulo XT_{MAX}^{FS}) menor que o limite de *crosstalk* estabelecido para a rede.

7.2 O Algoritmo Ciente de Crosstalk para Alocação de Núcleo e Espectro (ACiNE)

Nesta seção é apresentado o algoritmo ciente de *crosstalk* para alocação de núcleo e espectro (**ACiNE**) (Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2021). O **ACiNE** é um algoritmo do tipo *XT-aware* que busca alocar os novos caminhos ópticos com o menor valor de *crosstalk* possível. Para isso, o **ACiNE** é dividido em duas fases: a fase de balanceamento e a fase de busca. O **ACiNE** agrupa os núcleos da fibra em sua primeira fase (balanceamento), em que cada grupo é composto por núcleos não-adjacentes, sendo que cada grupo deve priorizar a alocação de *slots* em uma determinada região espectral, similar à estratégia do **ABE** (Seção 5.2). Tal região de prioridade pode ser o início do espectro ou o final do espectro. Essa estratégia ocasiona um balanceamento na alocação espectral da rede, diminuindo a sobreposição entre *slots* de núcleos vizinhos e, conseqüentemente, a ocorrência de *crosstalk*. O pseudo-código da segunda fase do **ACiNE**, conhecida como fase de busca, é apresentado no Algoritmo 3.

Algoritmo 3 : ACiNE

Entrada: Rota r , $slots$ requeridos req , regiões prioritárias

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

Após definir as regiões de prioridade, o ACiNE percorre todas as opções de núcleo (com exceção do núcleo central) e todos os $slots$ disponíveis, contíguos e contínuos de cada núcleo. Durante esse processo, o ACiNE armazena o caminho óptico candidato com menor valor de *crossstalk*. Um caminho óptico candidato é formado por um núcleo e um conjunto de $slots$. Por fim, o ACiNE aloca, dentre os candidatos com menor nível de *crossstalk*, aquele mais próximo da região de prioridade. Desta forma, o caminho óptico candidato escolhido tem o menor valor de *crossstalk* possível e é alocado numa região que minimiza a sobreposição espectral com seus vizinhos. Durante este processo, o espectro óptico do núcleo central não é avaliado. Como o núcleo central possui a característica de produzir e sofrer interferência em todos os outros núcleos, o núcleo central será usado apenas quando a busca nos demais núcleos não retornar solução. Neste caso, o espectro escolhido no núcleo central será aquele com menor valor de *crossstalk*. A Figura 40 representa um exemplo do funcionamento do ACiNE.

Neste exemplo é mostrado a chegada de uma requisição para um novo caminho óptico entre o nó n_1 e o nó n_2 , usando o enlace e_1 . A requisição necessita de cinco $slots$

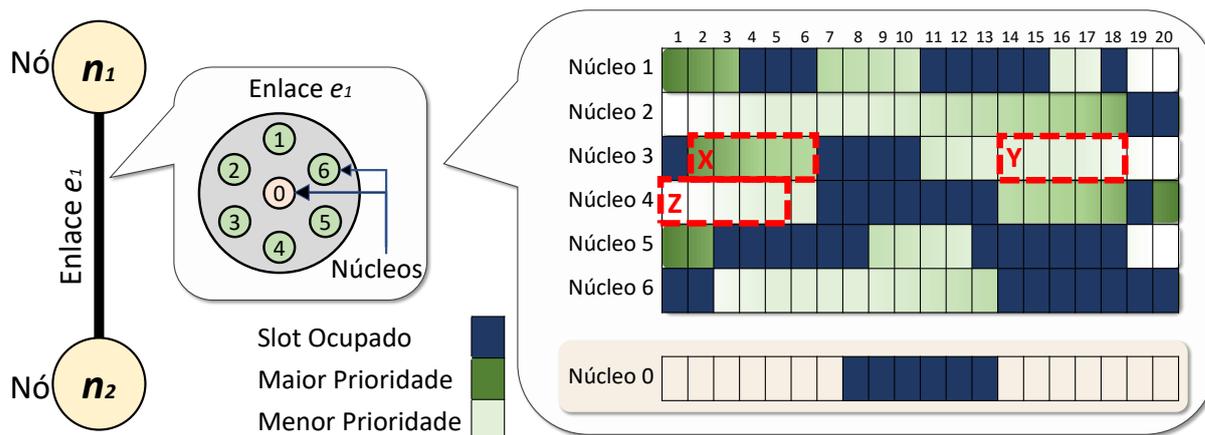


Figura 40 – Exemplo de funcionamento do ACiNE, com a descrição das regiões de prioridade de cada núcleo.

contíguos em algum dos sete núcleos do enlace e_1 , dispostos de maneira hexagonal. Os núcleos 1, 3 e 5 têm como prioridade a alocação de caminhos ópticos com frequências menores (*slots* com índices menores). Já os núcleos 2, 4 e 6 priorizam as maiores frequências. O ACiNE analisa todas as possibilidades de alocação e verifica o nível de *crossstalk* em cada uma delas. A Figura 40 mostra, como exemplo, três possíveis soluções: X , Y e Z . Em relação a estes três exemplos, verifica-se que Z não será selecionado pelo ACiNE. Isso ocorre pois a vizinhança de Z (*slots* 3, 4 e 5 ocupados no núcleo 5) proporciona a Z um maior nível de *crossstalk* quando comparado a X e Y . Por outro lado, as possíveis soluções X e Y tem valores de *crossstalk* mínimos por não ter sobreposições de *slots* entre os vizinhos. Neste caso, será alocado aquele que está localizado o mais próximo possível da sua região de prioridade. No exemplo, o caminho óptico candidato X (núcleo 3 e *slots* 2-6) será escolhido e alocado pelo ACiNE. Como citado anteriormente, o núcleo 0 (central) só será utilizado quando os recursos dos demais núcleos se esgotarem. Neste caso, será escolhido a região do núcleo 0 com menor nível de *crossstalk*.

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

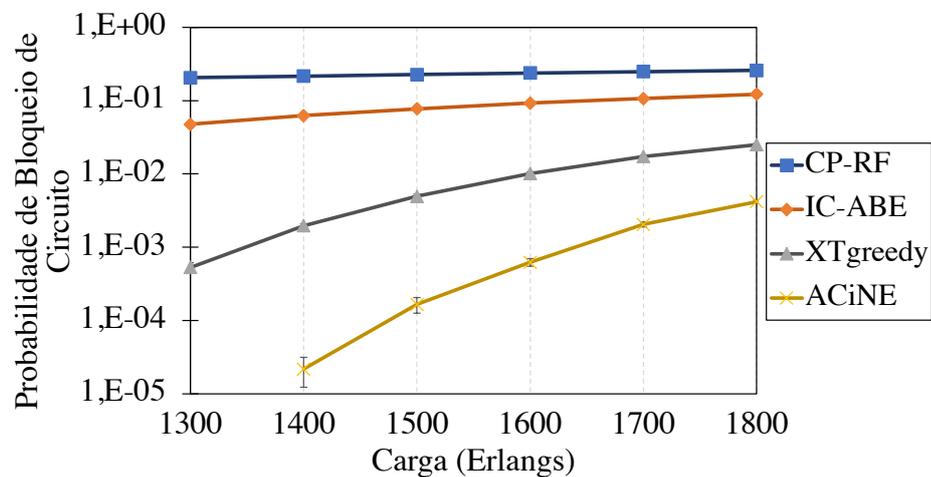
7.3 Avaliação de Desempenho

A seguir, na Seção 7.3.1 são apresentados os resultados numéricos e discussões da comparação do ACiNE com outros algoritmos.

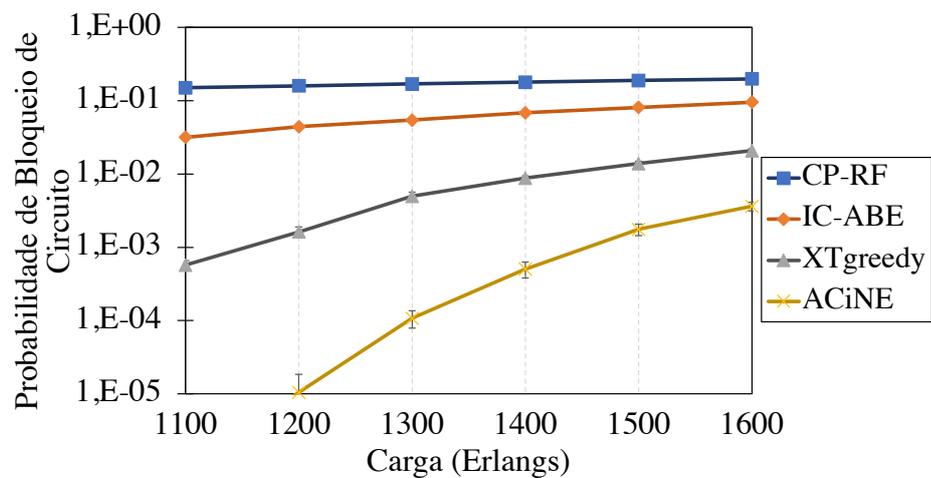
A ferramenta de simulação e o cenário de avaliação de desempenho são os mesmos apresentadas na Seção 5.3.1 e na Seção 5.3.2, respectivamente. Para evitar redundância, tais informações não são rerepresentadas neste capítulo.

7.3.1 Resultados Numéricos e Discussões

O algoritmo ACiNE foi avaliado e comparado com outras três propostas da literatura: *i*) o algoritmo *Core Prioritization* (Fujii et al. 2014) com a alocação espectral *random fit*, tratado a seguir como CP-RF; *ii*) o algoritmo ABE (Lacerda-Jr et al. 2020) com uma escolha de núcleo cíclica, tratado a seguir como IC-ABE; e *iii*) o algoritmo XTgreedy proposto em (Lobato et al. 2019). Os resultados de PBC em cenário HXT são mostrados na Figura 41.



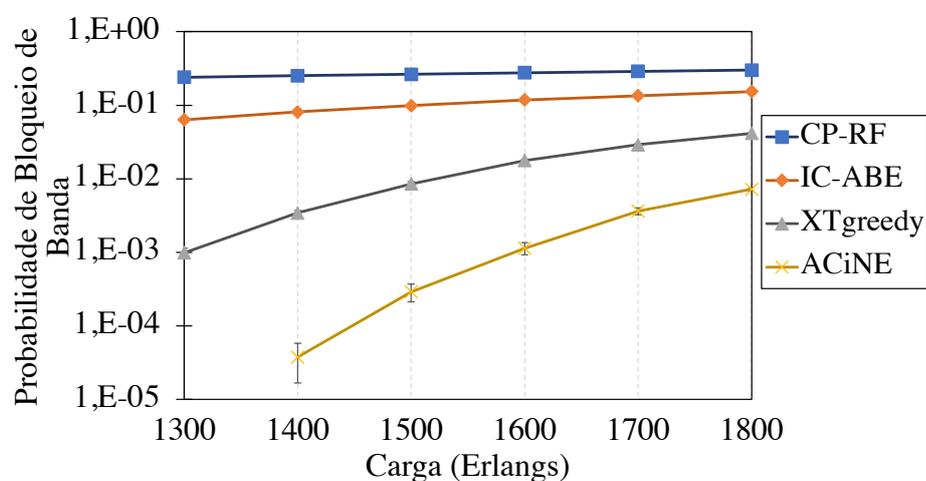
(a) NSFNet (HXT)



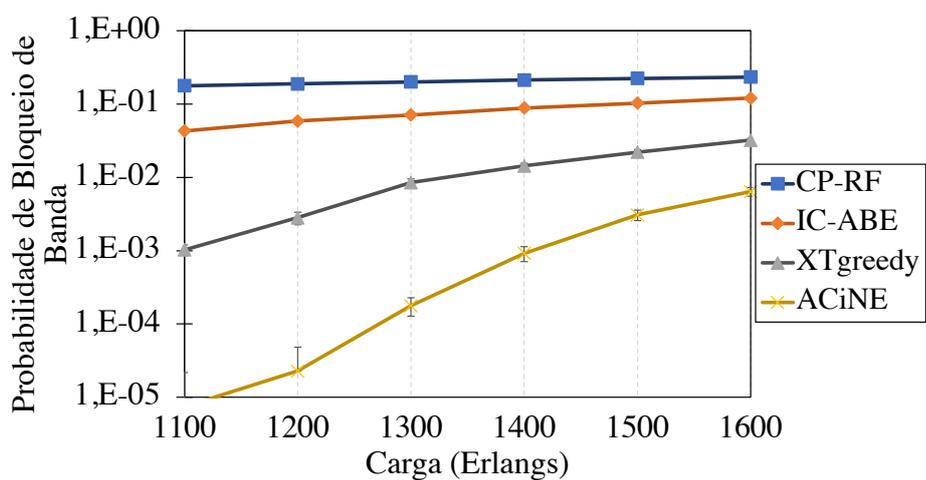
(b) EURO28 (HXT)

Figura 41 – Algoritmos de alocação de núcleo e espectro em termos de PBC em cenário HXT.

No cenário apresentado na Figura 41, o algoritmo ACiNE obteve melhores resultados em termos de PBC quando comparado aos concorrentes. No maior ponto de carga da topologia NSFNet (Figura 41 (a)), o ganho de probabilidade de bloqueio de circuito do ACiNE foi de 83,39% quando comparado ao XTgreedy, 96,59% quando comparado ao IC-ABE e 98,39% em relação ao CP-RF. Já para o maior ponto de carga da topologia EURO28 (Figura 41 (b)), o ganho de probabilidade de bloqueio do ACiNE foi de 82,52% quando comparado ao XTgreedy, 96,20% quando comparado ao IC-ABE e 98,17% em relação ao CP-RF. Tais resultados indicam a eficiência do ACiNE quando submetido a um cenário com alta incidência de *crosstalk*.



(a) NSFNet (HXT)

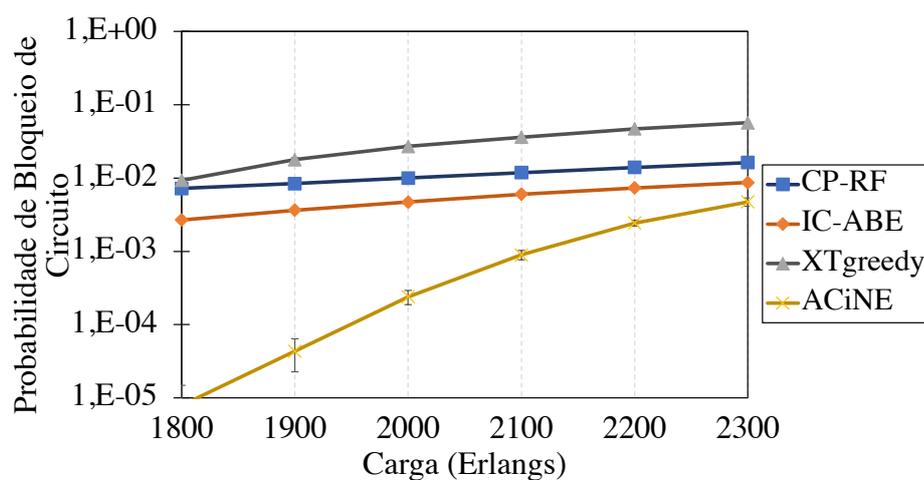


(b) EURO28 (HXT)

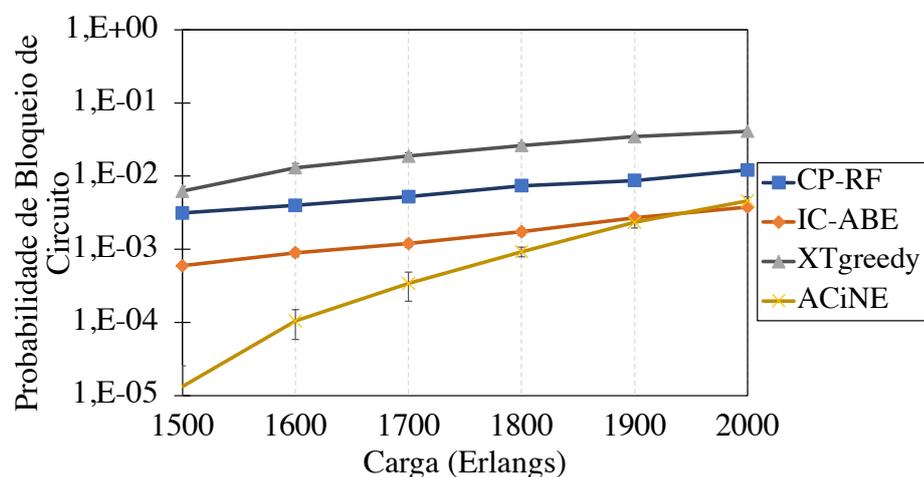
Figura 42 – Algoritmos de alocação de núcleo e espectro em termos de PBB em cenário HXT.

Os resultados em termos de PBB são apresentados na Figura 42. Para a métrica de PBB, o desempenho dos algoritmos foi semelhante ao da métrica de PBC. Tal semelhança indica que, neste cenário, os bloqueios ocorreram em proporções

similares entre as requisições com demandas diferentes (de 100 Gbps até 500 Gbps). A observação dessa característica justifica o estudo e comparação entre as métricas PBC e PBB. No maior ponto de carga da topologia NSFNet (Figura 42 (a)), o ganho de PBB do ACiNE foi de 82,61% quando comparado ao XTgreedy, 95,30% quando comparado ao IC-ABE e 97,60% em relação ao CP-RF. Já para o maior ponto de carga da topologia EURO28 (Figura 42 (b)), o ganho de PBB do ACiNE foi de 80,18% quando comparado ao XTgreedy, 94,72% quando comparado ao IC-ABE e 97,28% em relação ao CP-RF.



(a) NSFNet (LXT)



(b) EURO28 (LXT)

Figura 43 – Algoritmos de alocação de núcleo e espectro em termos de PBC em cenário LXT.

A Figura 43 apresenta o resultado de PBC em um cenário com baixa incidência de *crosstalk*. As variações no coeficiente de acoplamento de potência da fibra tem por objetivo avaliar o comportamento dos algoritmos quando submetidos a diferentes níveis de *crosstalk*. No maior ponto de carga da topologia NSFNet (Figura 43 (a)), o ganho

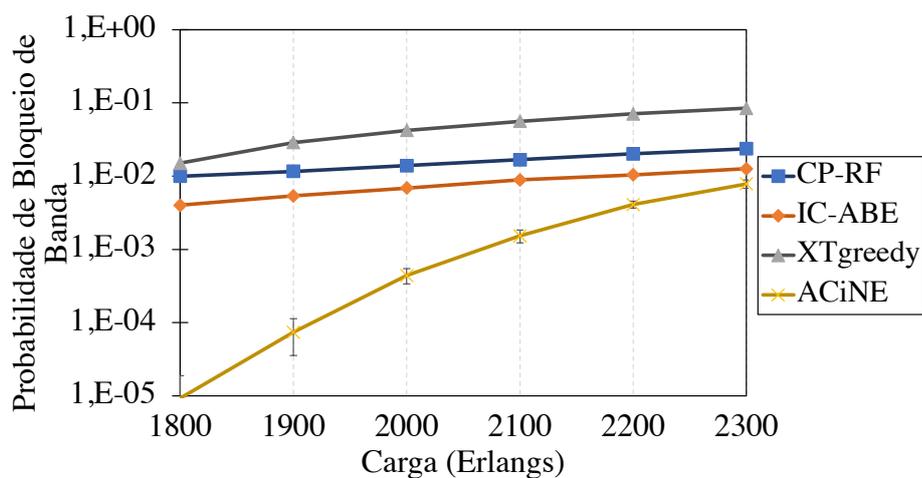
de PBC do ACiNE foi de 91,70% quando comparado ao XTgreedy, 45,62% quando comparado ao IC-ABE e 71,01% em relação ao CP-RF. Já para o maior ponto de carga da topologia EURO28 (Figura 43 (b)), o ganho de PBC do ACiNE foi de 88,80% quando comparado ao XTgreedy e 62,20% em relação ao CP-RF. Neste ponto de carga específico, o IC-ABE obteve ganho de 17,60% em relação ao ACiNE. Entretanto, este ganho é sobreposto pelo intervalo de confiança. De forma geral, no cenário de baixa incidência de *crossstalk* o ACiNE também obteve bom desempenho comparado aos concorrentes. Contudo, diferente do cenário de alta incidência de *crossstalk*, o ganho do ACiNE em relação aos demais diminui quando a rede é submetida a altas cargas. Este estreitamento torna-se visível a partir de 2200 Erlangs de carga na topologia NSFNet e 1800 Erlangs de carga na topologia EURO28. Nestes pontos há uma convergência entre os algoritmos. Isto ocorre porque o bloqueio por ausência de recursos torna-se mais frequente que o bloqueio por *crossstalk*. Para demonstrar este comportamento, as causas dos bloqueios são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Composição da probabilidade de bloqueio de circuito no cenário com baixa incidência de *crossstalk* no último ponto de carga.

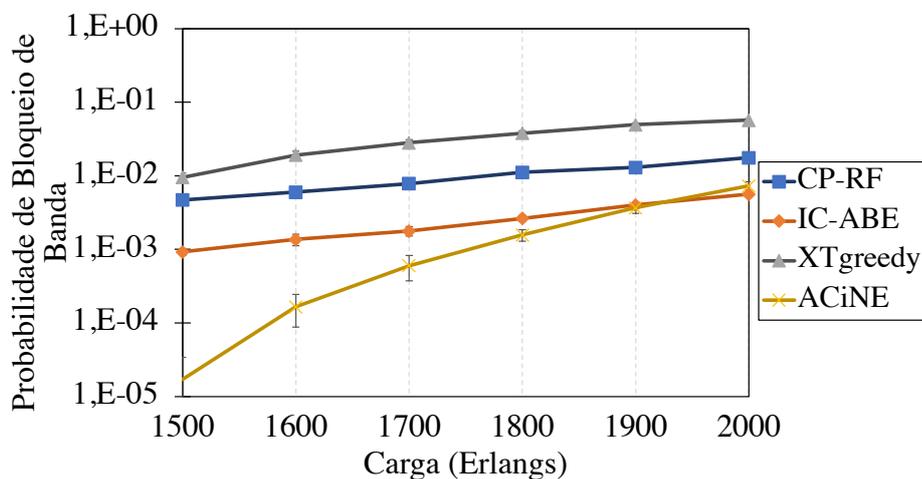
	Bloqueio por XT inadequado (NSFNet)	Bloqueio por outros tipos (NSFNet)	Bloqueio por XT inadequado (EURO28)	Bloqueio por outros tipos (EURO28)
CP-RF	75,31%	24,69%	36,70%	63,30%
IC-ABE	95,36%	4,64%	74,38%	25,62%
XTgreedy	0,39%	99,61%	0,10%	99,90%
ACiNE	0,40%	99,60%	0,02%	99,98%

Observa-se que, como esperado, os algoritmos *XT-aware* (XTgreedy e ACiNE) apresentam baixo bloqueio causado por *crossstalk* em relação aos algoritmos *XT-avoid* (CP-RF e IC-ABE). Entretanto, no maior ponto de carga (2300 Erlangs para NSFNet e 2000 Erlangs para EURO28), o bloqueio causado por ausência de recursos impactam significativamente nestes algoritmos. Isso ocorre porque os algoritmos *XT-aware* avaliados possuem o foco predominante em redução de *crossstalk*. Assim, pode ocorrer fragmentação da rede para garantir que os recursos sejam alocados com menor valor de *crossstalk* possível. A Figura 44 apresenta a PBB para o cenário de baixa incidência de *crossstalk*.

Para a PBB, o comportamento dos algoritmos foi similar ao da métrica de PBC. No maior ponto de carga da topologia NSFNet (Figura 44 (a)), o ganho de PBB do ACiNE foi de 90,70% quando comparado ao XTgreedy, 37,95% quando comparado ao IC-ABE e 66,84% em relação ao CP-RF. Já para o maior ponto de carga da topologia EURO28 (Figura 44 (b)), o ganho de PBB do ACiNE foi de 87,19% quando comparado ao XTgreedy e 58,49% quando comparado ao CP-RF. Apesar de obter melhores resultados na maioria dos pontos de carga, o ACiNE obteve pior resultado quando



(a) NSFNet (LXT)



(b) EURO28 (LXT)

Figura 44 – Algoritmos de alocação de núcleo e espectro em termos de PBB em cenário LXT.

comparado ao IC-ABE na carga de 2000 Erlangs. Para este caso, o IC-ABE obteve um ganho de 23,27% em relação ao ACiNE.

7.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o algoritmo **ACiNE**, proposto para a alocação integrada de núcleo e espectro. Além disso, o desempenho do **ACiNE** foi verificado em relação a outros algoritmos. De maneira geral, o **ACiNE** apresentou melhor desempenho em termos das métricas adotadas quando comparado aos dois algoritmos *XT-avoid* (**CP-RF** e **IC-ABE**) e também ao algoritmo *XT-aware* (**XTgreedy**). O **ACiNE** apresentou ganhos de no mínimo 45,62% em termos de probabilidade de bloqueio de circuito e no mínimo 37,95% em termos de probabilidade de bloqueio de banda.

Destaca-se que um dos algoritmos concorrentes, o algoritmo **XTgreedy**, busca a solução com menor nível de *crosstalk* dentre todas as soluções possíveis. Portanto o desempenho superior do **ACiNE** em relação ao **XTgreedy** aponta que o **ACiNE** é capaz de se esquivar de mínimos locais, reduzindo o *crosstalk* na rede de maneira eficiente.

No próximo capítulo é discutido um outro subconjunto do problema **RMCSA**: o problema de alocação de modulação, núcleo e espectro.

8 Alocação Integrada de Modulação, Núcleo e Espectro em SDM-EON

Neste capítulo é discutido de forma integrada o problema de escolha de formato de modulação, o problema de alocação de núcleo e o problema de alocação de espectro, três dos quatro subproblemas do problema **RMCSA**. Na Seção 8.1 são mostrados trabalhos relacionados ao problema de escolha de modulação, núcleo e espectro. Na Seção 8.2 é apresentada a proposta desta tese para lidar com o problema de alocação de modulação, núcleo e espectro. Na Seção 8.3 é realizada uma avaliação de desempenho para comparar o algoritmo proposto com outros algoritmos. Por fim, as considerações finais deste capítulo são mostradas na Seção 8.4.

8.1 Trabalhos Relacionados

O escopo deste capítulo abrange algoritmos para seleção de modulação, núcleo e espectro (*modulation, core, and spectrum assignment (MCSA)*). O algoritmo **MCSA** proposto neste capítulo tem foco em implementar mecanismos para lidar com as limitações intra e inter núcleo, assim como em (Arpanaei et al. 2020), (Su et al. 2022), (Klinkowski e Jaworski 2022). Portanto, esta seção tem como objetivo detalhar alguns algoritmos **MCSA** com verificação de limitações inter e intra núcleo.

Su *et al.* propôs um algoritmo para escolha de modulação, núcleo e espectro denominado *dynamic impairment-aware RMCSA algorithm (DI-RMCSA)*. O objetivo do **DI-RMCSA** é suprimir a degradação da qualidade de transmissão, considerando a minimização de efeitos de camada física acumulados no caminho óptico (Su et al. 2022). Para isso, os autores introduzem o parâmetro de comprometimento dinâmico (*DI*), em que o parâmetro de comprometimento dinâmico do caminho óptico i é $DI_i = XCI_i + XT_i$. Portanto, o *DI* é a soma de outros parâmetros baseados no *crosstalk* e na interferência não linear *XCI*. Em seguida, o **DI-RMCSA** classifica os caminhos ópticos candidatos em uma lista de acordo com o valor de *DI* em ordem crescente. Por fim, o **DI-RMCSA** seleciona o primeiro caminho óptico candidato da lista que satisfaça os limites de **QoT** da rede.

Klinkowski *et al.* propôs o **OSNR-LA** para redes ópticas multi-núcleos (Klinkowski e Jaworski 2022). O **OSNR-LA** calcula a **SNR** do caminho óptico considerando o ruído **ASE**, a **NLI** e o *crosstalk*. Segundo (Klinkowski et al. 2020), a **SNR** do caminho óptico l que usa a rota p considera o número de enlaces (indexado por e), em que cada enlace é composto pelo número de *spans* da fibra (indexado por i) e é calculado

através da expressão $SNR_l = \left(\sum_{e \in p} \left(\sum_{i \in e} \frac{p_i^{ASE} + p_i^{NLI}}{P_{ch}} + \mu_e^{XT} \right) \right)^{-1}$, em que o valor de **NLI** é simplificado por $P_{ASE} = 2P_{NLI}$. O **OSNR-LA** verifica todas as possibilidades de caminhos ópticos candidatos em cada núcleo e garante níveis aceitáveis de **QoT** para todos os caminhos ópticos. Para isso, a verificação de **QoT** (com base no valor de **SNR**) é realizada para cada caminho óptico candidato e também para todos os caminhos ópticos já ativos na rede. Dentre os caminhos ópticos candidatos com nível aceitável de **QoT**, o **OSNR-LA** escolhe aquele em que o primeiro *slot* possui o menor índice dentre os demais.

8.2 O Algoritmo Ciente de Limitações Intra e Inter Núcleo para Escolha de Modulação, Núcleo e Espectro (CIA-MCSA)

Nesta seção é apresentado o algoritmo ciente de *crossstalk* e de limitações intra-núcleos para escolha de modulação, núcleo e espectro (*XT-aware and intra-core impairment-aware algorithm for modulation, core, and spectrum assignment* (**CIA-MCSA**)) (**Lacerda-Jr, Cartaxo e Soares 2023**). O **CIA-MCSA** é projetado para tratar o problema **MCSA**, portanto, a rota (dada por um algoritmo de roteamento) é uma das entradas do **CIA-MCSA**. Assim como o **ACiNE** (Capítulo 7), o **CIA-MCSA** possui duas fases: *i*) a fase de balanceamento, em que o **CIA-MCSA** agrupa os núcleos da fibra em grupos de prioridade; *ii*) a fase de busca, em que o **CIA-MCSA** busca, entre os caminhos ópticos candidatos, àquele com o menor nível de *crossstalk* e que não sofra com bloqueios de **OSNRN**, **OSNRO**, **XTN** e **XTO**.

Considerando que a estrutura de fibras multi-núcleo mais difundida é a *close-packed structure* (**Takeda et al. 2022**), os núcleos da fibra são divididos em dois grupos na fase de balanceamento do **CIA-MCSA**: os núcleos periféricos e os núcleos internos. Qualquer um dos núcleos internos geram (e sofrem) *crossstalk* em seis núcleos vizinhos (como mostrado na Figura 45). Por outro lado, os núcleos periféricos geram (e sofrem) *crossstalk* em um menor número de núcleos vizinhos. Por exemplo: no máximo três núcleos vizinhos em uma fibra de sete núcleos e no máximo quatro núcleos vizinhos em uma fibra de dezenove núcleos. Portanto, o **CIA-MCSA** prioriza o uso dos núcleos periféricos em detrimento dos núcleos internos, pois os núcleos periféricos possuem menos vizinhos e potencialmente geram menos *crossstalk*. Além da divisão em grupos, o **CIA-MCSA** agrupa os núcleos periféricos em dois subgrupos, em que cada subgrupo é composto por núcleos não adjacentes. Baseado na estratégia do **ABE** (Seção 5.2), o primeiro subgrupo deve priorizar o início do espectro (política *first fit*) e o segundo subgrupo deve priorizar o final do espectro (política *last fit*). Este esquema reduz a sobreposição entre *slots* de núcleos adjacentes e, conseqüentemente, o nível de

crosstalk na rede. Entre os núcleos internos, não há divisão em subgrupos, pois, mesmo que um núcleo interno esteja localizado em uma região mais central em relação a outro núcleo interno (ex: c_0 e c_1 na fibra de 19-núcleos da Figura 45), eles ainda possuem a mesma quantidade de vizinhos (seis vizinhos). A Figura 45 mostra a fase de balanceamento do CIA-MCSA para os núcleos periféricos de fibras de sete e dezenove núcleos. Na Figura 45, o primeiro subgrupo (subgrupo *first fit*) é composto pelos núcleos c_1, c_3, c_5 na fibra de sete núcleos e $c_7, c_9, c_{11}, c_{13}, c_{15}, c_{17}$ na fibra de dezenove núcleos. Por outro lado, o segundo subgrupo (subgrupo *last fit*) é composto pelos núcleos c_2, c_4, c_6 na fibra de sete núcleos e $c_8, c_{10}, c_{12}, c_{14}, c_{16}, c_{18}$ na fibra de dezenove núcleos. Apesar de outros trabalhos já utilizarem esquemas de priorização de núcleos (Tode e Hirota 2017), (Liu, Xiong e Chen 2020), o CIA-MCSA aprimora este conceito por combiná-lo com a divisão de grupos (núcleos periféricos e internos) e com a ciência das imperfeições da camada física implementada na segunda fase do CIA-MCSA (fase de busca).

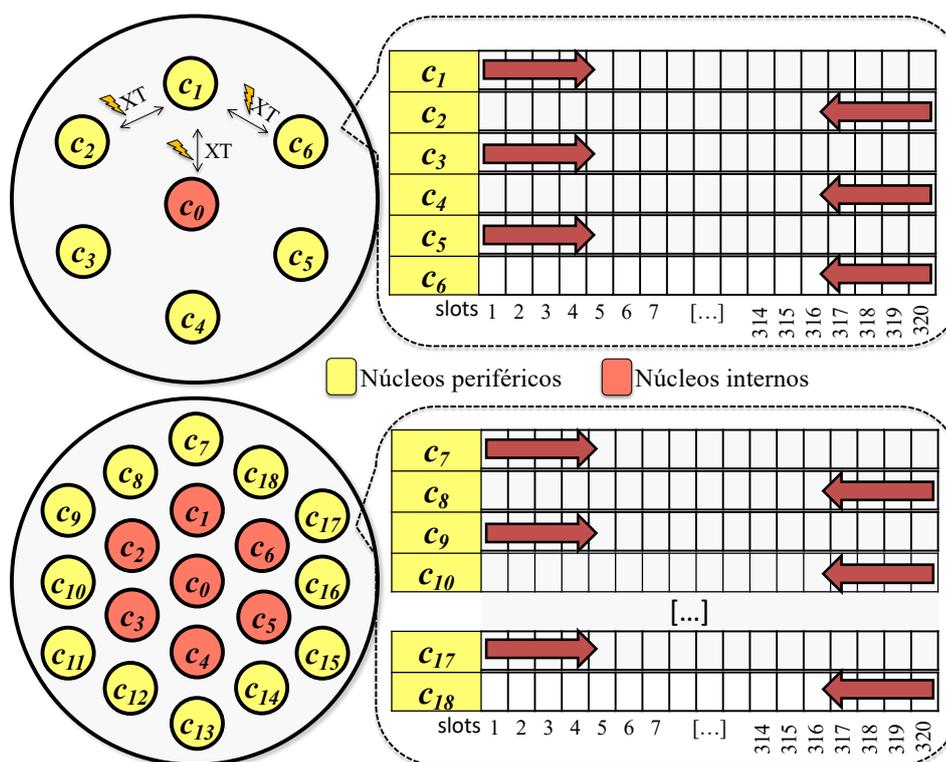


Figura 45 – Exemplo da fase de balanceamento do CIA-MCSA para fibras de sete e dezenove núcleos.

Na fase de busca, o CIA-MCSA escolhe o caminho óptico candidato considerando o nível de QoT deste caminho óptico e o nível de QoT dos caminhos ópticos já ativos na rede. Para lidar com os níveis de QoT, o CIA-MCSA implementa métodos para tratar o *crosstalk* inter-núcleo (Método XT) e a OSNR (Método OSNR) separadamente. Estes métodos previnem que os caminhos ópticos sofram com bloqueios de XTN, XTO, OSNRN e OSNRO. O Algoritmo 4 apresenta o pseudocódigo para o método que lida

com o *crosstalk*. Um caminho óptico candidato m e o conjunto de caminhos ópticos já ativos, $N_m^{(xt)}$, que sofrem *crosstalk* com a alocação de m são as entradas do Método XT. O Método XT retorna “verdadeiro” se ele puder alocar o caminho óptico m sem bloqueios de XTN e XTO. Por outro lado, o Método XT retorna “falso” se o nível de *crosstalk* do caminho óptico candidato m é maior que o limite de *crosstalk* definido para a rede (linha 4) ou se algum dos caminhos ópticos já ativos atingirem um nível de *crosstalk* maior que o limite de *crosstalk* definido para a rede (linha 10).

Algoritmo 4 : Método XT

Entrada: $m \leftarrow$ caminho óptico candidato; $N_m^{(xt)} \leftarrow$ conjunto de caminhos ópticos já ativos que sofrem interferência de m

```

1: armazena  $XT_{\mu,n}^{(tot)}$  de cada caminho óptico  $n \in N_m^{(xt)}$ 
2: calcula  $XT_{\mu,m}^{(tot)}$  do caminho óptico  $m$ 
3: if ( $XT_{\mu,m}^{(tot)} > XT_{\mu,th}$ ) then
4:   return FALSO
5: end if
6: for cada caminho óptico  $n \in N_m^{(xt)}$  do
7:   atualiza  $XT_{\mu,n}^{(tot)}$  de  $n$ , considerando a alocação do caminho óptico  $m$ 
8:   if ( $XT_{\mu,n}^{(tot)} > XT_{\mu,th}$ ) then
9:     restaura  $XT_{\mu,n}^{(tot)}$  de cada  $n \in N_m^{(xt)}$  para os valores da linha 1
10:    return FALSO
11:   end if
12: end for
13: restaura  $XT_{\mu,n}^{(tot)}$  de cada  $n \in N_m^{(xt)}$  para os valores da linha 1
14: return VERDADEIRO

```

O Algoritmo 5 apresenta o pseudocódigo para o método que trata as questões da OSNR (bloqueios de OSNRN e OSNRO). Neste caso, as entradas do Método OSNR são o caminho óptico candidato m e o conjunto de caminhos ópticos já ativos, $N_m^{(osnr)}$, que sofrem redução do nível de OSNR devido a alocação de m . O Método OSNR garante que o novo caminho óptico possua um nível de OSNR maior que o limite de OSNR definido para a rede somado a um incremento, denominado σ (linha 3). Este incremento σ torna o novo caminho óptico mais robusto, diminuindo a ocorrência de bloqueios do tipo OSNRO em futuras requisições. O conceito do incremento σ foi introduzido em trabalhos prévios, focados em fibras de único núcleo (Fontinele et al. 2017), (Lacerda-Jr et al. 2020). Nesta tese, uma série de simulações com diferentes valores de σ foram conduzidas para encontrar um valor de σ razoável para o CIA-MCSA. Esta análise é descrita no Capítulo 8.3.1. Tal como o Método XT, o Método OSNR retorna “verdadeiro” se for possível alocar o caminho óptico m sem bloqueios por OSNR. O Método OSNR retorna “falso” quando o nível de OSNR do caminho óptico candidato m é menor que o limite de OSNR (somado ao σ) definido para a rede (linha 4) ou quando o nível de OSNR de pelo menos um dos caminhos ópticos já ativos fique menor que o limite de OSNR estabelecido para a rede (linha 10).

Algoritmo 5 : Método OSNR

Entrada: $m \leftarrow$ caminho óptico candidato; $N_m^{(osnr)} \leftarrow$ conjunto de caminhos ópticos já ativos que sofrem impacto de OSNR devido a alocação de m

```

1: armazena  $OSNR_n$  de cada caminho óptico  $n \in N_m^{(osnr)}$ 
2: calcula  $OSNR_m$  do caminho óptico  $m$ 
3: if ( $OSNR_m < (OSNR_{th} + \sigma)$ ) then
4:   return FALSO
5: end if
6: for cada caminho óptico  $n \in N_m^{(osnr)}$  do
7:   atualiza  $OSNR_n$  de  $n$ , considerando a alocação do caminho óptico  $m$ 
8:   if ( $OSNR_n < OSNR_{th}$ ) then
9:     restaura  $OSNR_n$  de cada  $n \in N_m^{(osnr)}$  para os valores da linha 1
10:    return FALSO
11:   end if
12: end for
13: restaura  $OSNR_n$  de cada  $n \in N_m^{(osnr)}$  para os valores da linha 1
14: return VERDADEIRO

```

A Figura 46 apresenta um exemplo do uso do σ pelo CIA-MCSA. Neste exemplo, três caminhos ópticos candidatos possuem níveis de OSNR distintos e usam o mesmo formato de modulação, com limite de OSNR de 10 dB. O caminho óptico candidato 1 é desconsiderado pelo algoritmo por possuir um nível de OSNR menor que o limite de OSNR. Apesar do caminho óptico candidato 3 possuir um nível de OSNR maior que limite de OSNR, o nível de OSNR do caminho óptico candidato 3 está próximo do limite de OSNR, podendo torna-se menor que o limite de OSNR após a alocação de outro caminho óptico (próxima requisição). Neste caso, este caminho óptico futuro será bloqueado por OSNRO. Portanto, a escolha de um caminho óptico com uma margem σ acima do limite de OSNR (ex: candidato 2) torna este caminho óptico mais robusto, evitando a ocorrência de bloqueios por OSNRO para os caminhos ópticos vindouros.

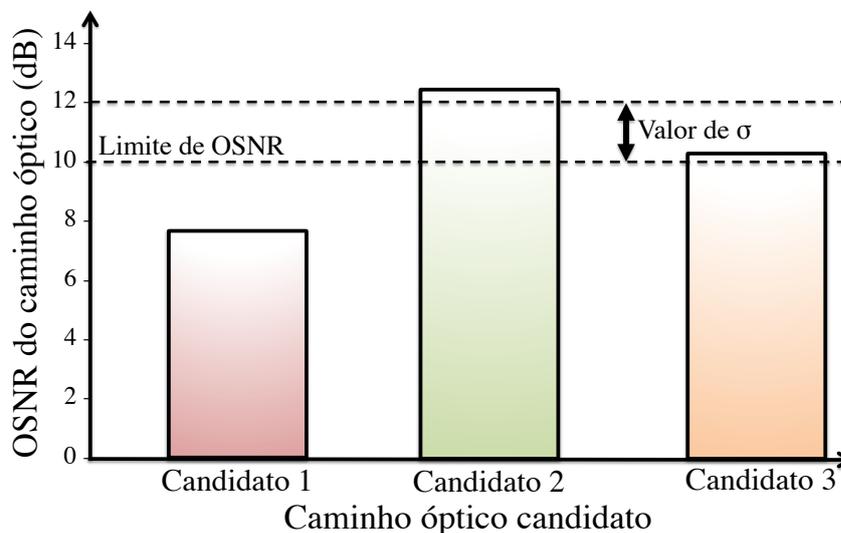


Figura 46 – Exemplo do uso do σ pelo algoritmo CIA-MCSA.

O Algoritmo 6 apresenta o pseudocódigo para a fase de busca do CIA-MCSA. Nesta fase, o CIA-MCSA verifica todas as possibilidades de caminhos ópticos candidatos originados da combinação de cada formato de modulação, cada núcleo e todos os *slots* de frequência disponíveis (livres, contíguos e contínuos) para cada núcleo. Para melhorar a leitura, o método para seleção de núcleo e espectro é apresentado no Algoritmo 7, desacoplado do algoritmo que apresenta a fase de busca do CIA-MCSA (Algoritmo 6).

Algoritmo 6 : CIA-MCSA - Fase de Busca

Entrada: $r \leftarrow$ rota; $MOD \leftarrow$ lista de formatos de modulação; $C \leftarrow$ lista de núcleos

- 1: criar as seguintes variáveis: melhor formato de modulação mod_{best} ; melhor núcleo c_{best} ; melhor espectro s_{best}
- 2: ordenar MOD em ordem decrescente do valor de M
- 3: **for** cada formato de modulação $mod \in MOD$ **do**
- 4: executar Método CSA($r, mod, lista de núcleos periféricos$)
- 5: **if** (retorno de Método CSA $\neq null$) **then**
- 6: armazena: $mod_{best} \leftarrow mod_b; c_{best} \leftarrow c_b; s_{best} \leftarrow s_b$
- 7: **else**
- 8: executar Método CSA($r, mod, lista de núcleos internos$)
- 9: armazena: $mod_{best} \leftarrow mod_b; c_{best} \leftarrow c_b; s_{best} \leftarrow s_b$
- 10: **end if**
- 11: **if** ($mod_{best}, c_{best}, s_{best} \neq null$) **then**
- 12: **return** $mod_{best}, c_{best}, s_{best}$
- 13: **end if**
- 14: **end for**
- 15: **return** requisição bloqueada

O Algoritmo 6 cria as variáveis mod_{best} , c_{best} e s_{best} para armazenar o melhor formato de modulação, o melhor núcleo e o melhor conjunto de *slots*, respectivamente. Então, para cada formato de modulação em ordem decrescente do valor de M , o Algoritmo 6 executa o Método CSA (Algoritmo 7) para selecionar uma solução de núcleo e espectro (linhas 3-10). O Método CSA verifica todas as possibilidades de caminhos ópticos candidatos (livre, contíguo e contínuo) em cada núcleo. Um caminho óptico candidato é verificado em cada iteração (linhas 2 e 4 no Algoritmo 7). Tal verificação consiste em: *i*) executar o Método OSNR e o Método XT (linhas 7 e 8 respectivamente) para verificar a possibilidade de bloqueio por XTN, XTO, OSNRN e OSNRO; *ii*) armazenar o caminho óptico candidato se ele possuir o menor nível de *crosstalk* até o momento, usando as variáveis mod_{best} , c_{best} e s_{best} (linhas 11, 16 e 21 no Algoritmo 7). Em cada iteração, se o caminho óptico candidato avaliado possuir o mesmo nível de *crosstalk* do caminho óptico armazenado, aquele mais próximo da região de prioridade (definida na fase de balanceamento) é armazenado. Após verificar todos os candidatos, o Método CSA retorna o caminho óptico armazenado para o Algoritmo 6. Se o Algoritmo 7 encontrar um caminho óptico, o Algoritmo 6 retorna este

Algoritmo 7 : Método CSA

Entrada: $r \leftarrow$ rota; $mod \leftarrow$ formato de modulação; $C \leftarrow$ lista de núcleos

```

1: criar as seguintes variáveis: melhor formato de modulação  $mod_b$ ; melhor núcleo  $c_b$ ;
   melhor espectro  $s_b$ ; menor XT  $xt_b$ ; lista de caminhos ópticos candidatos  $\Gamma$ 
2: for cada núcleo  $c \in C$  do
3:    $\Gamma \leftarrow$  lista com todas as possibilidades de caminhos ópticos candidatos (livres,
   contíguos e contínuos) assumindo  $r$ ,  $mod$  e  $c$ .
4:   for cada caminho óptico candidato  $m \in \Gamma$  do
5:     calcula  $XT_{\mu,m}^{(tot)}$  do caminho óptico  $m$ 
6:     calcula  $N_m^{(xt)}$  e  $N_m^{(osnr)}$ 
7:     if (Método OSNR( $m$ ,  $N_m^{(osnr)}$ )) then
8:       if (Método XT( $m$ ,  $N_m^{(xt)}$ )) then
9:         if ( $c \in$  subgrupo firstfit dos núcleos periféricos) then
10:          if ( $XT_{\mu,m}^{(tot)} < xt_b$ ) then
11:             $mod_b \leftarrow mod$ ;  $c_b \leftarrow c$ ;  $s_b \leftarrow$  slots de  $m$ ;  $xt_b \leftarrow XT_{\mu,m}^{(tot)}$ 
12:          end if
13:        end if
14:        if ( $c \in$  subgrupo lastfit dos núcleos periféricos) then
15:          if ( $XT_{\mu,m}^{(tot)} \leq xt_b$ ) then
16:             $mod_b \leftarrow mod$ ;  $c_b \leftarrow c$ ;  $s_b \leftarrow$  slots de  $m$ ;  $xt_b \leftarrow XT_{\mu,m}^{(tot)}$ 
17:          end if
18:        end if
19:        if ( $c \in$  grupo dos núcleos internos) then
20:          if ( $XT_{\mu,m}^{(tot)} < xt_b$ ) then
21:             $mod_b \leftarrow mod$ ;  $c_b \leftarrow c$ ;  $s_b \leftarrow$  slots de  $m$ ;  $xt_b \leftarrow XT_{\mu,m}^{(tot)}$ 
22:          end if
23:        end if
24:      end if
25:    end if
26:  end for
27: end for
28: return  $mod_b, c_b, s_b$ 

```

caminho óptico como resultado do CIA-MCSA. Caso contrário, o próximo formato de modulação é selecionado e o ciclo se repete. Se todos os formatos de modulação forem analisados e nenhuma solução for encontrada pelo Algoritmo 7, a requisição é bloqueada (linha 15 no Algoritmo 6). Assim, o CIA-MCSA retorna a solução com o formato de modulação espectralmente mais eficiente possível, isto é, o formato de modulação com o maior valor de M possível. Durante a fase de busca, os núcleos periféricos são priorizados em detrimento dos núcleos internos. Como os núcleos internos sofrem e produzem interferência em um maior número de núcleos vizinhos, os núcleos internos serão avaliados apenas se a busca nos núcleos periféricos não retornar solução (linhas 5-10 no Algoritmo 7).

A complexidade de tempo do CIA-MCSA é definida pela fase de busca e a análise de cada formato de modulação, núcleo e possibilidade de caminho óptico. A avaliação dos caminhos ópticos já ativos também contribuem para a complexidade. Portanto, a complexidade do CIA-MCSA é $O(|MOD| \cdot |C| \cdot |M_c| \cdot |N_{XT}| \cdot |N_{OSNR}|)$, em que $|MOD|$ é o número de formatos de modulação disponíveis, $|C|$ é o número de núcleos da fibra, $|M_c|$ é o número de caminhos ópticos candidatos no núcleo c , sendo $|M_c| \leq |S|$ e $|S|$ sendo o número de *slots* no núcleo c . $|N_{XT}|$ é o número de caminhos ópticos que sofrem *crosstalk* do caminho óptico candidato. $|N_{OSNR}|$ é o número de caminhos ópticos que sofrem interferências intra-núcleos do caminho óptico candidato, sendo $|N_{OSNR}| < \lceil S/2 \rceil$.

8.3 Avaliação de Desempenho

Nesta seção é apresentada a avaliação de desempenho de sistemas relacionada ao problema de alocação de modulação, núcleo e espectro. Tal seção é dividida em duas subseções, sendo elas: *i*) avaliação dos possíveis valores de σ para o algoritmo CIA-MCSA na Seção 8.3.1; e *ii*) apresentação dos resultados numéricos e discussões oriundas da comparação do algoritmo proposto em relação a outros algoritmos na Seção 8.3.2.

A ferramenta de simulação e o cenário de avaliação de desempenho são os mesmos apresentadas na Seção 5.3.1 e na Seção 5.3.2, respectivamente. Para evitar redundância, tais informações não são reapresentadas neste capítulo.

8.3.1 Ajuste de Sigma para o CIA-MCSA

A primeira investigação deste capítulo busca encontrar um valor razoável de σ para o CIA-MCSA. Neste contexto, simulações foram executadas para o CIA-MCSA com diferentes valores de σ na topologia NSFNet em um cenário de alto *crosstalk*. Estes resultados são apresentados na Figura 47. Resultados para outros cenários (baixo *crosstalk* e Topologia EURO28) apresentaram comportamento equivalente ao da Figura 47.

Como esperado, a seleção de um novo caminho óptico com um nível de OSNR e um incremento σ acima do limite de OSNR reduz a probabilidade de bloqueio. Para uma carga de 1600 Erlangs, o CIA-MCSA com $\sigma = 0$ dB possui 40,13% do seu bloqueio causado por OSNRO. Isso ocorre porque, neste caso, os caminhos ópticos já ativos possuem seus níveis de OSNR próximo do limite de OSNR da rede, o que cria uma situação propícia para que os caminhos ópticos vindouros sofram bloqueios por OSNRO devido ao impacto nos caminhos ópticos já ativos. Bloqueios causados por OSNRO nas simulações com σ igual a 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 dB são iguais a zero. No entanto,

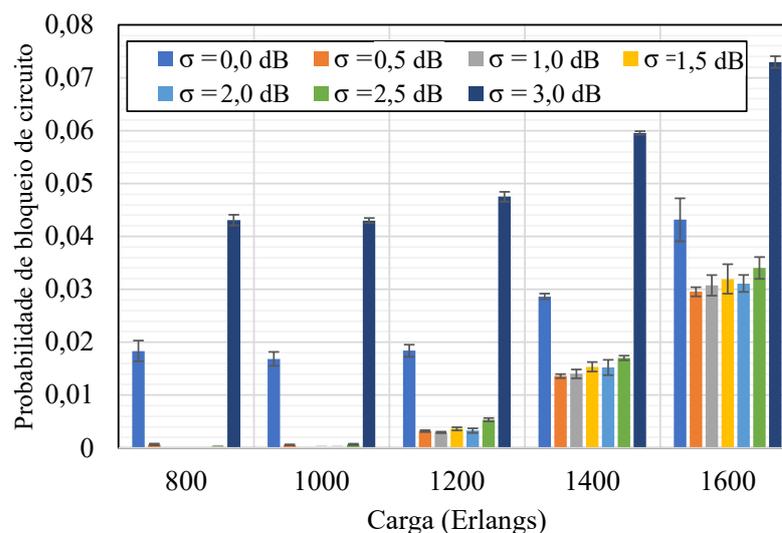


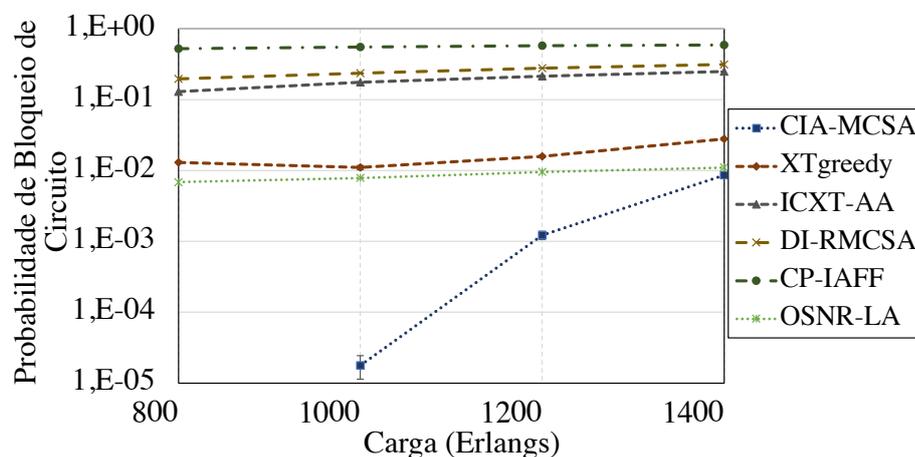
Figura 47 – Probabilidade de bloqueio de circuito para o CIA-MCSA com diferentes cargas e valores de σ , na Topologia NSFNet com HXT.

se o valor σ é elevado (ex: 3 dB ou mais), o CIA-MCSA pode ser incapaz de encontrar um caminho óptico que cumpra os requerimentos de OSNR somado ao incremento σ . Este comportamento justifica o $\sigma = 3,0$ dB possuir o maior bloqueio em todos os pontos de carga da Figura 47. Para melhor visualização do gráfico, a granularidade utilizada foi de 0,5 dB. Entretanto, nos experimentos foi observado um aumento gradual de bloqueio para valores de σ entre 2,5 dB e 3,0 dB (2,6, 2,7, 2,8 e 2,9 dB), tal como um aumento de bloqueio para valores de σ maiores que 3,0 dB. A partir dos resultados mostrados na Figura 47, conclui-se que o valor de $\sigma = 0,5$ dB alcança o menor valor de probabilidade de bloqueio. Portanto, a partir deste ponto, todos os resultados do CIA-MCSA consideram o valor de $\sigma = 0,5$ dB.

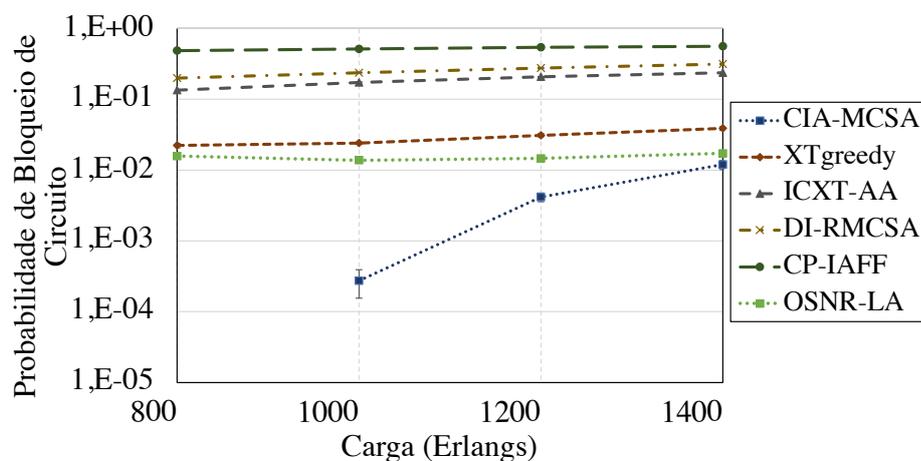
8.3.2 Resultados Numéricos e Discussões

O desempenho do CIA-MCSA é comparado com o desempenho de outros trabalhos da literatura que tratam o problema RMCSA, sendo eles: *i*) a estratégia de alocação de núcleo CP (Fujii et al. 2014) em conjunto com a estratégia de alocação de espectro IAFF proposta por (Tode e Hirota 2017), denominado *core prioritization* com *intra-area FF* (CP-IAFF); *ii*) o algoritmo ICXT-AA proposto por (Liu, Xiong e Chen 2020); *iii*) o algoritmo DI-RMCSA proposto por (Su et al. 2022); *iv*) o algoritmo XTgreedy-modificado proposto por (Lobato et al. 2019); e *v*) o algoritmo OSNR-LA proposto por (Klinkowski e Jaworski 2022). O algoritmo XTgreedy foi modificado para torna-lo ciente de limitações intra-núcleos, escolhendo apenas caminhos ópticos com OSNR acima do limite de OSNR da rede. Tal modificação foi realizada para tornar a comparação com o CIA-MCSA mais justa, além de mostrar que a ciência de limitações intra-núcleos não é o único fator que determina o bom desempenho do CIA-MCSA. Todos os algoritmos nesta seção realizam o roteamento a partir do algoritmo de

Dijkstra (Dijkstra 1959). Os algoritmos que não possuem método próprio de escolha de modulação (ex: CP-IAFF) e foram programados para escolher o formato de modulação mais espectralmente eficiente possível considerando os limites de OSNR. A seguir são apresentados os resultados da comparação do CIA-MCSA com outros algoritmos.



(a) NSFNet (HXT)

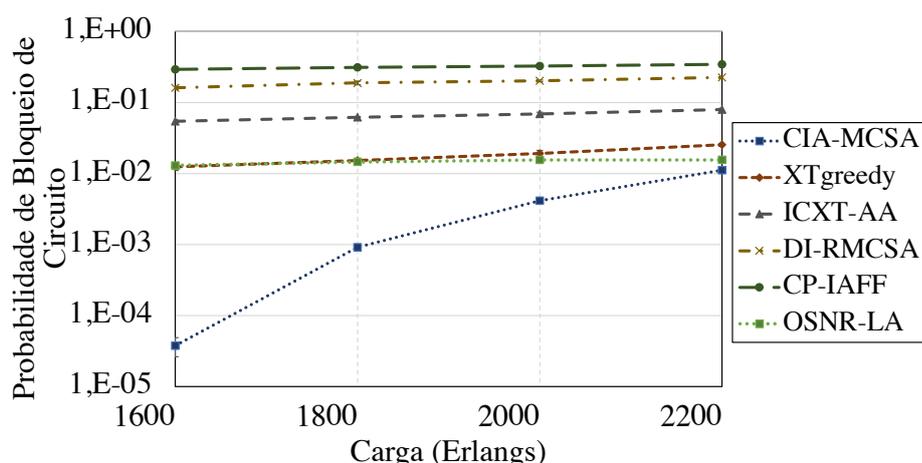


(b) EURO28 (HXT)

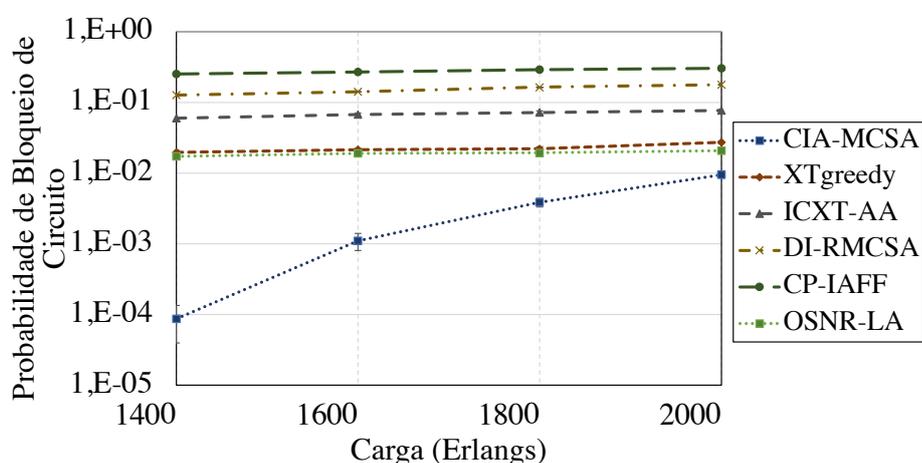
Figura 48 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBC em cenário HXT.

A Figura 48 apresenta a PBC para o cenário HXT. Todos os gráficos exibem a performance do CIA-MCSA entre uma probabilidade de bloqueio próxima a zero e não maior que 0,01, que é um limite máximo comumente aceitável para probabilidade de bloqueio (Walkowiak et al. 2020). No cenário HXT, o CIA-MCSA alcança uma menor PBC comparado a todos os outros algoritmos na topologia NSFNet e também na topologia EURO28.

A Figura 49 apresenta a PBC para o cenário LXT. No cenário LXT, o CIA-MCSA manteve o melhor desempenho, garantindo uma menor PBC que todos os outros



(a) NSFNet (LXT)



(b) EURO28 (LXT)

Figura 49 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBC em cenário LXT.

algoritmos na topologia NSFNet e também na topologia EURO28. Os resultados das Figuras 48 e 49 evidenciam que o CIA-MCSA possui bom desempenho em cenários em que o *crosstalk* é o maior fator limitante da camada física (cenário HXT) e também em cenários que as limitações intra-núcleos passam a ter maior impacto (cenário LXT).

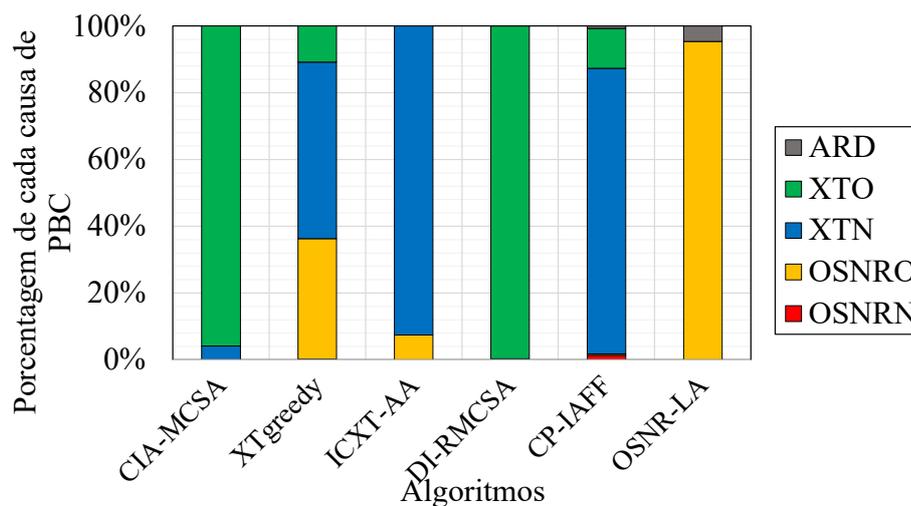
Tabela 21 – Ganho de probabilidade de bloqueio de circuito do CIA-MCSA comparados com outros algoritmos no maior ponto de carga de cada cenário.

	HXT NSFNet	HXT EURO28	LXT NSFNet	LXT EURO28
XTgreedy	69,34 %	69,18 %	56,13 %	65,25 %
ICXT-AA	96,56 %	94,95 %	86,07 %	87,68 %
DI-RMCSA	97,28 %	96,20 %	95,09 %	94,64 %
CP-IAFF	98,56 %	97,87 %	96,77 %	96,88 %
OSNR-LA	22,20 %	30,49 %	28,64 %	54,16 %

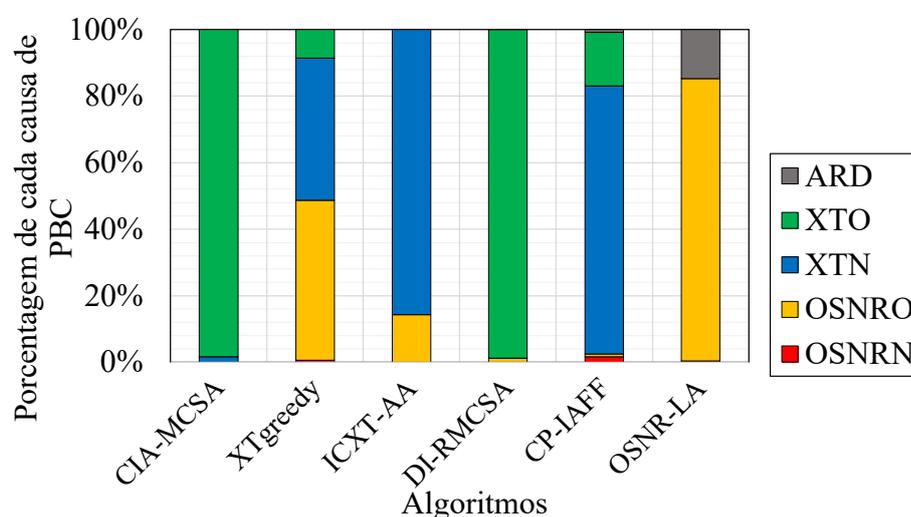
A Tabela 21 apresenta os ganhos mínimos do CIA-MCSA em relação a outros algoritmos nos cenários HXT e LXT, no último ponto de carga observado. O ganho do CIA-MCSA é definido como $GANHO_{m,n} = (\Upsilon_n - \Upsilon_m) / \Upsilon_n$, em que Υ_m é o resultado do CIA-MCSA (PBC ou PBB) e Υ_n é o resultado de outro algoritmo. No cenário HXT, o menor ganho do CIA-MCSA ocorreu na topologia NSFNet, em que o CIA-MCSA alcançou um ganho em termos de PBC de pelo menos 22,20% em relação ao OSNR-LA em uma carga de 1400 Erlangs. Já no cenário LXT, o menor ganho do CIA-MCSA também ocorreu na topologia NSFNet, em que o CIA-MCSA alcançou um ganho em termos de PBC de pelo menos 28,64% em relação ao OSNR-LA em uma carga de 2200 Erlangs. No maior ganho, o CIA-MCSA alcançou mais de 98% de ganho em relação ao CP-IAFF, como mostrado na Tabela 21. O CIA-MCSA alcança um ganho médio de PBC de pelo menos 33,87% em relação ao algoritmo mais competitivo (OSNR-LA). Este valor é obtido através da média da linha “OSNR-LA” na Tabela 21. Portanto, o CIA-MCSA alcança menor PBC do que qualquer outro algoritmo nos cenários avaliados. Para entender o motivo do ganho do CIA-MCSA, torna-se necessário investigar as causas dos bloqueios de cada algoritmo nos cenários avaliados.

A Figura 50 apresenta a porcentagem de cada componente que compõe a probabilidade de bloqueio de circuito de cada algoritmo, no cenário HXT e no maior ponto de carga. Tais componentes são calculadas da seguinte forma: Para cada requisição, o simulador verifica se o caminho óptico retornado pelo algoritmo RMCSA em termos de ARD, OSNRN, OSNRO, XTN e XTO (nesta ordem). Se um bloqueio de requisição ocorre, o simulador armazena qual a causa deste bloqueio e, ao final da simulação, apresenta quantas vezes cada tipo de bloqueio ocorreu. No cenário HXT, a causa de bloqueio predominante é devido ao *crossstalk*, seja XTN ou XTO. Por exemplo, 92,60% do bloqueio sofrido pelo algoritmo ICXT-AA na topologia NSFNet é causado por XTN, enquanto que 98,80% do bloqueio sofrido pelo algoritmo DI-RMCSA na topologia EURO28 é causado por XTO. Em valores absolutos, o CIA-MCSA é o algoritmo que sofre com menos bloqueio por *crossstalk*, com menos de 0,01 de probabilidade de bloqueio de circuito. Isto ocorre porque o CIA-MCSA implementa procedimentos para selecionar caminhos ópticos que obedecem aos requisitos de XTN e XTO. Além disso, o CIA-MCSA prioriza diferentes regiões do espectro para núcleos adjacentes, o que mitiga a sobreposição espectral (e conseqüentemente o *crossstalk*) para caminhos ópticos futuros. Portanto, se o CIA-MCSA apresenta bloqueio por *crossstalk* na Figura 50, não existe um caminho óptico candidato (dentre todas as possibilidades) que cumpra com os requisitos de *crossstalk* da rede.

No cenário LXT (Figura 51), o bloqueio por OSNR inadequado (OSNRN e OSNRO) aumenta para os algoritmos XTgreedy, ICXT-AA, DI-RMCSA, CP-IAFF e OSNR-LA. Por exemplo, na topologia NSFNet, 56,39% do bloqueio sofrido pelo XTgreedy e 23,72% do bloqueio sofrido pelo ICXT-AA são causados por OSNRO. Já na topologia



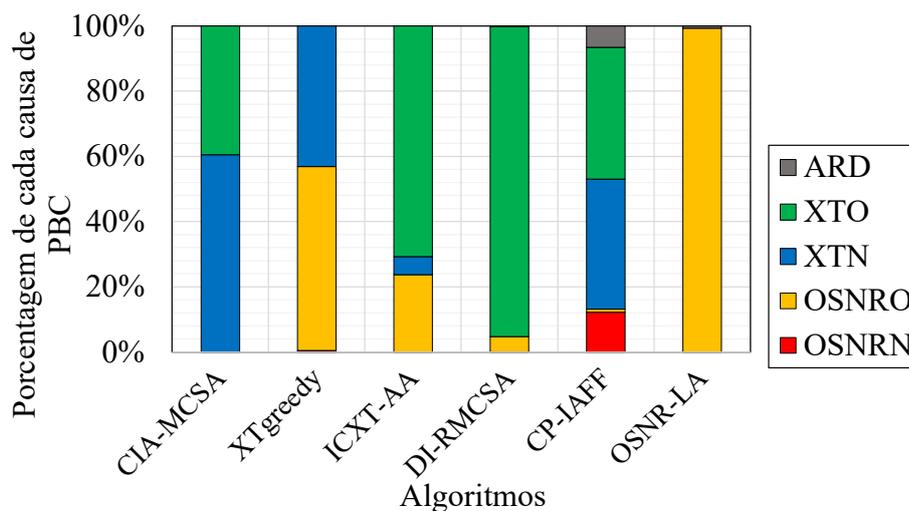
(a) NSFNet - 1400 Erlangs (HXT)



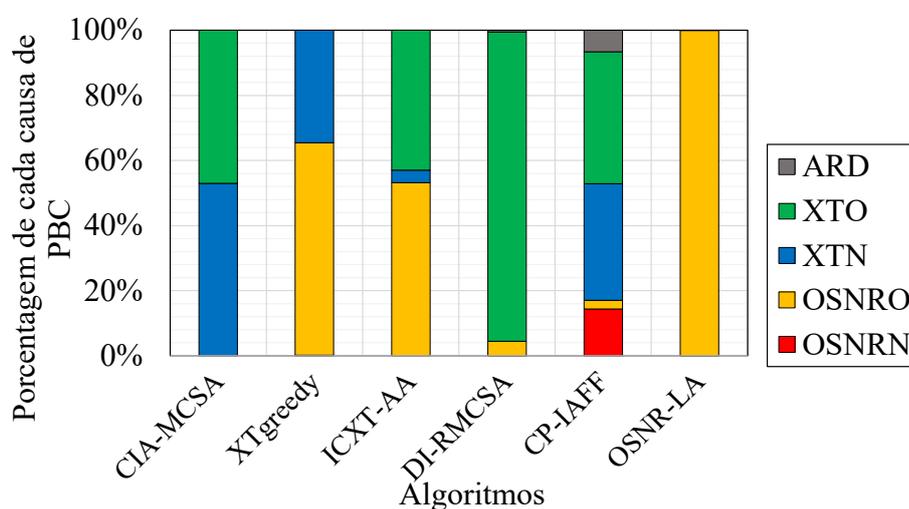
(b) EURO28 - 1400 Erlangs (HXT)

Figura 50 – Porcentagem de cada causa de bloqueio para os algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBC e cenário HXT.

EURO28, 65,26% do bloqueio sofrido pelo **XTgreedy** e 53,24% do bloqueio sofrido pelo **ICXT-AA** são causados por **OSNRO**. Os algoritmos **CIA-MCSA**, **DI-RMCSA**, **XTgreedy** (modificado nesta seção) e **OSNR-LA** verificam se o nível de **OSNR** do novo caminho óptico é maior que o limite de **OSNR** estabelecido para a rede. Esta verificação faz com que os algoritmos citados não sofram com bloqueios por **OSNRN**. Entretanto, os algoritmos **DI-RMCSA** e **XTgreedy** não analisam o nível de **OSNR** dos caminhos ópticos já ativos na rede em relação a alocação de um novo caminho óptico, o que ocasiona bloqueios por **OSNRO** para estes algoritmos. O **CIA-MCSA** verifica o **OSNR** em relação aos caminhos ópticos já ativos e também torna todos os caminhos ópticos mais robustos devido a adição do incremento σ . O incremento σ faz com que os caminhos ópticos sejam menos suscetíveis a excederem seus limites de **OSNR** quando outros caminhos ópticos são alocados, diminuindo o bloqueio por **OSNR** (como discutido na Seção 8.3.1).



(a) NSFNet - 2200 Erlangs (LXT)



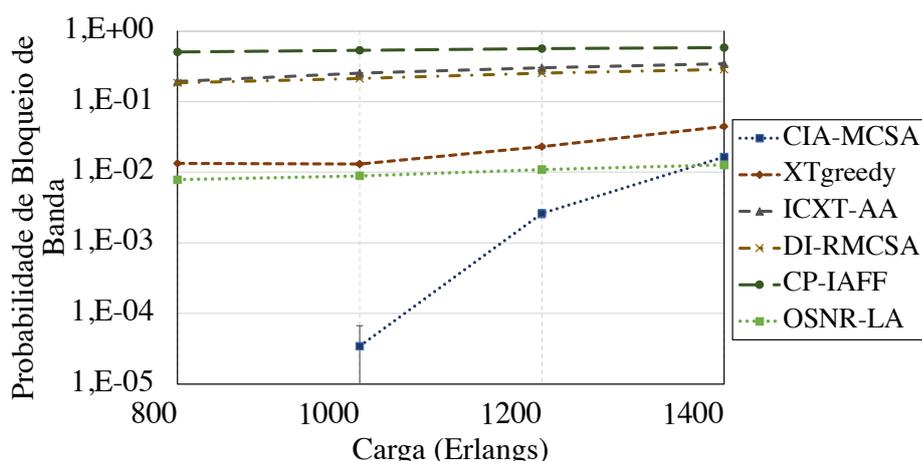
(b) EURO28 - 2000 Erlangs (LXT)

Figura 51 – Porcentagem de cada causa de bloqueio para os algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBC e cenário LXT.

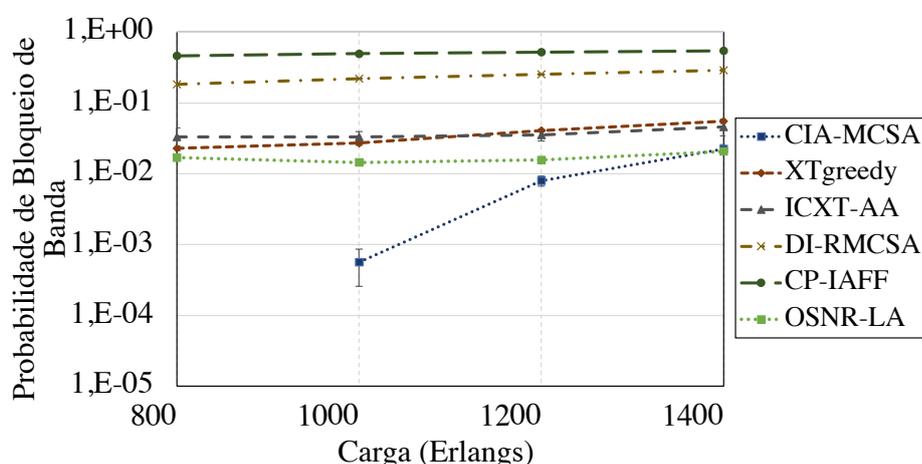
De forma geral, o bloqueio por **ARD** pouco impacta nos algoritmos avaliados. Isto ocorre porque os efeitos de camada física limitam a utilização da rede, não permitindo que a rede atinja um estado de ausência de recursos.

A Figura 52 apresenta a probabilidade de bloqueio de banda em um cenário com alta incidência de *crossstalk*. Tais resultados são similares aos resultados de probabilidade de bloqueio de circuito para **HXT**, apresentados na Figura 48.

A Figura 53 apresenta a **PBB** em um cenário com baixa incidência de *crossstalk*. Similar aos resultados de **PBC**, o **CIA-MCSA** alcança a menor **PBB** dentre todos os algoritmos considerados em uma janela de até 0,01 de **PBB** (limite aceitável na literatura (Walkowiak et al. 2020)). Este resultado mostra que o **CIA-MCSA** garante que menos dados são bloqueados na rede. Em outras palavras, os resultados indicam que



(a) NSFNet (HXT)



(b) EURO28 (HXT)

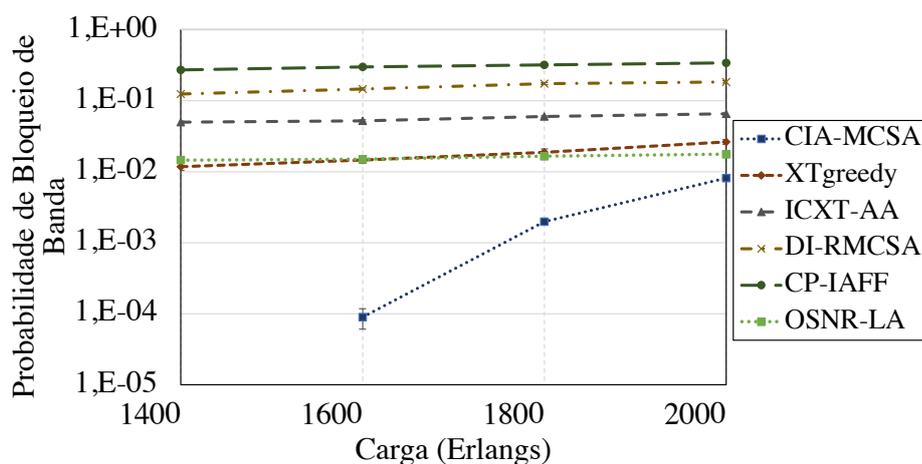
Figura 52 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBB em cenário HXT.

o **CIA-MCSA** garante que mais tráfego pode ser transportado na rede.

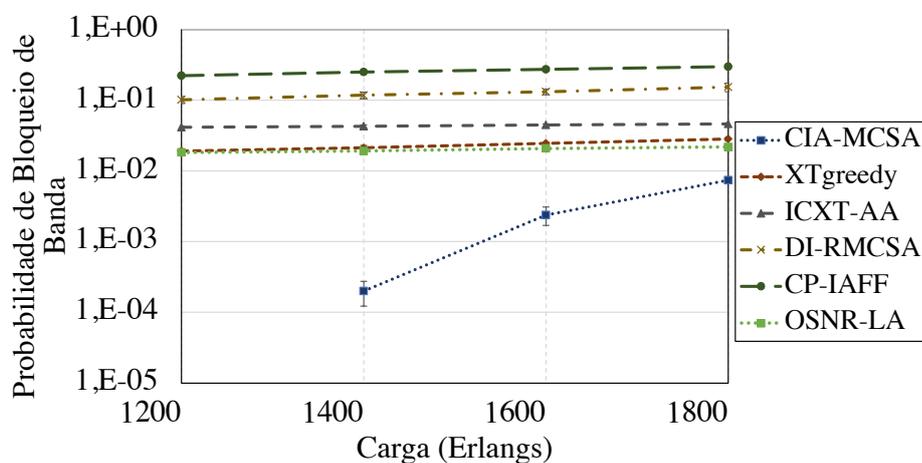
Tabela 22 – Ganho de probabilidade de bloqueio de banda do CIA-MCSA comparados com outros algoritmos no maior ponto de carga de cada cenário.

	HXT NSFNet	HXT EURO28	LXT NSFNet	LXT EURO28
XTgreedy	62,94 %	59,66 %	69,21 %	73,68 %
ICXT-AA	95,20 %	92,98 %	87,58 %	83,91 %
DI-RMCSA	94,23 %	92,27 %	95,59 %	95,15 %
CP-IAFF	97,18 %	95,92 %	97,62 %	97,52 %
OSNR-LA	-29,39 %	-7,64 %	53,98 %	66,04 %

A Tabela 22 mostra o menor ganho de PBB do **CIA-MCSA** em relação aos outros algoritmos avaliados. Destaca-se que para duas situações o **OSNR-LA** ultrapassou o **CIA-MCSA**. Entretanto, estes resultados são logo após os algoritmos passarem a



(a) NSFNet (LXT)

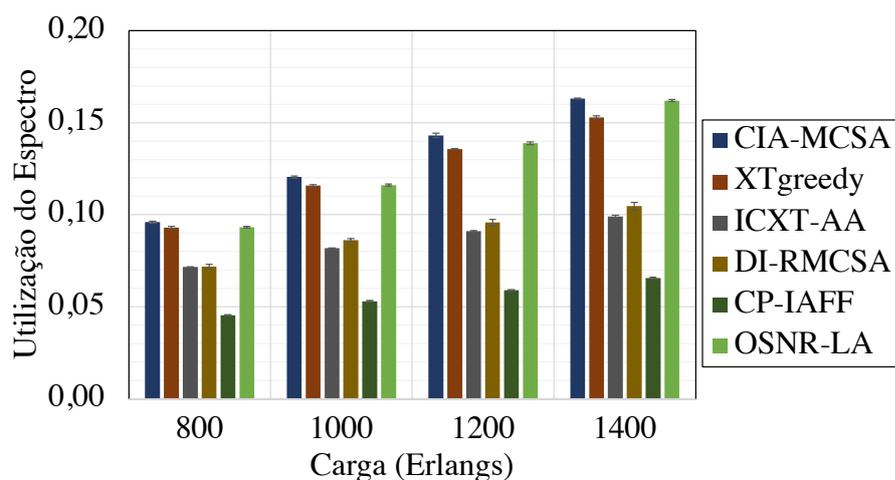


(b) EURO28 (LXT)

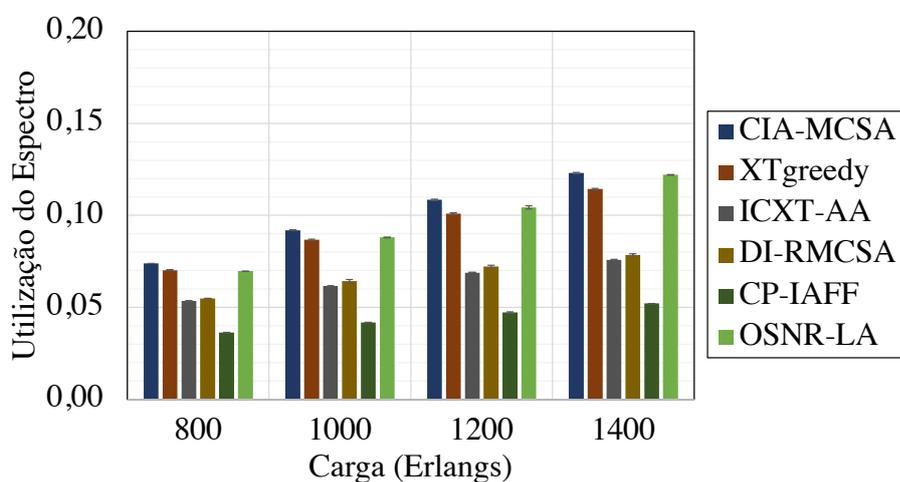
Figura 53 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de PBB em cenário LXT.

marca de 0,01 de PBB, o que configura um cenário de bloqueio inaceitável para ambos os algoritmos. O CIA-MCSA alcançou um ganho médio em termos de PBB de pelo menos 20,74% em relação ao algoritmo mais competitivo (OSNR-LA). Este valor é obtido pela média da linha “OSNR-LA” na Tabela 22. Portanto, o CIA-MCSA apresenta um bom desempenho não apenas considerando o número de requisições atendidas (PBC), mas também em relação a quantidade de dados transportados na rede (PBB).

A seguir, são apresentadas as informações sobre a utilização do espectro (UE) dos algoritmos. Esta métrica é definida como a razão entre o número de *slots* de frequência alocados e o número total de *slots* de frequência da rede. Nesta tese, o formato de modulação espectralmente mais eficiente é escolhido para os algoritmos avaliados. Portanto, neste contexto, uma maior UE significa uma melhor gestão dos recursos da rede (Su et al. 2022, Walkowiak et al. 2020).



(a) NSFNet (HXT)



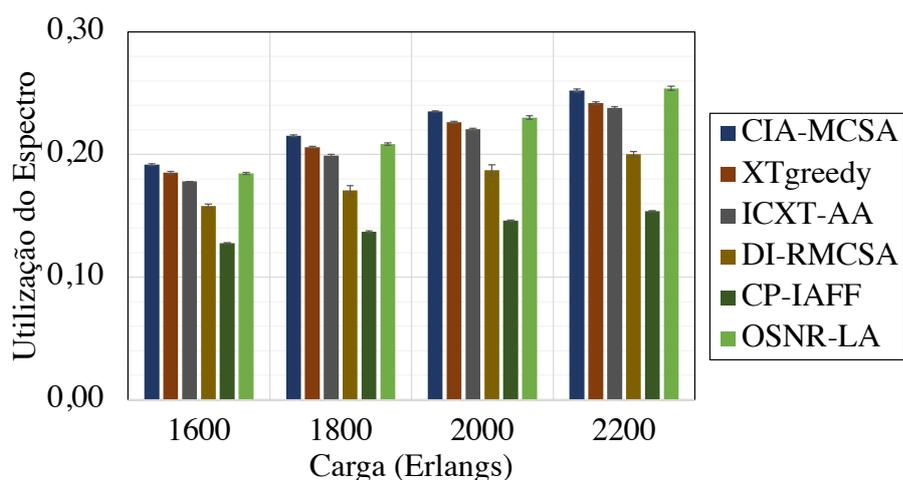
(b) EURO28 (HXT)

Figura 54 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de UE em cenário HXT.

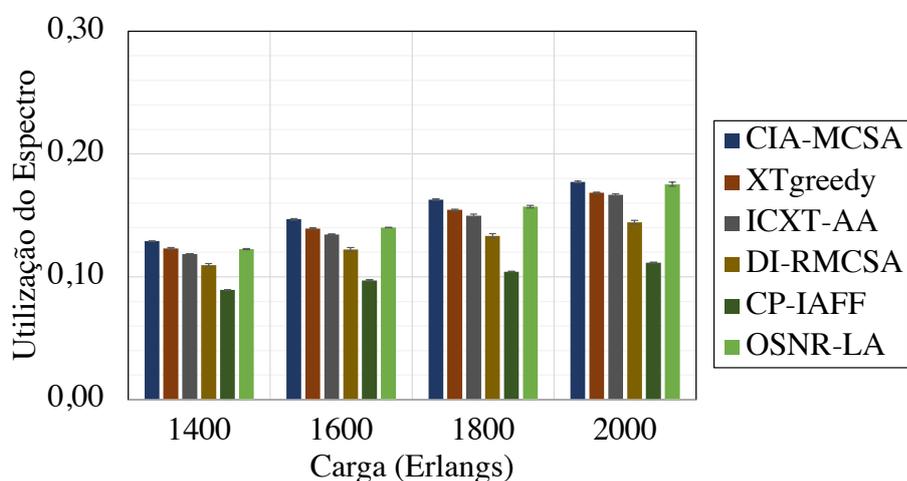
A Figura 54 apresenta a UE para o cenário de alta incidência de *crosstalk*. Neste cenário, o CIA-MCSA alcançou uma maior UE do que os outros algoritmos, o que significa que o CIA-MCSA é capaz de alocar mais *slots* de frequência na rede em relação a outros algoritmos (sob a mesma carga de tráfego).

A Figura 55 apresenta a UE para o cenário de menor incidência de *crosstalk*. Neste cenário, os algoritmos obtiveram comportamento similar ao cenário HXT. Considerando o uso do formato de modulação mais espectralmente eficiente possível por todos os algoritmos, estes resultados mostram que o CIA-MCSA é capaz de lidar de forma mais eficiente com o espectro óptico, reduzindo recursos ociosos e atendendo mais clientes (ou clientes com uma maior demanda de taxa de *bits*).

A UE adicional do CIA-MCSA comparada a outros algoritmos é apresentada



(a) NSFNet (LXT)



(b) EURO28 (LXT)

Figura 55 – Algoritmos de alocação de modulação, núcleo e espectro em termos de UE em cenário LXT.

Tabela 23 – Utilização de espectro adicional do CIA-MCSA comparado com outros algoritmos e considerando a média de todos os pontos de carga.

	HXT NSFNet	HXT EURO28	LXT NSFNet	LXT EURO28
XTgreedy	4,82 %	6,54 %	4,09 %	5,16 %
ICXT-AA	50,81 %	51,73 %	7,11 %	8,21 %
DI-RMCSA	44,66 %	46,11 %	24,77 %	20,66 %
CP-IAFF	132,42 %	122,28 %	58,05 %	52,64 %
OSNR-LA	2,62 %	3,73 %	2,14 %	3,69 %

na Tabela 23. No cenário HXT, o CIA-MCSA obteve uma média de UE (considerando todos os quatro pontos de carga) 2,62% maior que o OSNR-LA na topologia NSFNet e 3,73% maior que o OSNR-LA na topologia EURO28. Esta UE adicional é maior quando comparada aos outros algoritmos. No cenário LXT, os menores acréscimos obtidos pelo

CIA-MCSA são de 2,14% a mais que o **OSNR-LA** na topologia NSFNet e 3,69% a mais que o **OSNR-LA** na topologia EURO28. No melhor caso, o **CIA-MCSA** alcançou uma **UE** adicional de 132,42% em relação ao **CP-IAFF** na topologia NSFNet (cenário **HXT**). Um dos fatores que influencia no desempenho do **CIA-MCSA** em relação a outros algoritmos é a verificação dinâmica das **PLIs** intra e inter núcleo. Assim, o **CIA-MCSA** garante os requerimentos de **QoT** e consegue alocar simultaneamente mais caminhos ópticos (e *slots* de frequência) na rede, impactando em todas as métricas avaliadas (**PBC**, **PBB** e **UE**). Dessa forma, o **CIA-MCSA** alcança um incremento de **UE** adicional de pelo menos 3,04% em relação ao **OSNR-LA**. Este valor é obtido pela média da linha “**OSNR-LA**” na Tabela 23. A melhora do **ICXT-AA** no cenário **LXT** (também observada nas métricas **PBC** e **PBB**) ocorre pois o fator limitante deste algoritmo é o *crosstalk*, conforme mostrado nas Figuras 50 e 51. Isso explica porque o desempenho geral do **ICXT-AA** melhora em um cenário de **LXT**.

8.4 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o algoritmo **CIA-MCSA**, proposto para a alocação integrada de modulação, núcleo e espectro. Além disso, o desempenho do **CIA-MCSA** foi verificado em relação a outros algoritmos. De maneira geral, o **CIA-MCSA** apresentou melhor desempenho em termos das métricas adotadas quando comparado a cinco outros algoritmos. O **CIA-MCSA** quando comparado com o mais competitivo dos cinco algoritmos avaliados, atingiu: *i*) um ganho médio de pelo menos 33,87% em termos de probabilidade de bloqueio de circuito; *ii*) um ganho médio de pelo menos 20,74% em termos de probabilidade de bloqueio de banda; e *iii*) um aumento na utilização espectral da rede de pelo menos 3,04%.

O bom desempenho do **CIA-MCSA** deve-se ao fato deste algoritmo considerar as limitação intra e inter núcleos e implementar mecanismos para reduzir a ocorrência desses efeitos, como: prevenir a ocorrência de *crosstalk* em conexões futuras devido ao balanceamento espectral; prevenir que caminhos ópticos vindouros sejam bloqueados por **OSNR** a partir do uso do incremento σ ; garantir a **QoT** para os caminhos ópticos já ativos na rede.

No próximo capítulo são apresentadas as considerações finais desta tese, além de propostas de trabalhos futuros.

9 Considerações Finais

9.1 Conclusões Sobre os Trabalhos Realizados

As redes ópticas elásticas são tratadas pela literatura como a principal tecnologia para compor a infraestrutura das redes de transporte. Nos últimos anos as redes ópticas elásticas baseadas em fibras multi-núcleos oportunizaram meios de escalar a infraestrutura óptica. Este tipo de rede está atrelada a diversos desafios para garantir o seu funcionamento e a qualidade de serviço para o usuário. Neste contexto, um fator primordial para manter a qualidade de transmissão da rede é considerar as limitações de camada física no planejamento destas redes. Neste sentido, as contribuições desta tese estão atreladas à investigação das limitações de camada física e a implementação de novos algoritmos para a alocação de recursos em **SDM-EONs** baseadas em fibras multi-núcleos.

Devido a complexidade dos inúmeros fatores que degradam a **QoT** das conexões no âmbito da camada física da rede, muitos autores precisam abstrair alguns destes fatores. Como apresentado no Capítulo 4, muitos trabalhos consideram o *crosstalk* inter-núcleos como o único fator limitante da camada física. De fato, os experimentos realizados nesta tese apontam que o *crosstalk* pode ser o maior fator limitante em redes multi-núcleos. Entretanto, os efeitos intra-núcleos também podem figurar como protagonistas na degradação da **QoT**, como mostrado na avaliação de desempenho do Capítulo 8. Portanto, o esforço para avaliar de forma dinâmica as limitações inter-núcleo como o *crosstalk* em conjunto com as limitações intra-núcleos como o ruído **ASE** e os efeitos não lineares (tanto a **SCI** quanto a **XCI**) configura-se como uma das contribuições desta tese. Somado a isso, tem-se a avaliação dos níveis de **QoT** em caminhos ópticos já ativos na rede durante a alocação de novos caminhos ópticos.

Partindo de um cenário ciente das limitações da camada física, as demais contribuições desta tese estão relacionadas às propostas de novos algoritmos para resolver problemas de alocação de recursos. Foram propostos cinco algoritmos, sendo eles: **ABE**, **ABN**, **AMN**, **ACiNE** e **CIA-MCSA**. Cada um deles, propostos para problemas específicos do problema **RMCSA**, foram submetidos a um extenso processo de avaliação de desempenho. Tal processo considerou duas topologias, carga de tráfego dinâmico, demandas por taxa de bits heterogêneas, fibras com coeficientes de acoplamento diferentes (**HXT** e **LXT**), diferentes formatos de modulação, além de parâmetros da rede condizentes com a literatura.

No Capítulo 5 foi investigado o problema de alocação de espectro em **SDM-EONs**

baseadas em fibras multi-núcleos. O algoritmo proposto, **ABE**, apresentou uma ideia de balanceamento espectral simples, porém eficiente para mitigar o *crosstalk* inter-núcleo. O **ABE** é capaz de organizar o espectro de forma que futuras conexões não se sobreponham espectralmente com outros caminhos ópticos da rede. O **ABE** alcançou uma redução na probabilidade de bloqueio de banda de pelo menos 44% na topologia NSFNet e 33% na topologia EURO28 quando comparado a outros algoritmos. As evidências sobre a eficiência do **ABE** encorajaram o uso desta forma de balanceamento nos demais algoritmos propostos nesta tese.

No Capítulo 6 foi investigado o problema de alocação de núcleo em **SDM-EONs** baseadas em fibras multi-núcleos. Para este problema foram propostos dois algoritmos, o **ABN** e o **AMN**. O **ABN** apresentou a ideia de escolha de um núcleo com base na utilização espectral dos demais núcleos. O **ABN** apresentou desempenho satisfatório e, portanto, seu histórico de execução foi usado para treinamento de uma rede neural usada pelo segundo algoritmo proposto, o **AMN**. Uma das vantagens do **AMN** é que este consegue extrair padrões da tomada de decisão de outros algoritmos e, sem a necessidade de executar novamente estes algoritmos, alcança desempenho semelhante ou até superior ao algoritmo original. O **AMN**, em um cenário com alta incidência de *crosstalk*, apresentou ganhos médios em relação a outros algoritmos de pelo menos 9,28% em termos de probabilidade de bloqueio de banda. Já no cenário de baixa incidência de *crosstalk*, o **AMN** atingiu um ganho médio de pelo menos 24,87% em termos de probabilidade de bloqueio de banda.

No Capítulo 7 foi investigado o problema integrado de alocação de núcleo e espectro em **SDM-EONs** baseadas em fibras multi-núcleos. Neste contexto, foi proposto o **ACiNE**, que expande a ideia do **ABE** para um algoritmo ciente de *crosstalk*. Portanto, o **ACiNE** é capaz de selecionar o caminho óptico com menor nível de *crosstalk* possível de uma forma que o espectro óptico mantenha-se organizado para evitar sobreposição espectral em conexões futuras (e conseqüentemente reduzir o *crosstalk*). Quando comparado a outros algoritmos, o **ACiNE** apresentou ganhos de no mínimo 45,62% em termos de probabilidade de bloqueio de circuito e de no mínimo 37,95% em termos de probabilidade de bloqueio de banda.

Por fim, no Capítulo 8 foi investigado o problema de escolha de modulação, alocação de núcleo e espectro em **SDM-EONs** baseadas em fibras multi-núcleos. Neste contexto, o **CIA-MCSA** foi proposto com o objetivo de considerar dinamicamente não apenas as limitações inter-núcleos como também as limitações intra-núcleos. O **CIA-MCSA** é um algoritmo robusto, que considera uma gama de efeitos de camada física para o novo caminho óptico e para os caminhos ópticos já ativos na rede. Não apenas isso, o **CIA-MCSA** é capaz de tornar os caminhos ópticos futuros menos suscetíveis a bloqueio. Isso porque o **CIA-MCSA** realiza um balanceamento espectral

para evitar *crosstalk* e implementa o mecanismo do incremento σ para minimizar a ocorrência de bloqueios por OSNRO. O CIA-MCSA quando comparado com outros algoritmos garantiu um ganho médio de pelo menos 33,87% em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, um ganho médio de pelo menos 20,74% em termos de probabilidade de bloqueio de banda, além de um aumento na utilização espectral da rede de pelo menos 3,04%.

9.2 Propostas de Trabalhos Futuros

O estudo de alocação de recursos em SDM-EONs é desafiador principalmente pela abrangência do tema. Investigar o problema de forma completa é extremamente complexo. Por isso, partes do problema devem ser abstraídas para que seja possível a condução da pesquisa. Esta tese apresentou contribuições para os problemas de escolha de modulação, alocação de núcleo e espectro considerando as limitações de camada física. Entretanto, alguns aspectos não explorados nesta tese são objetos pertinentes para trabalhos futuros, como:

- Investigar o problema de alocação de recursos em SDM-EONs considerando a integração com o problema de roteamento. Neste contexto, a análise do melhor entre os k menores caminhos ou mesmo o uso de multi-caminhos para uma mesma requisição pode aumentar a eficiência de algoritmos de alocação de recursos.
- Investigar e propor técnicas de sobrevivência para garantir a disponibilidade da rede, mesmo após a ocorrência de falhas;
- Continuar o estudos de SDM-EONs em outros tipos de fibras, como as fibras de 12 e 19 núcleos. Além de uma investigação abrangente dos diferentes coeficientes de acoplamento de potência da fibra;
- Estudar e propor técnicas de otimização para a escolha da potência do transmissor para garantir um equilíbrio entre os efeitos de camada física que não dependem da potência (ruído ASE) e os efeitos de camada física dependentes da potência (NLIs e *crosstalk*);
- Investigar com profundidade mecanismos para reduzir a fragmentação espectral em conjunto com o *crosstalk*, assim como a utilização de métricas específicas para o estudo de fragmentação, como a fragmentação externa ou a entropia de Shannon;
- Continuar os estudos de técnicas de aprendizado de máquina, como a usada no algoritmo AMN, e expandir o estudo para outros subproblemas do problema

RMCSA, como a alocação integrada de núcleo e espectro. Neste sentido é pertinente uma amplo estudo de outras técnicas de aprendizado de máquina além da técnica adotada pelo AMN;

- Continuar a investigação de outros modelos de camada física para tornar a análise de SDM-EONs baseadas em fibras multi-núcleos mais rigorosa.

Referências

ABEDIFAR, V.; FURDEK, M.; MUHAMMAD, A.; ESHGHI, M.; WOSINSKA, L. Routing, modulation, and spectrum assignment in programmable networks based on optical white boxes. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 10, n. 9, p. 723–735, 2018. Citado na página 67.

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. Citado na página 60.

AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems: Third Edition**. [S.l.]: Wiley, John and Sons, 2002. Citado na página 55.

ARAUJO, P.; LACERDA-JR, J.; 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**. Uberlândia, MG, Brasil: [s.n.], 2021. Citado 7 vezes nas páginas 68, 73, 74, 75, 91, 99 e 105.

ARPANAEI, F.; ARDALANI, N.; BEYRANVAND, H.; SHARIATI, B. QoT-aware performance evaluation of spectrally–spatially flexible optical networks over FM-MCFs. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 12, n. 8, p. 288–300, 2020. Citado 6 vezes nas páginas 69, 72, 73, 74, 75 e 115.

BEHERA, S.; GEORGE, J.; DAS, G. Effect of transmission impairments in CO-OFDM based elastic optical network design. **Computer Networks**, v. 144, p. 242 – 253, 2018. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128618307291>>. Citado na página 43.

BEHERA, S.; SAVVA, G.; MANOUSAKIS, K.; ELLINAS, G. Impairment-aware routing, modulation, spectrum, and core allocation with bit loading in spectrally–spatially flexible optical networks. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 15, n. 6, p. 318–332, 2023. Citado 5 vezes nas páginas 27, 71, 73, 74 e 75.

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. Citado na página 84.

BOSCO, G.; CURRI, V.; CARENA, A.; POGGIOLINI, P.; FORGHIERI, F. On the performance of nyquist-wdm terabit superchannels based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM subcarriers. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, v. 29, n. 1, p. 53–61, 2011. Citado na página 37.

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>>. Citado 4 vezes nas páginas 27, 35, 40 e 43.

BRASILEIRO Ítalo; VALDEMIR, J.; SOARES, A. Regenerator assignment with circuit invigorating. **Optical Switching and Networking**, v. 34, p. 58–66, 2019. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427718301644>>. Citado na página 80.

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>>. Citado na página 54.

CARTAXO, A. V. T.; MORGADO, J. A. P. New expression for evaluating the mean crosstalk power in weakly-coupled multi-core fibers. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, v. 39, n. 6, p. 1830–1842, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 61.

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. Citado 6 vezes nas páginas 9, 27, 34, 35, 39 e 77.

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. Citado 6 vezes nas páginas 40, 69, 72, 73, 74 e 75.

CISCO. **Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022**. 2019. Disponível em: <<https://twiki.cern.ch/twiki/pub/HEPIX/TechwatchNetwork/HtwNetworkDocuments/white-paper-c11-741490.pdf>>. Citado 4 vezes nas páginas 9, 12, 26 e 27.

CISCO. **Cisco Annual Internet Report (2018–2023)**. 2021. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 25 e 26.

COSTA, I.; LACERDA-JR, J.; SOARES, A. Estratégia de priorização para alocação de núcleo e espectro em redes Ópticas elásticas sdm. In: **Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. Uberlândia, MG, Brasil: [s.n.], 2021. Citado 4 vezes nas páginas 68, 73, 74 e 75.

COSTA, L. R.; BRASILEIRO, B.; DRUMMOND, A. C. Low margin QoT-aware RMLSA with circuit invigoration in elastic optical networks. In: **GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6. Citado na página 66.

DIJKSTRA, E. **A note on two problems in connexion with graphs**. Numerische Mathematik, 1959. v. 1. 269–271 p. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF01386390>>. Citado 4 vezes nas páginas 33, 85, 99 e 124.

DIN, D.-R.; ZHAN, M.-X. The survivable RBCMLSA problem on EONs. **Journal of Information Science and Engineering**, v. 36, p. 937–952, 2020. ISSN 1016-2364. Citado na página 46.

- 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>>. Citado 9 vezes nas páginas 9, 37, 38, 39, 47, 48, 49, 53 e 63.
- 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)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 7–12. Citado na página 77.
- FERRARI, A.; VIRGILLITO, E.; CURRI, V. Band-division vs. space-division multiplexing: A network performance statistical assessment. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, v. 38, n. 5, p. 1041–1049, 2020. Citado na página 53.
- FIDLER, F.; WINZER, P. J.; THOTTAN, M. K.; BERGMAN, K. Impairment-aware optical networking using cross-layer communication. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 5, n. 2, p. 144–158, 2013. Citado na página 50.
- 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>>. Citado 4 vezes nas páginas 48, 53, 80 e 118.
- FUJII, S.; HIROTA, Y.; TODE, H. Dynamic resource allocation with virtual grid for space division multiplexed elastic optical network. In: **39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–3. Citado na página 40.
- 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. Citado 11 vezes nas páginas 40, 67, 73, 74, 75, 85, 91, 99, 105, 109 e 123.
- GERSTEL, O.; JINNO, M.; LORD, A.; YOO, S. B. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? **IEEE Communications Magazine**, v. 50, n. 2, p. s12–s20, 2012. Citado na página 27.
- GHAZIJAHANI, H. A.; SEYEDARABI, H.; NIYA, J. M.; CHEUNG, N.-M. Deep learning-assisted adaptive modulation level assignment for video communication over an elastic optical network. **Optical Fiber Technology**, v. 52, p. 101987, 2019. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520019302342>>. Citado na página 96.
- GONG, L.; ZHOU, X.; LIU, X.; ZHAO, W.; LU, W.; ZHU, Z. Efficient resource allocation for all-optical multicasting over spectrum-sliced elastic optical networks. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 5, n. 8, p. 836–847, Aug 2013. ISSN 1943-0620. Citado na página 63.

- GROVER, W. Forward error correction in dispersion-limited lightwave systems. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, v. 6, n. 5, p. 643–654, 1988. Citado na página 46.
- 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. Citado 5 vezes nas páginas 51, 53, 54, 58 e 73.
- 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. Citado 5 vezes nas páginas 70, 72, 73, 74 e 75.
- 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. Citado 6 vezes nas páginas 63, 70, 72, 73, 74 e 75.
- 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. Citado 5 vezes nas páginas 40, 42, 59, 60 e 73.
- INAO, S.; SATO, T.; SENTSUI, S.; KUROHA, T.; NISHIMURA, Y. Multicore optical fiber. In: **Optical Fiber Communication**. Optical Society of America, 1979. p. WB1. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-1979-WB1>>. Citado na página 40.
- IP, E.; LAU, A. P. T.; BARROS, D. J. F.; KAHN, J. M. Coherent detection in optical fiber systems. **Optics Express**, OSA, v. 16, n. 2, p. 753–791, Jan 2008. Disponível em: <<http://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-16-2-753>>. Citado na página 48.
- ITU-T G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. In: **International Telecommunication Union ITU**. [S.l.: s.n.], 2020. Citado na página 36.
- ITU-T G.975.1. Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems. In: **International Telecommunication Union ITU**. [S.l.: s.n.], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 51.
- IVES, D.; BAYVEL, P.; SAVORY, S. Routing, modulation, spectrum and launch power assignment to maximize the traffic throughput of a nonlinear optical mesh network. **Photonic Network Communications**, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 48.
- JAIN, R. **The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling**. [S.l.]: Wiley, John and Sons, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 80.
- 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. Citado 4 vezes nas páginas 27, 34, 37 e 39.

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. Citado na página 54.

KLINKOWSKI, M.; JAWORSKI, M. OSNR-aware modeling and optimization of multi-core fiber-based spectrally–spatially flexible optical networks. **Telecom**, v. 3, n. 3, p. 467–483, 2022. ISSN 2673-4001. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-4001/3/3/25>>. Citado 6 vezes nas páginas 70, 73, 74, 75, 115 e 123.

KLINKOWSKI, M.; KSIENIEWICZ, P.; JAWORSKI, M.; ZALEWSKI, G.; WALKOWIAK, K. Machine learning assisted optimization of dynamic crosstalk-aware spectrally-spatially flexible optical networks. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, v. 38, n. 7, p. 1625–1635, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 42, 92 e 115.

KLINKOWSKI, M.; LECHOWICZ, P.; WALKOWIAK, K. Survey of resource allocation schemes and algorithms in spectrally-spatially flexible optical networking. **Optical Switching and Networking**, v. 27, p. 58–78, 2018. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157342771730053X>>. Citado na página 40.

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. Citado 7 vezes nas páginas 40, 60, 62, 69, 73, 74 e 75.

KOSHIBA, M.; SAITOH, K.; TAKENAGA, K.; MATSUO, S. Analytical expression of average power-coupling coefficients for estimating intercore crosstalk in multicore fibers. **IEEE Photonics Journal**, v. 4, n. 5, p. 1987–1995, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.

KUMAR, S.; DEEN, J. **Fiber Optic Communications: Fundamentals and Applications**. [S.l.]: Wiley, 2014. Citado na página 53.

LACERDA-JR, J.; 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: [s.n.], 2021. Citado 3 vezes nas páginas 29, 32 e 92.

LACERDA-JR, J.; 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**. Uberlândia, MG, Brasil: [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/16759>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 32 e 106.

LACERDA-JR, J.; FONTINELE, A.; CAMPELO, D.; SOARES, A. Dedicated protection considering physical layer impairments in elastic optical networks. In: **2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 67 e 118.

LACERDA-JR, J.; 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**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/12306>>. Citado 4 vezes nas páginas 29, 32, 78 e 109.

LACERDA-JR, J. C.; CARTAXO, A.; SOARES, A. Algoritmo baseado em aprendizado de máquina para alocação de núcleo em redes Ópticas elásticas com multiplexação espacial. In: **Anais do XL Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. Fortaleza, CE, Brasil: SBC, 2022. p. 70–83. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/21162>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 32 e 95.

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, 2023. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427723000346>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 32 e 116.

LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. **Nature (London)**, Nature Publishing Group, England, v. 521, n. 7553, p. 436–444, 2015. ISSN 0028-0836. Citado na página 96.

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>>. Citado 4 vezes nas páginas 71, 73, 74 e 75.

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. Citado 9 vezes nas páginas 62, 69, 73, 74, 75, 105, 106, 117 e 123.

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>>. Citado 17 vezes nas páginas 36, 42, 50, 51, 60, 61, 62, 69, 73, 74, 75, 84, 86, 87, 105, 109 e 123.

LUO, Z.; YIN, S.; ZHAO, L.; WANG, Z.; ZHANG, W.; JIANG, L.; HUANG, S. Survivable routing, spectrum, core and band assignment in multi-band space division multiplexing-elastic optical networks. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, p. 1–1, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 35.

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**, p. 1–1, 2019. ISSN 1558-2213. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 72.

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. Citado 6 vezes nas páginas 43, 59, 63, 73, 74 e 75.

MONTEIRO, N.; FONTINELE, A.; CAMPELO, D.; SOARES, A. Provision of adaptive guard band in elastic optical networks. **Journal of Internet Services and Applications**, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 80.

MONTEIRO, N.; JUNIOR, W.; FONTINELE, A.; CAMPELO, D.; PAIVA, A.; RABÊLO, R.; SOARES, A. Alocação de banda de guarda adaptativa utilizando redes neurais multi-layer perceptron em redes ópticas elásticas. In: **Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. Rio de Janeiro-RJ: [s.n.], 2020. p. 770–783. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/12324>>. Citado 2 vezes nas páginas 92 e 96.

MOURA, P. M.; FONSECA, N. L. D. Routing, core, modulation level, and spectrum assignment based on image processing algorithms. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 10, n. 12, p. 947–958, 2018. Citado na página 42.

MUHAMMAD, A.; ZERVAS, G.; FORCHHEIMER, R. Resource allocation for space-division multiplexing: Optical white box versus optical black box networking. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, v. 33, n. 23, p. 4928–4941, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 42.

NAKAJIMA, K.; SILLARD, P.; RICHARDSON, D.; LI, M.-J.; ESSIAMBRE, R.-J.; MATSUO, S. Transmission media for an sdm-based optical communication system. **IEEE Communications Magazine**, v. 53, n. 2, p. 44–51, 2015. Citado na página 40.

OLIVEIRA, H.; FONSECA, N. Proteção e roteamento multicaminho em redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. In: **Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. Gramado, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 487–500. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7381>>. Citado 6 vezes nas páginas 68, 72, 73, 74, 75 e 105.

OLIVEIRA, H.; FONSECA, N. Uma estratégia de proteção eficiente em EONs-SDM utilizando p-cycle fipp. In: **Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: SBC, 2020. p. 155–168. ISSN 2177-9384. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/12280>>. Citado na página 40.

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. Citado 6 vezes nas páginas 43, 68, 72, 73, 74 e 75.

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. Citado 4 vezes nas páginas 71, 73, 74 e 75.

POGGIOLINI, P.; BOSCO, G.; CARENA, A.; CURRI, V.; JIANG, Y.; FORGHIERI, F. The gn-model of fiber non-linear propagation and its applications. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, v. 32, n. 4, p. 694–721, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

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. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-33-2-459>>. Citado na página 54.

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. Citado 10 vezes nas páginas 12, 36, 51, 54, 55, 56, 57, 58, 59 e 73.

PUTTNAM, B. J.; LUÍS, R. S.; AGRELL, E.; RADEMACHER, G.; SAKAGUCHI, J.; KLAUS, W.; SARIDIS, G. M.; AWAJI, Y.; WADA, N. High capacity transmission systems using homogeneous multi-core fibers. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, OSA, v. 35, n. 6, p. 1157–1167, Mar 2017. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-35-6-1157>>. Citado na página 59.

PUTTNAM, B. J.; LUÍS, R. S.; ERIKSSON, T. A.; KLAUS, W.; MENDINUETA, J.-M. D.; AWAJI, Y.; WADA, N. Impact of intercore crosstalk on the transmission distance of QAM formats in multicore fibers. **IEEE Photonics Journal**, v. 8, n. 0601109, p. 1–9, 2016. Disponível em: <www.doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2523993>. Citado na página 51.

PUTTNAM, B. J.; LUÍS, R. S.; RADEMACHER, G.; ALFREDSSON, A.; KLAUS, W.; SAKAGUCHI, J.; AWAJI, Y.; AGRELL, E.; WADA, N. Characteristics of homogeneous multi-core fibers for sdm transmission. **APL Photonics**, v. 4, n. 2, p. 022804, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.5048537>>. Citado na página 40.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. **Optical Networks: A Practical Perspective**. Third. [S.I.]: Morgan Kaufmann Publishers, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 9, 34, 35, 36 e 47.

RAVIPUDI, J. L.; BRANDT-PEARCE, M. Impairment- and fragmentation-aware, energy-efficient dynamic RMSCA for SDM-EONs. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 15, n. 9, p. D10–D22, 2023. Citado 5 vezes nas páginas 27, 72, 73, 74 e 75.

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>>. Citado na página 40.

RODRIGUES, E.; CERQUEIRA, E.; ROSÁRIO, D.; OLIVEIRA, H. Hybrid routing, modulation, spectrum and core allocation based on mapping scheme. **Sensors**, n. 21, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 70.

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. Citado 4 vezes nas páginas 72, 73, 74 e 75.

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)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 2814–2821. Citado 3 vezes nas páginas 73, 74 e 75.

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**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 242–246. Citado na página 77.

ROTTONDI, C.; MARTELLI, P.; BOFFI, P.; BARLETTA, L.; TORNATORE, M. Modulation format, spectrum and core assignment in a multicore flexi-grid optical link. In: **Optical Fiber Communication Conference**. Optical Society of America, 2018. p. M3J.2. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2018-M3J.2>>. Citado na página 63.

RUAN, L.; ZHENG, Y. Dynamic survivable multipath routing and spectrum allocation in OFDM-based flexible optical networks. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 6, n. 1, p. 77–85, 2014. Citado na página 67.

RUMIPAMBA-ZAMBRANO, R.; PERELLÓ, J.; GENÉ, J. M.; SPADARO, S. Cost-effective spatial super-channel allocation in flex-grid/mcf optical core networks. **Optical Switching and Networking**, v. 27, p. 93–101, 2018. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157342771730036X>>. Citado na página 43.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 3th. ed. [S.l.]: Pearson, 2009. Citado na página 95.

SANTOS, I.; MONTEIRO, J. A.; SOARES, A.; FONTINELLE, A.; CAMPELO, D. A spectrum spacing mechanism to enhance traffic grooming in elastic optical networks. **Photonic Network Communications**, v. 42, 08 2021. Citado na página 80.

SASAKI, Y.; AMMA, Y.; TAKENAGA, K.; MATSUO, S.; AIKAWA, K.; SAITOH, K.; MORIOKA, T.; MIYAMOTO, Y. Single-mode multicore fiber for dense space division multiplexing. In: **2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–3. Citado na página 40.

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. Citado 6 vezes nas páginas 42, 72, 73, 74, 75 e 105.

SILLARD, P. New fibers for ultra-high capacity transport. **Optical Fiber Technology**, v. 17, n. 5, p. 495–502, 2011. ISSN 1068-5200. 100G and Beyond. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520011000848>>. Citado na página 27.

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>>. Citado 9 vezes nas páginas 42, 71, 73, 74, 75, 105, 115, 123 e 130.

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>. Citado 5 vezes nas páginas 71, 73, 74, 75 e 116.

TAKESHITA, H.; NOGUCHI, H.; ABE, J.; FUJISAWA, S.; TAJIMA, A. Adaptive guard-band assignment with adaptive spectral profile equalizer to improve spectral usage of impairment-aware elastic optical network. In: **ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–3. Citado na página 37.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. **Redes de Computadores: 5ª edição**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 9, 35, 38 e 39.

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. Citado 5 vezes nas páginas 40, 70, 73, 74 e 75.

TANG, F.; SHEN, G.; ROUSKAS, G. N. Crosstalk-aware shared backup path protection in multi-core fiber elastic optical networks. **IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology**, OSA, v. 39, n. 10, p. 3025–3036, May 2021. Disponível em: <<http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-39-10-3025>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 60.

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. Citado 9 vezes nas páginas 40, 63, 67, 73, 74, 75, 105, 117 e 123.

TRINDADE, S.; FONSECA, N. L. S. d. Machine learning for spectrum defragmentation in space-division multiplexing elastic optical networks. **IEEE Network**, p. 1–7, 2020. Citado na página 92.

WALKOWIAK, K.; KLINKOWSKI, M.; LECHOWICZ, P. Dynamic routing in spectrally spatially flexible optical networks with back-to-back regeneration. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, OSA, v. 10, n. 5, p. 523–534, May 2018. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/jocn/abstract.cfm?URI=jocn-10-5-523>>. Citado na página 37.

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>>. Citado 4 vezes nas páginas 39, 124, 128 e 130.

- 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>>. Citado na página 77.
- WANG, X.; KUANG, K.; WANG, S.; XU, S.; LIU, H.; LIU, G. N. Dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with mixed line rates. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 6, n. 12, p. 1115–1127, 2014. Citado na página 67.
- XIONG, Y.; HE, J.; ZHANG, H.; WANG, B.; YANG, K. A machine learning method for green energy saving in space division multiplexing elastic optical networks. **Optical Fiber Technology**, v. 53, p. 102024, 2019. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520019304687>>. Citado na página 92.
- XIONG, Y.; YANG, Y.; YE, Y.; ROUSKAS, G. N. A machine learning approach to mitigating fragmentation and crosstalk in space division multiplexing elastic optical networks. **Optical Fiber Technology**, v. 50, p. 99–107, 2019. ISSN 1068-5200. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520018307028>>. Citado na página 92.
- XIONG, Y.; YE, Y.; ZHANG, H.; HE, J.; WANG, B.; YANG, K. Deep learning and hierarchical graph-assisted crosstalk-aware fragmentation avoidance strategy in space division multiplexing elastic optical networks. **Optics Express**, OSA, v. 28, n. 3, p. 2758–2777, Feb 2020. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-28-3-2758>>. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 92.
- YAGHUBI-NAMAAD, M.; RAHBAR, A. G.; ALIZADEH, B. Adaptive modulation and flexible resource allocation in space-division- multiplexed elastic optical networks. **IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking**, v. 10, n. 3, p. 240–251, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 68, 73, 74, 75 e 105.
- YAN, L.; AGRELL, E.; WYMEERSCH, H.; JOHANNISSON, P.; TARANTO, R. D.; BRANDT-PEARCE, M. Link-level resource allocation for flexible-grid nonlinear fiber-optic communication systems. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 27, n. 12, p. 1250–1253, June 2015. ISSN 1941-0174. Citado na página 37.
- 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. Citado 4 vezes nas páginas 71, 73, 74 e 75.
- 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. Citado 5 vezes nas páginas 42, 69, 73, 74 e 75.
- YAO, Q.; YANG, H.; ZHU, R.; YU, A.; BAI, W.; TAN, Y.; ZHANG, J.; XIAO, H. Core, mode, and spectrum assignment based on machine learning in space division multiplexing elastic optical networks. **IEEE Access**, v. 6, p. 15898–15907, 2018. Citado na página 92.

YEN, J. Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. **Management Science**, v. 17, n. 11, p. 712–716, 1971. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.17.11.712>>. Citado na página 33.

YOUSEFI, F.; RAHBAR, A. G. Novel crosstalk, fragmentation-aware algorithms in space division multiplexed- elastic optical networks (SDM-EON) with considering physical layer security. **Optical Switching and Networking**, v. 37, p. 100566, 2020. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427719301390>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 44.

ZHANG, G.; LEENHEER, M. D.; MOREA, A.; MUKHERJEE, B. A survey on ofdm-based elastic core optical networking. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 15, n. 1, p. 65–87, 2013. Citado na página 34.

ZHAO, J.; WYMEERSCH, H.; AGRELL, E. Nonlinear impairment aware resource allocation in elastic optical networks. In: **2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–3. Citado na página 84.