



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**APROVISIONAMENTO DINÂMICO DE RECURSOS  
EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS MULTIPLEXADAS  
POR DIVISÃO DE ESPAÇO CONSIDERANDO  
LIMITAÇÕES DE CAMADA FÍSICA**

**FABRICIO ROSSY DE LIMA LOBATO**

**Belém-Pará-Brasil  
2019**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FABRICIO ROSSY DE LIMA LOBATO**

**APROVISIONAMENTO DINÂMICO DE RECURSOS  
EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS MULTIPLEXADAS  
POR DIVISÃO DE ESPAÇO CONSIDERANDO  
LIMITAÇÕES DE CAMADA FÍSICA**

Tese de doutorado apresentada como exigência para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, elaborada sob a orientação do Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa e coorientação do Prof. Dr. Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo.

**Belém-Pará-Brasil  
2019**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Biblioteca do ITEC/UFPA-Belém-PA**

---

L796

Lobato, Fabricio Rossy de Lima, 1982-

Aprovisionamento dinâmico de recursos em redes ópticas elásticas multiplexadas por divisão de espaço considerando limitações de camada física / Fabricio Rossy de Lima Lobato. - 2019.

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa;  
Coorientador: Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2019.

1.Comunicações óticas- Testes.  
2.Multplexação. 3.Fibras óticas. 5. Sistema de comunicação sem fio- Modelos matemáticos.  
I.Título.

CDD 23. ed. – 6 2 1 . 3 8 2 7

---

Elaborado por Kelren Cecília dos Santos Lima da Mota – CRB-2/1461

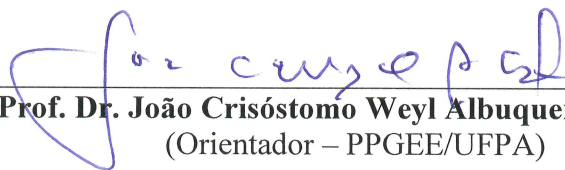
**“APROVISIONAMENTO DINÂMICO DE RECURSOS EM REDES ÓPTICAS  
ELÁSTICAS MULTIPLEXADAS POR DIVISÃO DE ESPAÇO CONSIDERANDO  
LIMITAÇÕES DE CAMADA FÍSICA”**

**AUTOR: FABRICIO ROSSY DE LIMA LOBATO**

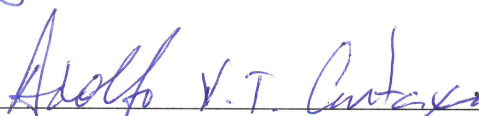
TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO  
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO  
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 07/06/2019

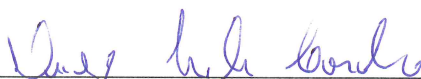
**BANCA EXAMINADORA:**



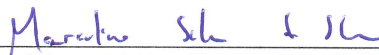
**Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa**  
(Orientador – PPGEE/UFPA)



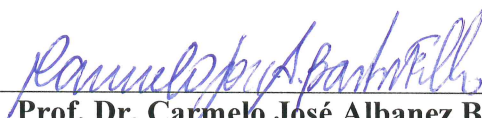
**Prof. Dr. Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo**  
(Co-Orientador – ISCTE/IL/PT)



**Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso**  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



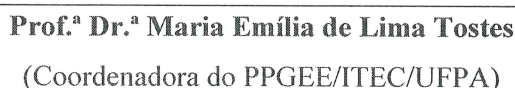
**Prof. Dr. Marcelino Silva da Silva**  
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)



**Prof. Dr. Carmelo José Albanez Bastos Filho**  
(Avaliador Externo – UPE)

**Prof. Dr. Darli Augusto de Arruda Mello**  
(Avaliador Externo – UNICAMP)

**VISTO:**



**Prof.ª Dr.ª Maria Emília de Lima Tostes**  
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

“Pouco conhecimento faz com que as  
pessoas se sintam orgulhosas.  
Muito conhecimento,  
com que se sintam humildes.”

Leonardo da Vinci

"A meritocracia jamais poderá  
ser justificativa  
para a desigualdade."

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre me iluminar e guiar, e por ter colocado cada pessoa listada abaixo no meu caminho.

À minha esposa, Brena Andrade de Lima Lobato, pelo incentivo e compreensão dos momentos ausentes, além do amor e do carinho sempre presentes.

Aos meus pais e meu irmão, que sempre me incentivaram e apoiaram em todos os momentos de minha vida.

Ao Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa, por sua dedicada orientação, confiança, paciência e incentivo, além da grande amizade demonstrada em diversos momentos.

Ao Prof. Dr. Adolfo da Visitação Tregeira Cartaxo, por sua dedicada orientação, paciência, disponibilidade e receptividade ao abrir as portas do seu grupo e laboratório de pesquisa.

A todos os professores que contribuíram na minha formação. Em especial aos professores: Carmelo José Albanez Bastos Filho, Darli Augusto de Arruda Mello, Diego Lisboa Cardoso e Marcelino Silva da Silva pelas valiosas contribuições que foram essenciais para elaboração desta tese.

Aos meus amigos pessoais e todo grupo do LEA e do GFOC (IST/IT-Lisboa), pelo companheirismo, pelas inúmeras contribuições na elaboração desse trabalho e pela companhia nos momentos de descontração.

A UFOPA, em especial aos professores: por terem dado o apoio necessário para a participação no curso de doutorado e ao Instituto de Telecomunicações (IT-Lisboa), pelo apoio dado a realização deste trabalho através da parceria institucional.

Ao **CNPq**, ao **PRODOUTORAL/CAPES** e à **PDSE/CAPES**, pelo apoio financeiro dado a este trabalho, que foi de grande importância para sua conclusão.

## ÍNDICE

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiii
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO 1 – Introdução	18
1.1. Contextualização	18
1.2. Trabalhos Correlatos	22
1.3. Definição de Hipótese	26
1.4. Objetivos	26
1.4.1. Geral	26
1.4.2. Específicos	26
1.5. Principais Contribuições	27
1.6. Organização do Trabalho	27
CAPÍTULO 2 – Efeitos de Camada Física sobre a Qualidade de Transmissão	29
2.1. Efeitos de Camada Física	29
2.1.1. Emissão Espontânea do Amplificador (ASE)	30
2.1.2. Diafonia Inter Subportadoras para Supercanais Nyquist-WDM	32
2.1.3. Diafonia Inter Núcleo	34
2.2. Qualidade de Transmissão	36
2.2.1. Dependência da BER na SNR	36
2.2.2. Relação Sinal Ruído por Bit ( $SNR_b$ ) Requerida	36
2.2.3. Relação Sinal Ruído Óptica (OSNR)	37
2.2.4. Relação entre OSNR Requerida e Diafonia Inter-Núcleo	38
CAPÍTULO 3 – Redes Ópticas Elásticas Multiplexadas por Divisão Espacial	42
3.1. Considerações Iniciais	42

3.2. Tipos de Fibra Óptica em SDM	42
3.3. Aprovisionamento de Recursos em Redes Ópticas Considerando Limitações de Camada Física	46
3.3.1. Aprovisionamento Estático e Dinâmico	48
3.3.1.1. Problema IA-RWA em Redes WDM	48
3.3.1.2. Problema IA-RSA e IA-RMLSA em EON	53
3.3.1.3. Problema IA-RSCA em EON-MCF	54
3.4. Considerações Finais	55
CAPÍTULO 4 – Proposta de Aprovisionamento Dinâmico de Recurso	56
4.1. Considerações de Projeto	56
4.2. Metodologia Proposta para Resolução do Problema IA-RSCA	58
4.3. Novo Índice de Sobreposição de <i>Slots</i> de Frequência e Potência Média da XT	61
4.4. Algoritmo Guloso <i>XT-Aware</i> Proposto para Resolução do Problema IA-SCA	65
CAPÍTULO 5 – Avaliação de Desempenho e Análise dos Resultados	67
5.1. Configurações das Simulações	67
5.2. Análise dos Resultados para a Topologia TESTE-6	70
5.3. Análise dos Resultados para a Topologia de rede DT-12	78
5.4. Análise dos Resultados para a Topologia EON-11	84
5.5. Análise dos Resultados para a Topologia de rede NSFNET-14	91
CAPÍTULO 6 – Conclusão	98
6.1. Considerações da Tese	98
6.2. Contribuições e Comprovação da Hipótese	99
6.3. Dificuldades Encontradas	100
6.4. Desdobramento e Trabalhos Futuros	100
6.5. Artigo Completo Aceito para Publicação em Periódico	101
6.6. Participação em Projetos de Pesquisa	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102



ANEXO I	115
Simulador de Redes Ópticas Elástica Multi Núcleo (SimROEL).	115
ANEXO II	119
Análise Comparativa da estratégia CP(NADJ)-FF e CP(NADJ)-RD	119

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 2. 1- Efeitos lineares e não lineares. ....	29
Ilustração 2. 2- Seções com um ou vários spans. ....	31
Ilustração 2. 3- Supercanal 1 Tb/s. ....	32
Ilustração 2. 4- Agregação de supercanais. ....	32
Ilustração 2. 5- Supercanais Nyquist-WDM em EON no nível de rede.....	33
Ilustração 2. 6- Seção transversal de uma fibra de 7 núcleos.....	34
Ilustração 2. 7- Diafonia entre núcleos na MCF-7 núcleos. ....	35
Ilustração 3. 1- Tipos de fibra óptica em SDM.....	43
Ilustração 3. 2- Acoplamento de Modo em SDM.....	45
Ilustração 3. 3- Várias abordagens IA-RWA.....	51
Ilustração 4. 1- Abordagem da metodologia proposta.....	58
Ilustração 4. 2- Fluxograma da metodologia de IA-RSCA proposta. ....	60
Ilustração 4. 3- Sobreposição parcial de <i>slots</i> entre conexões com mesma largura de banda.....	62
Ilustração 4. 4- Sobreposição parcial de <i>slots</i> entre conexões com diferentes larguras de banda.....	63
Ilustração 4. 5- Algoritmo Guloso XT-Aware.....	66
Ilustração 5. 1- Topologia TESTE 6-nós.....	70
Ilustração 5. 2- Probabilidade de bloqueio das estratégias SCA para o cenário 1. ....	71
Ilustração 5. 3- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 1. ....	72
Ilustração 5. 4- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para o cenário 2. Como o número de ocorrências (bloqueio por XT) da proposta para a carga de 200 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a BP por XT da proposta para essa carga não é mostrada no gráfico. ....	73
Ilustração 5. 5- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2. ....	74
Ilustração 5. 6- Probabilidade de bloqueio das estratégias SCA para o cenário 3. ....	75
Ilustração 5. 7- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 3. ....	76
Ilustração 5. 8- Probabilidade de bloqueio das estratégias SCA para o cenário 4. ....	77
Ilustração 5. 9- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 4. ....	78
Ilustração 5. 10- Topologia DT 12-nós. ....	78
Ilustração 5. 11- Probabilidade de bloqueio das estratégias SCA para o cenário 1. ....	79
Ilustração 5. 12- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 1. ....	80

Ilustração 5. 13- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para o cenário 2. Como o número de ocorrências (bloqueio por XT) da proposta para a carga de 400 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB por XT da proposta para essa carga não é mostrada no gráfico. ....	81
Ilustração 5. 14- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2. ....	81
Ilustração 5. 15- PB das estratégias de SCA para o cenário 2. Como o número de ocorrências (bloqueio total e bloqueio por XT) da proposta para a carga de 400 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB e PB por XT da proposta para essa carga não é mostrada no gráfico. ....	83
Ilustração 5. 16- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2. ....	83
Ilustração 5. 17- Topologia EON 11-nós.....	84
Ilustração 5. 18- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para o cenário 1 com HD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio total e bloqueio por XT) da proposta com HD-FEC para as cargas de 2400 e 2600 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB e PB por XT da proposta para essas cargas não são mostradas no gráfico.....	86
Ilustração 5. 19- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para o cenário 1 com SD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio total e bloqueio por XT) da proposta com SD-FEC para as cargas na faixa de 2400 a 3200 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB e PB por XT da proposta para essas cargas não são mostradas no gráfico. ....	86
Ilustração 5. 20- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 1 com HD-FEC.....	87
Ilustração 5. 21 - Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 1 com SD-FEC.....	87
Ilustração 5. 22- PB das estratégias de SCA para o cenário 2 com HD-FEC. ....	89
Ilustração 5. 23- PB das estratégias de SCA para o cenário 2 com SD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio por XT) da proposta com SD-FEC para a carga de 400 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB por XT da proposta para essa carga não é mostrada no gráfico. ....	89
Ilustração 5. 24- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2 com HD-FEC.....	90
Ilustração 5. 25- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2 com SD-FEC.....	90

Ilustração 5. 26- Topologia NSFNET 14-nós.....	91
Ilustração 5. 27- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para o cenário 1 com SD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio por XT) do algoritmo proposto para as cargas (1400, 1600, 1800, 2000 Erlang) é muito baixo (sem significância estatística), a PB por XT para estas cargas não é mostrada no gráfico...	92
Ilustração 5. 28- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 1 com SD-FEC.....	93
Ilustração 5. 29-Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para taxa de 42.8 Gb/s considerando HD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio total e bloqueio por XT) do algoritmo proposto para a carga de 4400 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB e PB por XT para essa carga não é mostrada no gráfico.....	94
Ilustração 5. 30- Utilização da rede das estratégias SCA para taxa de 42.8 Gb/s com HD-FEC.....	95
Ilustração 5. 31- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para as taxas de 42.8 e 112 GB/s considerando SD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio total e bloqueio por XT) do algoritmo proposto para a carga de 2600 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB e PB por XT para essa carga não é mostrada no gráfico.....	96
Ilustração 5. 32- Utilização da rede das estratégias SCA para taxa de 42.8 E 112 Gb/s com SD-FEC. ....	97

# LISTA DE QUADROS

Quadro 2. 1- $SNR_b$ requerida. ....	36
Quadro 2. 2- Relação $OSNR_{req}$ para HD-FEC com $BER= 3,8 \times 10^{-3}$ . ....	38
Quadro 2. 3- Relação $OSNR_{req}$ para SD-FEC com $BER= 1,5 \times 10^{-2}$ . ....	38
Quadro 2. 4- Limite de XT com 1 dB de penalidade na OSNR para HD-FEC. ....	39
Quadro 2. 5- Limite de XT com 1 dB de penalidade na OSNR para SD-FEC. ....	39
Quadro 2. 6- Limite de XT para $P_o = 10^{-5}$ para HD-FEC. ....	40
Quadro 2. 7- Limite de XT para $P_o = 10^{-5}$ para SD-FEC. ....	40
Quadro 2. 8- Relação $OSNR_{lim}$ para HD-FEC com $BER= 3,8 \times 10^{-3}$ . ....	41
Quadro 2. 9- Relação $OSNR_{lim}$ para SD-FEC com $BER= 1,5 \times 10^{-2}$ . ....	41
Quadro 3. 1- Vantagens e desvantagens das fibras ópticas em SDM. ....	44
Quadro 3. 2- Características dos problemas de provisionamento de recursos em redes ópticas. ....	47
Quadro 4. 1- Largura de Banda Total (monoportadora e supercanal vs formato de modulação). ....	57
Quadro 4. 2- Número <i>slots</i> (monoportadora e supercanal vs formato de modulação). ....	57
Quadro 5. 1- Parâmetros de Camada Física. ....	68
Quadro 5. 2- Descrição dos Cenários. ....	69

# LISTA DE ABREVIATURAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AR	<i>Adaptive Routing</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BP	<i>Blocking Probability</i>
CAPEX	<i>CAPital EXpenditure</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CO-OFDM	<i>Coherent Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
CP	<i>Core Prioritization</i>
DES	<i>Discrete Event System</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
EON	<i>Elastic Optical Network</i>
FAR	<i>Fixed Alternative Route</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FF	<i>First-Fit</i>
FMF	<i>Few-Mode Fiber</i>
FMFB	<i>Few-Mode Fiber Bundle</i>
FM-MCF	<i>Few-Mode MCF</i>
FR	<i>Fixed Route</i>
FWM	<i>Four Wave Mixing</i>
GB	<i>Guard Band</i>
GVD	<i>Group Velocity Dispersion</i>
HD-FEC	<i>Hard-Decision FEC</i>
IA	<i>Impairment Aware</i>
IABP	<i>Impairment Aware Best Path</i>
IA-R	<i>Impairment Aware Routing</i>
IA-RWA	<i>Impairment Aware RWA</i>
IA-RSA	<i>Impairment Aware RSA</i>
IA-RMLSA	<i>Impairment Aware RMLSA</i>
IA-RSCA	<i>Impairment Aware RSCA</i>

IA-SCA *Impairment Aware SCA*  
ILP *Integer Linear Programming*  
IoT *Internet of Things*  
IS-XT *Inter-Subcarrier Crosstalk*  
ITU-T *Telecommunication Standardization Sector of the International  
Telecommunication Union*  
JVM *Java Virtual Machine*  
KSP *K-Shortest Path*  
L *Linear effects*  
LEA *Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado*  
LU *Least-Used*  
LLR *Least Loaded Routing*  
MCF *Multi-Core Fiber*  
MIMO *Multiple Input Multiple Output*  
ML *Modulation Level*  
MMF *Multi-Mode Fiber*  
MU *Most-Used*  
NL *Non Linear effects*  
NP *Non Polynomial*  
NU *Network Utilization*  
N-WDM *Nyquist-WDM*  
OAWG *Optical Arbitrary Waveform Generation*  
OEO *Optical-to-Electrical-to-Optical*  
OPEX *Operational EXpenditure*  
OSNR *Optical Signal-to-Noise Ratio*  
PCE *Path Computation Element*  
PCEP *Path Computation Element Communication Protocol*  
PCC *Path Computation Clients*  
PDM *Polarization Division Multiplexed*  
PLI *Physical Layer Impairment*  
PMD *Polarization Mode Dispersion*  
QAM *Quadrature Amplitude Modulation*  
QPSK *Quadrature Phase Shift Keying*  
QoT *Quality of Transmission*

*R Routing*

*RA Regenerator Assignment*

*RD Random*

*ROADM Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*

*RWA Routing and Wavelength Assignment*

*RSA Routing and Spectrum Assignment*

*RML Routing and Modulation Level*

*RMLSA Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*

*RSCA Routing, Spectrum and Core Assignment*

*SA Spectrum Assignment*

*SCA Spectrum and Core Assignment*

*SD-FEC Soft-Decision FEC*

*SDM Space Division Modulation*

*SimROEL Simulador de Redes Óptica ELástica Multi núcleo*

*SMF Single-Mode Fiber*

*SMFB Single-Mode Fiber Bundle*

*SNR Signal Noise Ratio*

*SPM Self-Phase Modulation*

*TON Transparent Optical Networks*

*WA Wavelength Assignment*

*WDM Wavelength Division Multiplexing*

*WSS Wavelength Selective Switch*

*XPM Cross-Phase Modulation*

*XT Inter-Core Crosstalk*

*XT-WC Inter-Core Crosstalk Worst Case*



## RESUMO

Em redes ópticas elásticas (EONs), empregando fibra multi-núcleo (MCF) com núcleos monomodo fracamente acoplados, a diafonia entre os núcleos (XT) pode afetar significativamente o desempenho da rede, particularmente com o aumento do número de núcleos e o comprimento da rota. Portanto, em nível de rede, o problema de roteamento e atribuição de núcleo e espectro (RSCA) consciente de limitações de camada física (IA) é um importante desafio de pesquisa de MCF-EONs. Nesta tese, uma metodologia de provisionamento dinâmico é proposta para resolver de forma independente o problema IA-RSCA levando em conta limitações de camada física. Para obter a minimização do impacto da XT, decompõe-se o problema IA-RSCA em dois subproblemas: o subproblema de roteamento IA e o subproblema de atribuição de núcleo e espectro (IA-SCA). Para a solução de roteamento, um método de pré-computação baseado no  $k$  caminhos mais curtos é usado, e uma fase de verificação de limitação de camada física é realizada levando em consideração a relação sinal ruído óptica requerida. Para o subproblema IA-SCA, o novo algoritmo guloso XT-aware é proposto para minimizar o impacto da XT no desempenho das MCF-EONs da seguinte maneira: para cada nova conexão, o nível de potência da XT detectada da nova conexão e conexões interferentes em relação ao limite de potência da XT de cada conexão é minimizado na média sobre todas essas conexões. Essa minimização é obtida escolhendo o núcleo e o intervalo de frequência da nova conexão. De modo a ter em conta a extensão de sobreposição espectral das conexões novas e interferentes na potência da XT detectada, um novo índice de sobreposição de intervalos de frequência é introduzido. O desempenho do algoritmo proposto é avaliado por meio de simulações computacionais. Os resultados mostram que a probabilidade de bloqueio total e a utilização média da rede obtida pelo algoritmo proposto são melhores que as obtidas pelas estratégias de priorização de núcleo, aleatória e *first-fit*, para diferentes cenários de nível da XT e fragmentação do espectro.

**Palavras-chave:** Algoritmo Guloso, Diafonia entre núcleos, Fibra Multi-Núcleo, Multiplexação por Divisão Espacial, Rede Óptica Elástica, Roteamento, Atribuição de Núcleo e Espectro.

# ABSTRACT

*In elastic optical networks (EONs) employing weakly-coupled single-mode multi-core fibers (MCF), inter-core crosstalk (XT) can affect significantly the network performance, particularly when the number of cores and the path length increase. Hence, from the network perspective, the impairment-aware (IA) routing, spectrum and core assignment (RSCA) problem is an important research challenge of MCF-EONs. In this thesis, we propose a dynamic provisioning methodology that solves independently the IA-RSCA problem taking impairments physical layer into account. To achieve the XT impact minimization, we decompose the IA-RSCA problem into two subproblems: the IA routing sub-problem and the IA spectrum and core assignment (IA-SCA) sub-problem. For the routing solution, a pre-computation method based on the  $k$ -shortest path is used, and a physical layer impairment verification phase is performed taking the required optical signal to noise ratio into account. For the IA-SCA sub-problem, the novel XT-aware greedy algorithm is proposed to minimize the XT impact on the MCF-EONs performance as follows: for each new connection, the level of detected XT power of the new connection and interfering connections relative to the XT power threshold of each connection is minimized on the average over all those connections. This minimization is achieved by choosing the core and frequency slot of the new connection. In order to take the spectral overlapping extension of the new and interfering connections into account in the detected XT power, a novel frequency slot overlapping index is introduced. The performance of the proposed algorithm is evaluated through computer simulations. The results show that the total blocking probability and network average utilization achieved by the proposed algorithm are better than the ones obtained by core prioritization, random and first-fit strategies, for different scenarios of XT level and spectrum fragmentation.*

**Keywords:** greedy algorithm, inter-core crosstalk, multi-core fiber, space division multiplexing, elastic optical network, routing, spectrum and core assignment.

# CAPÍTULO 1 – Introdução

## 1.1. Contextualização

Atualmente, a sociedade da informação e do conhecimento baseia-se na troca rápida e confiável de informações. Para isto, avançados sistemas de comunicação tem que suportar o funcionamento tanto do mundo corporativo (videoconferência em alta qualidade, transações bancárias) quanto no ambiente doméstico (jogos eletrônicos em tempo real, serviço de streaming de vídeo). Além disso, inúmeras novas aplicações e serviços estão emergindo na Internet (como por exemplo: diagnósticos e tratamentos de saúde, internet das coisas (IoT) e computação em nuvem) e necessitarão cada vez mais de comunicações de alta capacidade [1]. A fim de suprir essas necessidades de forma mais eficaz, as redes de fibra óptica vem evoluindo ao longo do tempo com relação a novos conceitos, *hardware*, arquiteturas e tecnologias [2].

Na rede multiplexada por divisão de comprimento de onda (WDM), os recursos no espectro são atribuídos a cada conexão utilizando uma grade fixa. O tamanho desta grade tem que ser grande o suficiente para garantir recursos para todas as conexões da rede. Assim, quando uma conexão requer menos recursos no espectro ocorrerá subutilização, ou seja, desperdício. Além disso, vários elementos de projeto de rede, tais como o formato de modulação, são decididos considerando as piores condições da rede com relação a limitações de camada física. Para superar esta ineficácia, a rede óptica elástica (EON) foi proposta para reduzir o desperdício de recursos (espectro) através de um novo conceito: a flexibilidade [3], [4]. Assim, diversas características que nas redes WDM eram fixas tornaram-se flexíveis nas redes EONs. Uma das primeiras e principais características que se tornou flexível foi a grade e até por isso as redes elásticas também ficaram conhecidas como redes de grades flexíveis (*flex-grid*) [5-7].

Nas EONs, em contraste às redes WDM, os recursos no espectro são atribuídos para cada conexão com a grade flexível. Assim, quando é necessária uma rota com caminho curto, a rede pode selecionar formatos de modulação espectralmente mais eficientes, tais como multiplexação por divisão de polarização detectada coerentemente (PDM) com 16 pontos de constelação sendo modulados em amplitude em quadratura (16-QAM) e PDM 64-QAM, devido a estes formatos requererem maior relação sinal-ruído (SNR), para uma dada probabilidade/taxa de erro de bit (BER), do que formatos espectralmente menos eficientes, tais como PDM 8-QAM e o chaveamento em quadratura de fase (QPSK). Por outro lado,

quando uma rota com caminho longo é necessária, a rede seleciona um formato de modulação espectralmente menos eficiente, como, por exemplo, QPSK por causa da baixa SNR requerida. Neste caso, a atribuição do espectro se torna adaptativa à distância em EONs economizando os recursos no espectro [4].

A capacidade das EONs de atribuir o espectro permite uma maior flexibilidade a essas redes para lidar com demandas de tráfego que variam de *sub-wavelength* para supercanais. Isto acarreta uma utilização eficaz dos recursos no espectro [8]. Vários experimentos demonstraram a viabilidade das EONs [9], [10]. A fim de implantar uma EON, o espectro disponível, por exemplo, banda C, tem que ser mais granularizado em comparação com a grade rígida atual de 50 GHz [11]. Para tanto, existem propostas para a largura dos canais ópticos (*slot*) em redes EON podendo ser de 25, 12,5, e até 6,25 GHz [12].

A fim de atribuir *slots* de acordo com as demandas de tráfego, o problema de roteamento e atribuição comprimento de onda (RWA) é modificado para o problema de roteamento e atribuição de espectro (RSA) em EON [13]. O problema RSA é muito mais complexo do que o problema RWA, pois tem a considerar o roteamento e as restrições, como a contiguidade e continuidade do espectro. A contiguidade de espectro assegura que os *slots* para uma demanda de tráfego precisam ser consecutivos no domínio do espectro. Da mesma forma, a continuidade de espectro impõe que os *slots* atribuídos em cada enlace devem ser os mesmos ordenadamente ao longo de toda rota (fim a fim).

Visando solucionar o problema RSA, diversas pesquisas foram realizadas em EON [14-16]. Entre elas, foram propostos algoritmos RSA detalhados para as EONs [14], [15]. Uma das formas de solucionar o problema RSA é utilizando Programação Linear Inteira (ILP) e sua função objetivo é minimizar o número de *slots* [14], [16]. Assim, foram propostos métodos para o problema RSA tanto em ILP como em abordagens heurísticas [15], [17]. Além disso, existem trabalhos que consideram, além do problema RSA, o formato de modulação, sendo este problema conhecido como problema de roteamento, nível de modulação e atribuição de espectro (RMLSA) [18], [19]. Após a adição dos formatos de modulação, incluiu-se o conceito de supercanal Nyquist-WDM (N-WDM) [20], agregação de subportadoras ópticas, a fim de alcançar melhores taxas de transmissão e melhorar o desempenho do sistema. No entanto, os métodos para RSA com base em abordagem ILP tem um comportamento exponencial se encaixando em um problema NP-Completo. Além disso, se houver erros na matriz de tráfego de entrada, a solução ótima não é calculada. Outra questão é que estes métodos baseados em ILP não consideram o modelo de tráfego dinâmico

não sendo adequado para o modelo de rede realista. Para lidar com esse problema, em [18] é proposto a introdução de um modelo de tráfego probabilístico.

No entanto, mesmo com a evolução para EON, a demanda por largura de banda continua a aumentar drasticamente com o tempo. Por outro lado, há uma crescente percepção de que a capacidade de transmissão das redes baseadas em fibra óptica monomodo (SMF) está se aproximando rapidamente do seu limite fundamental [21], [22]. De forma a superar esta limitação de capacidade e alcançar uma maior taxa de transmissão e eficiência espectral, a comunidade científica começou a considerar uma nova dimensão que ainda não havia sido utilizada: o espaço [23].

Com este objetivo, foi proposta a multiplexação por divisão de espaço (SDM) que pode ser realizada de algumas formas, como por meio de múltiplas fibras monomodo (SMFB), fibra de poucos modos (FMF), fibra multi-núcleo (MCF) e fibra multi-núcleo de poucos modos (FM-MCF). A SMFB é a agregação de múltiplas fibras monomodo em uma estrutura de "feixe" de fibras. A FMF emprega a propagação de alguns modos independentes dentro de um único núcleo sendo que o número de modos suportados por uma fibra depende do diâmetro do núcleo e do índice de refração da fibra. Por outro lado, a MCF tem vários núcleos incorporados na casca da fibra e cada núcleo funciona como uma SMF. Por fim, tem-se FM-MCF que irá combinar poucos modos com a fibra de múltiplos núcleos. Dentre essas formas, a MCF é uma das soluções mais investigadas para realizar essa expansão de capacidade [24], [25]. Em vários experimentos de transmissão, a capacidade alcançada utilizando SDM vem ultrapassando a 1 Pbps/fibra [26] e quando considerado o alcance atinge a ordem de Exabit/s·km [27].

No entanto, as EONs com MCF necessitam do desenvolvimento de novos conceitos, metodologias e arquiteturas, pois além de considerar o roteamento e a atribuição de espectro terá que adicionar a atribuição de núcleo para demandas de tráfego, além de possíveis alterações com relação às restrições já conhecidas nas redes SMF-EONs, como por exemplo, a sobreposição de *slots* no espectro e restrição de continuidade.

O problema de roteamento, atribuição de núcleo e espectro (RSCA) aumenta ainda mais a complexidade computacional do problema RSA, principalmente se for resolvê-lo de forma conjunta, pois é adicionada uma nova dimensão ao problema (a dimensão do núcleo) além de utilizar um espectro de granularidade fina em comparação à rede WDM. Assim, similarmente ao problema RWA e RSA, o problema RSCA é intencionalmente dividido (R e SCA) e resolvido independentemente. Quanto ao problema de roteamento, podem-se adotar

abordagens semelhantes existentes em uma rede WDM, como: *K-shortest path* (KSP), mas considerando *slots* de granularidade fina [28].

Assim como em qualquer meio de comunicação, há um conjunto de efeitos físicos que degradam a qualidade da transmissão. Em redes ópticas não é diferente. Essas degradações são classificadas em efeitos lineares e não lineares [29]. A fim de levar em conta as limitações de camada física, diversas metodologias IA-RWA, IA-RSA e IA-RMLSA foram propostas tanto em redes WDM [30] quanto em SMF-EONs [31], [32], respectivamente.

Com relação às MCF-EONs este é mais um amplo campo de pesquisa ainda a ser explorado, pois há a necessidade de modelos que caracterizem esses efeitos físicos levando em consideração as características das MCF-EONs. No que tange a esse aspecto, nos últimos anos, em razão da diafonia inter-núcleo (XT) ser o principal efeito degradante em redes MCF-EONs, a comunidade científica propôs algumas maneiras de caracterizar estatisticamente este efeito [33-41]. A diafonia inter-núcleo ocorre quando os sinais ópticos usando os mesmos *slots* no espectro se propagam através de núcleos adjacentes da MCF. Em outras palavras, a sobreposição do espectro entre núcleos adjacentes resulta em limitar o desempenho transmissão da rede [42], [43]. Após a caracterização, diversas pesquisas para suprimir o efeito da diafonia foram propostas [44], [43] a fim de obter uma baixa diafonia e atenuação, e assim permitir que altas taxas de transmissão alcancem longas distâncias. Assim como em SMF-EON, o conceito de supercanal é também utilizado em redes MCF-EONs alcançando uma eficiência espectral ainda maior através da agregação dos núcleos [45]. Com isso, em [27], [46] através da técnica super-Nyquist-WDM são demonstrados o aumento do produto capacidade-distância para 1.03 Exabit/s·km com taxa acima de 140 T bit/s e alcance de mais de 7000 km.

No entanto, não é somente o processo de fabricação e composição da fibra [45], [46] que influenciam o efeito da diafonia em relação ao desempenho do sistema de telecomunicações, mas também o formato de modulação adotado. Em [47-49] são analisados o impacto da diafonia inter-núcleo em relação à distância de transmissão, relação sinal-ruído óptico (OSNR) e fator Q para diversos formatos de modulação. Além do efeito da diafonia, estudos recentes começam a analisar outros efeitos em redes MCF-EONs, presentes em redes SMF-EONs, e suas relações [36].

Portanto, além da perspectiva do projeto da estrutura da MCF, o impacto da diafonia inter-núcleo pode ser reduzido através de soluções que atribuam corretamente o núcleo e o espectro para as demandas [28], [50]. No entanto, não há mecanismos de provisionamento dinâmico otimizado para solucionar o problema IA-RSCA.

Sendo assim, esta pesquisa aborda os principais aspectos relacionados ao processo IA-RSCA considerando as restrições impostas pela camada física em redes ópticas SDM-EONs, sendo proposta uma metodologia de provisionamento dinâmico para resolver o problema IA-RSCA que visa à minimização do efeito da diafonia inter-núcleo entre sinais propagantes baseada em um algoritmo guloso, podendo ser aplicada em cenários dinâmicos onde a matriz de tráfego não é conhecida a priori.

## 1.2. Trabalhos Correlatos

Os trabalhos destacados nesta seção sintetizam o atual “estado da arte” da linha de pesquisa desta tese e servirão como base para o seu desenvolvimento.

Uma das MCF mais promissoras é a MCF monomodo fracamente acoplado [27], [35] [43], [51-54]. Nesta MCF, os múltiplos núcleos são suficientemente separados e cada núcleo guia um único modo, de forma que a energia acoplada seja muito baixa entre os núcleos ao longo de enlaces da MCF de poucos quilômetros de comprimento [27], [43], [53]. O efeito da XT é muito mais forte entre núcleos adjacentes do que entre núcleos não adjacentes devido à proximidade. O efeito da XT ocorre sempre que sinais ópticos são transmitidos em uma faixa de espectro sobreposta e a sua geração é distribuída ao longo da MCF [36], [43]. Além disso, a XT tem uma variação aleatória no tempo dependendo da frequência que pode causar um comportamento aleatório de altos níveis da XT em curtos períodos de tempo [35], [37-39]. Assim, a XT pode causar um impacto significativo na qualidade do sinal, particularmente para MCF com um grande número de núcleos adjacentes e rotas com comprimentos longos.

Portanto, diversas pesquisas foram realizadas sobre a caracterização e supressão da XT em MCF fracamente acoplados. Modelos da dependência da potência média da XT sobre os parâmetros da MCF (índice de refração do núcleo e raio, curvatura e torção, distância entre os núcleos), polarização dupla e comprimento de onda foram relatados em [9], [17-20], [27], fornecendo uma ferramenta valiosa para avaliação do impacto da XT no desempenho das MCF-EONs. Além disso, modelos para a variação aleatória no tempo dependendo da frequência foram propostos e validados [38], [39]. A supressão da XT tornou-se uma preocupação primordial nas pesquisas sobre MCF fracamente acoplado a fim de permitir alta capacidade e transmissão em longas distâncias [21], [43], [53], [54]. Diversas soluções foram propostas para reduzir o impacto da XT na qualidade do sinal, tanto no projeto da estrutura da MCF, como por exemplo: usando uma estrutura de "trincheira" ao redor de cada núcleo para melhorar o confinamento do campo óptico (*trench-assisted* MCF) [43], [52], [53], como em técnicas para redução do impacto da XT, por exemplo, usando a transmissão de sinais em

direções opostas em núcleos adjacentes da MCF [54]. Devido ao comportamento aleatório, a XT afeta a qualidade da transmissão do sinal de duas formas [47]: i) em curtos períodos de tempo, causando uma variação no fator Q [49] ou, similarmente, na degradação da OSNR requerida para a mesma BER [47]; ii) durante longos períodos de tempo, causando períodos de interrupção devido aos altos níveis da XT que ocorrem em intervalos curtos de tempo [37], [47]. Assim, ambos os impactos da XT devem ser considerados ao avaliar o desempenho das MCF-EONs.

A distância máxima de transmissão imposta pela XT depende das características da MCF (como: *core pitch* (distância entre os núcleos), índice de refração e número de núcleos), formato de modulação utilizado e o nível de BER considerado. Em alguns casos, distâncias relativamente curtas são impostas [47]. Para uma MCF de núcleo fracamente acoplado com 44,3  $\mu\text{m}$  de *core pitch* e um moderado nível da XT de -32,2 dB/100 km, a distância máxima de transmissão imposta pela XT correspondente a 1 dB de degradação da OSNR para uma BER de  $1,5 \times 10^{-2}$  é de 1585 km utilizando PDM 16-QAM e 417 km para PDM 64-QAM [47]. Distâncias de transmissão máxima semelhantes impostas pela XT para uma penalidade de 1 dB em MCF-EON podem ser encontradas na Tabela IV em [56]. Outros trabalhos que levam em conta a dependência do impacto da XT em relação ao formato de modulação também consideram o alcance de transmissão imposto pela XT para uma penalidade de 1 dB [48], [57], [58]. As distâncias máximas de transmissão impostas pela XT para uma penalidade de 1 dB são uma superestimação do alcance de transmissão devido a XT, uma vez que as distâncias de transmissão impostas pela XT correspondentes à probabilidade de interrupção são ainda mais baixas [47]. Para a mesma MCF fracamente acoplado com o nível da XT de -32,2 dB/100 km e uma probabilidade de interrupção de  $1 \times 10^{-5}$  definida para os mesmos níveis de BER ( $1,5 \times 10^{-2}$ ), a distância máxima de transmissão imposta pela XT é de 468 km para PDM 16-QAM e 123 km para PDM 64-QAM [47]. Para níveis mais baixos de BER ( $1 \times 10^{-3}$ ), essas distâncias máximas de transmissão impostas pela XT diminuem ainda mais, para 214 km e 54 km, respectivamente. Alcances de transmissão similares são relatados em [59] onde o quantil 0,9999 da distribuição da XT é usado para definir o nível de XT aceitável que leva em conta as variações estocásticas da XT.

No entanto, uma nova geração de MCF fracamente acoplado (*trench-assisted* MCF) foi desenvolvida para reduzir o nível de XT. Um dos níveis mais baixos da XT relatados foi -72,4 dB/100 km por núcleo, para uma *trench-assisted* MCF de sete núcleos com *core pitch* de 45  $\mu\text{m}$  e o diâmetro da casca de 150  $\mu\text{m}$  [43], [52]. Portanto, esse tipo de MCF permite aumentar significativamente a distância máxima de transmissão imposta pela XT. Por outro



lado, a *trench-assisted* MCF também foi proposta para possibilitar o aumento do número de núcleos (a fim de aumentar a capacidade da MCF), porém reduzindo o *core pitch* entre os núcleos para obter diâmetros de revestimento (limitados pelos requisitos de confiabilidade mecânica a menos de 230  $\mu\text{m}$  [60]), mantendo o nível de XT em valores aceitáveis. No entanto, esta redução do *core pitch* pode levar a um nível de XT muito alto. Com um *core pitch* de 32  $\mu\text{m}$  e diâmetro de revestimento de 180  $\mu\text{m}$ , uma *trench-assisted* MCF de 19 núcleos têm um nível de XT de cerca de  $-25$  dB/100 km por núcleo [39]. Portanto, uma *trench-assisted* MCF de alta capacidade provavelmente mostrará níveis de XT que impõe limitação significativa da distância de transmissão. Considerando as distâncias máximas de transmissão mostradas acima, essa limitação pode acontecer mesmo para MCF- EON de alta capacidade, onde conexões com centenas de quilômetros e formatos de modulação de ordem superior são considerados.

Como a XT pode causar um impacto significativo no desempenho da MCF-EON, tanto na fase de planejamento como de operação dessas redes, necessita-se levar em conta o impacto da XT [28], [56], [59], [61-64]. Da perspectiva de rede, o problema de roteamento, atribuição de núcleo e espectro considerando limitações de camada física (IA-RSCA) é um importante desafio de pesquisa em MCF-EON [56], [59]. Esse problema pode ser resolvido de forma conjunta ou independente (roteamento considerando deficiências de camada física (PLI) (IA-R) e, depois, atribuição de núcleo e espectro considerando PLI (IA-SCA)), por meio de abordagens estáticas ou dinâmicas. Há principalmente três abordagens quando se considera como restrição a XT na atribuição de núcleo e espectro: i) a abordagem *XT-avoid*, que evita a sobreposição dos *slots* de frequência entre os núcleos adjacentes [61-63], ii) o pior caso da XT (XT-WC), que considera um cenário de pior interferência causada por XT [28], [56] e iii) o *XT-aware*, que calcula o nível de XT dependendo da interferência de um núcleo com outros núcleos adjacentes ativos que compartilham os mesmos slots de frequência e enlace [61], [64]. As abordagens *XT-avoid* e XT-WC podem simplificar o problema IA-RSCA e reduzir significativamente a complexidade do problema. No entanto, a abordagem *XT-aware* tem melhor desempenho do que as abordagens *XT-avoid* e XT-WC, pois leva a uma solução ideal em termos de menor impacto da XT [61].

No cenário estático, o problema de planejamento IA-RSCA é geralmente resolvido usando a ILP. Os modelos de otimização ILP (abordagem XT-WC) e ILP mista (abordagem *XT-aware*) e o algoritmo heurístico (abordagem *XT-aware*) foram propostos [61]. Algumas soluções utilizando algoritmo guloso a fim de reduzir o uso do espectro em SDM-EON foram propostas [65], porém nessas soluções o impacto da XT foi negligenciado. No cenário

dinâmico, algumas soluções foram propostas para resolver o problema RSCA [62], [63]. Uma solução algorítmica para o problema IA-RSCA sobdemanda baseado na abordagem XT-avoid foi proposta para mitigar o impacto da XT em MCF [62]. Assim como um método para o problema IA-SCA “sob demanda” foi proposto com base em duas políticas: i) classificação de núcleo predefinida, que reduz a fragmentação do espectro e ii) priorização de núcleo predefinida (CP), que prioriza a alocação em núcleos não adjacentes, a fim de reduzir o impacto da XT (*XT-avoid*) [63]. Portanto, não é de conhecimento do autor baseado na literatura prévia, tratando-se de cenários dinâmicos, a existência de soluções gulosas para o problema IA-SCA que gerenciam o nível de XT, ou seja, que utilizem o nível de XT como parâmetro de otimização para o problema IA-SCA.

Neste contexto, um algoritmo guloso *XT-aware* para IA-SCA é proposto a fim de minimizar o impacto global da XT (conexões novas e interferentes) no desempenho das MCF-EONs. Este algoritmo soluciona o sub-problema IA-SCA no problema IA-RSCA. Nesta tese, uma metodologia de provisionamento dinâmico é proposta para resolver de forma independente o problema IA-RSCA levando em conta o PLI. Como solução de roteamento, um método de pré-computação baseado em KSP é executado e, após, uma fase de verificação de PLI levando em consideração a OSNR requerida é realizada. Para o subproblema IA-SCA, um novo algoritmo baseado em uma estratégia gulosa é proposto para minimizar o impacto da XT no desempenho das MCF-EONs da seguinte maneira: para cada nova conexão, o nível de potência da XT detectado da nova conexão e das conexões interferentes em relação ao respectivo limite de potência da XT suportado por cada conexão é minimizado em média sobre todas essas conexões. Essa minimização é obtida escolhendo o núcleo e o *slot* de frequência da nova conexão. Em cada enlace da MCF-EON, conexões em núcleos adjacentes podem afetar diferentemente o nível da XT, dependendo da extensão de sobreposição espectral dessas conexões. De modo a ter em conta a extensão de sobreposição espectral das conexões novas e interferentes na potência média da XT detectada, um novo índice de sobreposição de *slots* de frequência é proposto. Similarmente ao algoritmo guloso IA-SCA, não é de conhecimento do autor baseado na literatura prévia nenhum trabalho anterior que considere o número de *slots* de frequência sobrepostos para calcular a potência média da XT detectada.

### **1.3. Definição de Hipótese**

A hipótese desta tese é de que a metodologia proposta seja utilizada no cenário de operação de redes ópticas elásticas multiplexadas por divisão de espaço, e que possa ser implantada nos operadores destas redes para a tomada de decisão no que concerne ao roteamento e a atribuição de núcleo e espectro em um determinado cenário de rede, considerando limitações de camada física.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Geral**

Desenvolver uma metodologia para o provisionamento dinâmico de recursos em redes ópticas elásticas multiplexadas por divisão de espaço através de fibras multi-núcleo fracamente acopladas com um único modo, a fim de solucionar o problema de roteamento levando em conta a OSNR e atribuição de núcleo e espectro reduzindo o impacto do efeito da diafonia inter-núcleo.

#### **1.4.2. Específicos**

São objetivos desta tese:

- Propor uma metodologia que resolva o problema IA-RSCA separadamente em dois subproblemas IA-R e IA-SCA.
- Propor uma solução de roteamento que utilize a OSNR (considere como ruído: ASE e a penalidade proveniente da diafonia inter subportadora (IS-XT) nos supercanais Nyquist-WDM) na fase de verificação.
- Aplicar um modelo analítico para estimar a densidade espectral de potência da acumulação do ruído ASE sobre os enlaces e nós da rota fim a fim.
- Propor um índice de sobreposição de slots de frequência para quantificar os slots sobrepostos entre conexões adjacentes.
- Inserir o índice proposto no modelo analítico para estimar a potência média da XT.
- Propor um algoritmo guloso para IA-SCA a fim de minimizar o impacto da XT global da rede.
- Analisar cenários que sejam impactados pelo efeito XT em redes MCF-EONs.
- Realizar testes de desempenho em diferentes topologias de rede variando a carga de tráfego.
- Avaliar os resultados alcançados, comparando-os com bibliografias de referência da área.

## 1.5. Principais Contribuições

Como principais contribuições desta tese, destacam-se:

- Concepção de uma metodologia para o provisionamento dinâmico de recursos em MCF-EON considerando limitações de camada física.
- Desenvolvimento de uma solução de roteamento que verifica a OSNR (requerida e a calculada) considerando a ASE e a penalidade proveniente da IS-XT.
- Proposição e inclusão de um índice de sobreposição de *slots* no modelo analítico da potência média da XT, proporcionando uma melhor acurácia no impacto da XT entre as conexões em núcleos adjacentes.
- Desenvolvimento de um algoritmo guloso capaz de selecionar o núcleo e faixa de espectro em uma fibra MCF que minimize o impacto da XT global da rede.
- Formulação de uma métrica de decisão, utilizada pelo algoritmo guloso, que considera a XT da conexão interferida e interferentes (média das diferenças entre o limite de diafonia suportado pela conexão e a diafonia recebida pela conexão).
- Desenvolvimento de um simulador de redes ópticas elásticas com suporte a multiplexação por divisão espacial, proporcionando a implementação de soluções algorítmicas para o problema IA-RSCA.
- Realização de simulações em cenários próximos da situação real em termos de parâmetros de camada física, para validação dos preceitos fundamentais da proposta.
- Auxiliar os operadores da rede na alocação dos recursos para que possam suportar o comportamento dos serviços que serão oferecidos sobre a infraestrutura de rede existente, evitando/reduzindo assim, as possíveis limitações nos mais variados cenários.
- Divulgação dos resultados a partir da publicação aceita (ver subseção 6.5) e demais resultados a serem submetidos em periódicos e conferências nacionais e internacionais.

## 1.6. Organização do Trabalho

Para um melhor entendimento dos temas aqui tratados, esta tese está organizada da seguinte maneira: o primeiro capítulo apresenta a introdução, expondo a contextualização do trabalho, trabalhos correlatos, a definição da hipótese, os objetivos, suas principais contribuições e sua respectiva organização.

No segundo capítulo, são apresentados os principais efeitos de camada física que degradam o sinal óptico ao longo do caminho de transmissão, sendo feita uma abordagem

mais detalhada sobre o efeito da XT proveniente em fibras MCF, e as métricas de qualidade de transmissão (QoT). No terceiro capítulo, é realizada uma extensa revisão bibliográfica acerca dos principais aspectos referentes à SDM-EON, focando principalmente no estado da arte dos mecanismos de provisionamento de recursos em redes ópticas considerando limitações de camada física desde redes WDM até SDM-EON, bem como, diversos conceitos envolvidos em provisionamento de recursos.

O quarto capítulo descreve a proposta de provisionamento dinâmico de recursos para o problema IA-RSCA em MCF-EON, focando no algoritmo proposto para o subproblema IA-SCA objetivando reduzir o impacto da XT. Além disso, propõe-se um índice de sobreposição de *slots* de frequência a fim de considerar para o cálculo da potência média da XT diversos cenários de sobreposição de *slots* entre as conexões em núcleos adjacentes.

No quinto capítulo descreve-se as configurações das simulações e a análise dos resultados do algoritmo proposto comparando com algumas estratégias da literatura para a resolução do subproblema IA-SCA contida na metodologia de provisionamento dinâmico para a resolução do problema IA-RSCA em MCF-EON.

Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho, bem como são relacionados possíveis trabalhos futuros.

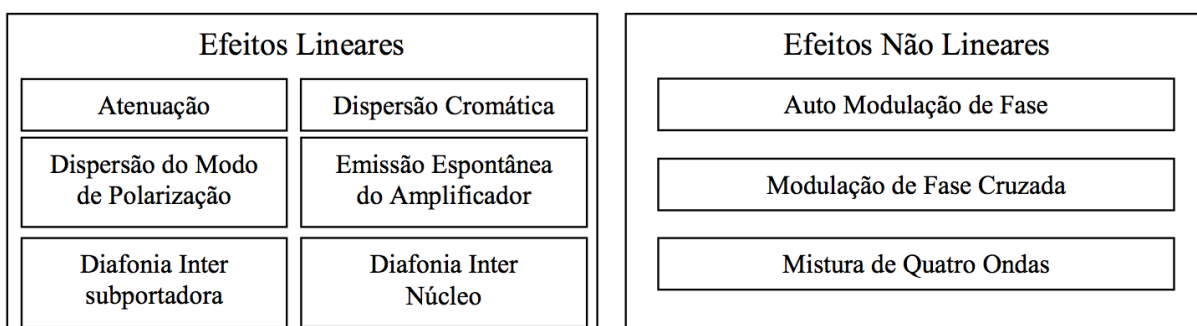
# CAPÍTULO 2 – Efeitos de Camada Física sobre a Qualidade de Transmissão

Este capítulo apresenta os efeitos de camada física em redes ópticas, detalhando os efeitos em um cenário de redes MCF- EONs, e as métricas de QoT levados em consideração nesta tese.

## 2.1. Efeitos de Camada Física

O sinal óptico é degradado por um meio de transmissão não ideal, pois o sinal recebido é uma versão distorcida do sinal transmitido resultando em erros na recepção dos dados. O sinal é degradado através da acumulação de ruído e por efeitos na transmissão que causam distorções no sinal [66], [67]. Os efeitos na transmissão podem ser classificados como: lineares ou não lineares, conforme a ilustração 2.1.

**Ilustração 2. 1- Efeitos lineares e não lineares.**



Fonte: Autor.

Existem inúmeras fontes de ruído em uma rota de transmissão nos domínios elétrico, óptico e digital. No transmissor, há um potencial ruído digital a partir da conversão digital para analógico, o ruído elétrico e térmico na eletrônica de acionamento, e o ruído de intensidade relativa do laser e de fase da fonte óptica. Assume-se que para um sinal óptico ser transmitido a certa distância as perdas sofridas pelo sinal óptico irão ser compensadas através da amplificação. O processo de amplificação óptica irá introduzir ruído na forma de emissão espontânea amplificada (ASE). Já, no receptor haverá o ruído de corrente devido à natureza quântica da luz. Além disso, existe o ruído elétrico ou térmico na eletrônica antes da digitalização, o ruído nos conversores analógico-digital e o ruído digital no receptor DSP. Um bom projeto de transmissor e receptor pode minimizar muitas destas fontes de ruído e que para transmissões de longa distância (múltiplos enlaces) a única fonte de ruído estocástico significativa é o ruído ASE dos amplificadores ópticos intermediários.

Os efeitos lineares causam distorção no sinal e são proporcionais à intensidade do sinal de tal modo que a forma distorcida do sinal é independente da intensidade do sinal. Os efeitos são: atenuação, cujo sinal é acoplado na fibra com uma determinada potência e ao percorrer a distância total do enlace, o sinal de saída terá uma amplitude menor do que o sinal originalmente transmitido [68]; dispersão cromática (CD), onde a velocidade de grupo do sinal é dependente da frequência e a dispersão dos modos de polarização (PMD), em que a velocidade de grupo do sinal depende do seu estado de polarização. Ambos os efeitos de dispersão levam a um alargamento da forma de onda do sinal causando sobreposição entre símbolos transmitidos. Com relação à diafonia, tem-se a diafonia inter subportadora e a internúcleo. A IS-XT é proveniente da interferência entre os sinais ópticos nas subportadoras que compõem os supercanais N-WDM, e a XT é causada pela interferência de sinais ópticos na mesma faixa de frequência em núcleos adjacentes em fibras MCF. Em receptores coerentes, os efeitos lineares de dispersão cromática e dispersão do modo de polarização podem ser equalizados e removidos dentro do receptor pelo DSP [69] [70].

Os efeitos não lineares proporcionam distorções no sinal que não são proporcionais à intensidade do sinal óptico, e tendem a aumentar mais rapidamente com o aumento da intensidade do sinal óptico. Estes efeitos não lineares são causados pelo efeito *Kerr*, através da susceptibilidade elétrica de terceira ordem, e também de interações não lineares entre o campo óptico e o meio de comunicação, por meio de vibrações moleculares dentro do material são gerados os efeitos *Brillouin* e *Raman* [66]. O efeito *Kerr* faz com que o índice de refração do meio de transmissão passe a ser dependente da intensidade óptica, resultando em efeitos como a automodulação fase (SPM), modulação de fase cruzada (XPM) e mistura de quatro ondas (FWM).

Uma abordagem mais detalhada será dada ao ruído de emissão espontânea do amplificador e aos efeitos da diafonia inter subportadora e diafonia internúcleo, por serem considerados os efeitos dominantes no cenário de MCF-EON e no modelo de camada física utilizado nesta tese. Neste trabalho consideram-se todas as variáveis com letras minúsculas em unidades lineares e com letras maiúsculas em decibéis (dB).

### **2.1.1. Emissão Espontânea do Amplificador (ASE)**

Enlaces com fibras ópticas monomodo na terceira janela possuem atenuação em torno de 0.2 dB/km com largura de banda de vários THz. Entretanto, após longas distâncias de transmissão, a atenuação na fibra reduz a potência do sinal abaixo do limiar detectável pelos receptores ópticos, tornando necessária a amplificação óptica. Esta amplificação minimiza o

processo de conversão óptico-elétrica-óptico (OEO) que vem se tornando cada vez mais complexo e caro com o aumento da taxa de transmissão.

A amplificação óptica usual é feita através de amplificadores, com fibra dopada com érbio (EDFA), espaçados em torno de 80 a 100 km, em sistemas terrestres de longa distância [71], [72].

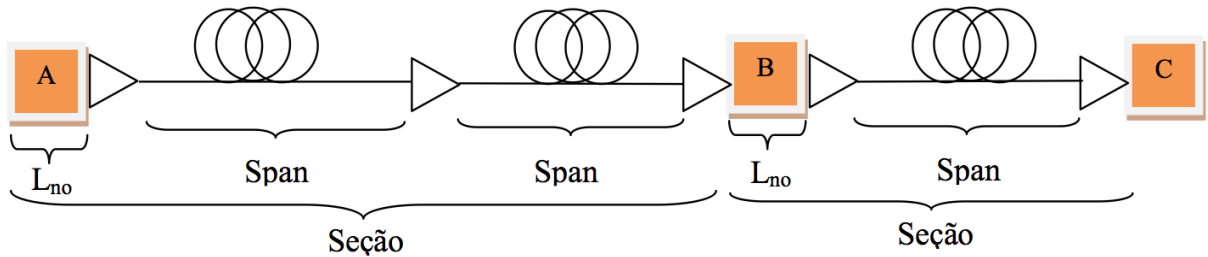
Os amplificadores ópticos introduzem o ruído ASE. O efeito do ruído ASE adiciona flutuações ao sinal amplificado, as quais são convertidas em flutuações de corrente pela foto-detecção. A densidade espectral de potência do ruído ASE é relativamente constante (ruído branco) [73], [74]. Entretanto, as propriedades estatísticas da ASE podem ser modificadas pelas interações não lineares durante a propagação da fibra. A densidade espectral de potência do ruído ASE em uma polarização é definida para um amplificador óptico por:

$$s_{ase} = \frac{f_n}{2} (g - 1) \cdot h \cdot \nu \quad (2.1)$$

$$G = \alpha \cdot L_{span} \quad (2.2)$$

A equação (2.1) calcula a densidade espectral de potencia do ruído ASE para uma polarização através dos seguintes parâmetros:  $f_n$  é a figura de ruído,  $h$  é a constante de *Planck* ( $6,626 \times 10^{-34}$  J·s),  $\nu$  é a frequência da portadora do canal óptico ( $1,94 \times 10^{14}$  Hz em 1550 nm) e  $G$  é o ganho do amplificador para compensar as perdas da seção (enlaces ou nós). Na equação (2.2) é calculado o ganho baseado no coeficiente de atenuação da fibra ( $\alpha$ ) e no comprimento do span ( $L_{span}$ ). Note que neste caso cada amplificador compensa exatamente as perdas de cada seção ( $g_k = l_k$ ), em que  $l_k$  são as perdas da seção.

### Ilustração 2. 2- Seções com um ou vários spans.



Fonte: Autor.

No entanto, ao longo de uma rota podem-se ter diversos amplificadores e o ruído da ASE será acumulado pelo número de seções ( $N_{sec}$ ). Então, o cálculo da densidade espectral de potencia do ruído ASE total ( $s_{tot_{ase}}$ ) de uma rota fim a fim é dado pela equação (2.3):

$$s_{tot_{ase}} = \sum_{i=1}^{N_{sec}} s_{ase_i} \quad (2.3)$$

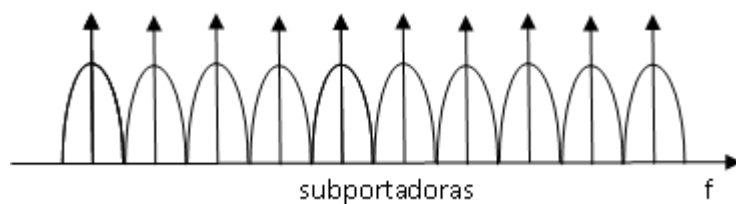


### 2.1.2. Diafonia Inter Subportadoras para Supercanais Nyquist-WDM

Atualmente, grupos de pesquisa começam a considerar a agregação de dados a fim de alcançar 1 Tb/s por canal de transmissão. Pois se fosse utilizada apenas uma única portadora para a transmissão na mesma banda seria necessária a utilização de formatos de modulação com alta eficiência espectral, como por exemplo, PM-1024QAM. A utilização de tais formatos causaria diversos problemas, como baixa sensibilidade, exigências extremas de ruído de fase, intolerância a não linearidade, problemas de largura de banda de hardware, necessidade de ultrarrápidos conversores analógico-digital (ADC) no transmissor (Tx) e, em última análise, muito curto alcance menos de algumas dezenas de quilômetros, mesmo considerando códigos com *Soft-Decision Forward Error Correction* (SD-FEC). Outra restrição seria a limitação na banda elétrica dos receptores.

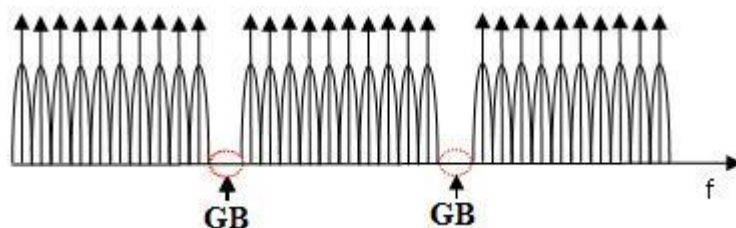
Portanto, conexões com capacidade de Terabit/segundo por canal devem ser tratadas de maneira diferente. Recentemente, diversas técnicas surgiram a fim de agregar 1 Tb/s através da composição de subportadoras [75-83]. Conexões com altas capacidades de centenas de Gb/s ou Tb/s são chamadas de supercanais e podem ser roteadas através de multiplexadores ópticos reconfiguráveis (ROADMs) e comutadores (WSS) como uma única entidade. Por exemplo: um supercanal com 1 Tb/s pode ser obtido utilizando dez (10) subportadoras, cada uma com 100G 4-QAM. Note-se que se pode também utilizar formatos de modulação mais eficientes espectralmente que irão ocupar menos espectro. A ilustração 2.3 vê-se a agregação de subportadoras a 100Gb/s formando um supercanal.

**Ilustração 2. 3- Supercanal 1 Tb/s.**



Fonte: Autor.

**Ilustração 2. 4- Agregação de supercanais.**



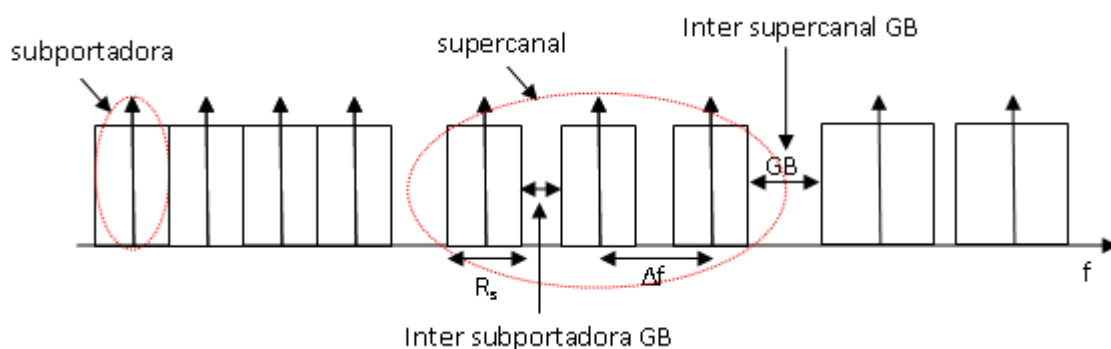
Fonte: Autor.

Na ilustração 2.4, note que entre os supercanais são deixados espaços na frequência que são chamados de banda de guarda (GB), com o objetivo de que não haja interferência entre estes supercanais. Esse espaçamento pode variar com relação à granularidade da rede.

Outra questão é como será a composição das conexões em supercanais. As agregações de subportadoras podem ser obtidas através de técnicas como: multiplexação por divisão de frequência ortogonal detectada coerente (CO-OFDM) ou N-WDM. A técnica de CO-OFDM utiliza eficientemente o espaçamento de subportadora igual à taxa de transmissão, porém precisa de uma grande largura de banda elétrica do transmissor e do receptor cuja é difícil de obter com o estado da arte dos equipamentos eletrônicos [82], [83]. Já na técnica N-WDM [78-80], as subportadoras são espectralmente dispostas a fim que elas ocupem uma pequena largura de banda, próximo ou igual ao limite Nyquist para transmissão sem interferência intersímbolo, o que coincide com a taxa de transmissão. Tais subportadoras estreitas podem ser multiplexadas no transmissor (Tx) com espaçamento próximo ou igual à taxa de transmissão, com pouca diafonia entre as subportadoras. Com altas taxas de dados é mais conveniente utilizar a técnica N-WDM, pois é baseada na redução da diafonia entre subportadoras através da distribuição das subportadoras no transmissor permitindo um *tradeoff* entre a capacidade e o desempenho em estender ou reduzir o espaçamento entre as subportadoras. A comparação teórica do conceito de N-WDM e CO-OFDM pode ser encontrada em [83].

Em [20] utiliza-se N-WDM em redes ópticas flexíveis e analisam-se alguns parâmetros de camada física que impactam no desempenho no nível de rede. Neste estudo o mais relevante foi o impacto que o espaçamento entre as subportadoras ( $\Delta f$ ) causará nos recursos da rede. Conforme se vê na ilustração 2.5 este espaçamento, taxa de símbolos ( $R_s$ ) e a relação entre eles também podem variar ( $\Delta f/R_s$ ).

**Ilustração 2. 5- Supercanais Nyquist-WDM em EON no nível de rede.**



Fonte: Autor.

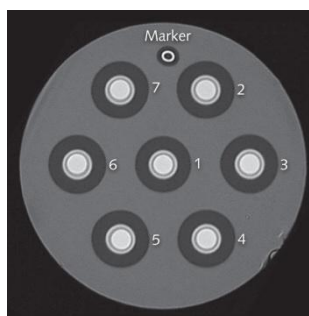
Na ilustração 2.5, uma rede elástica pode admitir diversas capacidades de conexão e com a técnica N-WDM permite variar o espaçamento entre subportadoras ( $\Delta f$ ) conforme o desempenho na rede. Evidentemente que esse espaçamento entre subportadoras irá ter uma relação direta com o formato de modulação adotado. Neste trabalho, assume-se que um supercanal consiste em subportadoras ópticas com a mesma taxa de símbolos e formato de modulação [84]. A banda de guarda inter subportadora é definida como a diferença entre o espaçamento das subportadoras ópticas dentro do super canal ( $\Delta f$ ) e a taxa de símbolo ( $R_s$ ).

O impacto da diafonia foi analisado entre as subportadoras de supercanais em relação à OSNR para diversos formatos de modulação (4-QAM, 8-QAM e 16-QAM) e concluiu-se que a diafonia entre as subportadoras utilizando os formatos de modulação analisados inserem uma penalidade de cerca de 1,5 dB em relação a OSNR para um determinado espaçamento entre subportadoras [84].

### 2.1.3. Diafonia Inter Núcleo

Em MCF-EON, o principal efeito de camada física a ser considerado pela literatura é o efeito da diafonia inter-núcleo [33], [85], proveniente da estrutura da fibra MCF ser formada por um conjunto de núcleos sem blindagem [43], conforme a ilustração 2.6, e entre os núcleos adjacentes na mesma faixa de frequência vir a ocorrer interferência.

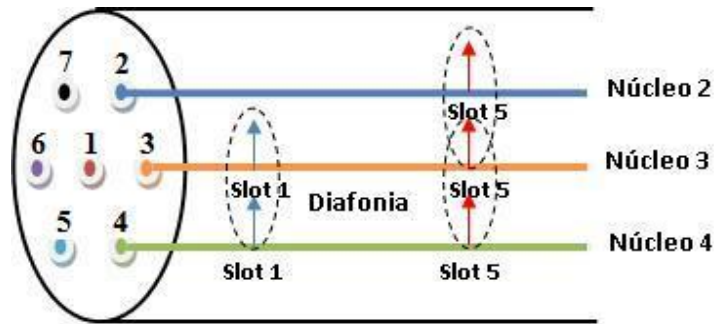
**Ilustração 2. 6- Seção transversal de uma fibra de 7 núcleos.**



Fonte: referência [42].

O efeito da diafonia inter-núcleo, mais especificamente, é proveniente da sobreposição de sinais ópticos na mesma faixa de frequência que propagam através de núcleos adjacentes em uma MCF, como pode ser visualizado na ilustração 2.7. Portanto, essa sobreposição de *slots* em cores adjacentes resulta em uma degradação no desempenho de transmissão na rede.

**Ilustração 2. 7- Diafonia entre núcleos na MCF-7 núcleos.**



Fonte: Autor.

Como se percebe na ilustração 2.7, no *slot* um (1) a diafonia acontece entre os núcleos três (3) e quatro (4). Já no *slot* cinco (5), a diafonia acontece entre o núcleo três (3) e os núcleos dois (2) e quatro (4) dos seus 3 núcleos adjacentes (1, 2 e 4). Nota-se que para a fibra com a configuração hexagonal de sete (7) núcleos, os núcleos da borda terão três núcleos adjacentes e o núcleo central terá seis núcleos adjacentes. Porém, para o cálculo da diafonia, só serão considerados os núcleos adjacentes que possuem *slots* ocupados na mesma faixa de frequência.

A potência média da diafonia pode ser calculada através das equações descritas em [43], como:

$$xt = h \cdot L \quad (2.4)$$

$$h = 2 \cdot \frac{\kappa^2}{\beta} \cdot \frac{R}{\Lambda} \quad (2.5)$$

onde a equação (2.4) para o cálculo médio da potência de diafonia é composta por:  $L$ , que é o comprimento do enlace da fibra e o  $h$  é calculado através da equação (2.5).  $h$ , o qual é obtido através dos seguintes parâmetros:  $\kappa$ , coeficiente de acoplamento;  $\beta$ , constante de propagação;  $R$ , raio de curvatura da fibra;  $\Lambda$ , distância entre núcleos.

Percebe-se que a  $XT$  é diretamente proporcional ao  $h$  e ao comprimento do enlace ( $L$ ). Assim,  $h$  denota a potência média da diafonia por unidade de comprimento. O efeito da diafonia média que um núcleo sofre de múltiplos núcleos é representado como a soma da diafonia média de cada núcleo para um núcleo específico, porque a diafonia média é a soma da diafonia causada por cada um dos núcleos interferentes. No entanto, observa-se que para a fibra MCF de 7-núcleos dispostos em uma estrutura hexagonal, no caso dos núcleos externos o número máximo de núcleos adjacentes é três (3) já para o núcleo central são seis (6). Então, verifica-se que o núcleo central poderá ser muito mais afetado pelo efeito da diafonia que os núcleos externos.

## 2.2. Qualidade de Transmissão

Para assegurar que seja possível ter uma transmissão livre de erros através de uma rede de comunicação, torna-se importante considerar as limitações de camada física que afetam a qualidade do sinal. A fim de mensurar essa qualidade na transmissão, existem métricas conforme detalharemos nesta subsecção.

### 2.2.1. Dependência da BER na SNR

Neste trabalho assume-se um receptor com filtro casado usando codificação de Gray. Nesse caso, a probabilidade ou taxa de erro de bit (BER) para formatos de modulação por quadratura com M símbolos com detecção coerente é dado por [87]

$$P_b = \frac{2}{\log_2 M} \left( \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 \log_2(M) \cdot snr_b}{2(M-1)}} \right) \quad (2.6)$$

para  $M = 2^{2n}$ , sendo  $n$  inteiro

$$P_b = \frac{11}{16} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3 snr_b}{3 + \sqrt{3}}} \right) \quad \text{para } M = 8 \quad (2.7)$$

$$P_b = \frac{91}{240} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{snr_b}{4}} \right) \quad \text{para } M = 32 \quad (2.8)$$

em que  $snr_b$  é a relação sinal ruído por bit.

### 2.2.2. Relação Sinal Ruído por Bit (SNR<sub>b</sub>) Requerida

Utilizam-se essas equações (2.6, 2.7, 2.8) conforme o formato de modulação para obter-se a SNR requerida por bit dada uma BER. Para os códigos Hard Decision Forward Error Correction (HD-FEC) com a BER de  $10^{-3}$  [87], [88] e de  $3,8 \times 10^{-3}$  com 6,7% FEC no padrão OTU4 [89] e o SD-FEC com a BER de  $1,5 \times 10^{-2}$  [90], segue a quadro 2.1.

**Quadro 2. 1- SNR<sub>b</sub> requerida.**

(dB)	HD-FEC		SD-FEC
Target line BER	$10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
4-QAM	6,79	5,52	3,72
8-QAM	9,03	7,83	6,18
16-QAM	10,52	9,17	7,22
32-QAM	12,57	11,23	9,28
64-QAM	14,77	13,34	11,23

Estes valores de  $SNR_b$  requerida dada uma BER  $3,8 \times 10^{-3}$  e  $1,5 \times 10^{-2}$  serão utilizados neste trabalho.

### 2.2.3. Relação Sinal Ruído Óptica (OSNR)

Em sistemas amplificados, o ruído é amplificado junto com o sinal e degrada a relação sinal-ruído óptica. Embora outros dispositivos adicionem ruídos ao sistema, o ruído proveniente do amplificador óptico é considerado a principal fonte de degradação da OSNR [74]. Em sistemas WDM com vários estágios de amplificadores cascadeados, o ruído ASE torna-se um sério problema, já que a OSNR degrada-se ao longo do enlace, devido aos efeitos cumulativos da figura de ruído de cada estágio do amplificador [74]. O cálculo da OSNR ao longo de uma rota fim a fim é dado pela equação (2.9):

$$osnr = \frac{P}{2 \cdot S_{ase_{tot}} \cdot B_{ref}} \quad (2.9)$$

onde  $P$  é a potência média total do sinal nas duas polarizações e  $B_{ref}$  é a largura de banda de referência (12.5 GHz, comumente usada). Nota-se que a OSNR calculada irá depender das perdas provenientes dos enlaces e nós ópticos que compõem a respectiva rota.

Conforme afirmado anteriormente, a OSNR calculada para cada  $k$  rota irá considerar a fórmula (2.9). Sendo que, no caso de ser um supercanal a potência utilizada pelo supercanal será calculada através da fórmula (2.10) que considera o número de subportadoras ( $N_{sc}$ ) conforme a capacidade de cada supercanal pela potência da subportadora ( $P_{sc}$ ).

$$P = N_{sc} \cdot P_{sc} \quad (2.10)$$

A fim de obter a OSNR requerida ( $osnr_{req}$ ) a partir da  $snr_b$  requerida (ver quadro 2.1) dada uma BER ( $3,8 \times 10^{-3}$  ou  $1,5 \times 10^{-2}$ ), tem-se a equação para monoportadora e a equação para supercanal, respectivamente, que representam a relação entre  $osnr_{req}$  e  $snr_b$  (Eq. 36 em [90]):

$$osnr_{req} = \frac{C \cdot snr_b}{2 \cdot B_{ref}} \quad (2.11)$$

$$osnr_{req} = \frac{C \cdot snr_b}{2 \cdot B_{ref}} + Pen_{IS-XT} \quad (2.12)$$

em que  $C$  é a taxa de bits da conexão e a  $snr_b$  é a relação sinal ruído por bit. Neste trabalho consideram-se a  $OSNR_{req}$ , conforme os quadros 2.2 e 2.3, para conexões que utilizam monoportadora e supercanal em relação aos formatos de modulação adicionando aos supercanais a penalidade de 1.5 dB causada pela diafonia inter subportadora ( $Pen_{IS-XT}$ ) como descrita na seção 2.1.2.

**Quadro 2. 2- Relação OSNR<sub>req</sub> para HD-FEC com BER= 3,8×10<sup>-3</sup>.**

OSNR <sub>req</sub> (dB)	Mono-portadora		Supercanal		
	42,8 Gb/s	112 Gb/s	224 Gb/s	448 Gb/s	1120 Gb/s
4-QAM	7,86	12,03	16,54	19,55	23,53
8-QAM	10,17	14,34	18,85	21,86	25,84
16-QAM	11,51	15,68	20,19	23,20	27,18
32-QAM	13,57	17,74	-	-	-
64-QAM	15,68	19,85	-	-	-

**Quadro 2. 3-Relação OSNR<sub>req</sub> para SD-FEC com BER= 1,5×10<sup>-2</sup>.**

OSNR <sub>req</sub> (dB)	Mono-portadora		Supercanal		
	42,8 Gb/s	112 Gb/s	224 Gb/s	448 Gb/s	1120 Gb/s
4-QAM	6,06	10,23	14,74	17,75	21,73
8-QAM	8,52	12,69	17,20	20,21	24,19
16-QAM	9,56	13,73	18,24	21,25	25,23
32-QAM	11,62	15,79	-	-	-
64-QAM	13,57	17,74	-	-	-

Observa-se que a OSNR<sub>req</sub> utilizando SD-FEC (quadro 2.2) é menor que a OSNR<sub>req</sub> com HD-FEC (quadro 2.3) para diversas taxas e formatos de modulação, respectivamente. Esta redução é devido a diminuição da SNR<sub>b</sub> requerida pelo SD-FEC pois suporta um meio mais ruidoso com a BER de 1,5×10<sup>-2</sup> enquanto que HD-FEC considera uma BER de 3,8×10<sup>-3</sup> (quadro 2.1).

#### **2.2.4. Relação entre OSNR Requerida e Diafonia Inter-Núcleo**

A fim de calcular os limites máximos aceitáveis de XT para diversos formatos de modulação, como por exemplo: M-QAM, e diferentes taxas de transmissão, em [47] investigou-se o impacto da diafonia de forma dinâmica usando um modelo existente em [35] [49] e considerou-se um sistema degradado por XT. Como mencionado anteriormente, o comportamento aleatório da XT afeta a qualidade da transmissão do sinal de duas formas [47]: i) em curtos períodos de tempo, causando uma degradação da OSNR requerida para a mesma BER [47]; ii) durante longos períodos de tempo, causando períodos de interrupção devido aos altos níveis de XT que ocorrem em intervalos curtos de tempo [37] [47]. Nesta

subseção ambos os impactos da XT são apresentados com suas respectivas formulações e ao longo desta tese são considerados ao avaliar o desempenho das MCF-EONs. Portanto, em [47] demonstra-se a equação (2.13) para o cálculo da XT:

$$\Delta\text{osnr} = \left(1 - \text{osnr}_{\text{req}} \cdot \text{XT} \cdot \frac{B_{\text{ref}}}{R_s}\right)^{-1} \quad (2.13)$$

$$R_s = \frac{C}{\eta} \quad (2.14)$$

$$\eta = 2 \cdot \log_2(M) \quad (2.15)$$

onde a equação (2.14) calcula o  $R_s$ , taxa de símbolos, a partir de  $C$ , capacidade da conexão, e  $\eta$ , eficiência espectral relativa ao respectivo formato de modulação (M-QAM) calculada através da equação (2.15);  $\Delta\text{OSNR}$  é a penalidade adicionada a OSNR devido a diafonia inter-núcleo igual a 1dB para uma dada BER;  $\text{OSNR}_{\text{req}}$  é a OSNR requerida para a determinada capacidade da conexão e formato de modulação (ver quadros 2.2 e 2.3). Nos quadros 2.4 e 2.5, observa-se os valores limites de XT para uma penalidade de 1 dB na OSNR referente a uma determinada taxa de bits e formato de modulação para HD-FEC e SD-FEC, respectivamente.

**Quadro 2. 4- Limite de XT com 1 dB de penalidade na OSNR para HD-FEC.**

XT (dB)	42,8 Gb/s	112 Gb/s	224 Gb/s	448 Gb/s	1120 Gb/s
4-QAM	-15,40	-15,40	-16,89	-16,89	-16,90
8-QAM	-19,48	-19,47	-20,97	-20,97	-20,97
16-QAM	-22,06	-22,06	-23,56	-23,56	-23,56
32-QAM	-25,09	-25,09	-	-	-
64-QAM	-27,99	-27,99	-	-	-

**Quadro 2. 5- Limite de XT com 1 dB de penalidade na OSNR para SD-FEC.**

XT (dB)	42,8 Gb/s	112 Gb/s	224 Gb/s	448 Gb/s	1120 Gb/s
4-QAM	-13,60	-13,60	-15,10	-15,10	-15,10
8-QAM	-17,83	-17,90	-19,32	-19,32	-19,32
16-QAM	-20,11	-20,02	-21,61	-21,61	-21,61
32-QAM	-23,14	-23,15	-	-	-
64-QAM	-25,88	-25,88	-	-	-



Porém, uma solução mais realista, assume que existe uma probabilidade de a XT exceder o nível máximo permitido para um nível de diafonia média. Esta probabilidade é dada pela função  $1 - F(X)$  da Equação (1) em [47]. Portanto, pode-se estimar o nível máximo de diafonia média que é tolerado dada uma probabilidade de indisponibilidade. Invertendo a função distribuição cumulativa apresentada em  $(F(X))$  [47] e usando uma expansão da série de Taylor, mostra-se que a máxima diafonia média permitida em unidades logarítmicas pode ser aproximadamente [47]:

$$[X_{\mu,thres}]_{dB} \approx [X_{max}]_{dB} - 10 \log_{10} \left[ 0.4431 - \frac{\ln(P_o)}{4} \right] \quad (2.16)$$

em que  $[X_{max}]$  é o maior valor de *diafonia* tolerado e  $P_o$  é a probabilidade de indisponibilidade. Em (2.16) apresenta-se a formulação do impacto do comportamento aleatório da XT em MCF dada uma probabilidade de indisponibilidade. Para isso, obteve-se a expressão para a probabilidade de indisponibilidade e utilizou-se para calcular um adicional na OSNR a fim de garantir uma probabilidade de indisponibilidade de  $1 \times 10^{-5}$  na presença de flutuações dinâmicas de XT. Em [47], os resultados expressam uma introdução ao limite de XT de 5,3 dB menor do que os apresentados nos quadros 2.4 e 2.5. Portanto, os limites de XT considerados nesta tese consideram essa introdução e são mostrados nos quadros 2.6 e 2.7.

**Quadro 2. 6- Limite de XT para  $P_o = 10^{-5}$  para HD-FEC.**

$X_{\mu,thres}$ (dB)	42,8 Gb/s	112 Gb/s	224 Gb/s	448 Gb/s	1120 Gb/s
4-QAM	-20,70	-20,70	-22,19	-22,19	-22,19
8-QAM	-24,78	-24,78	-26,27	-26,27	-26,27
16-QAM	-27,36	-27,36	-28,86	-28,86	-28,86
32-QAM	-30,39	-30,39	-	-	-
64-QAM	-33,29	-33,29	-	-	-

**Quadro 2. 7- Limite de XT para  $P_o = 10^{-5}$  para SD-FEC.**

$X_{\mu,thres}$ (dB)	42,8 Gb/s	112 Gb/s	224 Gb/s	448 Gb/s	1120 Gb/s
4-QAM	-18,90	-18,90	-20,40	-20,40	-20,40
8-QAM	-23,13	-23,20	-24,62	-24,62	-24,62
16-QAM	-25,41	-25,32	-26,91	-26,91	-26,91
32-QAM	-28,44	-28,45	-	-	-
64-QAM	-31,18	-31,18	-	-	-

Nota-se que o limite de XT para o SD-FEC, seja para 1 dB de penalidade na OSNR ou  $P_o = 10^{-5}$ , é maior do que o limite de XT para o HD-FEC. Isto é causado pela redução da OSNR requerida ao utilizar o SD-FEC em relação ao HD-FEC (ver na subseção 2.2.3).

Nesta tese, além da adição de 1,5 dB na  $OSNR_{req}$ , causada pela penalidade da diafonia inter subportadora no caso de supercanais (ver quadro 2.2 e 2.3). Devido a boas práticas de projeto de rede deve-se adicionar uma margem razoável ( $M= 3$  dB) em relação à  $OSNR_{req}$  a fim de garantir o funcionamento abaixo da BER durante a operação da rede, lidando com as flutuações das condições ambientais da rede, como demonstrado em [92] e na subseção 5.4.3 de [93]. Por fim, ainda será adicionado um (1) dB a  $OSNR_{req}$  proveniente da penalidade da XT conforme considerado para o cálculo da XT limite. Essas adições de penalidades a  $OSNR_{req}$  irão gerar a  $OSNR_{lim}$  (ver quadros 2.8 e 2.9) conforme:

$$OSNR_{lim} = OSNR_{req} + 4 \quad (2.17)$$

**Quadro 2. 8- Relação  $OSNR_{lim}$  para HD-FEC com  $BER= 3,8 \times 10^{-3}$ .**

OSNR <sub>lim</sub> (dB)	Mono-portadora		Supercanal		
	42,8 Gb/s	112 Gb/s	224 Gb/s	448 Gb/s	1120 Gb/s
4-QAM	11,86	16,03	20,54	23,55	27,53
8-QAM	14,17	18,34	22,85	25,86	29,84
16-QAM	15,51	19,68	24,19	27,20	31,18
32-QAM	17,57	21,74	-	-	-
64-QAM	19,68	23,85	-	-	-

**Quadro 2. 9- Relação  $OSNR_{lim}$  para SD-FEC com  $BER= 1,5 \times 10^{-2}$ .**

OSNR <sub>lim</sub> (dB)	Mono-portadora		Supercanal		
	42,8 Gb/s	112 Gb/s	224 Gb/s	448 Gb/s	1120 Gb/s
4-QAM	10,06	14,23	18,74	21,75	25,73
8-QAM	12,52	16,69	21,20	24,21	28,19
16-QAM	13,56	17,73	22,24	25,25	29,23
32-QAM	15,62	19,79	-	-	-
64-QAM	18,57	21,74	-	-	-

Percebe-se que a  $OSNR_{lim}$  é um limite mínimo aceitável para garantir que essa conexão conseguirá ser transmitida ao longo do caminho fim a fim através da rede e então poderá ser aprovacionada. Para isto, a seguinte condição deverá ser respeitada: a OSNR calculada deverá ser maior ou igual à OSNR limite ( $OSNR \geq OSNR_{lim}$ ).

# CAPÍTULO 3 – Redes Ópticas Elásticas Multiplexadas por Divisão Espacial

## 3.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo, serão tratados os principais tópicos relacionados com redes ópticas elásticas multiplexadas por divisão espacial e apresenta-se uma extensa revisão bibliográfica do estado da arte dos mecanismos de provisionamento de recursos em redes ópticas considerando limitações de camada física, bem como diversos conceitos envolvidos em provisionamento de recursos. Espera-se criar um arcabouço de conhecimento para contextualizar os principais pontos que serão apresentados na sequência neste documento.

## 3.2. Tipos de Fibra Óptica em SDM

Atualmente existem diversos tipos de fibra óptica que são utilizados em SDM (ver il. 3.1). As principais encontradas na literatura recente são classificadas como segue:

- Multi fibra monomodo (SMFB)

É a forma mais simples de SDM, obtida com a agregação de múltiplas fibras em uma estrutura de feixe de fibras. No SMFB cada fibra suporta um modo espacial. O SMFB é uma tecnologia disponível comercialmente, que deve facilitar a migração de redes atualmente implantadas para o SDM.

- Fibra de múltiplos núcleos monomodo (SM-MCF)

A MCF é composta por vários núcleos incorporados na casca da fibra e cada núcleo funciona como uma fibra monomodo (SMF). Diversas estruturas de distribuição dos núcleos são propostas para MCFs, incluindo estruturas de um anel, anel duplo, matriz linear, "*two-pitched*" ou hexagonal. O espaçamento e o empacotamento de núcleos podem ser pares ou irregulares e próximos ou largos, respectivamente [94].

- Fibra de poucos modos (FMF)

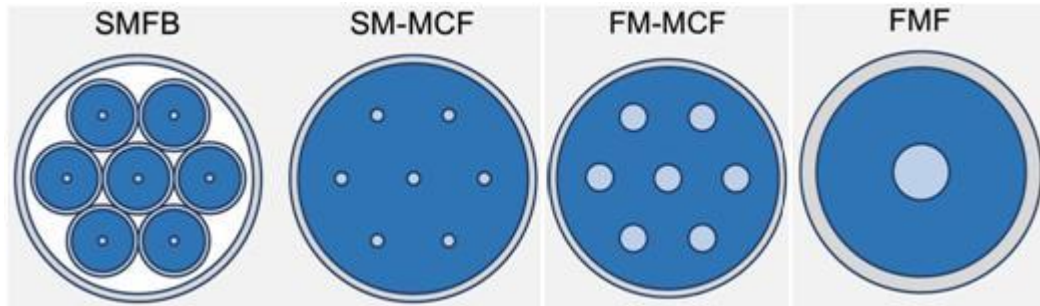
É um tipo de fibra multimodo (MMF) que permite a propagação de alguns modos independentes dentro de um único núcleo sendo que o número de modos suportados por uma fibra depende do diâmetro do núcleo e do índice de refração da fibra. As FMF são utilizadas para distâncias de transmissão mais altas, quando comparadas às MMF, já que mitigar as limitações de camada física e a interferência das FMF é menos problemático do que no caso de MMF que suportam um número mais elevado

de modos. Outro possível caso de utilização de FMF seria um "feixe" de fibra de poucos modos (FMFB), onde cada fibra guia alguns modos.

- Fibra de múltiplos núcleos com poucos modos (FM-MCF)

A FM-MCF combina a propagação de poucos modos transversais em cada um dos múltiplos núcleos existentes. A FM-MCF agrega as vantagens das tecnologias FMF e MCF, reduzindo o impacto negativo de cada tecnologia, simultaneamente.

### **Ilustração 3. 1- Tipos de fibra óptica em SDM.**



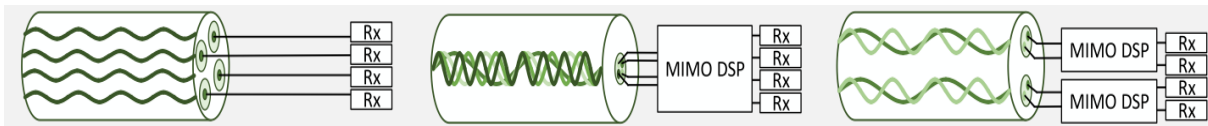
Fonte: Referência [96]

As fibras ópticas em SDM possuem diversas vantagens e desvantagens como se pode observar no quadro 3.1.

**Quadro 3. 1- Vantagens e desvantagens das fibras ópticas em SDM.**

Tipo de Fibra	Vantagens	Desvantagens
Multi fibras (SMFB (bundle))	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponível Comercialmente.</li> <li>• A transmissão não é afetada por diafonia entre os modos espaciais.</li> <li>• Suporte a um grande número de modos espaciais em enlaces SMF paralelos.</li> <li>• Alta flexibilidade de comutação.</li> <li>• Não necessita de multiplexadores/de multiplexadores SDM para interconexões de componentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa eficiência espacial quando comparado a outras soluções baseadas em SDM.</li> </ul>
MCF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suporte a um grande número de modos espaciais e alta eficiência espacial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• qualidade de transmissão afetada pela XT.</li> <li>• necessidade de componentes SDM dedicados.</li> <li>• Maior diâmetro da fibra quando comparado a SMF, especialmente em MCFs com elevado número de núcleos, o que exigirá novos padrões (conectores).</li> </ul>
FMF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integração de componentes SDM e redução de custos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Degradação na QoT devido a limitações de camada físicas provenientes ao acoplamentos dos modos.</li> <li>• Necessidade de processamento digital de sinal com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO-DSP) para lidar com acoplamento de modo.</li> <li>• Necessidade de componentes SDM dedicados.</li> <li>• Baixa flexibilidade de comutação.</li> </ul>
FM-MCF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suporte a um grande número de modos espaciais e eficiência espacial muito elevada.</li> <li>• integração de componentes SDM e redução de custos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitações físicas devido ao acoplamento de modo.</li> <li>• Necessidade de MIMO-DSP de complexidade reduzida quando comparado aos FMFs do mesmo número geral de modos suportados.</li> <li>• necessidade de componentes SDM dedicados.</li> <li>• Flexibilidade de comutação moderada.</li> </ul>

### Ilustração 3. 2- Acoplamento de Modo em SDM.



Fonte: Referência [95].

Além do tipo de fibra, outra característica das fibras ópticas que podem ser utilizadas em SDM é o nível do acoplamento entre os modos (ver il. 3.2). Segundo esta característica, as fibras podem ser classificadas como segue:

- Modos fracamente acoplados ou desacoplados  
Esses modos podem ser encontrados tanto nas SMFB quanto nas MCF com distância suficientemente grande entre os núcleos. Nas SMFB, não ocorre o acoplamento entre os modos, pois cada modo é guiado em uma fibra separada fisicamente das demais. Nas MCF, necessita-se garantir uma distância suficientemente alta entre os núcleos da fibra a fim de reduzir o acoplamento modal a valores muito baixos. Assim, não há necessidade da utilização de MIMO-DSP para receber corretamente os sinais óticos transmitidos.
- Todos os modos fortemente acoplados  
O acoplamento ocorre em todos os modos suportados pela fibra, como em FMF. Além disso, em algumas MCF cujos núcleos estão muito próximos e os modos se acoplam. Neste caso, há a necessidade da utilização de MIMO-DSP para todos os modos.
- Grupo de modos fortemente acoplados  
Os modos fortemente acoplados estão separados em subgrupos, porém o acoplamento entre esses subgrupos é baixo ou não existe. As técnicas de MIMO-DSP precisam ser aplicadas apenas a cada subgrupo. Neste caso, como exemplo temos: as FM-MCF com os núcleos espaçados suficientemente distantes e as FMFB. No caso das FM-MCF, o forte acoplamento entre os modos acontece dentro de cada núcleo enquanto que nas FMFB irá acontecer dentro de cada fibra.

A maioria dos trabalhos pesquisados em fibras em SDM assume modos desacoplados (como em SMFB) [50], [96], [97] ou fraco acoplamento de modos espaciais (no caso de MCF) [28], [50], [56], [63]. Portanto, não havendo a necessidade de MIMO-DSP, os modos espaciais podem ser roteados independentemente pela rede. No entanto, existem trabalhos que consideram todos os modos fortemente acoplados [23], [98], [99] e em alguns destes há a utilização de MIMO-DSP [23], [98], da mesma forma que os trabalhos que apresentam grupos de modos fortemente acoplados que utilizam MIMO-DSP [98], [100]. Além disso, em

[100], a XT intermodal entre diferentes grupos de modos fortemente acoplados em um FMF é assumido. A aplicação de MIMO-DSP para a supressão de diafonia é discutida em [101], [102], [103], e é usada na análise de desempenho de rede em [104]. Resumidamente, o quadro 3.1, apresenta as principais vantagens e desvantagens das fibras SDM que são citadas na literatura e que mencionamos nesta seção. Nesta tese, como mencionado anteriormente, considerou-se o tipo MCF monomodo fracamente acoplado por ser o tipo de fibra SDM mais pesquisada [28], [50], [56], [63], [95] e mais promissor para o aumento de capacidade [105], [106]. Além disso, em sua forma mais simples, sistemas baseados em SDM podem ser implementados enviando tráfego sobre sistemas multi fibras SMF. Observe, no entanto, que as  $N_f$  fibras SMF em paralelos não apenas aumentam a capacidade do sistema por um fator  $N_f$ , mas também aumentam o custo do sistema e o consumo de energia em  $N_f$  vezes. Assim, o custo e o consumo de energia permanecem os mesmos por bit [107]. Historicamente, a fim de atender economicamente a uma demanda exponencialmente crescente de capacidade espera-se que os equipamentos de transmissão reduzam continuamente a energia e o custo por bit [108]. Portanto, para que sistemas SDM sejam introduzidos em redes comerciais com um custo similar e redução de energia por bit semelhante a sistemas WDM, as tecnologias SDM disponíveis comercialmente terão que suportar a integração e compartilhar componentes do sistema entre os canais espaciais para reduzir as despesas de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX) [109].

### **3.3. Aprovisionamento de Recursos em Redes Ópticas Considerando Limitações de Camada Física**

As redes de fibra óptica vêm evoluindo com o tempo, paralelamente a isso os mecanismos de provisionamento de recursos destas redes precisam se tornar cada vez mais complexos. Inicialmente com as redes ópticas transparentes WDM surgiu-se o problema IA-RWA, com suas respectivas restrições e limitações de camada física [30]. Posteriormente com as EONs o problema RWA evoluiu para o IA-RSA e posteriormente para o IA-RSMA com adicionais restrições, limitações de camada física e a introdução de supercanais [31], [32]. Atualmente, com as MCF-EONs o problema evoluiu para o IA-RSCA com suas respectivas restrições, limitações de camada física e os supercanais. Os vários mecanismos desenvolvidos de provisionamento de recursos para solucionar estes problemas demonstram o interesse e entusiasmo da comunidade científica em buscar, cada vez mais, soluções com várias

propostas e ideias inovadoras a fim de otimizar a utilização dos recursos e, assim, melhorar o desempenho da rede. O quadro 3.2 mostra uma classificação geral dos problemas de provisionamento de recursos em redes ópticas e apresenta um resumo das principais características que os mecanismos de provisionamento de recursos têm que considerar dependendo da rede e das tecnologias.

**Quadro 3. 2– Características dos problemas de provisionamento de recursos em redes ópticas.**

		IA-RWA	IA-RSA ou IA-RSMA	IA-RSCA
Restrições	Continuidade no Espectro	X	X	X
	Contiguidade no Espectro		X	X
	Não Sobreposição no Espectro	X	X	
Nº de Portadoras		Monoportadora	Supercanal	Supercanal
Grade		Fixa	Flexível	Flexível
Granularidade		Grossa	Fina	Fina
Tipo de Fibra		SMF	SMF	MCF
Efeitos de Camada Física		Lineares (ASE, PMD, GVD) e Não Lineares (SPM, XPM e FWM)	Lineares (ASE, PMD, GVD, Diafonia inter-portadora) e Não Lineares (SPM, XPM e FWM)	Lineares (Diafonia inter-núcleo, Diafonia inter-portadora, ASE, PMD, GVD) e Não Lineares (SPM, XPM, FWM)
Rede óptica		WDM	EON	MCF-EON



Nas subseções que seguem são apresentados conceitos e soluções propostas na literatura para o problema de provisionamento de recursos considerando limitação de camada física desde redes WDM até as redes MCF-EONs.

### **3.3.1. Provisionamento Estático e Dinâmico**

Em uma rede óptica os recursos precisam ser provisionados para que os serviços (conexões, camada de rede) sejam atendidos. O problema de provisionamento de recurso pode ser dividido em: estático ou dinâmico [110] dependendo do cenário de tráfego. No caso estático, os serviços requeridos ou requisições de conexões para serem atendidos na rede são previamente conhecidos e o principal objetivo é atender essas requisições minimizando os recursos utilizados (enlaces, núcleos, *slots*, números de transmissões, receptores). O provisionamento estático também é conhecido como *off-line* e é considerado um problema de planejamento de rede. Por outro lado, no caso dinâmico, os serviços requeridos ou requisições de conexão não são conhecidos previamente e geralmente chegam à rede em algum instante de tempo aleatório. Portanto, como a demanda de tráfego não é conhecida previamente, não se consegue otimizar o recurso que seria necessário para atender a demanda. Ao invés disso, o objetivo principal no caso dinâmico é minimizar a probabilidade de bloqueio. O provisionamento dinâmico é também conhecido como *online* ou sobdemanda [110] e é considerado um problema de operação de rede. Nesta tese trabalha-se em soluções de provisionamento dinâmico de recursos.

#### **3.3.1.1. Problema IA-RWA em Redes WDM**

Em OTN baseadas na tecnologia WDM, um dos principais problemas é o RWA. O problema do RWA consiste em como serão alocadas as requisições de conexões em relação ao roteamento e a atribuição de comprimento de onda. Este problema pode ser inviável de ser resolvido conjuntamente em tempo polinomial devido a sua complexidade computacional. O problema RWA é conhecido por ser um problema NP completo [111], assim diversas soluções heurísticas foram propostas na literatura [29]. Portanto, o problema RWA é geralmente dividido em dois subproblemas: (i) roteamento, e (ii) atribuição de comprimento de onda.

As soluções para o subproblema do roteamento resultam em rotas possíveis para o estabelecimento das conexões na rede. O subproblema do roteamento pode ser resolvido como:

- Roteamento com Rota Fixa (FR)

É a solução mais simples para realizar a pré-computação de uma única rota para cada par (origem e destino) para que todas as requisições de conexão entre esse par sejam satisfeitas. Utiliza-se o algoritmo *shortest path*, que computa a menor rota baseada em um custo (distância do enlace ou saltos), através das implementações de Dijkstra ou Bellman-Ford [112]. Devido ao fato de somente uma única rota ser computada para cada origem e destino e não haver reserva de recurso, as requisições de conexão poderão ser bloqueadas se os recursos ao longo da respectiva rota estiverem ocupados, gerando um aumento na probabilidade de bloqueio, pois não há rotas alternativas para satisfazer a requisição ou em caso de s.

- Roteamento com Rota Fixa Alternativa (FAR)

O roteamento fixo alternativo pode ser considerado como uma extensão do roteamento com rota fixa onde mais que uma rota são pré-computadas para cada par (origem e destino) para satisfazer as requisições de conexão. Assim, cada nó na rede mantém uma tabela de roteamento que contém uma lista ordenada de múltiplas rotas possíveis para cada nó destino. Quando uma requisição de conexão chega, o nó de origem checa se a primeira rota na lista baseada em um determinado custo (distância, saltos) tem recursos disponíveis para atender a requisição, caso haja a conexão é estabelecida, senão são tentadas as outras rotas candidatas. Caso nenhuma rota na lista tenha recursos disponíveis para atender a requisição de conexão, a requisição é bloqueada. O algoritmo utilizado é o *k-shortest path*, onde *k* rotas candidatas são calculadas [113]. Ao comparar o FAR com o RF, não somente se vê redução na probabilidade de bloqueio [114], [115], mas também provê a possibilidade de tolerância a em relação a enlaces ou nós.

- Roteamento Dinâmico ou Adaptativo (AR)

Diferentemente do FR e do FAR onde as rotas são pré-computadas, o roteamento adaptativo (AR) calcula uma rota para cada requisição de conexão dinamicamente, baseando-se no estado atual da rede [110], [116], que é determinado pelo conjunto de todas as conexões em progresso no momento. Algumas técnicas comuns para o roteamento adaptativo são: *Shortest path* [110], *Least Loaded Routing* (LLR) [117], *Weighted Least Congested Routing* (WLCR) [118]. Quando uma requisição de conexão chega, o caminho de menor custo entre o nó fonte e o nó destino é determinado, e para cada nova chamada, um novo caminho é encontrado. Uma possível métrica para o custo adaptativo para um enlace seria o seu número de canais ativos, de forma que um algoritmo que utilizasse esta métrica encontraria rotas passando por enlaces pouco carregados, realizando assim, um melhor balanceamento de carga

na rede [119]. Uma desvantagem do roteamento adaptativo pode ser um excesso de mensagens de sinalização, pois a tabela de roteamento no nó necessita ser continuamente atualizada com o estado atual da rede ou incorreções nas atualizações dessas tabelas. Já, uma vantagem do esquema adaptativo é a capacidade de fornecer uma baixa probabilidade de bloqueio de chamadas quando comparado ao roteamento fixo e ao roteamento fixo alternativo [119].

Após a seleção de uma rota disponível para a requisição de conexão, o segundo subproblema do RWA é escolher um apropriado comprimento de onda na rota selecionada. Note que ao considerar um cenário de redes transparentes, ou seja, sem conversores de comprimento de onda. O problema de atribuição de comprimento de onda é classificado como NP-completo, pois uma solução ótima em tempo polinomial não é possível. Assim, para encontrar soluções menos custosas computacionalmente foram propostas diversas abordagens heurísticas na literatura, as principais são:

- Atribuição Aleatória ou Randômica (RD)

Neste algoritmo primeiro procura-se o conjunto de todos os comprimentos de onda que estão disponíveis para a rota encontrada, i.e., os comprimentos de onda que não estão ativos no momento. Em seguida, um deles é escolhido aleatoriamente seguindo uma distribuição de probabilidade uniforme. A vantagem deste esquema é que ele não requer nenhuma informação global sobre o estado atual da rede.

- *First-Fit* (FF)

Nessa heurística todos os comprimentos de onda são numerados e dispostos em uma lista. Ao ser requisitado um comprimento de onda, o algoritmo fornece o primeiro da lista, e se este não puder ser usado, então será tentado o segundo comprimento de onda da lista, e assim sucessivamente, até que seja encontrado um disponível. Esta heurística também não requer informação global sobre o estado atual da rede.

- Atribuição *Most-Used* (MU)

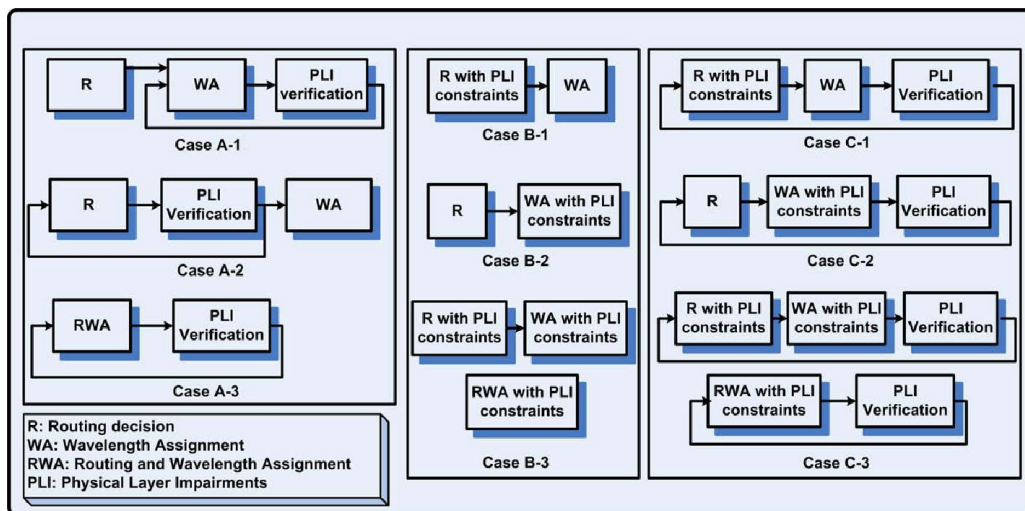
A ideia do MU é tentar compactar o uso dos comprimentos de onda de forma ainda mais rigorosa que a feita pelo FF. Entretanto, devido o MU sempre tentar atribuir o comprimento de onda mais usado, ele consegue uma compactação melhor que o FF. Por isso, em geral, o MU é ligeiramente superior ao FF em termos de desempenho, porém o MU tem a necessidade de informação global da rede para saber qual o comprimento de onda mais utilizado [119].

- Atribuição *Least-Used* (LU)

Ao contrário do *Most-Used*, este algoritmo seleciona o comprimento de onda menos utilizado na rede. Em geral, apresenta um desempenho superior aos algoritmos randômico e *First-Fit*, porém inferior ao MU [110]. Este algoritmo também tem a necessidade de informação global da rede para saber qual o comprimento de onda menos utilizado, introduzindo sobrecarga de comunicação.

Inicialmente, os algoritmos RWA assumiram que as fibras e os componentes ópticos eram ideais [110], porém isto não é o que acontece em um cenário real em redes ópticas. Então, posteriormente, os algoritmos RWA começaram a considerar a degradação sofrida pelo sinal óptico devido aos efeitos de camada física provenientes da fibra e dos componentes ópticos e, então, passam a ser classificados, como: algoritmos IA-RWA (*Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment*). O problema IA-RWA pode ser resolvido tanto como um problema de projeto de rede quanto de operação de rede. A referência [29] reúne-se as três principais abordagens: (A) A qualidade do sinal é verificada após a rota e o comprimento de onda serem atribuídos através de um algoritmo convencional RWA, (B) os efeitos de camada física são considerados durante o processo de decisão do roteamento e/ou atribuição de comprimento de onda, e (C), pode ser visto como uma combinação de (A) e (B), os efeitos de camada física são considerados durante o processo de decisão do roteamento e/ou atribuição de comprimento de onda e após a decisão é verificada a qualidade do sinal da solução candidata, conforme a ilustração 3.3. A seguir tem-se um breve resumo de algoritmos RWA propostos na literatura que utilizam essas três abordagens.

**Ilustração 3.3- Várias abordagens IA-RWA**



Fonte: Referência [29].

Em [120] apresenta-se um algoritmo RWA baseado no caminho mais curto considerando a disponibilidade dos comprimentos de onda a partir do nó de origem. O objetivo é encontrar um conjunto de rotas candidatas disjuntas para serem rotas primárias e de proteção obedecendo à restrição de continuidade de comprimento de onda. Em seguida, para cada uma destas rotas fim a fim é calculado o fator  $Q$ . A rota com o maior fator  $Q$  é selecionada para atender a requisição de conexão. Os autores em [121] propõem dois algoritmos de IA-RWA diferentes. No primeiro, uma rota com menor distância física é selecionada em primeiro lugar, e depois a sua qualidade de sinal levando em conta os efeitos PMD e ASE é checada. No segundo, o algoritmo do caminho mais curto é utilizado para encontrar um caminho na topologia considerando o primeiro comprimento de onda livre. E em seguida, a qualidade do sinal do caminho óptico selecionado é examinada. Se a qualidade do sinal do caminho óptico é melhor do que o limite pré-determinado, a requisição de conexão é estabelecida. Caso contrário, o caminho mais curto do segundo comprimento de onda disponível é checado, e assim por diante, até que um adequado caminho é encontrado ou as opções sejam esgotadas. O trabalho em [122] apresenta uma formulação de ILP e duas abordagens heurísticas, onde uma rota é calculada usando o custo do enlace associado com os efeitos do PMD e ASE, enquanto que a estratégia de atribuição de comprimento de onda first-fit é usada. Diferentemente da [122], os autores em [123] focam na atribuição de comprimento de onda, onde o comprimento de onda com a menor intensidade de diafonia é selecionado. Em [124] apresenta-se um algoritmo de roteamento adaptativo onde a computação da rota é com base nas medições do fator  $Q$  em tempo real, coletados a partir de dispositivos. Em vez de usar um fator  $Q$  medido em tempo real como em [124], o trabalho em [125] utiliza a variância dos ruídos ASE, XPM, FWM e diafonia como custo do enlace a fim de calcular uma rota candidata para uma requisição de conexão. Dada à rota encontrada, verificam-se os comprimentos de onda que respeitem a restrição de continuidade e o primeiro comprimento de onda que satisfaça um limite pré-definido da BER é selecionado. Se nenhum comprimento de onda com qualidade de sinal aceitável for encontrado, a requisição de conexão é bloqueada. Os autores em [126] propõem um esquema de roteamento dinâmico cujo valor da dispersão, do ruído ASE e da diafonia são considerados como restrições durante o RWA, se o limite de qualidade do sinal for cumprido, a rota com o menor número de enlaces é selecionada. Caso contrário, a requisição de conexão será bloqueada. Em [127] utiliza-se soluções meta-heurísticas para a resolução do problema RWA utilizando parâmetros de camada física.

### 3.3.1.2. Problema IA-RSA e IA-RMLSA em EON

Em redes EONs, o conceito de *slot* surge com a flexibilidade em relação ao número de subportadoras que podem ser atribuídas para cada demanda e é definido através da ITU-T G.694.1 [11]. O problema a ser resolvido em EON é o problema RSA (roteamento e atribuição de espectro), este problema torna-se mais complexo que o RWA pela adição de uma restrição (contiguidade), cujos *slots* para uma determinada demanda de tráfego precisam ser consecutivos no domínio do espectro. Além de manter a restrição de continuidade já existente no problema RWA, esta restrição impõe que os *slots* atribuídos em cada enlace devem ter a mesma ordem ao longo de toda rota (fim a fim). Então, assim como no RWA, divide-se o problema RSA da seguinte maneira: 1) Roteamento (R) e 2) Atribuição de espectro (SA).

A fim de solucionar o problema RSA surgiram várias propostas na literatura dependendo do seu escopo de aplicação, pois pode ser visto como um problema de planejamento [17], [18] ou de operação [128]. No caso do planejamento, são comumente utilizados métodos de otimização matemática, como ILP [129], a fim de otimizar os recursos da rede. Já no problema de operação, são utilizadas heurísticas e meta-heurísticas [128] com o intuito de minimizar os bloqueios das requisições na rede. É importante ressaltar que também no caso do RSA as soluções que utilizam métodos de otimização matemática não são capazes de encontrar solução ótima em tempo polinomial para o problema de operação, pois há um drástico aumento da complexidade computacional. Por isso, justifica-se a utilização de heurísticas e meta-heurísticas para resolução do problema de operação ou provisionamento dinâmico.

Em redes EONs pode-se ter a flexibilidade em diversos outros aspectos como: formato de modulação, taxa de símbolos, razão entre *payload* e FEC, espaçamento entre subportadoras em supercanais e espaçamento entre canais e supercanais (banda de guarda). O impacto dessas flexibilidades é analisado em relação a algumas métricas (capacidade efetiva, alcance transparente e eficiência espectral) [5]. Se no problema RSA for adicionado à flexibilidade com relação à seleção do formato de modulação, evolui-se para o problema RMLSA. O problema RMLSA pode ser decomposto em: 1) roteamento e atribuição de nível de modulação (RML) e 2) atribuição de espectro (SA). Assim novas soluções foram propostas a fim de solucionar o problema RMLSA [18] [130] [131].

Com o alcance de maiores taxas de transmissão (a partir de 100 Gb/s) constatou-se a impossibilidade na prática de utilizar uma única portadora para a transmissão de altas taxas (como por exemplo: 200 Gb/s, 400 Gb/s e 1 Tb/s) pois seria necessário utilizar formatos de

modulação com uma altíssima eficiência espectral (por exemplo: 1024QAM no caso de 1 Tb/s) resultando em um alcance muito reduzido além do aumento dos efeitos degradantes de camada física, além da limitação de banda do receptor. A fim de viabilizar essas conexões com altas taxas surgiu o conceito de supercanal [84], agregação de subportadoras ópticas, que utiliza diversas técnicas como: N-WDM [132], CO-OFDM [133] e OAWG [134].

No entanto, as soluções apresentadas tanto com relação ao problema RSA quanto ao problema RMLSA consideraram fibras e componentes ópticos como ideais, ou seja, em suas soluções não foram consideradas perdas e/ou degradações que as fibras e os componentes ópticos sofrem através dos efeitos de camada física. Porém, em um cenário de rede transparente é necessário que as soluções para os problemas RSA e RMLSA levem em consideração essas degradações e perdas a fim de se aproximar mais de um cenário real. Então, são propostas soluções para os problemas IA-RSA e IA-RMLSA que levam em consideração parâmetros de camada física [31], [32].

### **3.3.1.3. Problema IA-RSCA em EON-MCF**

Os avanços conseguidos pelas diversas flexibilidades introduzidas pelas redes EONs trouxeram um grande ganho, reduzindo o desperdício de recursos e aumentando a: capacidade, taxas de transmissão e eficiência espectral. Porém, como citado anteriormente, a capacidade de transmissão das SMF tende a aproximar-se rapidamente do seu limite fundamental [21], [22]. A fim de superar essas limitações, a comunidade científica propôs a multiplexação por divisão espacial [23], podendo ser realizada por meio da fibra multi-núcleo.

Contudo, com a inclusão da dimensão espacial, novas soluções [50] para o problema de provisionamento em redes MCF-EONs além de considerar o roteamento e a atribuição de espectro terá que adicionar a atribuição de núcleo para as demandas de tráfego. Além de possíveis alterações com relação às restrições já conhecidas nas redes SMF-EONs, como por exemplo, a sobreposição de *slots* no espectro e restrição de continuidade. Assim, o problema de provisionamento em redes MCF-EONs é conhecido, como: RSCA.

A atribuição de núcleo contida pelo problema RSCA resultou em um aumento ainda maior da complexidade computacional em sua resolução, principalmente se for solucionado de forma conjunta. Sendo assim, semelhante à resolução dos problemas RWA e RSA, necessita-se dividir o problema RSCA em: roteamento (R) e atribuição de espectro e núcleo (SCA). Quanto ao escopo de aplicação, o problema RSCA pode ser classificado como um problema de: planejamento ou de operação [135].

Apesar da multiplexação por divisão de espaço através das fibras MCF aumentar drasticamente a taxa de transmissão de dados, o processo de fabricação e a composição dessas fibras por meio de sua característica intrínseca gera o principal efeito degradante nas redes MCF-EONs: a diafonia inter-núcleo [42], [43]. Portanto, com o conhecimento de que existem efeitos físicos que degradam a qualidade da transmissão e precisam ser levados em consideração pela solução de provisionamento, surge o problema: IA-RSCA.

Na literatura existem três abordagens quando se considera como restrição a XT na atribuição de núcleo e espectro: i) a abordagem *XT-avoid* [61], [62], [63], ii) *XT-WC* [28], [56], [59] e iii) *XT-aware* [61], [64]. As abordagens i) e ii) reduzem significativamente a complexidade do problema. A abordagem iii) tem ainda melhor desempenho, pois leva a uma solução ideal em termos de menor impacto da XT [61].

Conforme o escopo de aplicação do problema, algumas soluções foram propostas, tanto na fase de planejamento como de operação dessas redes, levando em conta o impacto da XT [28], [56], [58], [59], [61], [62], [63], [64]. No cenário estático, o problema de planejamento IA-RSCA é geralmente resolvido usando a ILP. Os modelos de otimização ILP (abordagem *XT-WC*) e ILP mista (abordagem *XT-aware*) e o algoritmo heurístico (abordagem *XT-aware*) foram propostos [61]. No cenário dinâmico, uma solução algorítmica para o problema IA-RSCA sobdemanda baseado na abordagem *XT-avoid* foi proposta para mitigar o impacto da XT em MCF [62]. Assim como em [63], um método para o problema IA-SCA “sob demanda” foi proposto com base em duas políticas: i) classificação de núcleo predefinida, que reduz a fragmentação do espectro e ii) priorização de núcleo predefinida, que prioriza a alocação em núcleos não adjacentes, a fim de reduzir o impacto da XT (*XT-avoid*).

### **3.4. Considerações Finais**

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos relacionados à EON, destacando-se o provisionamento de recursos em redes ópticas considerando limitações de camada física desde redes WDM até MCF-EONs. Assim, foram apresentadas diversas abordagens para resolver os problemas IA-RWA, IA-RSA ou IA-RMSA e IA-RSCA demonstrando ser a melhor opção para redução das penalidades sofridas pelo sinal óptico. No próximo capítulo, será detalhada, a proposta de provisionamento dinâmico de recursos



# CAPÍTULO 4 – Proposta de Aprovisionamento Dinâmico de Recurso

Este capítulo trata da proposta de uma nova metodologia de aprovisionamento dinâmico de recursos em MCF-EONs que considera um modelo de limitação de camada física através da inclusão de efeitos de camada física. Esta metodologia tem como objetivo solucionar o problema IA-RSCA.

A seguir apresentam-se as considerações iniciais do projeto da metodologia e posteriormente descreve-se o fluxograma da metodologia proposta, o novo índice de sobreposição de *slots* de frequência juntamente com a computação da potência média da XT propostos e, por fim, um novo algoritmo guloso *XT-aware* para IA-SCA é proposto.

## 4.1. Considerações de Projeto

Neste trabalho, considera-se que as MCF-EONs podem suportar conexões PDM com detecção coerente [136] para diferentes formatos de transmissão (monoportadora ou supercanal) e taxas de transmissão (capacidade total nas duas polarizações,  $C$ ). Para monoportadora, as conexões de 42.8 Gb/s (HD-FEC) e 112 Gb/s (HD-/ SD-FEC) cujos formatos M-QAM em forma de *Nyquist* [86], com  $M$  (número de pontos de constelação ou ordem de modulação) igual a 64, 32, 16, 8 e 4, são considerados. Para supercanal, os supercanais *Nyquist-WDM*, que consistem em um conjunto de subportadoras ópticas de formato *Nyquist* com a mesma taxa de símbolo e formato de modulação [84], são considerados. Neste caso, todas as subportadoras ópticas têm a mesma taxa de bits (por exemplo, 112 Gb/s),  $C_{sc}$ , e para um número de subportadoras ópticas (por exemplo: 2, 4 e 10),  $N_{sc}$ , a capacidade total do supercanal é  $C = N_{sc} \cdot C_{sc}$ . As taxas de transmissão dos supercanais a 224 Gb/s, 448 Gb/s e 1120 Gb/s (todos com HD-/ SD-FEC) com os formatos M-QAM com apenas  $M = 16, 8$  e 4 são considerados. Devido ao alcance reduzido de 32- e 64-QAM, estes formatos não são considerados para supercanais.

Para uma portadora PDM em formato *Nyquist* (com o fator *roll-off* ou fator de decaimento ajustado para zero corresponde à largura de banda mínima necessária para interferência intersimbólica igual a zero), a largura de banda do sinal é igual a taxa de símbolo transmitida pela portadora em cada estado de polarização,  $R_s$  [21]. Conclui-se que, para monoportadora, essa taxa de símbolo é dada por  $R_s$  (ver as eq. 2.14 e 2.15), onde o fator 2 representa as duas polarizações [21] e, para os supercanais, a taxa de símbolo transmitida

por cada subportadora óptica em cada estado de polarização é dada por  $R_s = C_{sc} / \eta$ . Portanto, no caso de monoportadora, a largura de banda total ( $B_{tot}$ ) de cada conexão é igual à taxa de símbolo,  $B_{tot} = R_s$ . Para os supercanais, a largura de banda total pode ser escrita como (veja o esquema da ilustração 1 (a) em [20])

$$B_{tot} = (N_{sc} - 1) \Delta f + R_s \quad (4.1)$$

em que  $\Delta f$  é o espaçamento entre as subportadoras (ver tabela 4.1). Após obter a largura de banda total necessária, similarmente ao que foi feito em [130], o número de *slots* contíguos ( $N_s$ ) de cada conexão é dado por

$$N_s = \left\lceil \frac{B_{tot}}{B_s} \right\rceil + N_{GB} \quad (4.2)$$

onde  $B_s$  é a largura de banda do *slot* de frequência (ex. 12,5 GHz),  $N_{GB}$  é o número de *slots* de banda de guarda por conexão e  $\lceil x \rceil$  é a função de teto que mapeia um número real  $x$  para o menor número inteiro que é maior ou igual a  $x$  (ver quadro 4.2).

**Quadro 4. 1- Largura de Banda Total (monoportadora e supercanal vs formato de modulação).**

Largura de Banda (GHz)	Monoportadora		Supercanal		
	42,8 Gb/s	112 Gb/s	224 Gb/s	448 Gb/s	1120 Gb/s
4-QAM	10,7	28	56	112	280
8-QAM	7,13	18,67	38,18	77,20	194,26
16-QAM	5,35	14	29,14	59,40	150,21
32-QAM	4,28	11,2			
64-QAM	3,57	9,33			

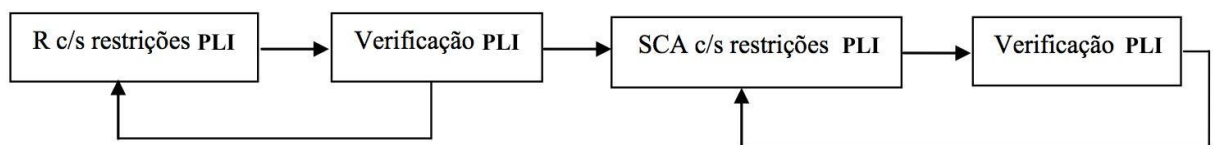
**Quadro 4. 2- Número *slots* (monoportadora e supercanal vs formato de modulação).**

$N_s$	Monoportadora		Supercanal		
	42,8 Gb/s	112 Gb/s	224 Gb/s	448 Gb/s	1120 Gb/s
4-QAM	2	4	6	10	24
8-QAM	2	3	5	8	17
16-QAM	2	3	4	6	14
32-QAM	2	2			
64-QAM	2	2			

## 4.2. Metodologia Proposta para Resolução do Problema IA-RSCA

A metodologia proposta nesta tese é uma extensão das abordagens de IA-RWA, apresentadas na subseção 3.3.3.1 através da ilustração 3.3, para a resolução do problema IA-RSCA. Nota-se que a metodologia proposta poderá se encaixar em diversas abordagens dependendo das estratégias adotadas para a resolução de cada subproblema, pois dependerá se essas estratégias irão considerar ou não as restrições de camada física. Porém ao final da resolução tanto do primeiro subproblema quanto do segundo subproblema são verificadas as respectivas PLI, como se apresenta na ilustração 4.1.

**Ilustração 4. 1- Abordagem da metodologia proposta.**



Fonte: Autor.

A seguir descreve-se o fluxograma do algoritmo proposto para resolução do problema IA-RSCA.

Na ilustração 4.2, o fluxograma da metodologia de IA-RSCA proposta é apresentado. A metodologia começa com a fase de inicialização coletando as informações topológicas da rede (como por exemplo: número de nós e enlaces, comprimento dos enlaces, capacidade dos enlaces) e os parâmetros de camada física para o cálculo dos efeitos lineares (L) e não lineares (NL) que afetam cada enlace, conforme o modelo considerado.

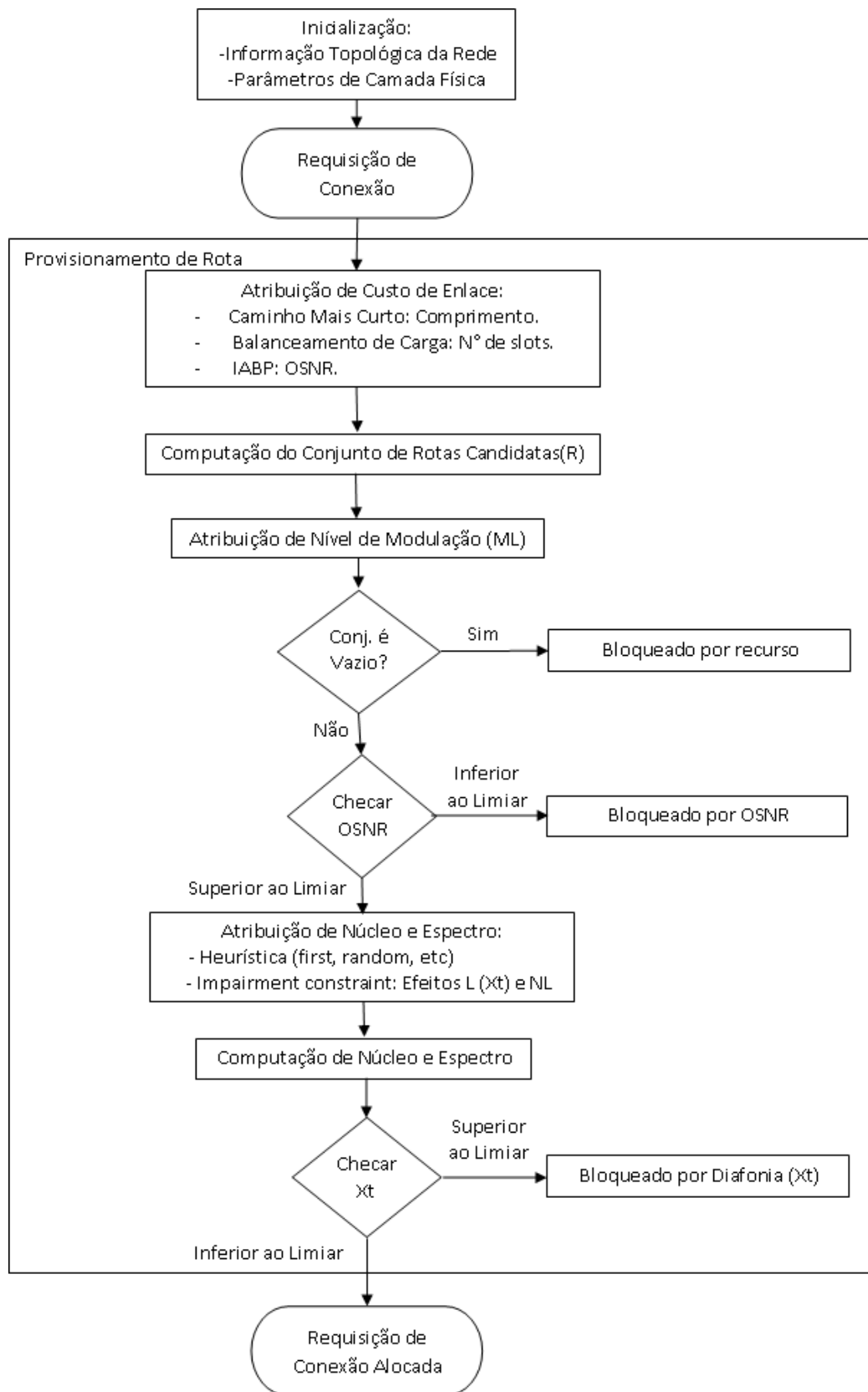
Com a chegada de uma requisição de conexão seguindo, por exemplo, um processo poissoniano, a metodologia irá resolver o problema de roteamento (R), porém anteriormente terá que atribuir um custo ao enlace (comprimento do enlace, número de *slots* ocupados, penalidade causada por efeitos lineares e/ou não lineares) conforme o algoritmo de roteamento utilizado (KSP, *Balanced Load*, *Impairment-Aware Best Path*), respectivamente. Nesta tese considerou-se como algoritmo de roteamento: K *Shortest Path*. Então, k rotas candidatas serão calculadas entre a origem e o destino usando o algoritmo de *Yen's* a fim de servir a requisição de conexão. Para cada k rota será atribuído o nível de modulação (ML) disponível na rede, sendo a ordem dessa atribuição do nível de modulação do mais para o menos eficiente espectralmente (64-QAM para o 4-QAM, por exemplo).

Após a computação dessas rotas candidatas, é checada a existência de pelo menos uma rota entre a origem e o destino que respeitem as restrições de continuidade e contiguidade assegurando a quantidade mínima de *slots* requeridos pela conexão (expressa pela eq. 4.2). A

restrição de continuidade só será respeitada se houver ao longo da rota fim a fim ao menos um núcleo em comum a todos os enlaces da rota que comporte a quantidade mínima de *slots* requerida pela conexão. Já a restrição de contiguidade assegura que esses *slots* tem que ser contíguos ao longo do espectro, ou seja, adjacentes no espectro de frequência. Assim, se não houver nenhuma rota, ou seja, se o conjunto de rotas candidatas for vazio, a requisição de conexão será bloqueada por recurso. No entanto, se houver ao menos uma ou um conjunto de rotas candidatas entre a origem e o destino, então elas serão armazenadas priorizando as melhores soluções em função do custo (no caso, menor comprimento de rota). Essas soluções ainda serão testadas em relação ao nível de OSNR obtido, pois se o nível de OSNR obtido for inferior ao limiar, a requisição de conexão que utilizar essa solução será bloqueada por OSNR, porém se o nível de OSNR obtido for superior ao limiar, a requisição de conexão que utilizar essa solução será aceita em relação à OSNR (como detalhado nas subseções 2.2.3 e 2.2.4).

Posteriormente, a metodologia proposta irá solucionar o problema de atribuição de núcleo e espectro. Sendo essa atribuição feita através de heurísticas (*first-fit*, *random*) ou soluções que levam em consideração limitações de camada física que são geradas por efeitos lineares e/ou não lineares. Nesta tese, foi proposto um algoritmo guloso *XT-Aware* considerando um novo índice de sobreposição de *slots* de frequência para o cálculo da potência média da XT (detalhado na subseção 4.4). Após a resolução do problema SCA, serão listadas as soluções conforme a atribuição aplicada. Então, será checado o nível de diafonia das soluções encontradas, por ser um fator intrinsecamente limitante em redes MCF-EONs. Se for superior ao limiar, a requisição de conexão será bloqueada por diafonia inter-núcleo, porém, se for inferior ao limiar, a requisição de conexão será aceita em relação ao nível de diafonia e poderá ser alocada.

**Ilustração 4. 2- Fluxograma da metodologia de IA-RSCA proposta.**



### 4.3. Novo Índice de Sobreposição de *Slots* de Frequência e Potência Média da XT

No cenário de MCF-EON vê-se que as conexões que estão em núcleos adjacentes (conexão<sub>i</sub> e conexão<sub>j</sub>) poderão ter a mesma largura de banda com a totalidade ou parcialidade de seus *slots* contíguos sobrepostos ou diferentes largura de banda com parcialidade de seus *slots* contíguos sobrepostos. Isto tem um impacto fundamental no cálculo da potência média da diafonia inter-núcleo entre as conexões. As equações apresentadas até o momento são válidas somente para conexões em núcleos adjacentes com a mesma largura de banda (1 *slot*) e totalmente sobrepostas (ver subseção 2.1.3).

Contudo, em um cenário real de redes MCF-EONs, há a possibilidade de existir conexões que seus *slots* de frequência sejam sobrepostos parcialmente com conexões de mesma ou diferente largura de banda. Então, essa análise precisa ser generalizada e considerada no cálculo da potência média da XT. Esses cenários de diferente sobreposição devido ao número de *slots* levam a diferentes níveis de XT entre as conexões. No entanto, artigos recentes sobre o problema SCA em MCF-EON não consideram diferentes impactos no nível de XT devido ao nível de sobreposição [28], [56], [61-65]. Esses trabalhos consideram apenas o cenário de sobreposição total. No caso, da sobreposição total e a mesma largura de banda, o número de *slots* de frequência sobrepostos entre as conexões é igual ao número de *slots* da conexão adjacente estabelecida. No entanto, no caso da sobreposição parcial entre conexões com mesma ou diferente largura de banda, é vital avaliar o número de *slots* de frequência sobrepostos entre as conexões.

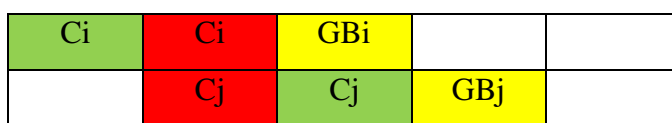
Para isso, como foi considerado nesta tese, necessita-se explicar a razão da XT ser impactado apenas pelo número de *slots* de frequência sobrepostos (e não necessariamente por toda a largura de banda do sinal interferente). Assim, assume-se que o espectro do sinal é plano semelhante à forma de um pulso *Nyquist* com baixo fator de *roll-off*. Considerando que o mecanismo de geração da XT é um efeito linear, e para níveis moderados de potência, ocorre propagação linear ao longo da MCF. O efeito da XT é gerado no núcleo interferido apenas nos *slots* de frequência ocupados pelo sinal do núcleo interferente. A linearidade do mecanismo de geração da XT foi mostrada em [36] onde a função de transferência do campo da XT foi derivada para uma única polarização. Posteriormente, a linearidade do mecanismo de geração da XT foi investigada para dupla polarização [41]. O modelo resultante da linearidade do mecanismo de geração da XT mostrou fornecer uma descrição adequada da evolução temporal estocástica e do tempo de correlação da XT com um único ou múltiplos

núcleos interferentes [38], [39]. No lado do receptor, o receptor coerente filtra todos os componentes espectrais da banda do sinal. Conseqüentemente, apenas os componentes espectrais da XT que estão na mesma banda que o sinal afetam o desempenho do sinal. Isto significa que apenas a banda correspondente à sobreposição da banda dos sinais interferidos e interferentes deve ser levada em consideração ao avaliar a potência média da XT que afeta o desempenho de MCF-EON, ou seja, a potência média da XT detectada. Como a geração da XT é similar para todas as frequências na banda do sinal (porque a potência média da XT aumenta com o comprimento de onda a uma taxa de aproximadamente 0,1 dB/nm [52], [20]), então a potência média da XT detectada gerada na largura de banda do sinal do núcleo interferido é proporcional à largura da banda resultante da sobreposição das bandas de sinal interferidas e interferentes. Para simplificar a análise e levar em consideração essa largura de banda, descreve-se a sobreposição de largura de banda em termos do número de *slots* de frequência. Ilustra-se isso nos dois casos a seguir:

1) Sobreposição parcial entre conexões de mesma largura de banda

Neste caso, considera-se duas conexões alocadas (*i* e *j*) em dois núcleos adjacentes (1 e 2), respectivamente, e cada núcleo contém cinco *slots* (ver il. 4.3). Sendo as conexões *i* e *j* compostas por 3 *slots*, sendo 2 *slots* com o sinal óptico e 1 de banda de guarda. A GB (em amarelo) é um slot sem sinal óptico que serve para evitar interferência entre conexões no espectro do mesmo núcleo. Então, necessita-se que a GB não seja considerada para o efeito da diafonia, mas é computada para a ocupação espectral.

**Ilustração 4. 3- Sobreposição parcial de *slots* entre conexões com mesma largura de banda.**



Fonte: Autor.

Na ilustração 4.3, nota-se que a sobreposição parcial entre as conexões com a mesma largura de banda em núcleos adjacentes irá impactar diretamente no nível de diafonia, pois neste caso dos dois *slots* que tem sinal, somente um (1) está sobreposto (*slots* em vermelho) entre as duas conexões, reduzindo a interferência em 50% entre as conexões, porém tem impacto semelhante no nível de XT induzido em cada conexão. Tanto os *slots* em verde quanto os em amarelo (GB) não contribuem em nada para o impacto da diafonia, pois estão sobrepostos a slots desocupados ou entre eles.

2) Sobreposição parcial entre conexões de diferentes largura de banda

Neste caso, considera-se duas conexões alocadas ( $i$  e  $j$ ) em dois núcleos adjacentes (1 e 2), respectivamente, e cada núcleo contém cinco *slots* (ver il. 4.4). Sendo a conexão  $i$  composta de 3 *slots*, sendo 2 *slots* com o sinal óptico e 1 de banda de guarda ( $GB_i$ ), já a conexão  $j$  é composta de 4 *slots*, sendo 3 *slots* com o sinal óptico e 1 de  $GB_j$ . Igualmente ao primeiro caso, considerar-se a GB com um slot sem sinal óptico servindo para evitar interferência entre conexões no espectro do mesmo núcleo. Então, da mesma forma necessita-se que a GB não seja considerada para o efeito da diafonia.

**Ilustração 4. 4- Sobreposição parcial de *slots* entre conexões com diferentes larguras de banda.**

C <sub>i</sub>	C <sub>i</sub>	GB <sub>i</sub>		
	C <sub>j</sub>	C <sub>j</sub>	C <sub>j</sub>	GB <sub>j</sub>

Fonte: Autor.

Na ilustração 4.4, percebe-se que a sobreposição parcial entre as conexões com diferentes larguras de banda em núcleos adjacentes também irá impactar diretamente no nível da diafonia. No entanto, neste caso, como a largura de banda das conexões não são iguais, existirá diferença na diafonia induzida em cada conexão, por exemplo: com relação a conexão  $i$  dos dois *slots* que tem sinal óptico somente um (1) está sobreposto reduzindo a sua interferência em 50% no sinal da conexão  $j$ , que irá reduzir a sua interferência em 66.6% em relação a conexão  $i$  pois somente um (1) *slot* dos três que tem sinal óptico está sobreposto. Semelhante ao primeiro caso, tanto os *slots* em verde quanto os em amarelo (GB) não contribuem em nada para o impacto da diafonia, pois estão sobrepostos a *slots* desocupados ou entre eles.

Portanto, tanto no caso de sobreposição parcial de *slots* entre conexões com mesma largura de banda quanto no caso de diferentes larguras de banda, percebe-se claramente que o impacto da diafonia entre as duas conexões não será igual se todos os *slots* com sinal ótico estivessem sobrepostos. Os autores deste trabalho desconhecem na literatura alguma solução de cálculo da diafonia em MCF que leve em consideração somente os *slots* sobrepostos com mesmas ou diferentes larguras de banda, além de considerar a GB para a alocação, porém não causando contribuição nenhuma para a diafonia entre as conexões.

A fim de considerar esses casos, propomos um novo índice de sobreposição de *slots* de frequência para quantificar a relação entre a potência média da XT detectada devido à sobreposição parcial de bandas de sinais interferidas e interferentes e a potência média da XT devido à potência total da conexão interferente. O índice é definido como:



$$I_{so\ i,j} = \frac{N_{so\ i,j}}{N_{s\ j}} \quad (4.3)$$

onde  $N_{so\ i,j}$ , é o número de slots sobrepostos entre as conexões  $i$  (interferida) e  $j$  (interferente), e  $N_{s\ j}$ , é o número total de slots da conexão  $j$ .

Após a proposição do  $I_{so\ i,j}$ , considerou-se a inclusão do índice de sobreposição do *slot* de frequência e de diferentes potências de sinal de conexões interferentes para calcular a potência média da XT detectada em MCF homogênea fracamente acoplados. Para um enlace de comprimento  $L$ , a potência média da XT da conexão  $i$  pode ser expressa como:

$$P_{XT\ i} = \sum_{j=1}^{N_a} (I_{so\ i,j} \cdot P_{s\ j} \cdot h \cdot L) \quad (4.4)$$

onde  $N_a$  é o número de núcleos adjacentes interferentes,  $I_{so\ i,j}$  é o índice de sobreposição entre as conexões  $i$  e  $j$ ,  $P_{s\ j}$  é a potência de sinal da conexão interferente  $j$ , e  $h$  como descrito na eq. 2.5 [34], [40], [43].

Portanto, a potência média da XT normalizada pela potência do sinal de conexão  $i$  é dada por:

$$XT_{\mu,i} = \frac{P_{XT\ i}}{P_{s\ i}} \quad (4.5)$$

No entanto, até este momento, considerou-se para o cálculo do efeito da diafonia inter-núcleo apenas um único enlace de fibra ponto a ponto (eq. 4.5). Porém, em um cenário realístico de redes de comunicação sabe-se que uma rota pode ter diversos enlaces. Então, o cálculo da potência média da XT total normalizada da conexão  $i$  para uma rota fim a fim com múltiplos enlaces, segue:

$$XT_{\mu,i}^{(tot)} = \sum_{l=1}^{N_i} XT_{\mu,i}^{(l)} \quad (4.6)$$

onde  $N_i$  é o número de enlaces da rota da conexão  $i$  e  $XT_{\mu,i}^{(l)}$  é a potência média da XT normalizada dada pela eq. 4.5 para o enlace  $l$ . Note que o cálculo da  $XT_{\mu,i}^{(tot)}$  será o somatório da potência média da XT normalizada de cada enlace ( $XT_{\mu,i}^{(l)}$ ) que compõe a rota. Note-se que, um cenário de rede, conexões diferentes podem partilhar todos ou somente alguns enlaces que compõem as suas respectivas rotas.

## 4.4. Algoritmo Guloso XT-Aware Proposto para Resolução do Problema IA-SCA

Nesta seção, propõe-se um algoritmo guloso XT-aware e compara-se com heurísticas e soluções propostas pela literatura para a resolução do problema IA-SCA. Esta nova estratégia para o problema IA-SCA procura minimizar a XT induzida em todas as conexões da rede (nova e interferentes). O parâmetro usado pelo algoritmo é a média da diferença entre o limite de XT de cada conexão e a potência média da XT normalizada induzida na respectiva conexão, sobre o número total de conexões (nova e interferentes), dado por

$$\overline{\Delta XT} = \frac{1}{N_{cn}} \sum_{n=1}^{N_{cn}} (XT_{\mu,thres,n} - XT_{\mu,n}^{(tot)}) \quad (4.7)$$

onde  $XT_{\mu,thres,n}$  é o limite de XT da conexão  $n$ ,  $XT_{\mu,n}^{(tot)}$  é a potência média da XT total normalizada induzida na conexão  $n$  e  $N_{cn}$  é o número total de conexões (nova e interferentes).

Na ilustração 4.5, o procedimento 1 mostra o pseudocódigo do algoritmo proposto para minimizar o impacto da XT. A maior média das diferenças de XT ( $\overline{\Delta XT}$ ) indica a melhor solução. Inicialmente, uma nova conexão tentará cada solução, núcleo ( $c$ ) e  $slots$  de frequência ( $f$ ), entre todas as soluções candidatas (todos os núcleos e  $slots$  de frequência que respeitem as duas restrições na rota selecionada, continuidade e contiguidade de espectro) seguindo uma ordem inicial predefinida (por exemplo, *first-fit*). Depois de selecionar uma solução candidata ( $c$  e  $f$ ), a potência média da XT normalizada induzida na nova conexão ( $XT_{\mu,nova}^{(tot)}$ ) é calculada. Então, verifica-se se existem conexões adjacentes ( $XT_{\mu,nova}^{(tot)} \neq 0$ ). Caso contrário, a solução candidata é a solução final: Núcleo (Core #) e  $slots$  de frequência (FS #) atribuídos. Se houver conexões adjacentes, será verificado se a potência média da XT normalizada induzida na nova conexão é menor/igual do que o nível do limite de XT. Caso seja maior, a solução candidata é rejeitada. Senão, a potência média da XT de todas as conexões adjacentes interferentes ( $j$ 's) é atualizada e é verificado se a potência média da XT normalizada de cada conexão interferente é menor/igual do que o limite de XT correspondente. Se, a potência média da XT normalizada de uma das conexões interferentes for maior que seu limite, a solução candidata será rejeitada. Caso contrário, para a solução candidata, a média das diferenças de XT ( $\overline{\Delta XT}$ ), dada pela eq. 4.7, é calculada, e o algoritmo guloso compara a média da solução candidata atual com a da solução candidata anterior. A solução candidata com a maior média entre todas as soluções candidatas é a solução final (FS #, Core #) para a rota selecionada da nova conexão.

A complexidade do algoritmo é focada na linha 5 do Procedimento 1, onde a potência média da XT normalizada para todas as conexões interferentes ( $j$ 's) é atualizada. Nesse caso, as variáveis dominantes são  $c$  e  $f$ , o núcleo no enlace de fibra e os *slots* de frequência em um núcleo, respectivamente. No pior caso, a complexidade do algoritmo proposto é assumida como  $O(c \cdot f)$ . No contexto da análise da complexidade, deve-se destacar que as variáveis  $c$  e  $f$  devem respeitar as restrições de continuidade e de contiguidade de espectro na rota selecionada.

#### Ilustração 4. 5- Algoritmo Guloso XT-Aware

---

Procedimento 1 Algoritmo Guloso XT-Aware

---

**Entrada** C, F.

**Saída** Solução final (FS#, Core#) para a rota selecionada.

**Variáveis**

/\* C- conjunto de núcleos, F- conjunto de *slots* de frequência,

$c \in C$ - núcleo em um enlace de fibra,  $f \in F$ - *slots* de frequência em um núcleo,

$XT_{\mu,nova}^{(tot)}$  - potência média da XT normalizada induzida na nova conexão,

$XT_{\mu,j}^{(tot)}$  - potência média da XT normalizada induzida na conexão interferente ( $j$ 's).

\*/

- 1 **Para** todas as soluções  $(c, f)$  que respeitem as duas restrições na rota selecionada **faça**
  - 2     compute a  $XT_{\mu,nova}^{(tot)}$  dada pela Eq. 4.6.
  - 3     **Se**  $(XT_{\mu,nova}^{(tot)} \neq 0)$  **então**
  - 4         **Se**  $(XT_{\mu,nova}^{(tot)} \leq \text{limite de } XT_{\mu,nova}^{(tot)})$  **então**
  - 5             Atualize o nível de XT para todas as conexões interferentes ( $j$ 's).
  - 6             **Se**  $(XT_{\mu,j}^{(tot)} \leq \text{limite de } XT_{\mu,j}^{(tot)})$  **então**
  - 7                 Compute  $\overline{\Delta XT}$  dada pela Eq. 4.7.
  - 8                 Guloso( solução anterior  $\overline{\Delta XT}$ , solução atual  $\overline{\Delta XT}$ )
  - 9                 A solução com a maior  $\overline{\Delta XT}$  é a solução candidata para a nova conexão.
  - 10            **Senão**  $(c, f)$  é rejeitada.
  - 11            **Senão**  $(c, f)$  é rejeitada.
  - 12            **Senão**  $\overline{\Delta XT}$  da solução  $(c, f)$  é a maior e retorna como solução final (FS#,Core#).
  - 13 **FimPara**
  - 14 **retorne** solução final (FS#, Core#) para a rota selecionada.
-

# CAPÍTULO 5 – Avaliação de Desempenho e Análise dos Resultados

Neste capítulo, descreve-se as configurações das simulações e a análise dos resultados do algoritmo proposto comparando com algumas estratégias da literatura para a resolução do subproblema IA-SCA contido na metodologia de provisionamento dinâmico para a resolução do problema IA-RSCA em MCF-EON.

## 5.1. Configurações das Simulações

Nesta tese, utilizou-se um simulador de eventos discretos baseado em Java: SimROEI com suporte a SDM (detalhado no anexo I), desenvolvido por um grupo do LEA (Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado) e também como contribuição desta tese através do registro do software (parceria UFOPA, UEMA e UFPA).

Neste trabalho, considera-se diversas capacidades de conexão (42,8, 112, 224, 448, 1120 Gb/s), cada conexão é randomicamente escolhida seguindo uma distribuição uniforme, e formatos de modulação M-QAM ( $M= 64/32/16/8/4$ ). As conexões são divididas em dois tipos: monoportadora, 42.8 Gb/s e 112 Gb/s, e múltiplas portadoras ou supercanais, 224 Gb/s, 448 Gb/s, 1120 Gb/s. Os supercanais são formados pelo conjunto de subportadoras ( $N_{sc}$ ) de capacidade de 112 Gb/s ( $C_{sc}$ ) necessárias para comportar a demanda de conexão. A eficiência espectral ( $\eta$ ) que seguirá a fórmula (2.15) sendo o  $M$  relativo aos formatos de modulação adotados na rede.

A fim de avaliar a proposta e comparar com as estratégias da literatura, utilizou-se diversas topologias de rede, como: TESTE-6, DT-12 (*National Deutsche Telekom*), EON-11 (*European-wide*) e NSFNET-14 (*National Science Foundation*) (descritas nas subseções 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5). Cada link tem uma MCF em cada direção. Assume-se uma MCF homogênea de sete núcleos com disposição hexagonal dos núcleos [61], [63], [137]. Considerando a largura de banda do *slot* de frequência ( $B_s$ ) de 12,5 GHz e a largura de banda disponível por núcleo ( $B_{av}$ ) de 4 THz (banda  $C$ ), o número de *slots* de frequência por núcleo é igual a 320. Essas topologias permitem mostrar o impacto da XT no desempenho da MCF-EON para níveis moderados de potência na entrada da fibra. As topologias com enlaces muito longos precisam de níveis de potência mais altos para superar a limitação de alcance causada por efeitos lineares (atenuação, ASE, etc.) [138].

No entanto, o uso de níveis mais altos de potência em enlaces muito longos adiciona efeitos não lineares na fibra que reduzem a OSNR [139]. A fim de focar este trabalho nas

limitações físicas fundamentais (ruído óptico e XT), negligencia-se os efeitos não lineares nas fibras estabelecendo uma baixa potência média por subportadora na entrada de fibra de 0.3 mW. Outra maneira de conseguir aumentar o alcance das transmissões, principalmente para supercanais, é a utilização de SD-FEC. Então, neste trabalho considera-se HD-FEC e SD-FEC com suas respectivos impactos na OSNR e XT (ver subsecção 2.2.4).

O par de nós (origem e destino) para cada solicitação de conexão é escolhido aleatoriamente seguindo uma distribuição uniforme. A operação dinâmica da rede é emulada com requisições de conexão chegando com distribuição de Poisson, com taxa média  $\lambda$ , e o tempo de duração exponencialmente distribuído (com uma média normalizada de  $1/\mu = 1$ ). A carga da rede é dada por  $\rho = \lambda/\mu = \lambda$  (Erlang), como em [140]. Os valores dos parâmetros de camada física são apresentados no quadro 5.1.

**Quadro 5. 1- Parâmetros de Camada Física.**

Parâmetro	Valor	Definição
$k$	3	Número de rotas candidatas
$B_{av}$	4 THz	Largura de banda total por núcleo
$B_s$	12,5 GHz	Largura de banda do <i>slot</i>
$B_{ref}$	12,5 GHz	Largura de banda de referência
$P_{sc}$	0,3 mW	Potência do sinal por subportadora
$N_{GB}$	1	Número de <i>slots</i> de GB por conexão
$f_n$	3,16	Figura de ruído do amplificador
$\alpha$	0,2 dB/km	Coefficiente de perda na fibra
$L_{no}$	16 dB	Perda no nó óptico
$d_{amp}$	80 km	Distância entre os amplificadores
$\lambda$	1550 nm	Comprimento de onda
$\beta$	$10^7$ 1/m	Constante de propagação
$R$	0,01 m	Raio de curvatura
$\kappa$	$1,2 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$	Coeficientes de acoplamento
	$5,84 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	
$\Lambda$	$4,5 \times 10^{-5} \text{ m}$	Distância entre núcleos

A estratégia IA-SCA proposta, bem como as estratégias para comparação, são avaliadas em quatro cenários diferentes, cujas principais características estão resumidas no

quadro 5.2. Nos quatro cenários, vários formatos de modulação (M-QAM com M= 64, 32, 16, 8, 4 para monoportadora e M= 16, 8, 4 para supercanais) podem ser empregados nas conexões dependendo da OSNR da conexão e da OSNR requerida. O número de *slots* de frequência requeridos por conexão, cujo depende do formato de modulação usado, é dado pela eq. 4.2. Nos cenários 1 e 3 (somente conexões a 112 Gb/s), considera-se a estratégia CP-RD para atribuir aleatoriamente os *slots* de frequência disponíveis, reduzindo o impacto da XT. Assim, nesses cenários de menor fragmentação no espectro, tende-se que a probabilidade de bloqueio (PB) da estratégia CP-RD seja menor que a da estratégia CP-FF. No entanto, nos cenários 2 e 4 (conexões a 42.8, 112, 224, 448 e 1120 Gb/s), utiliza-se a estratégia CP-FF para atribuir os primeiros *slots* de frequência disponíveis, reduzindo a fragmentação no espectro. Portanto, nesses cenários de maior fragmentação no espectro, tende-se que a PB da estratégia CP-FF seja menor que a PB da estratégia CP-RD. Ressalta-se que ambas as estratégias utilizam CP para atribuição de núcleo, mas diferentes estratégias para atribuição no espectro. A estratégia RD apresenta menor PB do que a estratégia FF em cenários com menor fragmentação, porém a estratégia do FF mostra menor PB em cenários com maior fragmentação [63] (como demonstrado no anexo II).

**Quadro 5. 2- Descrição dos Cenários.**

Cenários	Características	Observações
Cenário 1	$\kappa = 1.2 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1} \rightarrow \overline{XT} = -32.2 \text{ dB/}$ 100 km; taxas das conexões = 112 Gb/s.	Maior impacto da XT e menor fragmentação no espectro.
Cenário 2	$\kappa = 1.2 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1} \rightarrow \overline{XT} = -32.2 \text{ dB/}$ 100 km; taxas das conexões = 42.8, 112, 224, 448 e 1120 Gb/s.	Maior impacto da XT e maior fragmentação no espectro.
Cenário 3	$\kappa = 5.84 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \rightarrow \overline{XT} = -38.2 \text{ dB/}$ 100 km; taxas das conexões = 112 Gb/s.	Menor impacto da XT e menor fragmentação no espectro.
Cenário 4	$\kappa = 5.84 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \rightarrow \overline{XT} = -38.2 \text{ dB/}$ 100 km; taxas das conexões = 42.8, 112, 224, 448 e 1120 Gb/s.	Menor impacto da XT e maior fragmentação no espectro.

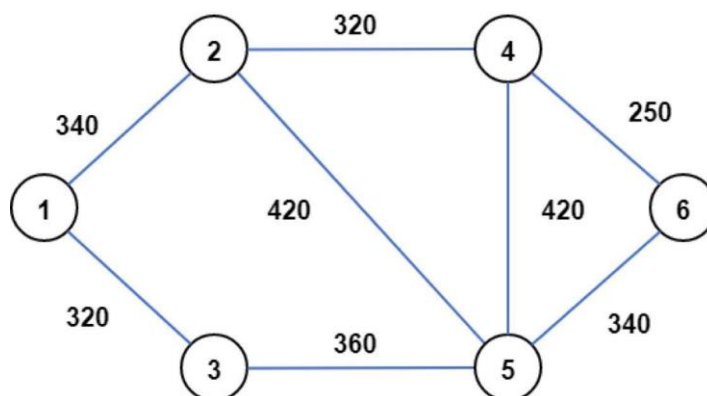
O desempenho das estratégias de SCA é avaliado a partir dos resultados da simulação, calculando-se a PB total da rede e a utilização da rede (NU) em função da carga de tráfego. Na metodologia IA-RSCA proposta, a PB é a soma da probabilidade de bloqueio por: recurso, OSNR e XT. A NU é a razão entre o número de *slots* ocupados na rede e o número total de *slots* da rede (número de *slots* por núcleo  $\times$  número de núcleos  $\times$  número de links). A NU é calculada e atualizada para cada alocação e desalocação de *slots* durante a simulação, e o valor médio é computado. Os resultados da simulação apresentados nos gráficos correspondem: média da PB total, média da PB por XT e média da NU obtidos por cada estratégia. Para cada carga e cenário de rede, o desempenho da rede é avaliado pela média dos resultados obtidos de um conjunto de 30 simulações independentes. Para cada simulação, um conjunto de 100.000 requisições de conexão é gerado. Barras de erro correspondentes ao intervalo de confiança de 95% são apresentadas juntamente com os valores médios.

Nas subseções a seguir são apresentados e analisados os resultados das estratégias avaliadas para os cenários detalhados e topologias apresentadas a seguir.

## 5.2. Análise dos Resultados para a Topologia TESTE-6

Nesta seção, analisa-se o desempenho da estratégia de IA-SCA proposta e compara-se com a das estratégias FF, RD e CP-FF/RD nos quatro cenários diferentes (ver quadro 5.2) considerando HD-FEC, para a topologia de rede TESTE (ver il. 5.1). Essa topologia tem 6 nós e 16 enlaces unidirecionais, cujo os comprimentos são apresentados (em km) a seguir.

**Ilustração 5. 1- Topologia TESTE 6-nós.**



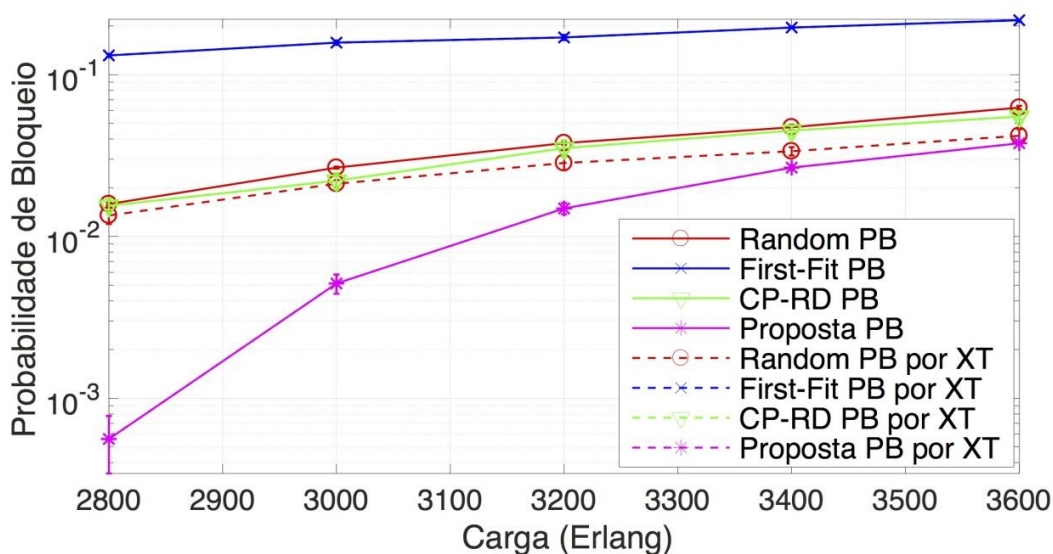
Fonte: Autor.

A ilustração 5.2 mostra a probabilidade de bloqueio total (linhas contínuas) e a probabilidade de bloqueio por XT (linhas tracejadas) das estratégias SCA para o cenário 1. Neste cenário, o desempenho do algoritmo proposto (linhas na cor magenta com marcador asterisco, correspondendo ao PB e PB por XT, estão sobrepostas) é melhor que as outras estratégias de SCA porque seleciona o núcleo e o espectro disponíveis com o mínimo impacto

da XT. Esses resultados mostram que o algoritmo guloso proposto reduz a PB da rede em 61%, 64% e 91%, em média, sobre todas as cargas testadas, quando comparado com as estratégias CP-RD, RD e FF, respectivamente. O pior desempenho da estratégia FF é causado pelo maior bloqueio por XT devido à alocação nos primeiros *slots* de frequência disponíveis. Observe que a PB e a PB por XT (linhas azuis com marcador cruzado) estão sobrepostas. Em comparação com a estratégia FF, a estratégia RD reduz o bloqueio por XT (linha vermelha tracejada com marcador circular), devido à atribuição aleatória do núcleo e *slot* de frequência, mas aumenta o bloqueio por recurso devido à maior fragmentação do espectro. A PB da estratégia RD (linha vermelha contínua com marcador circular) é um pouco pior que a da estratégia CP-RD (as linhas verdes com marcador triangular, correspondentes a PB e PB por XT, estão sobrepostas), devido à estratégia de RD tender a uma maior fragmentação do espectro, como pode ser concluído a partir da comparação das curvas da PB e da PB por XT para a estratégia de RD.

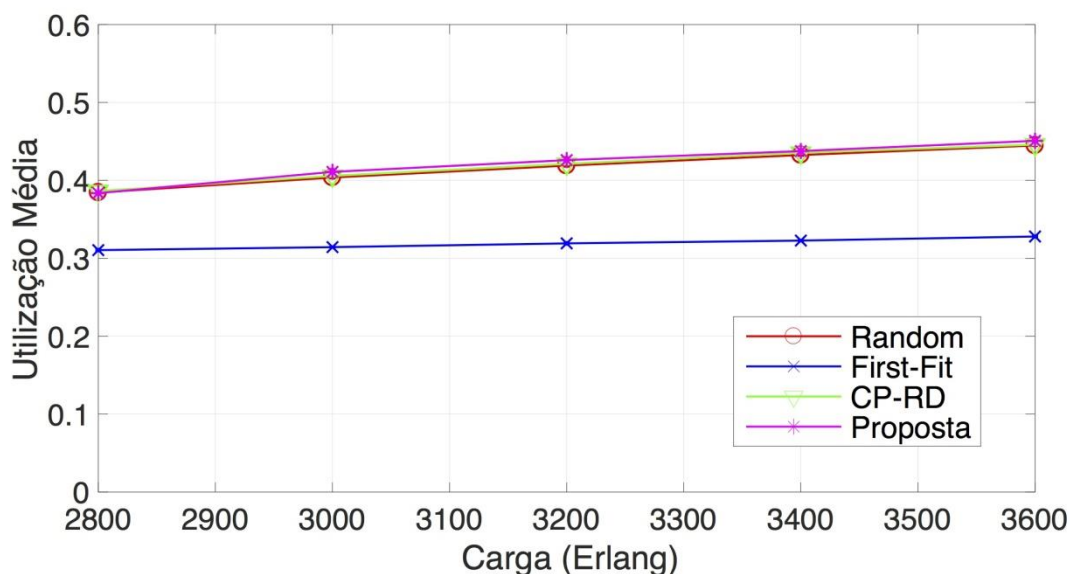
A ilustração 5.3 apresenta a utilização da rede das estratégias SCA analisadas para o cenário 1. Nesse cenário, a NU do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador asterisco) é marginalmente melhor que a das estratégias RD (linha vermelha com marcador circular) e CP-RD (verde linha com marcador de triângulo). De fato, as três estratégias têm um número similar de *slots* alocados, mas com mais conexões alocadas para o algoritmo proposto devido a menor PB, assim resultando em uma melhor ocupação do espectro. O pior desempenho em relação a NU da estratégia FF (linha azul com marcador cruzado) é causado pelo aumento da faixa de espectro nos núcleos impedidos para alocação devido ao alto impacto da XT.

**Ilustração 5. 2- Probabilidade de bloqueio das estratégias SCA para o cenário 1.**





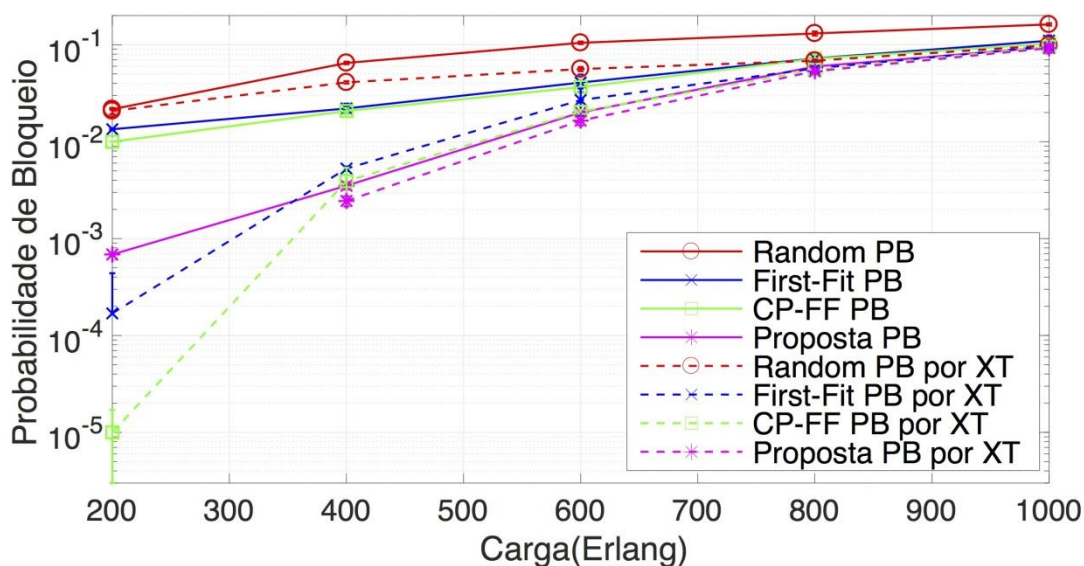
**Ilustração 5. 3- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 1.**



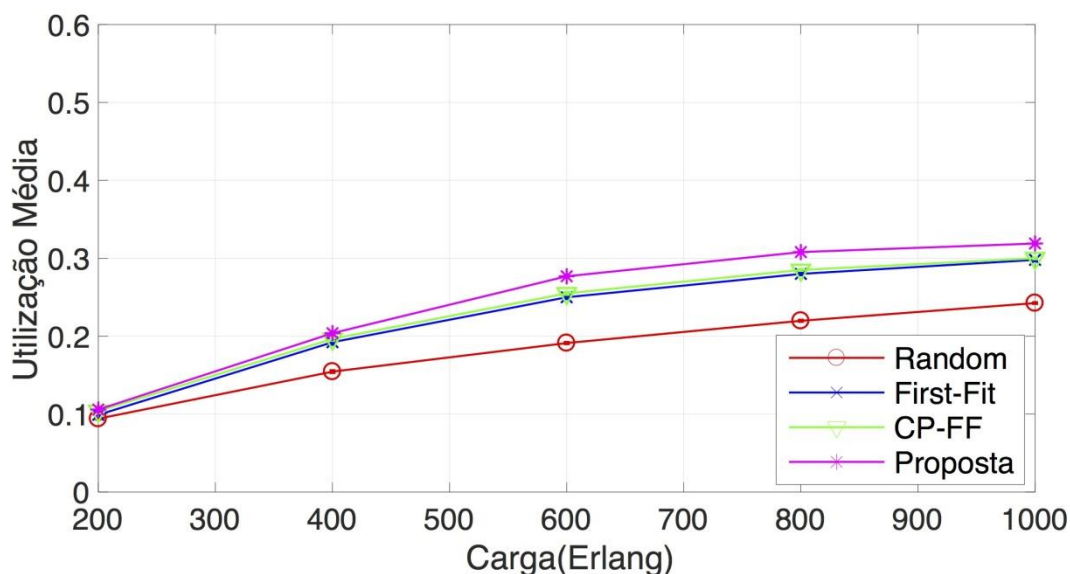
A ilustração 5.4 apresenta a probabilidade de bloqueio total (linha contínua) e a probabilidade de bloqueio por XT (linha tracejada) das estratégias de SCA avaliadas para o cenário 2. Neste cenário, a fragmentação no espectro é maior devido à maior variabilidade do número de *slots* de frequências necessários (diversas taxas de transmissão). Em comparação com o cenário 1, isso causa a redução da carga de tráfego necessária para atingir um nível similar de PB. Apesar da maior fragmentação espectral, o algoritmo proposto (linha na cor magenta contínua com marcador asterisco) diminui a PB em 49%, 52% e 74% em média, ao longo da faixa de carga considerada, quando comparado com as estratégias CP-FF, FF e RD, respectivamente. Este melhor desempenho é principalmente devido à minimização da PB devido a XT (ver linha na cor magenta tracejada com marcador asterisco). Como se pode ver na ilustração 5.4, nesse cenário, a PB do algoritmo proposto é principalmente causada por XT. O pior desempenho é da estratégia RD (linha vermelha contínua com marcador circular) sendo causado principalmente pela XT (linha vermelha tracejada com marcador circular), devido à alocação aleatória no espectro e núcleos. Neste cenário, a probabilidade de bloqueio da estratégia CP-FF (linha verde contínua com marcador triangular) é um pouco menor que a da estratégia FF (linha azul contínua com marcador cruzado) porque a maior fragmentação no espectro reduz o impacto do bloqueio por XT nas duas estratégias (ver linha verde tracejada com marcador triangular e linha azul tracejada com marcador cruzado correspondente à PB por XT para CP-FF e FF, respectivamente).

A ilustração 5.5 mostra a utilização de rede das estratégias SCA para o cenário 2. Nesse cenário, embora a NU diminua devido ao aumento do número de *slots* impedidos devido a fragmentação no espectro, nível da OSNR e nível de XT, a NU do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador asterisco) é melhor do que a NU das outras estratégias SCA. Este resultado mostra que o algoritmo proposto continua a ter melhor desempenho do que as demais estratégias mesmo em cenários de maior fragmentação quando o impacto da XT é significativo. O pior desempenho sobre a NU é da estratégia RD (linha vermelha com marcador circular), pois é causada pela alta penalidade de XT e fragmentação no espectro. Note que o aumento da faixa de espectro nos núcleos impedidos leva a uma utilização de rede muito menor. Os desempenhos das estratégias FF (linha azul com marcador cruzado) e CP-FF (linha verde com marcador triangular) são semelhantes.

**Ilustração 5. 4- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para o cenário 2. Como o número de ocorrências (bloqueio por XT) da proposta para a carga de 200 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a BP por XT da proposta para essa carga não é mostrada no gráfico.**



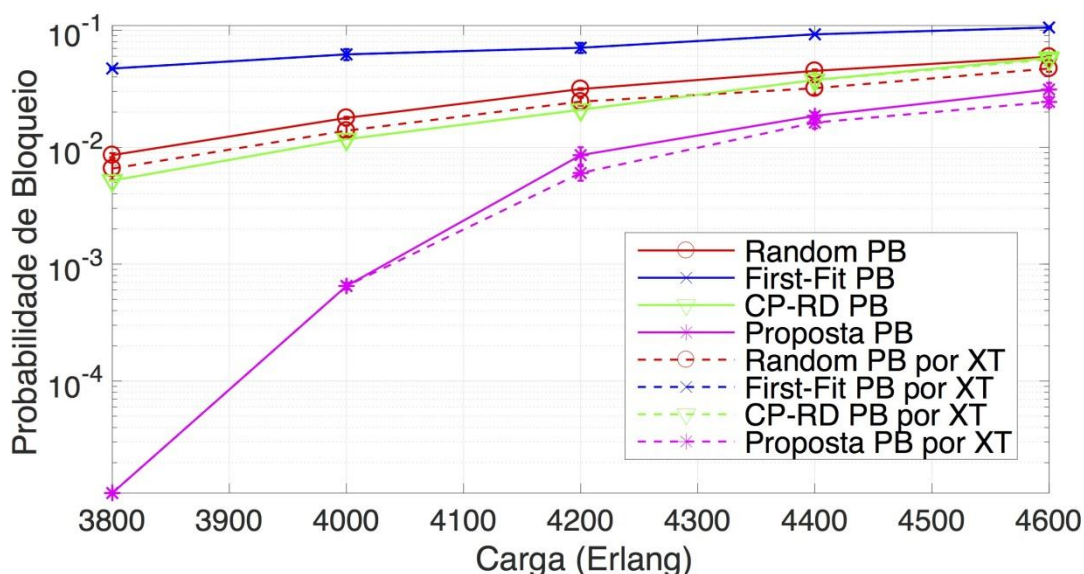
**Ilustração 5. 5- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2.**



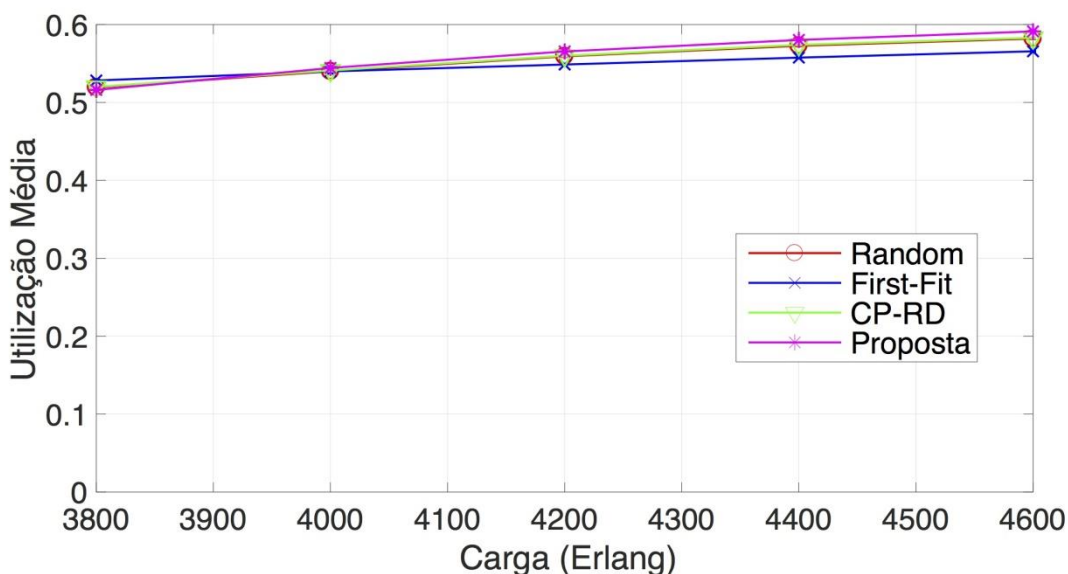
A ilustração 5.6 apresenta a probabilidade de bloqueio total (linha contínua) e a probabilidade de bloqueio por XT (linha tracejada) das estratégias SCA para o cenário 3. Nesse cenário, o impacto da XT na BP é menor devido ao menor coeficiente de acoplamento da MCF. Portanto, cargas mais altas são aceitáveis para níveis semelhantes de PB em comparação ao cenário 1. Apesar da diminuição do impacto da XT e do aumento relativo da fragmentação no espectro neste cenário, a PB para o algoritmo proposto (linha na cor magenta contínua com marcador de asterisco) é menor do que para as outras estratégias de SCA, pois minimiza o impacto da XT (linha na cor magenta tracejada com marcador de asterisco). Os resultados mostram que o algoritmo proposto diminui a PB da rede, em média, sobre todas as cargas testadas, em 70%, 75% e 87% quando comparado com as estratégias CP-RD, RD e FF, respectivamente. Semelhante ao cenário 1, o pior desempenho da estratégia FF é causado pelo impacto da XT devido à alocação nos primeiros *slots* de frequência disponíveis (as linhas azuis PB e PB por XT com marcador cruzado estão sobrepostas). A estratégia RD reduz o bloqueio por XT (linha vermelha tracejada com marcador de círculo) devido à alocação aleatória no espectro e núcleo, mas aumenta o bloqueio por recurso devido à fragmentação no espectro. O desempenho de RD (linha vermelha contínua com marcador circular) é um pouco pior do que o da estratégia CP-RD (as linhas verdes PB e PB por XT com marcador triangular estão sobrepostas), porque a estratégia CP-RD reduz o impacto por XT.

A ilustração 5.7 mostra a utilização da rede das diferentes estratégias de SCA para o cenário 3. Nesse cenário, os valores da NU são maiores do que para os outros cenários, porque o impacto da XT e a fragmentação no espectro são menores. A NU do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador de asterisco) é marginalmente melhor que as estratégias RD (linha vermelha com marcador circular) e CP-RD (linha verde com marcador triangular). Isto é demonstrado, pois a diferença entre a PB das três estratégias é claramente menor que 0.1 tendendo ao um número similar de *slots* alocados, mas com um número maior de conexões alocadas (menor PB) para o algoritmo proposto resultando em uma melhor ocupação espectral. O pior desempenho sobre a NU da estratégia FF (linha azul com marcador cruzado), para cargas de alto tráfego, é causado por XT, pois o impacto da XT aumenta a faixa de espectro nos núcleos impedidos. No entanto, para baixa carga de tráfego, a estratégia FF apresenta a maior NU, pois o impacto da XT na utilização da rede ainda é baixo. Em comparação ao cenário 1, a diferença da NU entre a estratégia FF e as outras estratégias é menor devido ao menor impacto da XT.

**Ilustração 5. 6- Probabilidade de bloqueio das estratégias SCA para o cenário 3.**



**Ilustração 5. 7- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 3.**

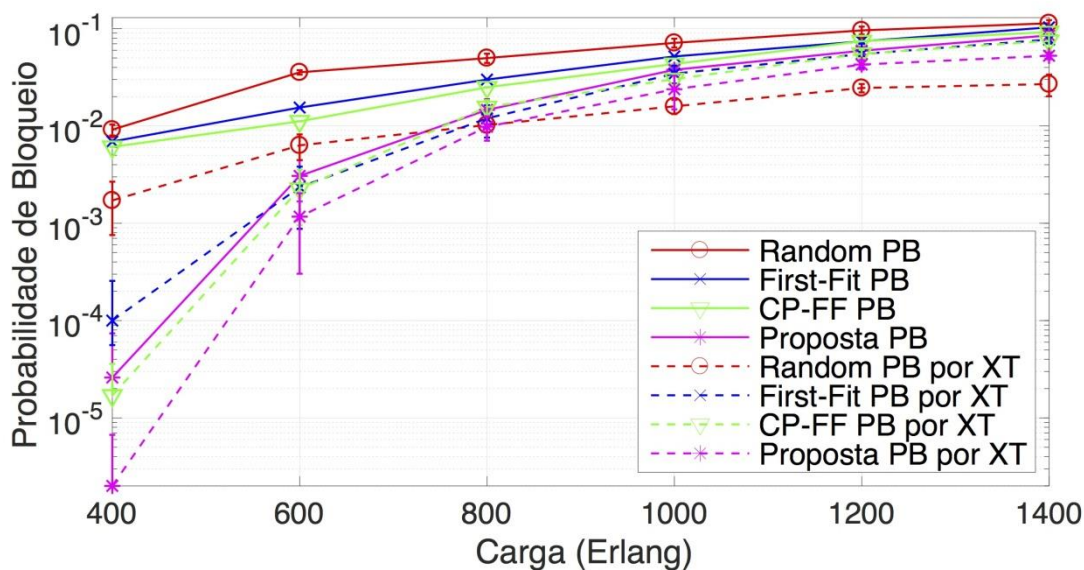


A ilustração 5.8 mostra a probabilidade de bloqueio total (linha contínua) e a probabilidade de bloqueio por XT (linha tracejada) das estratégias SCA para o cenário 4. Neste cenário, a contribuição do bloqueio por recurso aumenta devido a: (i) maior fragmentação no espectro causada por diversas taxas de transmissão, e (ii) a menor penalidade por XT. No entanto, como o bloqueio por XT é a maior contribuição para a PB total do algoritmo proposto, *first-fit* e CP-FF, o impacto da XT ainda é relevante. Portanto, o algoritmo proposto (linha na cor magenta contínua com marcador asterisco) diminui a PB total da rede, em média sobre todas as cargas consideradas, em 42%, 49% e 62% em relação às estratégias CP-FF, FF e RD, respectivamente. Esta menor PB do algoritmo proposto é principalmente devido à minimização do impacto da XT (linha na cor magenta tracejada com marcador de asterisco). Como pode ser visto na ilustração 5.8, para cargas média e alta de tráfego, o bloqueio por XT ainda é a maior contribuição para a PB total do algoritmo proposto. Devido à maior fragmentação no espectro, a estratégia RD (linha vermelha contínua com marcador circular) mostra a maior PB. A PB da estratégia CP-FF (linha verde contínua com marcador triangular) é um pouco melhor do que a PB da estratégia FF (linha azul contínua com marcador cruzado) porque a maior fragmentação no espectro reduz o impacto do bloqueio por XT (ver linha verde tracejada com marcador triangular e linha azul tracejada com marcador cruzado, para as estratégias CP-FF e FF, respectivamente).

A ilustração 5.9 apresenta a NU das estratégias SCA para o cenário 4. Embora a NU neste cenário diminua devido à maior fragmentação no espectro e menor impacto da XT em comparação ao cenário 3, a NU do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador

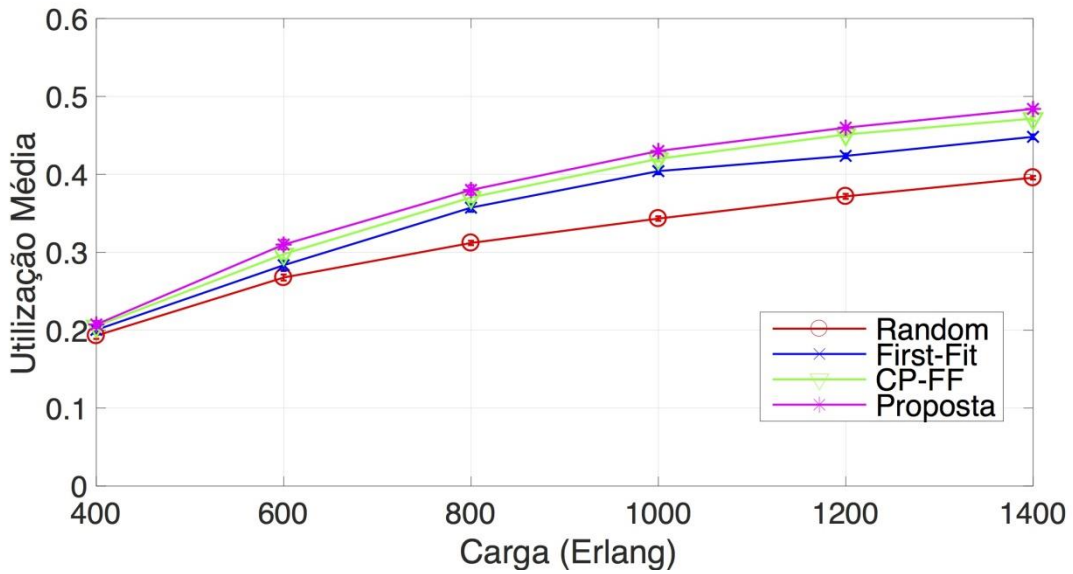
de risco) é maior do que a NU das outras estratégias de SCA porque reduz a faixa de espectro nos núcleos impedidos por XT. O desempenho das outras estratégias (RD, FF e CP-FF) é semelhante ao cenário 2, o pior desempenho é da estratégia de RD (linha vermelha com marcador de círculo) devido à maior fragmentação no espectro. No entanto, a estratégia FF (linha azul com marcador cruzado) diminui a fragmentação no espectro e, assim, aumenta a utilização da rede. Em comparação ao cenário 2, a diferença entre a NU do algoritmo proposto e da estratégia CP-FF (linha verde com marcador triangular) é reduzida devido ao menor impacto da XT. Deve-se ressaltar que, para probabilidades de bloqueio similares e a mesma carga, o cenário 3, com apenas conexões de 112 Gb/s, apresenta a NU inferior ao cenário 4, que tem conexões de 42,8, 112, 224, 448 e 1120 Gb/s. Em outras palavras, para probabilidades de bloqueio semelhantes e uma carga quase três vezes maior no cenário 3, espera-se que a NU no cenário 3 seja inferior a três vezes a NU no cenário 4. Isto pode ser visto nas ilustrações 5.7 e 5.9 para as cargas de 4600 Erlang e 1400 Erlang, respectivamente.

**Ilustração 5. 8- Probabilidade de bloqueio das estratégias SCA para o cenário 4.**





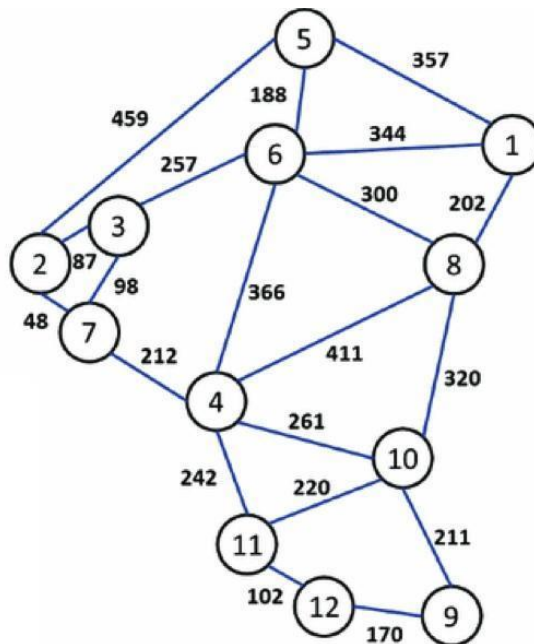
**Ilustração 5. 9- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 4.**



### 5.3. Análise dos Resultados para a Topologia de rede DT-12

Nesta subseção, analisa-se o desempenho da estratégia de IA-SCA proposta e compara-se com a das estratégias FF, RD e CP-FF/RD nos cenários 1 e 2 (ver quadro 5.2) considerando HD-FEC e, posteriormente SD-FEC para supercanais. Considera-se a topologia de rede *National Deutsche Telekom* (DT) (ver il. 5.10). Essa topologia tem 12 nós e 40 enlaces unidirecionais, cujos comprimentos são apresentados (em km) a seguir.

**Ilustração 5. 10- Topologia DT 12-nós.**

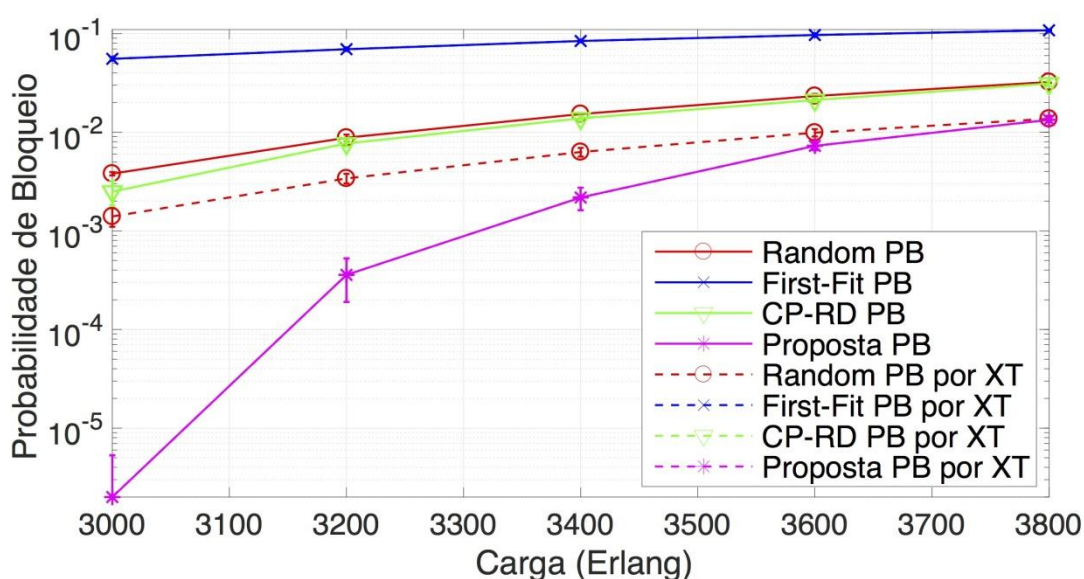


Fonte: Autor

A ilustração 5.11 mostra a probabilidade de bloqueio total (linhas contínuas) e a probabilidade de bloqueio por XT (linhas tracejadas) das estratégias SCA para o cenário 1 considerando HD-FEC. O desempenho do algoritmo proposto (linhas na cor magenta com marcador de asterisco, correspondente ao PB e PB por XT, estão sobrepostas) é melhor que o das outras estratégias SCA porque é selecionado o núcleo e a faixas de espectro disponíveis com o mínimo impacto da XT. Nota-se que o desempenho relativo as diferentes estratégias para a topologia DT é semelhante ao cenário 1 na topologia TESTE, mas com menores PB e PB por XT devido ao aumento de recursos (número total de *slots* da rede). Os resultados mostram que o algoritmo guloso proposto diminui a PB da rede em 80%, 81% e 95%, em média, para todas as cargas testadas, quando comparado com as estratégias CP-RD, RD e FF, respectivamente.

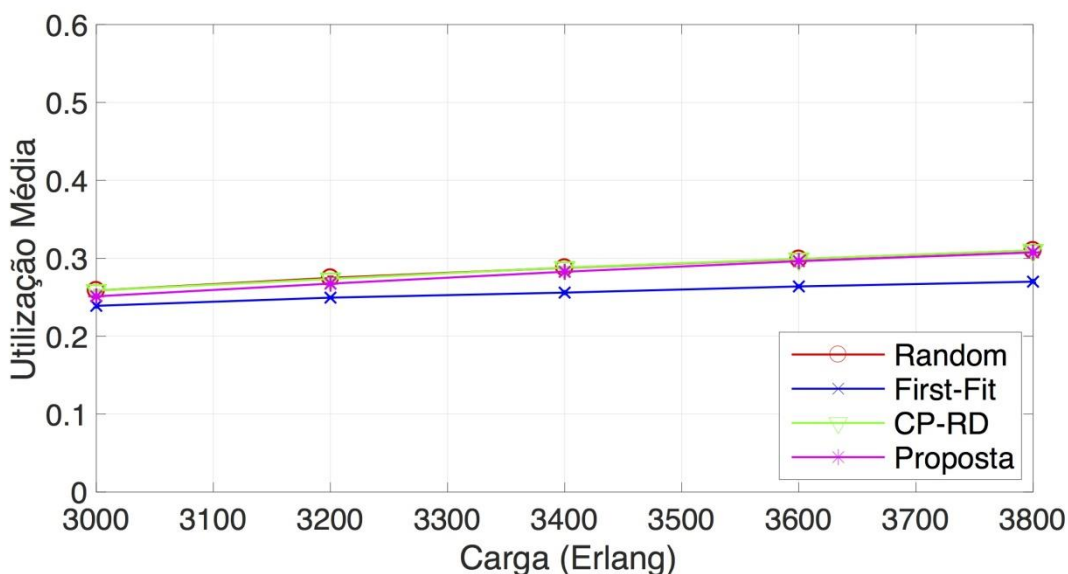
A ilustração 5.12 apresenta a utilização da rede das diferentes estratégias SCA para o cenário 1. Neste cenário, a NU do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador asterisco) é marginalmente menor que as estratégias RD (linha vermelha com marcador circular) e CP-RD (verde linha com marcador de triângulo). A estratégia FF (linha azul com marcador cruzado) tem o pior desempenho com relação a NU devido ao aumento da faixa de espectro nos núcleos impedidos devido ao nível de XT. Observe que os valores de NU, assim como os de PB, são menores em comparação ao cenário 1 para a topologia TEST. Os menores valores de NU são resultado do número total de *slots* da rede DT-12 ser muito maior, apesar do maior número de conexões alocadas.

**Ilustração 5. 11- Probabilidade de bloqueio das estratégias SCA para o cenário 1.**





**Ilustração 5. 12- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 1.**

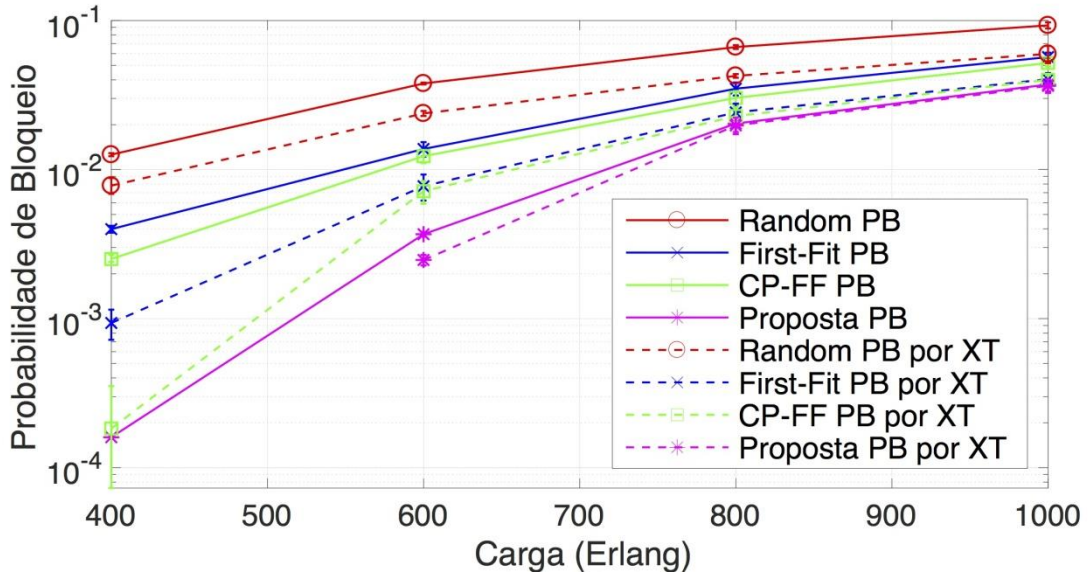


A ilustração 5.13 apresenta a PB total (linhas contínuas) e a probabilidade de bloqueio por XT (linhas tracejadas) das estratégias de SCA avaliadas para o cenário 2 considerando HD-FEC. Semelhante ao cenário 2 para a topologia TESTE, a maior ocupação e fragmentação espectral provoca a diminuição da carga de tráfego necessária para atingir um nível semelhante de PB em comparação ao cenário 1. Apesar da maior fragmentação no espectro, o algoritmo proposto (linha contínua na cor magenta com marcador de asterisco) diminui a PB em 55%, 57% e 80%, em média, ao longo de todas as cargas testadas, quando comparado com as estratégias CP-FF, FF e RD, respectivamente. Este melhor desempenho deve-se principalmente à redução da PB devido à minimização do impacto da XT (ver linha tracejada na cor magenta com marcador de asterisco). Nota-se que o desempenho relativo às estratégias para a topologia DT é semelhante ao cenário 2 da topologia TESTE, mas com menores valores de PB e PB por XT devido a maior quantidade de recursos (*slots* de frequência) desta topologia.

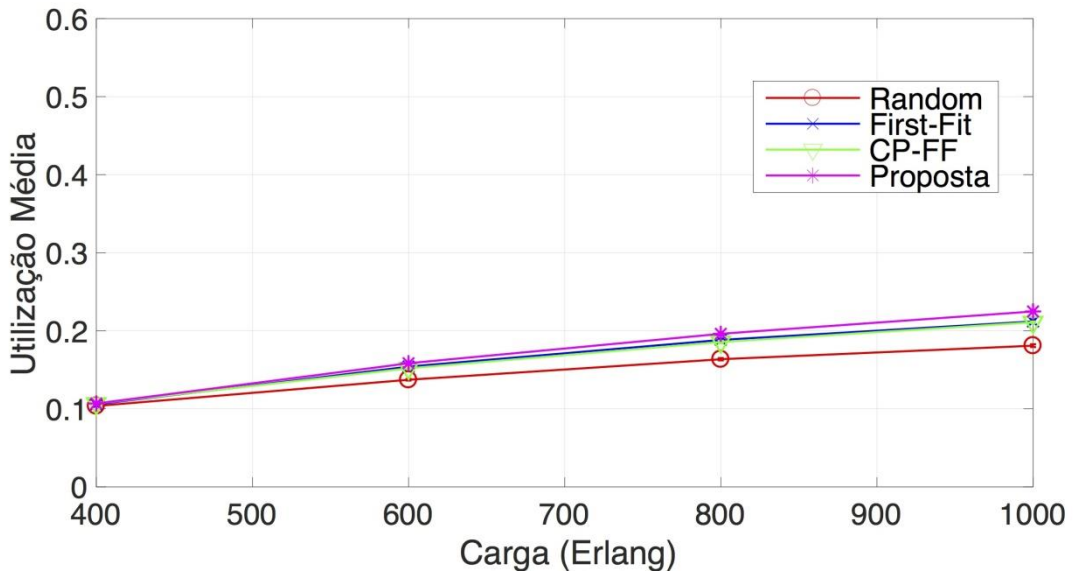
A ilustração 5.14 mostra a utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2. Semelhante ao cenário 2 para a topologia TESTE, a NU é menor para esse cenário do que para o cenário 1 devido ao aumento do número de *slots* impedidos por fragmentação no espectro, nível de OSNR e nível de XT. Além disso, em comparação com a topologia TESTE, a NU diminui ainda mais para a topologia DT, devido ao aumento de recursos. Neste cenário, a NU do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador asterisco) é marginalmente maior que as estratégias FF (linha azul com marcador cruzado) e CP-FF (linha verde com marcador triangular). O pior desempenho com relação a NU da estratégia RD (linha vermelha

com marcador circular) é causado pela maior penalidade por XT e pela fragmentação no espectro.

**Ilustração 5. 13- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para o cenário 2. Como o número de ocorrências (bloqueio por XT) da proposta para a carga de 400 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB por XT da proposta para essa carga não é mostrada no gráfico.**



**Ilustração 5. 14- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2.**



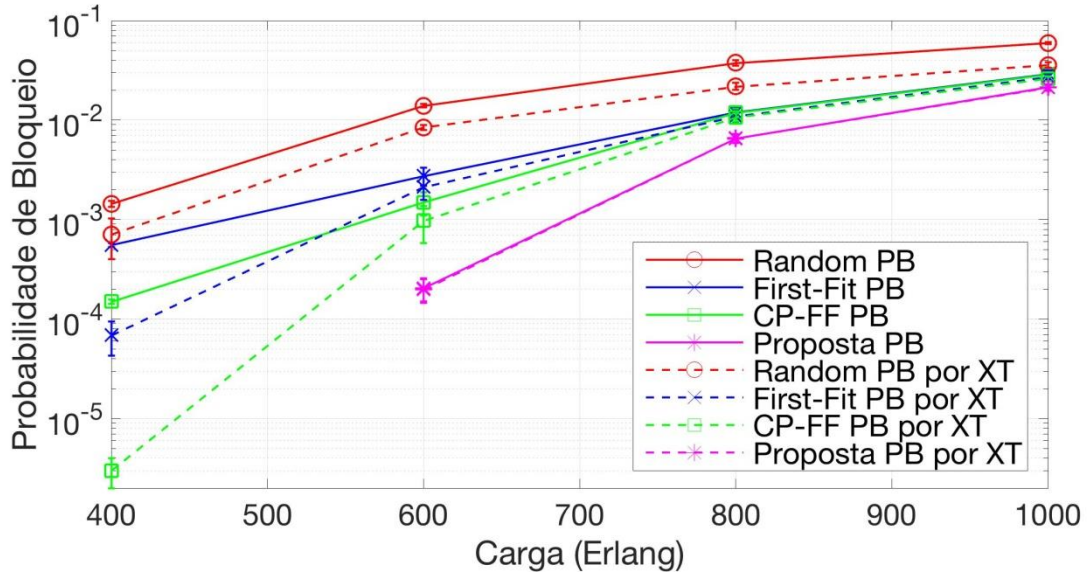
Com relação a topologia DT-12, percebe-se que as rotas fim-a-fim possuem maior comprimento do que as rotas na topologia TESTE. Devido a esse maior comprimento, o

impacto/bloqueio com relação a OSNR e XT aumentam, principalmente, com relação aos supercanais.

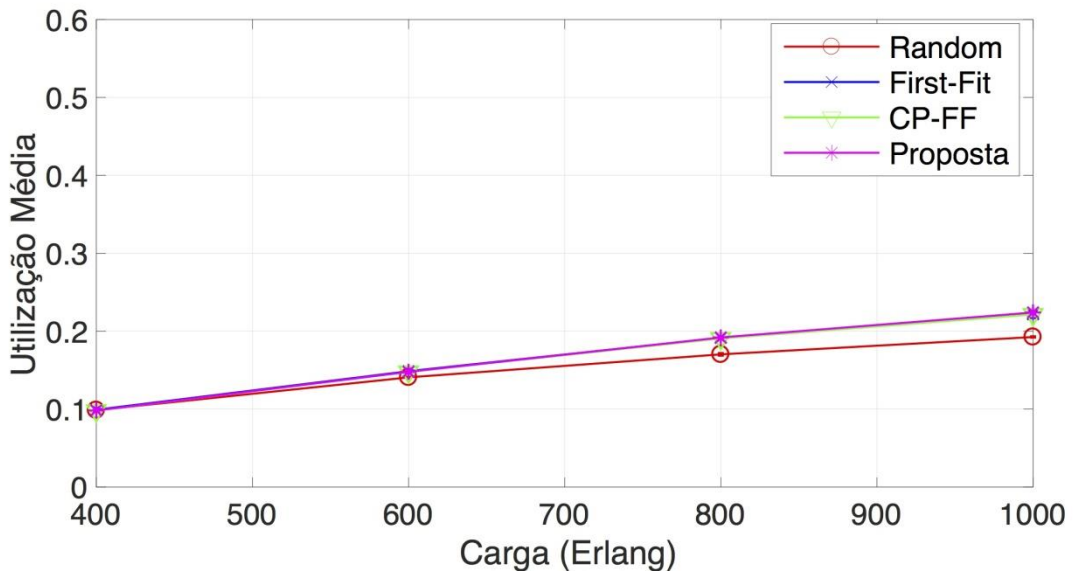
No sentido de reduzir esse impacto, considera-se o SD-FEC somente para os supercanais. A ilustração 5.15 apresenta a PB total (linhas contínuas) e a probabilidade de bloqueio por XT (linhas tracejadas) das estratégias de SCA avaliadas para o cenário 2. Semelhante ao cenário 2 para a HD-FEC, a maior ocupação e fragmentação espectral provoca a diminuição da carga de tráfego necessária para atingir um nível semelhante de PB em comparação ao cenário 1. Apesar da maior fragmentação no espectro, o algoritmo proposto diminui a PB em 66%, 67% e 87%, em média, ao longo de todas as cargas testadas, quando comparado com as estratégias CP-FF, FF e RD, respectivamente. Esse melhor desempenho deve-se principalmente à redução da PB, composta essencialmente pela PB por XT (linha contínua e tracejada na cor magenta com marcador de asterisco sobrepostas), devido a minimização do impacto da XT. Nota-se que o desempenho relativo às estratégias considerando SD-FEC é semelhante ao considerar HD-FEC, porém com menores valores de PB e PB por XT devido ao menor impacto da XT e menor diferença entre as curvas de PB e PB por XT devido a redução do impacto da OSNR.

A ilustração 5.16 mostra a utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2 com SD-FEC. O desempenho da NU relativo às estratégias SCA considerando SD-FEC é semelhante aos resultados para o cenário 2 considerando HD-FEC. Nota-se que não houve mudança significativa no comportamento das curvas, que no caso do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador asterisco) era marginalmente maior que FF (linha azul com marcador cruzado) e CP-FF (linha verde com marcador triangular) considerando HD-FEC e com o SD-FEC estão sobrepostas. O pior desempenho continua a ser da estratégia RD (linha vermelha com marcador circular). Portanto, conclui-se que a utilização do SD-FEC ao invés do HD-FEC não houve alteração significativa em relação a NU.

**Ilustração 5. 15- PB das estratégias de SCA para o cenário 2.** Como o número de ocorrências (bloqueio total e bloqueio por XT) da proposta para a carga de 400 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB e PB por XT da proposta para essa carga não é mostrada no gráfico.



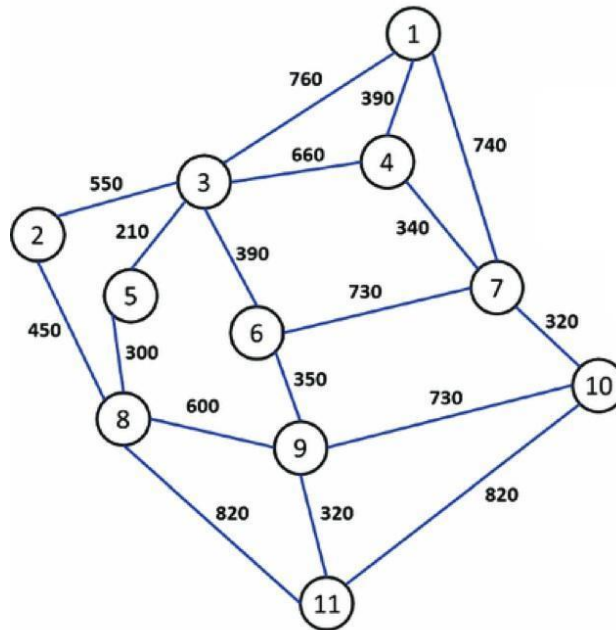
**Ilustração 5. 16- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2.**



## 5.4. Análise dos Resultados para a Topologia EON-11

Nesta subseção, analisa-se o desempenho da estratégia de IA-SCA proposta e compara-se com a das estratégias FF, RD e CP-FF/RD nos cenários 1 e 2 (ver quadro 5.2) considerando HD-FEC e SD-FEC para monoportadora e, posteriormente, SD-FEC para supercanais, para a topologia de rede *European-wide* (EON) (ver fig. 5.17). Essa topologia tem 11 nós e 36 enlaces unidirecionais, cujos comprimentos são apresentados (em km) a seguir.

**Ilustração 5. 17- Topologia EON 11-nós.**



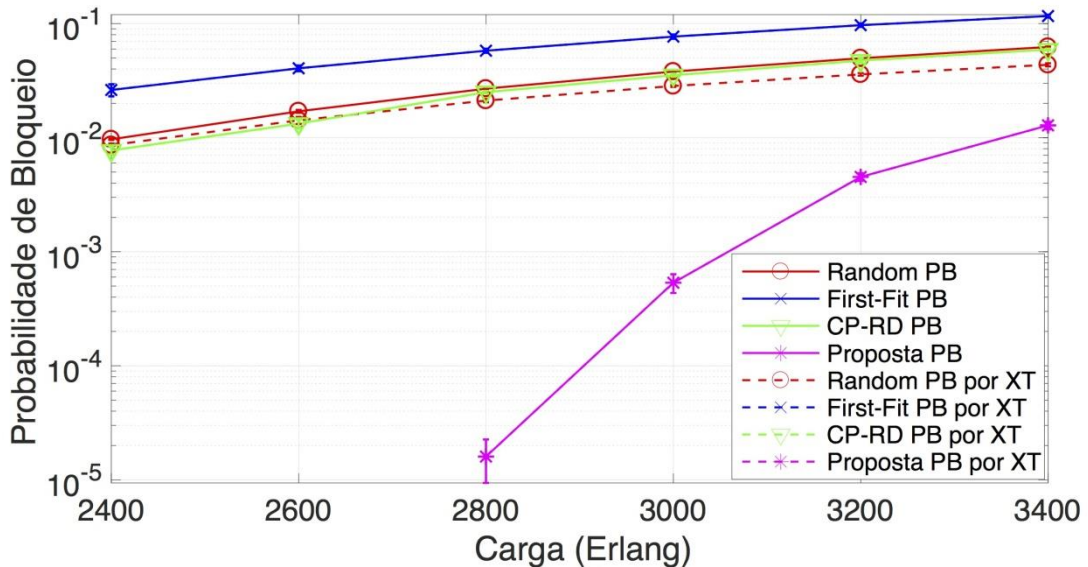
As ilustrações 5.18 e 5.19 mostram a probabilidade de bloqueio total (linhas contínuas) e a probabilidade de bloqueio por XT (linhas tracejadas) das estratégias de SCA para o cenário 1 considerando HD-FEC ou SD-FEC, respectivamente. Devido ao aumento dos comprimentos das rotas em comparação a topologia DT-12, percebe-se um maior impacto da XT nas estratégias. Assim, provocando a diminuição da carga de tráfego necessária para atingir um nível semelhante de PB em comparação ao cenário 1 da topologia DT-12. Por isso, analisa-se também o cenário 1 considerando SD-FEC.

No cenário 1 com HD-FEC (il. 5.18), o desempenho do algoritmo proposto (linhas na cor magenta com marcador de asterisco, correspondente ao PB e PB por XT, estão sobrepostas) é melhor que as demais estratégias de SCA porque seleciona o núcleo e a faixa de espectro disponível com o mínimo impacto da XT. Os resultados mostram que o algoritmo proposto diminui a PB em 94%, 95% e 97%, em média, na faixa de carga considerada quando

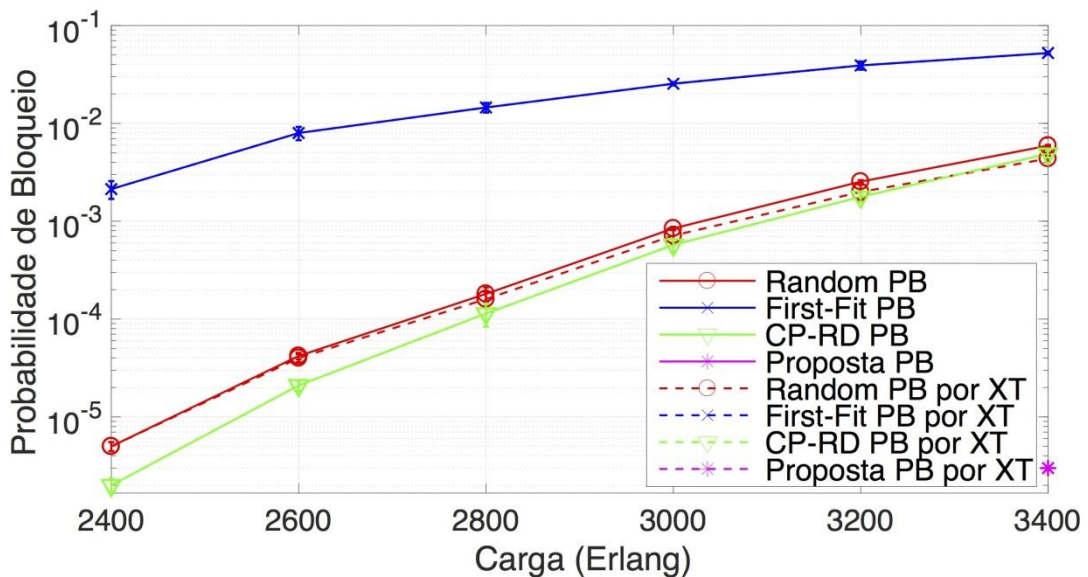
comparado às estratégias CP-RD, RD e FF, respectivamente. No cenário 1 com SD-FEC (il. 5.19), o algoritmo proposto minimiza a PB e o PB por XT próximo de 0, isto é devido ao SD-FEC aumentar os níveis de limite de XT combinado com a redução do impacto da XT conseguida pelo algoritmo proposto. Assim, o algoritmo proposto diminui a PB próximo de 100% em relação às outras estratégias. Para o cenário 1 considerando HD-FEC ou SD-FEC (il. 5.18 e 5.19), a estratégia FF tem o pior desempenho cujo é causado pelo maior bloqueio por XT devido à concentração da alocação nos primeiros *slots* de frequência disponíveis. Observe que PB e PB por XT (linhas azuis com marca cruzada) estão sobrepostas. Em comparação com a estratégia FF, a estratégia RD reduz o bloqueio por XT (marcador vermelho tracejado de círculo), devido à atribuição aleatória de núcleos e *slots* de frequência, mas aumenta o bloqueio por recurso devido à fragmentação no espectro. No cenário 1 com HD-FEC, a PB da estratégia RD (linha vermelha contínua com marcador circular) é marginalmente pior que a da estratégia CP-RD (as linhas verdes com marcador triangular, correspondentes a PB e PB por XT, estão sobrepostas), porque a estratégia RD leva a uma maior fragmentação no espectro e reduz o impacto da XT, como pode ser concluído a partir da comparação das curvas do PB e do PB devido a XT para a estratégia de RD. No cenário 1 com SD-FEC, a PB da estratégia RD (linha vermelha contínua com marcador circular) é um pouco pior que a da estratégia CP-RD (as linhas verdes com marcador triangular, correspondentes a PB e PB por XT, são sobrepostas), porque o uso do SD-FEC reduz o impacto da XT. Observe que o desempenho das estratégias de SCA com o SD-FEC é significativamente melhorado em comparação ao uso de HD-FEC.



**Ilustração 5. 18- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para o cenário 1 com HD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio total e bloqueio por XT) da proposta com HD-FEC para as cargas de 2400 e 2600 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB e PB por XT da proposta para essas cargas não são mostradas no gráfico.**



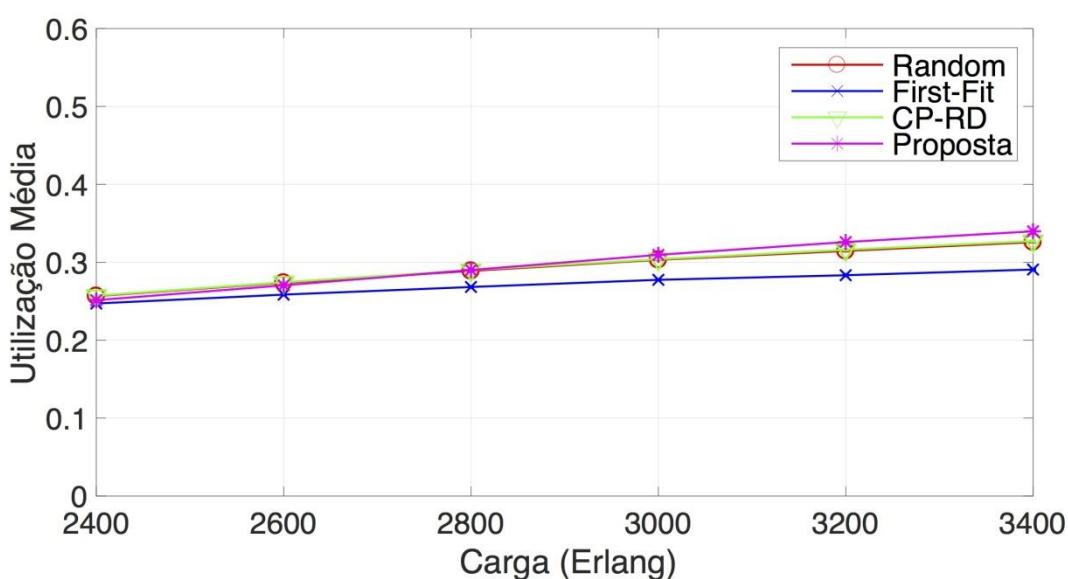
**Ilustração 5. 19- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para o cenário 1 com SD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio total e bloqueio por XT) da proposta com SD-FEC para as cargas na faixa de 2400 a 3200 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB e PB por XT da proposta para essas cargas não são mostradas no gráfico.**



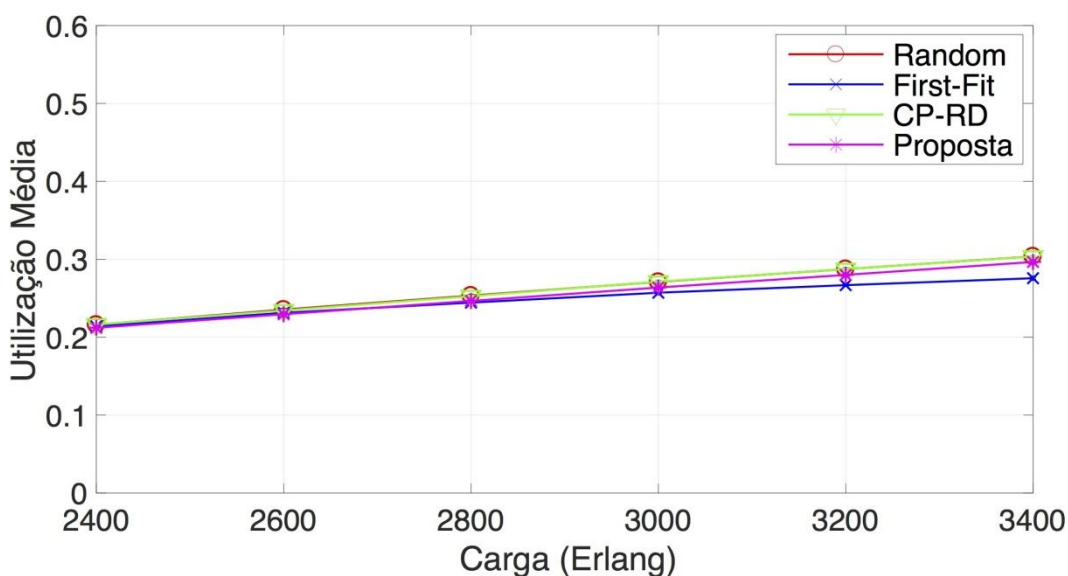
As ilustrações 5.20 e 5.21 apresentam a utilização da rede das diferentes estratégias SCA para o cenário 1 com HD-FEC ou SD-FEC, respectivamente. O desempenho da NU relativo às estratégias SCA considerando HD-FEC e SD-FEC são semelhantes. Nota-se que

não houve mudança significativa no comportamento das curvas, que no caso do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador asterisco) é bem próximo do RD (linha vermelha com marcador circular) e CP-RD (linha verde com marcador triangular) tanto considerando HD-FEC como SD-FEC, pois essa diferença entre as curvas é tão pequena que para algumas cargas as curvas se sobrepõem. O pior desempenho continua a ser da estratégia FF (linha azul com marcador cruzado) devido ao aumento da faixa de espectro nos núcleos impedidos devido ao nível de XT. Portanto, conclui-se que para o cenário 1 utilizar HD-FEC ou SD-FEC em relação a NU não tem alteração significativa para a topologia EON.

**Ilustração 5. 20- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 1 com HD-FEC.**



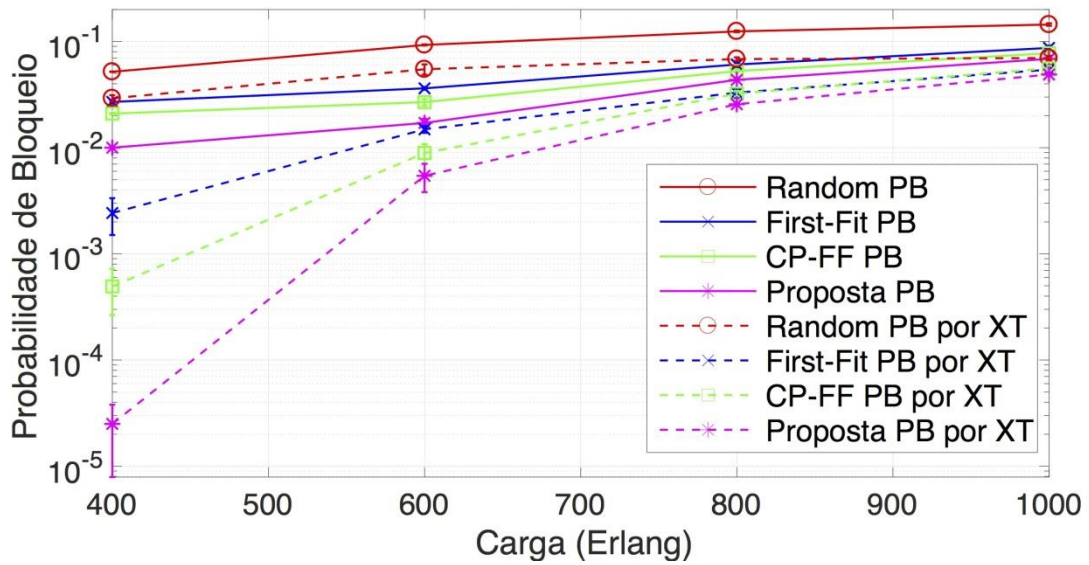
**Ilustração 5. 21 - Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 1 com SD-FEC.**



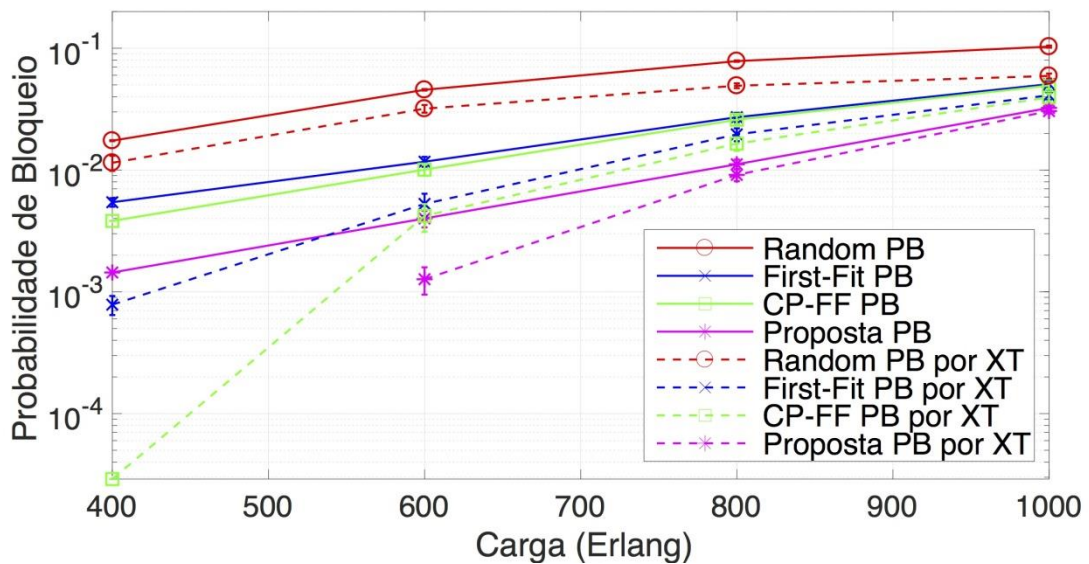


As ilustrações 5.22 e 5.23 apresentam a PB total (linhas contínuas) e a probabilidade de bloqueio por XT (linhas tracejadas) das estratégias de SCA avaliadas para o cenário 2 considerando HD-FEC ou SD-FEC, respectivamente. Semelhante ao cenário 2 para as topologias anteriores, a maior ocupação e fragmentação espectral provoca a diminuição da carga de tráfego necessária para atingir um nível semelhante de PB em comparação aos cenários 1. No cenário 2 com HD-FEC (il. 5.22) e SD-FEC (il. 5.23), apesar da maior fragmentação no espectro, o algoritmo proposto (linha contínua na cor magenta com marcador de asterisco) diminui a PB em 34%, 38% e 69%, considerando HD-FEC, e a PB em 55%, 66% e 85%, considerando SD-FEC, em média, ao longo de todo o cargas testadas, quando comparado com as estratégias CP-FF, FF e RD, respectivamente. Este melhor desempenho deve-se principalmente à redução da PB devido a minimização do impacto da XT (ver linha tracejada na cor magenta com marcador de asterisco). Assim, a PB do algoritmo proposto é principalmente impactada por OSNR e XT. No caso de HD-FEC ou SD-FEC, o pior desempenho da estratégia RD (linha vermelha contínua com marcador circular) é causado, principalmente, pelo impacto da XT (marcador vermelho tracejado de círculo), devido a alocação aleatória de *slots* e núcleos. Além da PB por recursos e OSNR. A probabilidade de bloqueio de CP-FF (linha verde contínua com marcador triangular) é um pouco menor que a da estratégia FF (linha azul contínua com marcador cruzado) porque a fragmentação de maior espectro reduz o impacto do bloqueio por XT (ver linha verde tracejada com marcador triangular e linha azul tracejada com marcador cruzado correspondente à PB devido a XT para CP-FF e FF, respectivamente). Observe que, considerando SD-FEC, as estratégias de SCA mostram menores valores de PB e PB por XT em comparação ao uso de HD FEC. Isto é devido à redução dos limites de OSNR requerida e o aumento dos limites de XT suportado.

**Ilustração 5. 22- PB das estratégias de SCA para o cenário 2 com HD-FEC.**



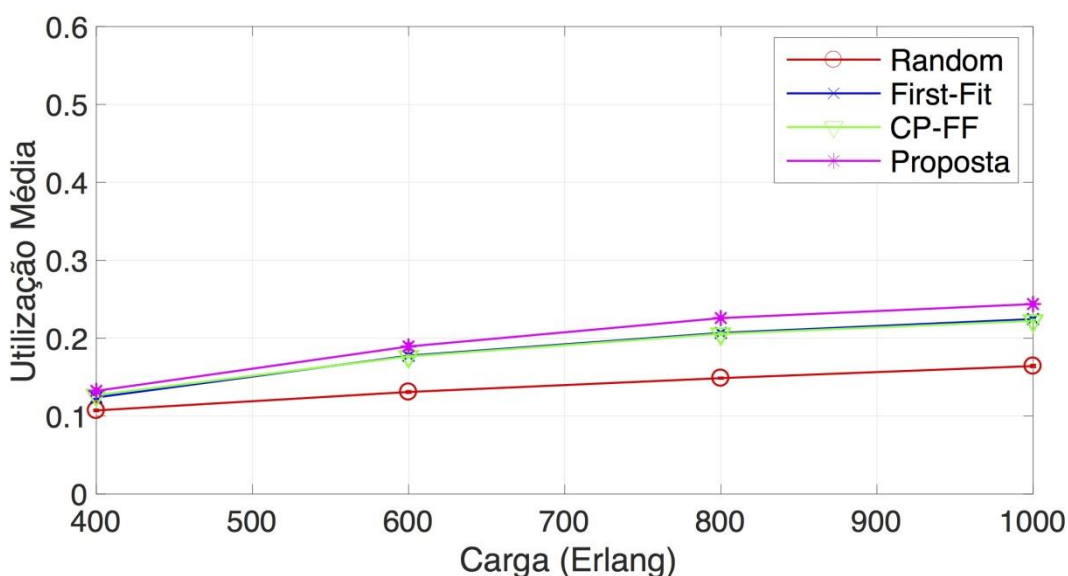
**Ilustração 5. 23- PB das estratégias de SCA para o cenário 2 com SD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio por XT) da proposta com SD-FEC para a carga de 400 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB por XT da proposta para essa carga não é mostrada no gráfico.**



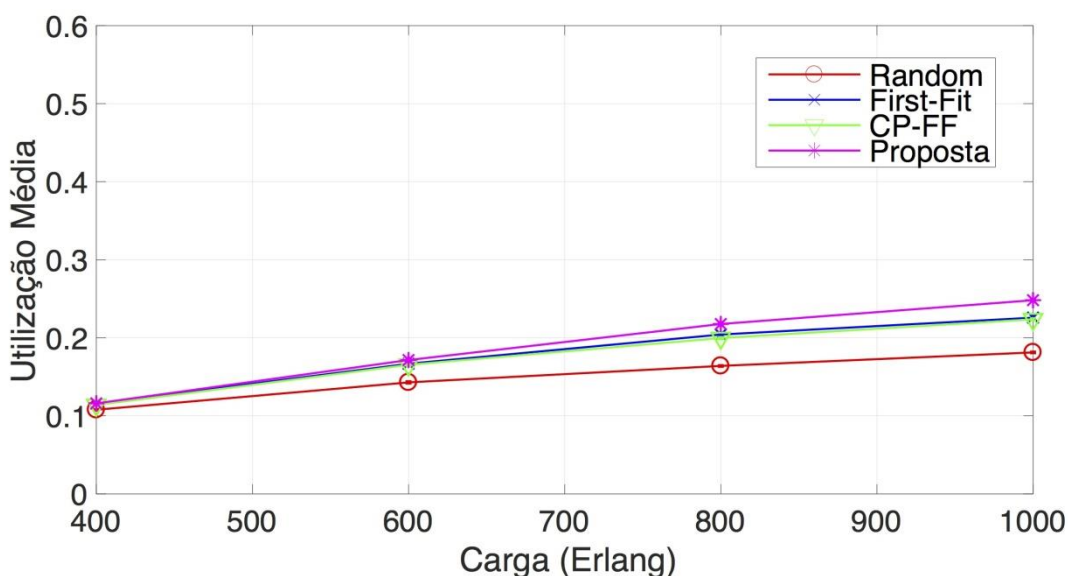
As ilustrações 5.24 e 5.25 apresentam a utilização de rede das estratégias SCA para o cenário 2 considerando HD-FEC e SD-FEC, respectivamente. Semelhante ao cenário 2 para a topologia TESTE e DT, a NU é menor para esse cenário do que para o cenário 1 devido ao aumento do número de *slots* impedidos por fragmentação no espectro, nível de OSNR e nível

de XT. Neste cenário, com os dois FECs (HD e SD) considerados, a NU do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador asterisco) é marginalmente maior que as estratégias FF (linha azul com marcador cruzado) e CP-FF (linha verde com marcador triangular). O pior desempenho com relação a NU da estratégia RD (linha vermelha com marcador circular) é causado pela maior penalidade por XT e pela fragmentação no espectro. Portanto, conclui-se que para o cenário 2 utilizar HD-FEC ou SD-FEC em relação a NU não tem alteração significativa para a topologia EON.

**Ilustração 5. 24- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2 com HD-FEC.**



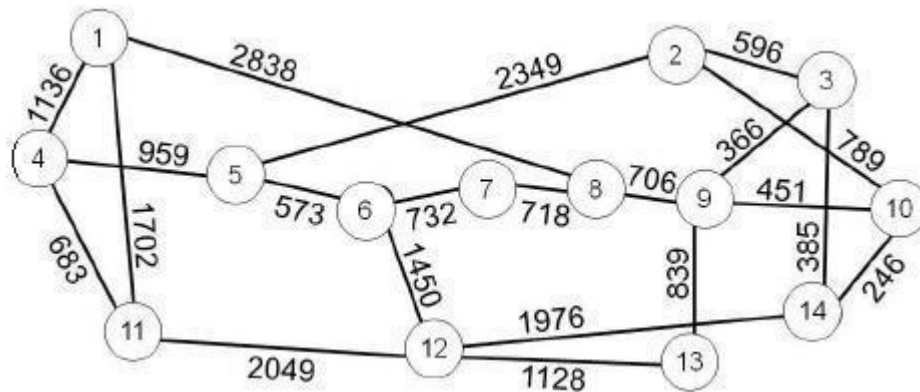
**Ilustração 5. 25- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 2 com SD-FEC.**



## 5.5. Análise dos Resultados para a Topologia de rede NSFNET-14

Nesta subseção, analisa-se o desempenho da estratégia de IA-SCA proposta e compara-se com a das estratégias FF, RD e CP-FF/RD no cenário um (1) (ver quadro 5.2), para a topologia de rede National Science Foundation (NSFNET) (ver il. 5.26). Essa topologia tem 14 nós e 36 enlaces unidirecionais, cujos comprimentos são apresentados (em km) a seguir.

**Ilustração 5. 26- Topologia NSFNET 14-nós.**

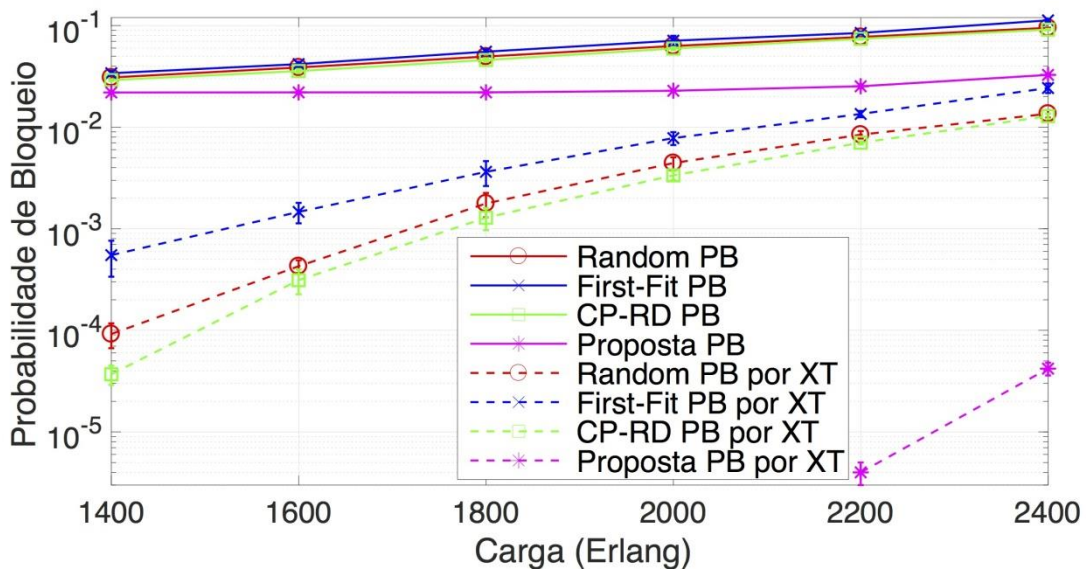


Fonte: Autor.

A ilustração 5.27 apresenta o PB (linha contínua) e o PB por XT (linha tracejada) das estratégias de SCA para o cenário um (1) considerando SD-FEC. Devido o comprimento dos enlaces ser muito longo na topologia NSFNET-14, o uso do HD-FEC para a taxa de 112 Gb/s não é viável porque somente a PB por OSNR excede o limiar da PB (0,1) para cargas muito baixas, portanto é viável somente o uso de SD-FEC apesar ainda do alto bloqueio por OSNR. Assim, a PB para o algoritmo proposto (linha na cor magenta contínua com marcador de asterisco) é um pouco menor que para outras estratégias de SCA, porque a PB para as conexões a 112 Gb/s é causada principalmente pelo bloqueio por OSNR devido ao comprimento dos enlaces ser muito longo. Os resultados mostram que o algoritmo proposto diminui a PB da rede, em média, sobre todas as cargas testadas, em 51%, 54% e 59%, quando comparado com as estratégias CP-RD, RD e FF, respectivamente. A PB do CP-RD (linha verde com marcador triangular) é marginalmente melhor que as estratégias RD (linha vermelha com marcador circular) e FF (linha azul com marcador cruzado). No entanto, o algoritmo proposto minimiza a PB por XT próximo de 0 (linha na cor magenta tracejada com marcador de asterisco). Assim, diminui em cerca de aproximadamente 100% a PB em XT, em média, sobre todas as cargas testadas, quando comparado com todas as estratégias. Para a PB por XT, o pior desempenho da estratégia FF (linha azul tracejada com marcador cruzado) é devido à alocação nos primeiros *slots* de frequência disponíveis. A estratégia de RD reduz o

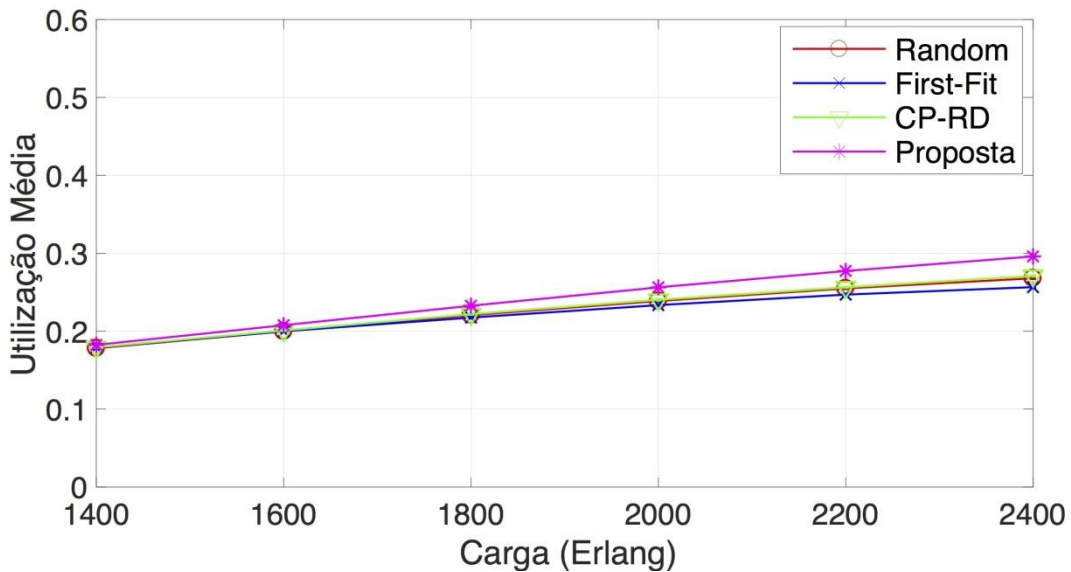
bloqueio por XT (linha vermelha tracejada com marcador circular) devido à alocação arbitrária no espectro, mas aumenta o bloqueio por recurso devido à fragmentação no espectro. O desempenho de RD é um pouco pior do que o da estratégia CP-RD (linha verde tracejada com marcador triangular), porque a estratégia CP-RD reduz o impacto da XT.

**Ilustração 5. 27- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para o cenário 1 com SD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio por XT) do algoritmo proposto para as cargas (1400, 1600, 1800, 2000 Erlang) é muito baixo (sem significância estatística), a PB por XT para estas cargas não é mostrada no gráfico.**



A ilustração 5.28 apresenta a utilização de rede das estratégias SCA para o cenário 1 considerando SD-FEC. Como pode-se ver, a NU do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador asterisco) é maior do que das outras estratégias pois reduz os *slots* impedidos por XT. As estratégias CP-RD (linha verde com marcador triangular) é marginalmente maior que RD (linha vermelha com marcador circular). O pior desempenho com relação a NU da estratégia FF (linha azul com marcador cruzado) é causado pelo número maior de *slots* impedidos por XT. No entanto, percebe-se uma pequena diferença em relação a NU entre as estratégias (CP-RD, RD e FF). Isto é devido pela a alta penalidade por OSNR.

**Ilustração 5. 28- Utilização da rede das estratégias SCA para o cenário 1 com SD-FEC.**

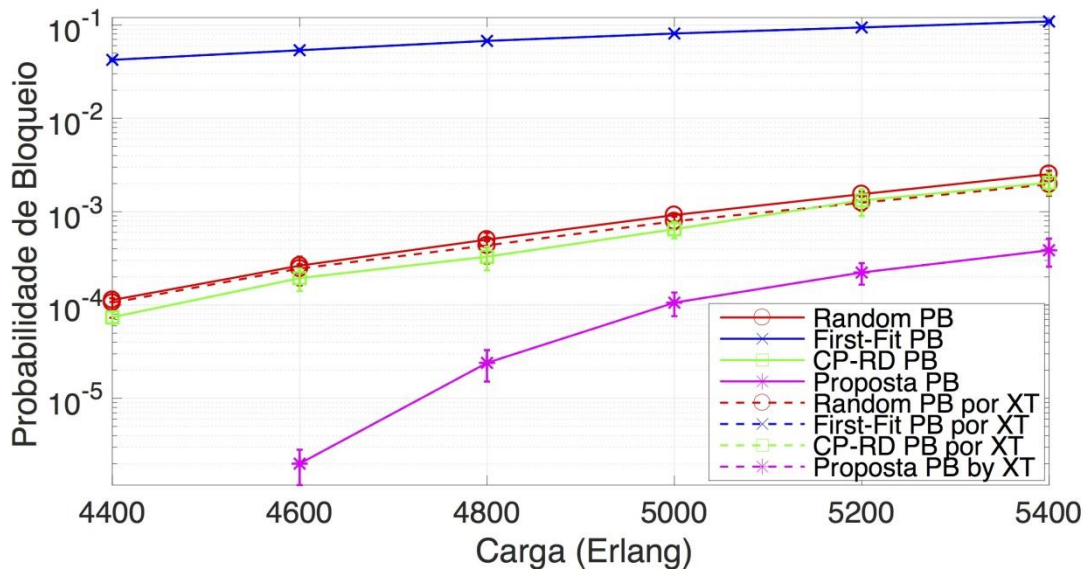


A fim de analisar o desempenho das estratégias de SCA considerando o HD-FEC para a topologia NSFNET-14, considera-se somente a taxa de transmissão a 42.8 Gb/s, pois, assim, pode-se analisar mais isoladamente o impacto da XT. A ilustração 5.29 mostra a PB (linha contínua) e a PB por XT (linha tracejada) das estratégias de SCA para taxas de transmissão a 42.8 Gb/s considerando HD-FEC. O desempenho do algoritmo proposto (linhas na cor magenta com marcador de asterisco, correspondente ao PB e PB por XT, estão sobrepostas) é melhor que as outras estratégias de SCA porque seleciona o núcleo e o espectro disponíveis com o mínimo impacto da XT. Estes resultados mostram que o algoritmo proposto diminui a PB da rede em 88%, 91% e 100% em média ao longo da faixa de carga considerada quando comparada com as estratégias CP-RD, RD e FF, respectivamente. O pior desempenho da estratégia FF é causado pelo maior bloqueio por XT devido à alocação nos primeiros *slots* de frequência disponíveis. Observe que a PB e a PB por XT (linhas azuis com marcador cruzado) estão sobrepostas. Em comparação com a estratégia FF, a estratégia RD reduz o bloqueio por XT (linha vermelha tracejada com marcador circular), devido à atribuição aleatória de núcleos e *slots* de frequência e aumenta o bloqueio por recurso devido à maior fragmentação no espectro, porém a maior contribuição na PB continua a ser por XT. A PB da estratégia RD (linha vermelha contínua com marcador circular) é um pouco pior do que a da estratégia CP-RD (as linhas verdes com marcador triangular, correspondentes a PB e PB por XT, estão sobrepostas), porque a estratégia RD leva a uma maior fragmentação no espectro e impacto da XT, como pode ser concluído a partir da comparação das curvas da PB e da PB devido a XT para a estratégia de RD. Observe que devido a taxa de bits de 42.8 Gb/s não é



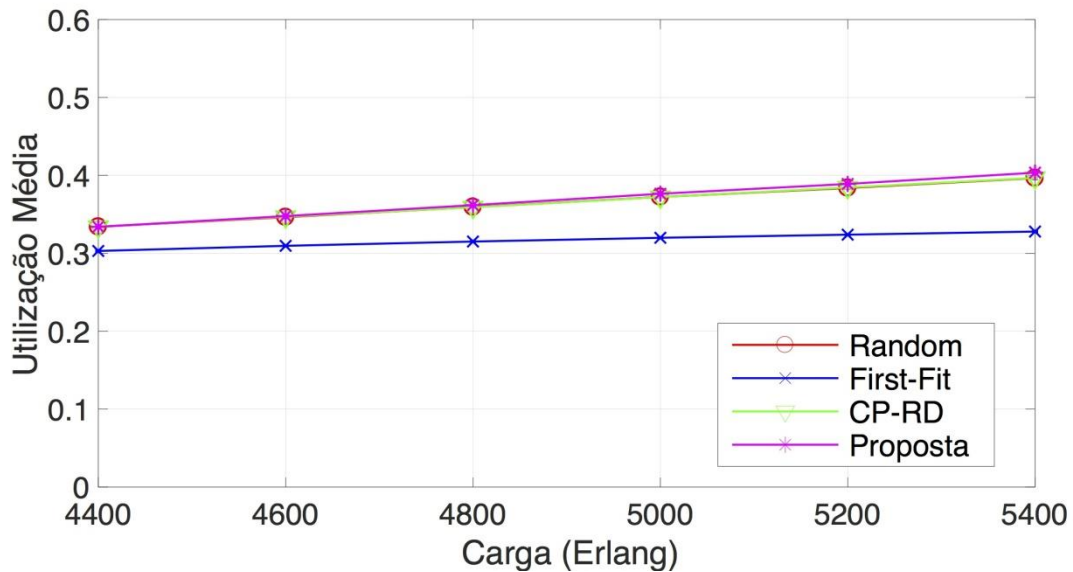
necessário considerar SD-FEC porque o bloqueio por OSNR é muito baixo para o HD-FEC, então a PB é devido, principalmente, pelo bloqueio por XT.

**Ilustração 5. 29-Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para taxa de 42.8 Gb/s considerando HD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio total e bloqueio por XT) do algoritmo proposto para a carga de 4400 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB e PB por XT para essa carga não é mostrada no gráfico.**



A ilustração 5.30 apresenta a utilização de rede das estratégias SCA para taxas de transmissão a 42.8 Gb/s considerando HD-FEC. Como se pode ver, a NU do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador asterisco) é marginalmente maior do que das estratégias CP-RD (linha verde com marcador triangular) e RD (linha vermelha com marcador circular) pois reduz os *slots* impedidos por XT e aloca muito mais conexões (PB menor para a mesma carga). O pior desempenho com relação a NU da estratégia FF (linha azul com marcador cruzado) é causado pelo número maior de *slots* impedidos por XT.

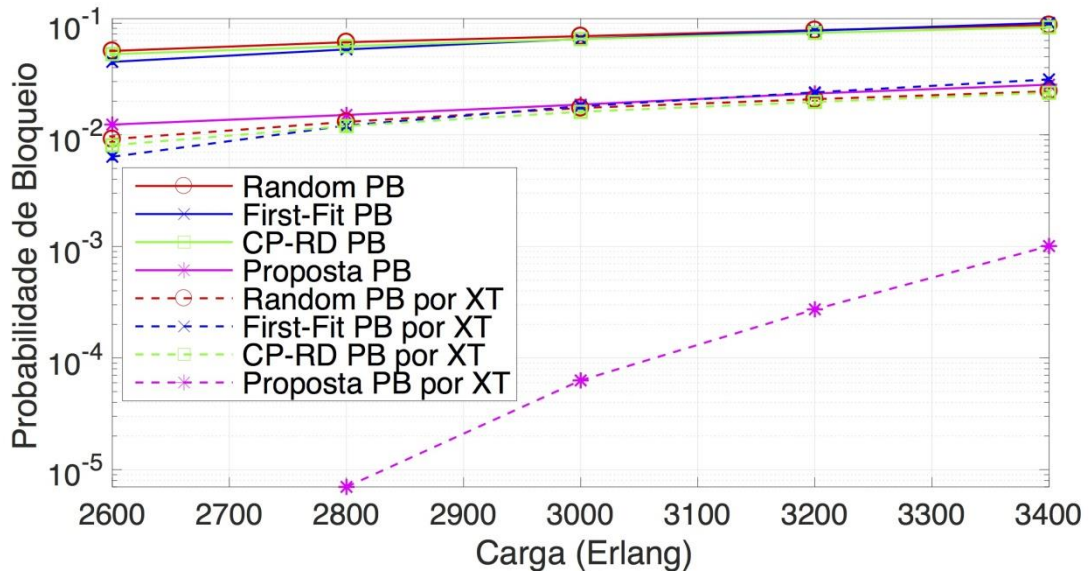
**Ilustração 5. 30- Utilização da rede das estratégias SCA para taxa de 42.8 Gb/s com HD-FEC.**



Para a topologia NSFNET-14, não foram considerados os supercanais (224, 448 e 1024 Gb/s) para a comparação das estratégias analisadas devido a alta PB por OSNR (superior a 0.1) mesmo utilizando SD-FEC. Com o objetivo de analisar um cenário de diversas taxas para a topologia NSFNET, considerou-se as taxas 42.8 e 112 Gb/s considerando SD-FEC. Para este cenário, a ilustração 5.31 apresenta a PB (linha contínua) e a PB pela XT (linha tracejada) das estratégias de SCA. A PB para o algoritmo proposto (linha na cor magenta contínua com marcador de asterisco) não é muito menor do que a das outras estratégias de SCA, porque a PB para as conexões a 112 Gb/s é causada principalmente pelo bloqueio por OSNR devido ao comprimento dos enlaces ser muito longo apesar de considerar conexões de 42.8 Gb/s que reduzem esse impacto. Os resultados mostram que o algoritmo proposto diminui a PB da rede, em média sobre todas as cargas testadas, em 74%, 75% e 73% quando comparado com as estratégias CP-RD, RD e FF, respectivamente. A PB do FF (linhas azuis com marcador cruzado) é marginalmente melhor que CP-RD (linha verde com marcador triangular) e RD (linha vermelha com marcador circular) para cargas baixas e é marginalmente pior para cargas altas. No entanto, o algoritmo proposto diminui significativamente a PB em XT (linha na cor magenta tracejada com marcador de asterisco) em 99% quando comparado com todas as estratégias. Semelhante à PB, a PB por XT da FF (linha azul tracejada com marcador cruzado) é marginalmente melhor que CP-RD (linha verde tracejada com marcador triangular) e RD (linha vermelha tracejada com marcador circular) para cargas baixas e é ligeiramente pior para cargas elevadas.

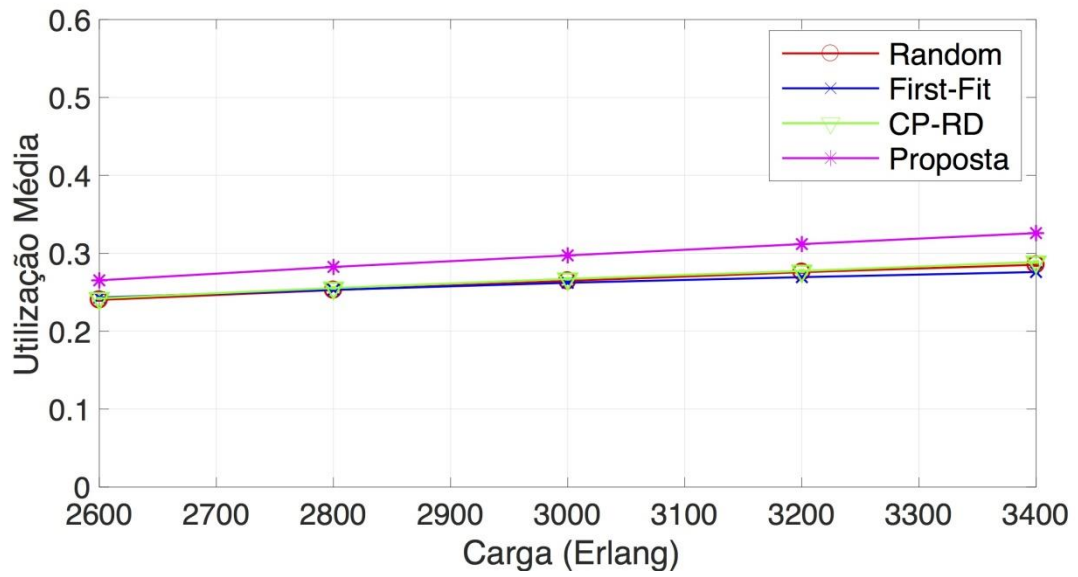


**Ilustração 5. 31- Probabilidade de bloqueio das estratégias de SCA para as taxas de 42.8 e 112 GB/s considerando SD-FEC. Como o número de ocorrências (bloqueio total e bloqueio por XT) do algoritmo proposto para a carga de 2600 Erlang é muito baixo (sem significância estatística), a PB e PB por XT para essa carga não é mostrada no gráfico.**



A ilustração 5.32 apresenta a utilização de rede das estratégias SCA para taxas de transmissão a 42.8 e 112 Gb/s considerando SD-FEC. Como pode-se ver, a NU do algoritmo proposto (linha na cor magenta com marcador asterisco) é maior do que das estratégias pois reduz os *slots* impedidos por XT. O pior desempenho com relação a NU da estratégia FF (linha azul com marcador cruzado) é marginalmente menor do que das estratégias CP-RD (linha verde com marcador triangular) e RD (linha vermelha com marcador circular) causado pelo número maior de *slots* impedidos por XT e OSNR, principalmente, devido a conexões de 112 Gb/s.

**Ilustração 5. 32- Utilização da rede das estratégias SCA para taxa de 42.8 E 112 Gb/s com SD-FEC.**



## CAPÍTULO 6– Conclusão

Neste capítulo será descrito algumas conclusões acerca desta tese. Também são apresentados os desdobramentos.

### 6.1. Considerações da Tese

Neste trabalho foram apresentados diversos estudos relacionados ao processo de roteamento e atribuição de núcleo e espectro, em que foram propostos diferentes algoritmos de RSCA que levem em consideração penalidades impostas pela camada física (IA-RSCA), a fim de garantir a qualidade do sinal óptico à saída da fibra óptica. Porém, nesta tese considerou-se que o processo de roteamento será resolvido pelo algoritmo *K-shortest path*, e desta forma o algoritmo proposto resumiu-se em solucionar o processo de atribuição de núcleo e espectro, o algoritmo de IA-SCA aqui proposto, considera a degradação do sinal óptico gerada pelo efeito da XT.

A metodologia proposta neste trabalho para resolver o problema dinâmico IA-RSCA decompõe o problema em dois subproblemas: 1) subproblema de roteamento e 2) subproblema de atribuição de núcleo e espectro. Como solução para o roteamento utilizou-se um método de pré-computação baseado *K-shortest path* com verificação de limitação de camada física cujo leva em conta a OSNR. Para a solução de IA-SCA foi proposto um algoritmo guloso a fim de minimizar o impacto da XT sobre a MCF-EON. A metodologia proposta é flexível e aberta no sentido de suportar outros algoritmos de roteamento assim como diferentes soluções de IA-SCA. Além de também poder incorporar outros modelos de limitações de camada física.

Os resultados do algoritmo proposto mostraram a melhor solução, em termos de probabilidade de bloqueio total e utilização da rede, dentre os analisados. A partir de cada requisição de conexão uma nova solução de SCA foi criada de maneira dinâmica para uma determinada carga de tráfego na fase de operação de rede de acordo com o estado atual da rede. Em todos os cenários e topologias apresentados no capítulo 5, verificou-se que as soluções geradas pelo algoritmo proposto foram melhores do que as dos algoritmos *first-fit*, *random* e *core prioritization*. No entanto, nos cenários de menor fragmentação, o algoritmo proposto apresentou resultados similares aos outros algoritmos com relação a utilização da rede porém com melhor performance pois aloca mais conexões ocupando faixa espectral semelhante.

Portanto, neste trabalho foi possível demonstrar a aplicabilidade de um algoritmo XT - *aware* para solucionar o problema IA-SCA na fase de operação em uma MCF-EON.

## 6.2. Contribuições e Comprovação da Hipótese

A hipótese desta tese é de que a metodologia proposta seja utilizada no cenário de operação de redes ópticas elásticas multiplexadas por divisão de espaço, e que possa ser usada nos operadores destas redes para a tomada de decisão no que concerne ao roteamento e a atribuição de núcleo e espectro em um determinado cenário de rede, considerando limitações de camada física.

Desta forma, são entendidas como principais contribuições desta tese, as quais comprovam e certificam as premissas da hipótese:

- Concepção de uma metodologia para o provisionamento dinâmico de recursos em MCF-EON considerando limitações de camada física.
- Desenvolvimento de uma solução de roteamento que verifica a OSNR (requerida e a calculada).
- Proposição e inclusão de um índice de sobreposição de *slots* no modelo analítico da potência média da XT, proporcionando uma melhor precisão no impacto da XT entre as conexões em núcleos adjacentes.
- Desenvolvimento de um algoritmo guloso capaz de selecionar o núcleo e faixa de espectro em uma MCF que minimize o impacto da XT global da rede.
- Formulação de uma métrica de decisão, utilizada pelo algoritmo guloso, que considera a XT da conexão interferida e interferentes (média das diferenças entre o limite de diafonia suportado pela conexão e a diafonia recebida pela conexão).
- Desenvolvimento de um simulador de redes ópticas elásticas com suporte à multiplexação por divisão espacial, proporcionando a implementação de soluções algorítmicas para o problema IA-RSCA.
- Realização de simulações em cenários próximos da situação real em termos de parâmetros de camada física, para validação dos preceitos fundamentais da proposta.

Auxiliar os operadores da rede na alocação dos recursos para que possam suportar o comportamento dos serviços que serão oferecidos sobre a infraestrutura de rede existente, evitando/reduzindo assim, possíveis limitações nos mais variados cenários.

### 6.3. Dificuldades Encontradas

Cabe relatar que ao longo do desenvolvimento da tese foram encontradas dificuldades para a realização deste trabalho, as quais serão apresentadas com o objetivo de orientar pesquisadores e estudantes que venham a utilizar os conhecimentos disponíveis neste trabalho.

As dificuldades encontradas foram decorrentes de diversos fatores, entre os quais se destacam:

- A existência de uma grande variedade de penalidades de camada física que degradam o sinal óptico ao longo do caminho de transmissão, como pôde ser observado na literatura. Portanto, foi necessário realizar um levantamento bibliográfico bastante extenso, para que se pudesse embasar de forma satisfatória a proposta.
- Análise da formulação matemática e implementação dos efeitos de camada física considerados nesta tese.
- A pesquisa de diversas soluções para os problemas IA-RWA, IA-RSA e, principalmente, IA-RSCA pela pouca quantidade de soluções existentes durante o desenvolvimento desta tese.
- Análise arquitetural e implementação de um novo simulador de redes ópticas elásticas com suporte a MCF baseado em um DES (*Discrete-Event System*).
- Análise dos parâmetros de camada física, de simulação e das topologias para os cenários de simulação.

### 6.4. Desdobramento e Trabalhos Futuros

A partir das contribuições e dificuldades aqui elencadas e pela própria natureza do processo de construção de um trabalho científico, há sempre margem para desdobramentos dos estudos executados, aprimoramentos e aplicações que transcendem o escopo das investigações realizadas. Por essas razões, alguns temas podem ser apontados como sugestões de trabalhos futuros às pesquisas que fundamentam esta tese, os quais são indicados a seguir:

- Paralelizar o algoritmo guloso a fim de melhorar o desempenho, pois nessa tese a sua execução é sequencial;
- Analisar, implementar e inserir a estrutura de provisionamento em lotes (*Bulk provision*) no simulador a fim de possibilitar a utilização de soluções inteligentes;

- Analisar e implementar diferentes tipos de algoritmos de roteamento como solução para o problema IA-R em MCF-EONs. A fim de comparar o desempenho de algoritmos que utilizem diferentes critérios de seleção de rota, como por exemplo: a carga;
- Analisar e implementar diferentes tipos de algoritmos inteligentes como solução para o problema IA-SCA em MFC-EONs;
- Analisar e implementar os efeitos não lineares relevantes no contexto MCF-EONs;
- Criar e implementar uma métrica capaz de mensurar os *slots* de frequência impedidos de alocar conexões devido a efeitos de camada física;
- Publicação dos resultados inseridos nas seções 5.3, que consideram SD-FEC, e das seções 5.4 e 5.5;
- Publicação dos resultados da análise do impacto da FEC (HD ou SD) em relação à XT e ao desempenho da rede. Estes resultados não estão inseridos nesta tese.

## 6.5. Artigo Completo Aceito para Publicação em Periódico

Fabricio R. L. Lobato, Antonio Jacob, Jhonatan Rodrigues, Adolfo V. T. Cartaxo and J. C. W. A. Costa, “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, April 2019.

## 6.6. Participação em Projetos de Pesquisa

Esta tese foi concebida no âmbito de eixos contemplados nos seguintes projetos de pesquisa:

- Modelagem e desenvolvimento de dispositivos e redes de sensores baseados em fibras ópticas e investigação de tecnologias para redes banda larga baseadas em cobre e fibra óptica. Financiador: MCTI/CNPQ/Universal. Número do projeto: 454.483/2014-2017.
- *Analysis and Mitigation of crosstalk Effects in multi-core fiber-based Networks*. (AMEN). Financiador: FCT (Portugal). UID/EEA/50008/2013.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CISCO 2015 ‘The zettabyte era: Trends and analysis’, white paper. Disponível em: [http://cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/VNI\\_Hyperconnectivity\\_WP.html](http://cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/VNI_Hyperconnectivity_WP.html). Acesso em: 06/2016.
- [2] Agrell, E.; Karlsson, M.; Chraplyvy, AR.; Richardson, D. J.; Krummrich, P. M.; Winzer, P.; Roberts, K.; Fischer, J. K.; Savory, S. J.; Eggleton, B. J.; Secondini, M.; Kschischang, F. R.; Lord, A.; Prat, J.; Tomkos, I.; Bowers, J. E.; Srinivasan, S.; Brandt-Pearce M e Gisin, N., “Roadmap of optical communications”, *Journal of Optics*, vol. 18, no. 6, Maio 2016.
- [3] JINNO, M. *et al.* “Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 66–73, Nov. 2009.
- [4] JINNO, M.; Kozicki, B.; Takara, H.; Watanabe, A.; Sone, Y.; Tanaka, T. e Hirano, A., “Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum sliced elastic optical path network”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 8, pp. 138–145, Agosto. 2010.
- [5] Tomkos, I., Azodolmolky, S., Solé-Pareta, J., Careglio, D., e Palkopoulou, E., “A tutorial on the flexible optical networking paradigm: state-of-the-art, trends, and research challenges”, (invited), *Proc. of the IEEE*, vol. 102, pp. 1317-1337, Set. 2014.
- [6] Gerstel, O. Jinno, M., Lord, A. e Ben Yoo, S. J, “Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, pp. s12–s20, Fev. 2012.
- [7] Napoli, A., Bohn, M., Rafique, D., Stavdas, A, Sambo, N., Poti, L., Nolle, M., Fischer, J. K., Riccardi, E., Pagano, A., Di Giglio, A., Moreolo, M. S., Fabrega, J. M, Hugues-Salas, E., Zervas, G., Simeonidou, D., Layec, P., D’Errico, A., Rahman, T., e Gimenez, J. P. F.-P., “Next generation elastic optical networks: The vision of the european research project IDEALIST”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, pp. 152–162, Fev. 2015.
- [8] Kozicki, B.; Takara, H.; Sone, Y.; Watanabe, A. e Jinno, M., “Distance adaptive spectrum allocation in elastic optical path network (SLICE) with bit per symbol adjustment”, in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, 2010, artigo OMU3, pp.1–3.
- [9] Qian, D.; Huang, M.-F.; Ip, E.; Huang, Y.-K.; Shao, Y.; Hu, J. e Wang, T., “101.7-Tb/s (370x294-Gb/s) PDM-128 QAM-OFDM transmission over 3x55-km SSMF using pilot-based phase noise mitigation”, in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, 2011, artigo PDBP5, pp. 1–3.

- [10] Oliveira, J.; Siqueira, M.; Curiel, G.; Hirata, A.; van't Hooft, F.; Macedo, D.; Colazza, M. e Rothenberg, C., “Experimental test bed of reconfigurable flex grid optical network with virtualized GMPLS control plane and autonomic controls towards SDN”, in International Microwave Optoelectronics Conference (IMOC), 2013, pp. 1–5. DOI: 10.1109/IMOC.2013.6646553.
- [11] ITU-T G.694.1, “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid”, 2012.
- [12] Li, Y.; Zhang, F. e Casellas, R., “Flexible grid label format in wavelength switched optical network”, in IETF RFC Draft, 2012.
- [13] Jinno, M.; Takara, H. e Kozicki, B., “Dynamic optical mesh networks: drivers, challenges, and solutions for the future”, in 35th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2009, artigo 7.7.4, pp. 1–3.
- [14] Wang, Y.; Cao, X. e Hu, Q., “Routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks”, Proc. IEEE ICC, pp. 1–5, June 2011. DOI: 10.1109/icc.2011.5963223.
- [15] Christodoulopoulos, K.; Tomkos, I., e Varvarigos, E.A., “Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation”, Proc. GLOBECOM, pp. 1–6, Dec. 2010. DOI: 10.1109/GLOCOM.2010.5684008.
- [16] Wang, Y.; Cao, X., e Pan, Y., “A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks”, IEEE INFOCOM, pp.1503–1511, 2011.
- [17] Klinkowski M., e Walkowiak, K., “Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network”, IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 8, pp.884-886, 2011.
- [18] Christodoulopoulos, K.; Tomkos, I., e Varvarigos, E.A., “Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks”, Journal of Lightwave Technology, vol.29, no.9, pp.1354–1366, 2011.
- [19] Klinkowski, M.; Walkowiak, K., e Jaworski, M., “Off-line algorithms for routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks”, 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) 2011, Jun. 2011, artigo We.C3.2.
- [20] E. Palkopoulou, G. Bosco, A. Carena, D. Klonidis, P. Poggiolini, and I. Tomkos, “Nyquist-WDM-based flexible optical networks: Exploring physical layer design parameters,” J. Lightw. Technol., vol. 31, no. 14, pp. 2332–2339, Jul. 2013.
- [21] Essiambre, R.; Kramer, G.; Winzer, P.; Foschini, G., e Goebel, B., “Capacity limits of optical fiber networks”, Journal of Lightwave Technology, vol. 28, no. 4, pp. 662–701, 2010.



- [22] Essiambre, R., e Tkach, R., “Capacity trends and limits of optical communication networks”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 5, pp. 1035–1055, 2012.
- [23] Proietti, R., et al., “3D elastic optical networking in the temporal, spectral, and spatial domains,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 2, pp. 79–87, Fev. 2015.
- [24] Mizuno, T., Takara, H., Shibahara, K., Sano, A., e Miyamoto, Y., “Dense space division multiplexed transmission over multicore and multimode fiber for long-haul transport systems”, *J. Lightwave Technol.*, vol 34, no. 6, pp. 1484–1493, 2016.
- [25] Morioka, T., “New generation optical infrastructure technologies: “exascale initiative” towards 2020 and beyond”, in: 2009 14th OptoElectronics and Communications Conference, pp. 1–2. 2009, doi:10.1109/OECC.2009.5213198.
- [26] Takara, H. e Sano, A., “1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency”, in 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), 2012, artigo Th.3.C.1.
- [27] Igarashi, K., Tsuritani, T., Morita, I., Tsuchida, Y., Maeda, K., Tadakuma, M., Saito, T., Watanabe, K., Imamura, K., Sugizaki, R., e Suzuki, M., “Super-Nyquist-WDM transmission over 7,326-km seven-core fiber with capacity distance product of 1.03 Exabit/s · km”, *Opt. Express.*, vol.22, no.2, pp. 1220–1228. 2014.
- [28] Muhammad, A., Zervas, G., Simeonidou, D., e Forchheimer, R., “Routing, Spectrum and Core Allocation in Flexgrid SDM Networks with Multi-core Fibers”, in 18th International Conference on Optical Networking Design and Modeling (ONDM), pp. 192-197, 2014. INSPEC Accession Number: 14451993.
- [29] Azodolmolky, S., Klinkowski, M., Marin, Eva., Careglio, D., Pareta, J. S., e Tomkos, I., “A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks”, *Elsevier Comput. Netw.*, vol. 53, no. 7, pp. 926–944, Maio 2009.
- [30] Yurong, H., Heritage, J.P., e Mukherjee, B., “Connection provisioning with transmission impairment consideration in optical WDM networks with high-speed channels”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no.3, pp. 982–99. 2005.
- [31] Zhao, J., et al. “A novel partition-plane impairment aware routing and spectrum assignment algorithm in mixed line rates elastic optical networks”, *Photon Netw Commun* (2016). doi:10.1007/s11107-015-0601-4.
- [32] Gao, G., Zhang, J., Wang, L., Gu, W., e Ji, Y. “Influence of physical layer configuration on performance of elastic optical OFDM networks”. *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no.4, pp. 672-675. Abril 2014.

- [33] Takenaga, K., Arakawa, Y., Tanigawa, S., Guan, N., Matsuo, S., Saitoh, K., e Koshiha, M., “An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction”, *IEICE Trans. Commun. E* 94-B, 409–416. 2011.
- [34] Koshiha, M., Saitoh, K., Takenaga, K., e Matsuo, S., “Analytical expression of average power-coupling coefficients for estimating intercore crosstalk in multicore fibers,” *IEEE Photon. J.* 4(5), 1987–1995. 2012.
- [35] Luís, R. S., et al., “Time and modulation frequency dependence of crosstalk in homogeneous multi-core fibers,” *IEEE J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 2, pp. 441–447, Jan. 2016.
- [36] Cartaxo, A. V. T., Luís, R. S., Puttnam, B. J. T., Hayashi, Awaji, Y., Wada, N., “Dispersion impact on the crosstalk amplitude response of homogeneous multi-core fibers,” *IEEE Photonics Technology Letters.*, vol. 28, no. 17, pp. 1858–1861. 2016. doi:10.1109/LPT.2016.2573925.
- [37] Alves, T. M. F., Cartaxo, A. V. T., Luís, R. S., Puttnam, B. J. T., Hayashi, Awaji, Y., Wada, N., “Intercore crosstalk in direct-detection homogeneous multicore fiber systems impaired by laser phase noise”, *Opt. Express.*, vol. 25, no. 23, pp. 29417–29431, 2017. doi:10.1364/OE.25.029417.
- [38] Alves, T. M. F., Cartaxo, A. V. T., “Intercore crosstalk in homogeneous multicore fibers: Theoretical characterization of stochastic time evolution”, *Journal of Lightwave Technology.*, vol. 35, n. 21, pp. 4613– 4623, 2017. doi:10.1109/JLT.2017.2754218.
- [39] Alves, T. M. F., Cartaxo, A. V. T., “Characterization of the stochastic time evolution of short-term average intercore crosstalk in multicore fibers with multiple interfering cores”, *Opt. Express.*, vol. 26, n. 4, pp. 4605–4620, 2018. doi:10.1364/OE.26.004605.
- [40] Cartaxo, A. V. T., Alves, T. M. F., “Discrete changes model of inter-core crosstalk of real homogeneous multi-core fibers”, *Journal of Lightwave Technology.* vol. 35, n. 12. pp. 2398–2408. 2017. doi:10.1109/JLT.2017.2652067.
- [41] Soeiro, R. O. J., Alves, T. M. F., Cartaxo, A. V. T., “Dual polarization discrete changes model of inter-core crosstalk in multi-core fibers”, *IEEE Photonics Technology Letters.* vol. 29, n. 16. pp. 1395–1398, 2017. doi:10.1109/LPT.2017.2723662.
- [42] Hayashi, T., Taru, T., Shimakawa, O., Sasaki, T., e Sasaoka, E., “Low crosstalk and low-loss multi-core fiber utilizing fiber bend”, in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, 2011, artigo OWJ3, pp. 1–3.

- [43] Hayashi, T., Taru, T., Shimakawa, O., Sasaki, T., e Sasaoka, E., “Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi core fiber,” *Optics Express*, vol. 19, no. 17, pp. 16 576–16 592, Agosto 2011.
- [44] Imamura, K.; Mukasa, K., e Yagi, T., “Investigation on multi-core fibers with large Aeff and low micro bending loss”, in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, Vol. 19, No. 11, pp.1–3, 2010.
- [45] Liu, X., et al, “1.12-Tb/s 32-QAM-OFDM superchannel with 8.6-b/s/Hz intrachannel spectral efficiency and space-division multiplexed transmission with 60-b/s/Hz aggregate spectral efficiency,” *Opt. Exp.*, vol. 19, pp. B958–B964, 2011.
- [46] Igarashi, K., Tsuritani, T., Morita, I., e Suzuki, M., “Ultra-long-haul high capacity super-Nyquist-WDM transmission experiment using multi-core fibers,” *IEEE J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 5, pp. 1027–1036, Mar. 2015.
- [47] Puttnam, B. J., et al. “Impact of Inter-Core Crosstalk on the Transmission Distance of QAM Formats in Multi-Core Fibers,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, no. 2, 2016.
- [48] Winzer, P. J., et al., “Penalties from in-band crosstalk for advanced optical modulation formats,” in *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.*, Geneva, Switzerland, Paper Tu.5.B.7. 2011.
- [49] Hayashi, T., Takashi, S., e Sasaoka, E., “Behavior of inter-core crosstalk as a noise and its effect on Q-factor in multi-core fiber”, *IEICE Trans. Commun.*, vol. E97-B, no. 5, pp. 936–944, 2014.
- [50] Tode, H., e Hirota, Y., “Routing, Spectrum and Core Assignment for Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks”, in *16th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks)*, pp. 1-7, 2014, DOI: 10.1109/NETWKS.2014.6958538.
- [51] Puttnam, B. J., et al., “2.15 pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb”, in: *2015 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, pp. 1–3, 2015. doi:10.1109/ECOC.2015.7341685.
- [52] Hayashi, T., Taru, T., Shimakawa e Sasaki, O. T., Sasaoka, E., “Characterization of crosstalk in ultra-low-crosstalk multi-core fiber”, *Journal of Lightwave Technology* vol. 30 no. 4, pp. 583–589, 2012. doi:10.1109/JLT.2011.2177810.
- [53] Tu, J., Saitoh, K., Koshiba, M., Takenaga, K. e Matsuo, S. “Design and analysis of large-effective-area heterogeneous trench-assisted multi-core fiber ”, *Opt. Express* vol. 20 no. 14, pp. 15157–15170, 2012. doi:10.1364/OE.20.015157.

- [54] Sano, A., et al., “Crosstalk-managed high capacity long haul multicore fiber transmission with propagation-direction interleaving”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 16, pp. 2771–2779, 2014. doi:10.1109/JLT.2014.2320826.
- [55] Takenaga, K., et al., “Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber”, in: *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pp. 1–3, 2011.
- [56] Perelló, J., et al., “Flex-grid /SDM backbone network design with inter-core XT-limited transmission reach”, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 8, pp. 540–552, 2016. doi:10.1364/JOCN.8.000540.
- [57] Góscień, R., Natalino, C., Wosinska, L., e Furdek, M., “Impact of high-power jamming attacks on SDM networks”, in: *2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pp. 77–81, 2018. doi:10.23919/ONDM.2018.8396110.
- [58] Muhammad, A., Zervas, G., e Forchheimer, R., “Resource allocation for space-division multiplexing: Optical white box versus optical black box networking”, *J. Lightwave Technol.* vol. 33, no. 23, pp. 4928–4941, 2015.
- [59] Klinkowski, M., Lechowicz, P., Walkowiak, K., “A study on the impact of inter-core crosstalk on SDM network performance”, in: *2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2018, pp. 404–408. doi:10.1109/ICCNC.2018.8390393.
- [60] Nakajima, K., Sillard, P., Richardson, D., Li, M., Essiambre, R. e Matsuo, S., “Transmission media for an SDM based optical communication system”, *IEEE Communications Magazine*. vol. 53, no. 2, pp. 44–51, 2015. doi:10.1109/MCOM.2015.7045390.
- [61] 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*. vol. 10, no. 3, pp. 195–208, 2018. doi:10.1364/JOCN.10.000195.
- [62] Fujii, S., Hirota, Y., Tode, H., e Murakami, K., “On-demand spectrum and core allocation for multi-core fibers in elastic optical network, in: *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, 2013, pp. 1–3. doi:10.1364/OFC.2013.OTh4B.4.
- [63] Fujii, S., Hirota, Y., Tode, H., e Murakami, K., “On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks,” *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 6, no. 12, pp. 1059-1071, 2014.

- [64] 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*. vol. 9, no. 1, A99–A113, 2017. doi:10.1364/JOCN.9.000A99.
- [65] Lechowicz, P., Walkowiak, K., Klinkowski, M., “Selection of spectral-spatial channels in SDM flexgrid optical networks”, in: *2017 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, pp. 1–6, 2017. doi:10.23919/ONDM.2017.7958542.
- [66] Agrawal, G. P., *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed., Eds. Harcourt Place, 32 Jamestown Road, London NW1 7BY, UK: Academic Press, 2001.
- [67] Agrawal, G. P., *Fiber-Optic Communication Systems*, 4th ed., K. CHANG, Ed. Hoboken, New Jersey, USA.: John Wiley & Sons, 2010.
- [68] Fortes, D. N. L., *Estudo de Sistemas WDM Incluindo Compensação de Dispersão*, Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.
- [69] Taylor, M. G., “Coherent Detection Method Using DSP for Demodulation of Signal and Subsequent Equalization of Propagation Impairments”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No. 2, Feb. 2004, pp. 674–676. [doi: 10.1109/LPT.2003.823106].
- [70] Savory, S. J., “Digital Coherent Optical Receivers: Algorithms and Subsystems”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 16, No. 5, Sep. 2010, pp. 1164–1179. [doi: 10.1109/JSTQE.2010.2044751].
- [71] Becker, P. C., Olsson, N. A., e Simpson, J. R., *Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Fundamentals and Technology*, New York: Academic, 1999.
- [72] Desurvire, E., Bayart, D., Desthieux, B., Bigo, S., *Erbium-doped fiber amplifiers and device and system developments*, Wiley, 2002.
- [73] Keiser, G., *Optical fiber communications*, 3a ed. McGraw Hill International Editions, 2000.
- [74] Alwayn, V., *Optical network design and implementation*, CCIE No 2995. Cisco Press, 2004.
- [75] Ma, Y., Yang, Q., Tang, Y., Chen, S., e Shieh, W., “1-Tb/s per channel coherent optical OFDM transmission with subwavelength bandwidth access”, in *Proc. OFC 2009*, Mar. 22–26, 2009, paper PDPC1.
- [76] Dischler, R., e Buchali, F., “Transmission of 1.2 Tb/s continuous waveband PDM OFDM-FDM signal with spectral efficiency of 3.3 bit/s/Hz over 400 km of SSMF,” in *Proc. OFC 2009*, Mar. 22–26, 2009, Paper PDPC2.

- [77] Chandrasekhar, S., Liu, X., Zhu, B., e Peckham, D. W., “Transmission of a 1.2-Tb/s 24-carrier no-guard-interval coherent OFDM superchannel over 7200-km of ultra-large-area fiber”, in Proc. ECOC 2009, Vienna, Sep. 20–24, 2009, Paper PD2.6.
- [78] Gavioli, G., et al., “Investigation of the impact of ultra-narrow carrier spacing on the transmission of a 10-carrier 1 Tb/s superchannel,” in Proc. OFC 2010, Mar. 21–25, 2010, Paper OThD3.
- [79] Torrenco, E., et al., “Transoceanic PM-QPSK Terabit superchannel transmission experiments at baud-rate subcarrier spacing,” in Proc. ECOC 2010, Sep. 19–23, 2010, Paper We.7.C.2.
- [80] Cai, J.-X., et al., “Transmission of 96 100 G pre-filtered PDM-RZQPSK channels with 300% spectral efficiency over 10 608 km and 400% spectral efficiency over 4 368 km,” in Proc. OFC 2010, Mar. 21–25, 2010, Post-deadline paper PDPB10.
- [81] Zhu, B., Liu, X., Chandrasekhar, S., Peckham, D. W., e Lingle, Jr., R., “Ultra-long-haul transmission of 1.2-Tb/s multicarrier no-guardinterval CO-OFDM superchannel using ultra large-area fiber,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 826–828, Jun. 2010.
- [82] Chandrasekhar, S., e Liu, X., “Experimental investigation on the performance of closely spaced multi-carrier PDM-QPSK with digital coherent detection,” *Opt. Exp.*, vol. 17, no. 24, pp. 21350–21361, 2009.
- [83] Bosco, G., Carena, A., Curri, V., Poggiolini, P., e Forghieri, F., “Performance limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in high-speed PM-QPSK systems”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 1129–1131, Aug. 2010.
- [84] Bosco, G., Curri, V., Carena, A., Poggiolini, P., e Forghieri, F., “On the performance of Nyquist-WDM terabit superchannels based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM subcarriers,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 29, no. 1, pp. 53–61, Jan. 1, 2011.
- [85] Eriksson, T., et al., “Experimental investigation of crosstalk penalties in multicore fiber transmission systems,” *IEEE Photonics Journal* 7 (1), Fev. 2015.
- [86] Ip, E., Lau, A., Barros, D., e Kahn, J., “Coherent detection in optical fiber systems”, *Optics Express*, vol. 16, no. 2, pp. 753-791, 2008.
- [87] Stark, A., Hsueh, Y.-T., Detwiler, T., Filer, M., Tibuleac, S., Chang, G.-K., e Ralph, S., “Fiber performance comparison in all-EDFA 112 Gb/s PDM-QPSK systems”, *Optical Fiber Communication Conference (OFC/NFOEC)*, paper JW2A.50, 2012.
- [88] Chung, H., Chang, S., Lee, J., Shin, J., Youn, J., Ko, J., Lee, J., Kang, S.-K., Huh, J., Lee, J., Lee, W., Hyun, S., Kang, S., e Kim, K., “Field trial of 112 Gb/s dual-carrier DQPSK

channel upgrade in installed 516 km of fiber link and ROADM”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 30, no. 24, Dec. 15, pp. 3918-3923, 2012.

[89] ITU-T Recommendation G.975.1 (2004), Appendix I.9.

[90] Tzimpragos, G. *et al*, “A Survey on FEC Codes for 100 G and Beyond Optical Networks” in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 209-221, 2016. doi: 10.1109/COMST.2014.2361754.

[91] Essiambre, R.-J., Kramer, G., Winzer, P., Foschini, G., e Goebel, B., “Capacity limits of optical fiber networks”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 28, no. 4, Feb. 15, pp. 662-701, 2010.

[92] Fidler, F., Winzer, P. J., Thottan, M. K. e Bergman, K., “Impairment-aware optical networking using cross-layer communication”, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking.*, vol. 5. no. 2, pp. 144–158, 2013. doi:10.1364/JOCN.5.000144.

[93] Cvijetic, M., “Optical Transmission Systems Engineering”, Artech House opoelectronics library. 2003,

[94] Saridis, G. M., Alexandropoulos, D., Zervas, G., e Simeonidou, D., “Survey and Evaluation of Space Division Multiplexing: From Technologies to Optical Networks”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2136-2156, 2015. doi: 10.1109/COMST.2015.2466458.

[95] Klinkowski, M., Lechowicz, P., e Walkowiak, K., “Survey of resource allocation schemes and algorithms in spectrally-spatially flexible optical networking”. *Opt. Switch. Netw.*, vol. 27, pp. 58-78, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.osn.2017.08.003>.

[96] Hirota, Y., Hatada, Y., Watanabe, T., e Tode, H., “Dynamic spectrum allocation based on connection alignment for elastic optical networks”, in: *Proceedings of APSITT, Colombo, Sri Lanka*, pp. 1–3, 2015.

[97] Siracusa, D., Pederzoli, F., Khodashenas, P. S., Rivas-Moscoso, J. M., Klonidis, D., Salvadori, E., e Tomkos, I., “Spectral vs. spatial super-channel allocation in SDM networks under independent and joint switching paradigms”, in: *Proceedings of ECOC*, pp. 1–3, 2015.

[98] Diamantopoulos, N, P., Shariati, B., e Tomkos, I., “On the power consumption of MIMO processing and its impact on the performance of SDM networks”, in: *Proceedings of OFC, Los Angeles, USA*, pp. 1–3, 2017.

[99] Huang, H., Huang, S., Yin, S., Zhang, M., Zhang, J., e Gu, W., “Virtual network provisioning over space division multiplexed optical networks using few-mode fibers”, *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.* vol. 8, no. 10, pp. 726–733, 2016.

- [100] Rottondi, C., Boffi, P., Martelli, P., e Tornatore, M. “Routing, modulation format, baud rate and spectrum allocation in optical metro rings with flexible grid and few-mode transmission”, *IEEE J. Light. Technol.* vol. 1, no. 1, pp. 61–70, 2017.
- [101] Hua, Y. L. N., e Zheng., X. “Routing, wavelength and core allocation planning for multi-core fiber networks with MIMO-based crosstalk suppression”, in: *Proceedings of OECC, Shanghai, China*, pp. 1–3, 2015.
- [102] Tode, H., e Hirota., “Y. Routing, spectrum and core assignment on SDM optical networks”, in: *Proceedings of OFC, San Diego, USA*, pp. 1–3, 2016.
- [103] Li, Y., Li, Y., Hua., N., e Zheng, X. “Shared backup path protection in multi-core fiber networks with MIMO-based crosstalk suppression”, in: *Proceedings of OFC, San Diego, USA*, pp. 1–3, 2016.
- [104] Li, Y., Hua., N., e Zheng, X. “A capacity analysis for space division multiplexing optical networks with MIMO equalization”, in: *Proceedings of OFC, Los Angeles, USA*, pp. 1–3, 2017.
- [105] Huang, M.-F., et al., “Terabit/s Nyquist superchannels in high capacity fiber field trials using DP-16QAM and DP-8QAM modulation formats”, *IEEE J. Light. Technol.* vol. 32, no.4, pp. 776–782, 2014.
- [106] Essiambre, R.J., Ryf, R., Fontaine, N.K., Randel, S., “Breakthroughs in photonics 2012: space-division multiplexing in multimode and multicore fibers for high-capacity optical communication”, *IEEE Photon. J.* vol. 5, no. 2, 2013.
- [107] P. J. Winzer, "Spatial Multiplexing in Fiber Optics: The 10X Scaling of Metro/Core Capacities," in *Bell Labs Technical Journal*, vol. 19, pp. 22-30, 2014.
- [108] Tucker, R. S., “Green Optical Communications-Part I: Energy Limitations in Transport,” *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 17, no. 2, pp. 245–260, Mar./Apr. 2011.
- [109] Korotky, S. K., “Price-Points for Components of Multi-Core Fiber Communication Systems in Backbone Optical Networks,” *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 4, no. 5, pp. 426–435, May 2012.
- [110] Zang, H., Jue, J. P., e Mukherjee, B., "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," *Optical Networks Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 47-60, Jan. 2000.
- [111] Chlamtac, I., Ganz, A., e Karmi, G., “Lightpath Communications: An Approach to High Bandwidth Optical WANs”, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, no. 7, pp. 1171–1182, Julho. 1992.



- [112] Mukherjee, B., "Optical WDM Networks", Springer, 2006.
- [113] Eppstein, D. "Finding the k Shortest Paths", SIAM Journal of Computing, vol. 28, pp. 652-673, 1998.
- [114] Ramamurthy, S. "Optical Design of WDM Network Architectures", Ph.D. Dissertation, University of California, Davis, 1998.
- [115] Ramamurthy, R., e Mukherjee, B., "Fixed-Alternate Routing and Wavelength Conversion in Wavelength-Routed Optical Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 10, no. 3, pp. 351-367, Junho. 2002.
- [116] Murthy, C. S. R., Gurusamy, M., "WDM optical Networks - Concepts, Design, and Algorithms", 1a ed. Prentice Hall, 2002.
- [117] Chan, K., e Yum, T. P., "Analysis of Least Congested Path Routing in WDM Lightwave Networks," IEEE INFOCOM, vol. 2, pp. 962-969, Toronto, Canada, Abril. 1994.
- [118] Chu, X.-W., Li, B., e Zhang, Z., "A dynamic RWA algorithm in a wavelength-routed all-optical network with wavelength converters," IEEE INFOCOM 2003, San Francisco, CA, USA, Abril. 2003.
- [119] Chaves, D. A. R., "Planejamento de Redes Ópticas de Alta Capacidade por Otimização Multiobjetiva", Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Março de 2012.
- [120] Zhai, Y., Pointurier, Y., Subramaniam, S., e Brandt-Pearce, M., "Performance of Dedicated Path Protection in Transmission-Impaired DWDM Networks", in Proc. of IEEE International Conference on Communications ICC'07, Junho. 2007.
- [121] Huang, Y., Heritage, J. P., Mukherjee, B., "Connection Provisioning With Transmission Impairment Consideration in Optical WDM Networks With High-Speed Channels", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 23, no. 3, pp. 982-992, Março. 2005.
- [122] Yang, X., Shen, L., e Ramamurthy, B., "Survivable Lightpath Provisioning in WDM Mesh Networks Under Shared Path Protection and Signal Quality Constraints", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 23, no. 4, pp. 1556-1567, Abril. 2005.
- [123] Zhai, Y., Pointurier, Y., Subramaniam, S., e Brandt-Pearce, "QoS-aware RWA algorithms for path-protected DWDM networks", in Proc. of IEEE/OSA Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference OFC/NFOEC'07, Março. 2007.
- [124] Deng, T., e Subramaniam, S., "Adaptive QoS Routing in Dynamic Wavelength Routed Optical Networks", in Proc. of 2nd International Conference on Broadband Networks BroadNets'05, Out. 2005.

- [125] He, J, Brandt-Pearce, M. Pointurier, Y., e Subramaniam, S., “QoT-Aware Routing in Impairment-Constrained Optical Networks”, in Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM’07, Novembro 2007.
- [126] Yang, X., e Ramamurthy, B., “Dynamic Routing in Translucent WDM Optical Networks: The Intradomain Case”, IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 23, no. 3, pp. 955-971, Março. 2005.
- [127] Manousakis, K., e Varvarigos, E., "Using a nature inspired technique to train a dynamic IA-RWA algorithm", Proc. 18<sup>th</sup> International Conference on Telecommunications (ICT), 2011. DOI: 10.1109/CTS.2011.5898986.
- [128] Wan, X., Wang, L., Hua, N., Zhang, H., e Zheng, X., “Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks,” in Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. Expo./Nat. Fiber Opt. Eng. Conf., 2011.
- [129] Christodoulopoulos, K., Tomkos, I., e Varvarigos, E., “Spectrally/bitrate flexible optical network planning”, in Proc. 36<sup>th</sup> Eur. Conf. Exhibit. Opt. Commun., 2010, DOI: 10.1109/ECOC.2010.5621304.
- [130] Zhou, X., Lu, W., Gong, L., e Zhu, Z., “Dynamic RMSA in elastic optical networks with an adaptive genetic algorithm”, in Proc.of GLOBECOM 2012, pp. 1–6, Dez. 2012.
- [131] Ding, H., Zhang, M., Ramamurthy, B., Liu, Z., Huang, S., e Chen, X., “Routing, modulation level and spectrum allocation with dynamic modulation level conversion in elastic optical networks,” Photonic Netw. Commun., vol. 28, pp. 295–305, 2014.
- [132] Palkopoulou, E., Bosco, G., Carena, A., Klonidis, D., Poggiolini, P., Tomkos, I., “Nyquist-WDM-based flexible optical networks: exploring physical layer design parameters”, J. Lightw. Technol., vol. 31, no. 14, pp. 2332-2339, Maio, 2013.
- [133] Chandrasekhar, S., e Liu, X., “OFDM Based Superchannel Transmission Technology”, Journal of Lightwave Technology, vol. 30, no. 24, 2012.
- [134] Geisler, D. J., et al., “Bandwidth scalable, coherent transmitter based on the parallel synthesis of multiple spectral slices using optical arbitrary waveform generation”, Opt. Exp., vol. 19, no. 9, pp. 8242–8253, Abril. 2011.
- [135] Klonidis, D., et al., “Spectrally and spatially flexible optical network planning and operations,” IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 2, pp. 69–78, Fev. 2015.
- [136] Jansen, S. L., e Morita, I., “Polarization-Division-Multiplexed Coherent Optical OFDM Transmission Enabled by MIMO Processing”, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 167–178, 2010.

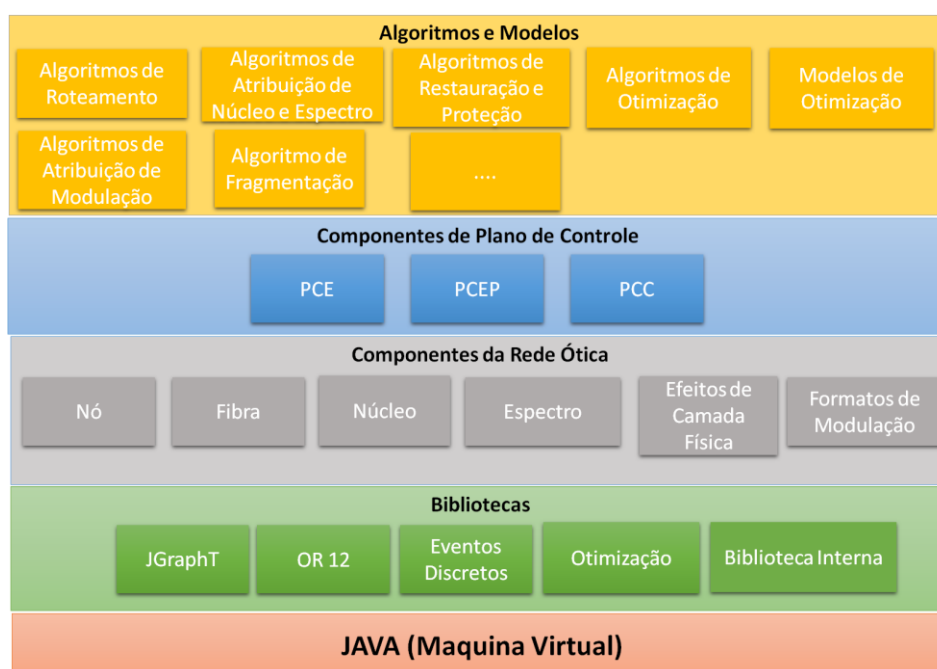
- [137] Igarashi, K., et al., “110.9-tbit/s sdm transmission over 6,370 km using a full c-band seven-core edfa”, *Opt. Express*, vol. 21, no. 15, pp. 18053–18060, 2013. doi:10.1364/OE.21.018053.
- [138] Poggiolini, P., “The GN model of non-linear propagation in uncompensated coherent optical systems”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no.24, pp. 3857–3879, 2012. doi:10.1109/JLT.2012.2217729.
- [139] Bosco, G., et al., “Experimental investigation of nonlinear interference accumulation in uncompensated links”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 14, pp.1230–1232, 2012. doi:10.1109/LPT.2012.2200672.
- [140] Tessinari, R., Puype, B., Colle, D., e Garcia, A., “Elastico++: An elastic optical network simulation framework for omnet++”, *Optical Switching and Networking*, vol. 22, pp. 95-104, 2016. doi:10.1016/j.osn.2016.07.001.
- [141] Delaney, W., e Vaccari, E., “Dynamic Models and Discrete Event Simulation”, Dekker Inc., 1988.
- [142] Kelton, W. D., e Law, A. M., “Simulation modeling and analysis,” Boston, MA: McGraw Hill, 2000.
- [143] OR-Objects 1.2.4, disponível em: <http://opsresearch.com/ORjects/download/free.html>.
- [144] JGraphT – Java Graph Library, disponível em: <http://jgrapht.org/>.
- [145] Johnson, D. B., "A note on Dijkstra's shortest path algorithm", *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 20, issue 3, pp. 385-388, 1973.
- [146] Chen, S., e Nahrstedt, K., "An overview of quality of service routing for next-generation high-speed networks: problems and solutions", *IEEE Network*, vol. 12, issue 6, pp. 64-79, 1998.
- [147] Farrel, A., Vasseur, J.-P, e Ash, J., "A Path Computation Element (PCE) Based Architecture", IETF RFC 4655, Aug. 2006.

# ANEXO I

## Simulador de Redes Ópticas Elástica Multi Núcleo (SimROEL).

O Simulador de Redes ópticas ELástica com múltiplos núcleo (SimROEL) é uma ferramenta de DES [141] [142] que foi desenvolvida, especificamente no contexto desta tese, para o estudo de diversas propostas (algoritmos ou modelos) para solucionar o problema de IA-RSCA em redes MCF- EONs. Porém o simulador não se limita somente a esse problema e pode ser estendido para solucionar outros problemas como: tolerância à , fragmentação, etc.

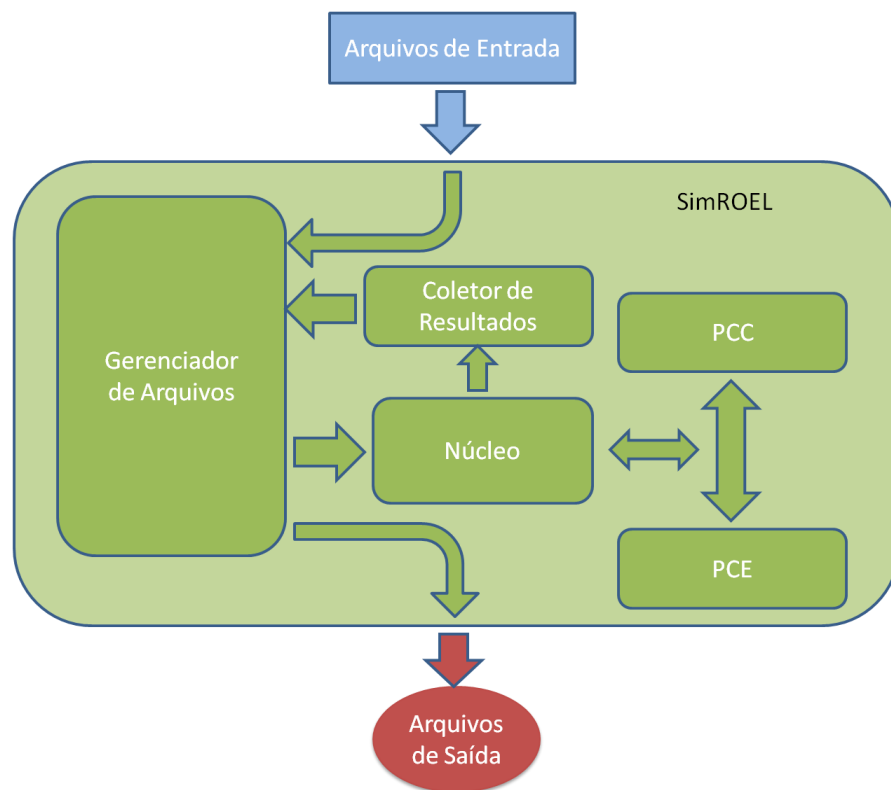
Ilustração. I.1. Visão em Camadas da Arquitetura do Simulador



Uma visão em camadas da arquitetura do Simulador é apresentada na il. I.1. O simulador está sendo desenvolvido em Java, tornando-o portátil e independente de plataforma, ou seja, ele pode ser executado em qualquer plataforma na qual a Máquina Virtual Java (JVM) está disponível (por exemplo, Windows, Linux, Unix). A próxima camada contém as bibliotecas externas e internas. As bibliotecas externas são: OR 12 [143] e JGraphT [144] que implementam algoritmos relacionados a grafos (Dijkstra [145] e o variação do Bellman-Ford [146]) e estruturas de dados (tabela hash e árvore binária de busca (fila FES)), a biblioteca Eventos Discretos é relacionada a implementação de um DES e a Otimização oferece suporte a fim de resolver instâncias de modelos gerados por Modelos de Otimização em tempo de execução. Já as bibliotecas internas estão intrinsecamente ligadas ao funcionamento do simulador. A camada de componentes de rede óptica é responsável por modelar os elementos e conceitos relacionados à infraestrutura de uma rede óptica elástica

com múltiplos núcleos, tais como: enlaces de fibra, nós ópticos, núcleos, efeitos de camada física, etc. A camada de componentes de plano de controle contém frameworks e protocolos utilizados para provisionar e configurar as conexões, nós escolhemos um mecanismo de plano de controle centralizado baseado em uma arquitetura PCE [147]. Finalmente, a camada superior contém algoritmos e modelos implementados para resolução de diversos problemas no âmbito de redes ópticas elásticas com múltiplos núcleos, como: algoritmos de roteamento, atribuição de núcleo e espectro (RSCA), algoritmos de otimização (genético, colônia) e modelos de otimização (programação linear inteira), etc. Estes algoritmos e modelos podem acessar diretamente informações de infraestrutura através da camada de rede óptica. Para esta tese, nós focaremos na aplicação de algoritmos de otimização para resolução do problema de provisionamento de recursos considerando limitações de camada física (IA-RSCA).

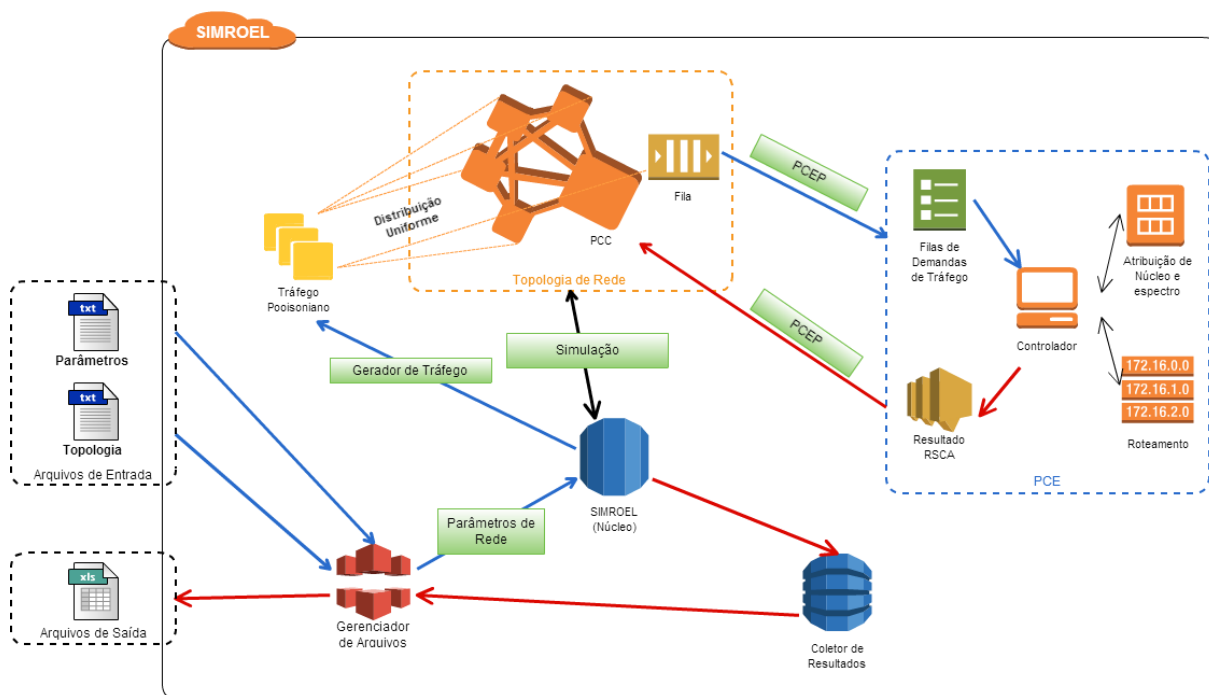
Ilustração II.2- Fluxograma Geral do Simulador



Um diagrama geral de fluxo e interação entre módulos funcionais do simulador é mostrado na il. II.2. O módulo Núcleo é o módulo principal responsável pela coordenação e interação entre outros módulos do simulador. Rotinas de inicialização, condições de término e a rotina principal da simulação são implementados nesta classe. O módulo Arquivos de Entrada contém os parâmetros de entrada necessários para a execução da simulação (parâmetros e topologia). O módulo Gerenciador de Arquivos é responsável pelas operações de entrada e saída. O módulo Coletor de Resultados é responsável pela coleta e

armazenamento das métricas. Os módulos PCC e PCE serão responsáveis pelo mecanismo de plano de controle e provisionamento de recursos (resolução do problema IA-RSCA). O módulo Arquivos de Saída é responsável pelo armazenamento dos arquivos saída (traces e resultados).

Ilustração II.3- Fluxograma Detalhado do Simulador



A fim de fazer uma análise e descrição mais detalhada do fluxograma geral do simulador, iremos detalhar os módulos do fluxograma anteriormente apresentado, como podemos ver na ilustração II.3. Iremos iniciar pelos módulos: Arquivos de Entrada, sendo responsável pela entrada de parâmetros de configuração da simulação e da topologia do cenário de rede, e o Arquivos de Saída, responsável pelo armazenamento dos arquivos que contém métricas de resultados e traces da simulação. Em seguida, detalharemos os módulos contidos no simulador: 1) Gerenciamento de Arquivos: Módulo responsável por ser a interface entre os arquivos de entrada e o Núcleo do simulador e entre o Coletor de Resultados e os arquivos de saída no simulador. 2) Gerador de Tráfego é usado para criar uma ou mais instâncias de tráfego, com a possibilidade de escolher distribuições específicas (Poisson, exponencial e uniforme) para caracterizar o tempo entre chegadas e o tempo de espera de uma conexão. 3) PCE e Topologia da Rede: Módulos responsáveis por implementar a arquitetura PCE através dos elementos PCC, PCE e o protocolo PCEP com sua sinalização. Assim, atuando no plano de controle e no provisionamento de recursos da rede. Note, que no módulo PCE são implementados algoritmos e modelos para solucionar o problema IA-RSCA, assim como soluções para o problema de tolerância a , fragmentação, etc. Já o módulo

Topologia de Rede gera requisições de conexão através do gerador de tráfego (distribuição Poisson) e atribui aleatoriamente, através de uma distribuição uniforme, aos pares de nós ópticos (PCC's). Enquanto que o tempo de espera de uma conexão segue uma distribuição exponencial. 4) SIMROEL (Núcleo): Módulo responsável por fazer as interações entre os módulos e controlar a simulação. O Núcleo irá conter as rotinas: i) Inicialização que será alimentada com os parâmetros de entrada para posteriormente construir o cenário de rede e o tráfego. ii) A rotina principal da simulação será responsável por controlar o estado do sistema e a ocorrência dos eventos. iii) Condição de término que poderá ser fixada por valores estatísticos pré-determinados (intervalo e nível de confiança). 5) Coletor de Resultados: Módulo responsável pela coleta e o armazenamento das variáveis utilizadas para o cálculo das métricas mais relevantes para avaliar o desempenho do cenário de rede simulado.

## ANEXO II

### **Análise Comparativa da estratégia CP(NADJ)-FF e CP(NADJ)-RD**

Neste anexo, apresenta-se as configurações e o desempenho das estratégias SCA, especificamente CP(NADJ)-FF e CP(NADJ)-RD, analisado no início do desenvolvimento desta tese.

#### **Configurações das Simulações**

Inicialmente neste trabalho, considerou-se cenários com diversas capacidades de conexões (42.8, 112, 224, 448, 1120 Gb/s) e formatos de modulação (M-QAM) sendo M (64/32/16/8/4). Utilizou-se a topologia NSFNET-14, visualizada na ilustração 5.26, e a seguinte configuração: a largura da banda total do canal 4 THz ( $B_{av}$ ) e a largura de banda do slot ( $B_s$ ) igual a 12.5 GHz resultando em 320 slots por núcleo. A banda de guarda (GB- *Guard Band*) é igual a um (1) slot. A capacidade (42.8, 112, 224, 448, 1120 Gb/s) de cada conexão é randomicamente escolhida através de uma distribuição uniforme. Para cada simulação, um conjunto de 100.000 requisições de conexões é gerado por um processo de *Poisson* e o tempo de duração (*holding time*) de cada conexão segue uma distribuição exponencial. O par de nós (origem, destino) de cada conexão é randomicamente escolhido através de uma distribuição uniforme. Para cada experimento são realizadas 10 simulações independentes e gerada a média dos resultados. Outros parâmetros utilizados nas simulações são apresentados no quadro II.1.



Quadro II.1- Parâmetros de Camada Física.

Parâmetro	Valor	Definição
$k$	3	Número de rotas candidatas
$B_{av}$	4 THz	Largura de banda total por núcleo
$B_s$	12.5 GHz	Largura de banda do <i>slot</i>
$B_{ref}$	12.5 GHz	Largura de banda de referência
$P_{sc}$	1 mW	Potência do sinal por subportadora
$N_{GB}$	1	Número de <i>slots</i> de GB por conexão
$f_n$	3.16	Figura de ruído do amplificador
$\alpha$	0.2 dB/km	Coefficiente de perda na fibra
$L_{no}$	16 dB	Perda no nó óptico
$d_{amp}$	80 km	Distância entre os amplificadores
$\lambda$	1550 nm	Comprimento de onda
$\beta$	$10^7$ 1/m	Constante de propagação
$R$	0.01 m	Raio de curvatura
$\kappa$	$2.93 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	Coefficiente de acoplamento
$\Lambda$	$4.5 \times 10^{-5} \text{ m}$	Distância entre núcleos

## Análise dos Resultados

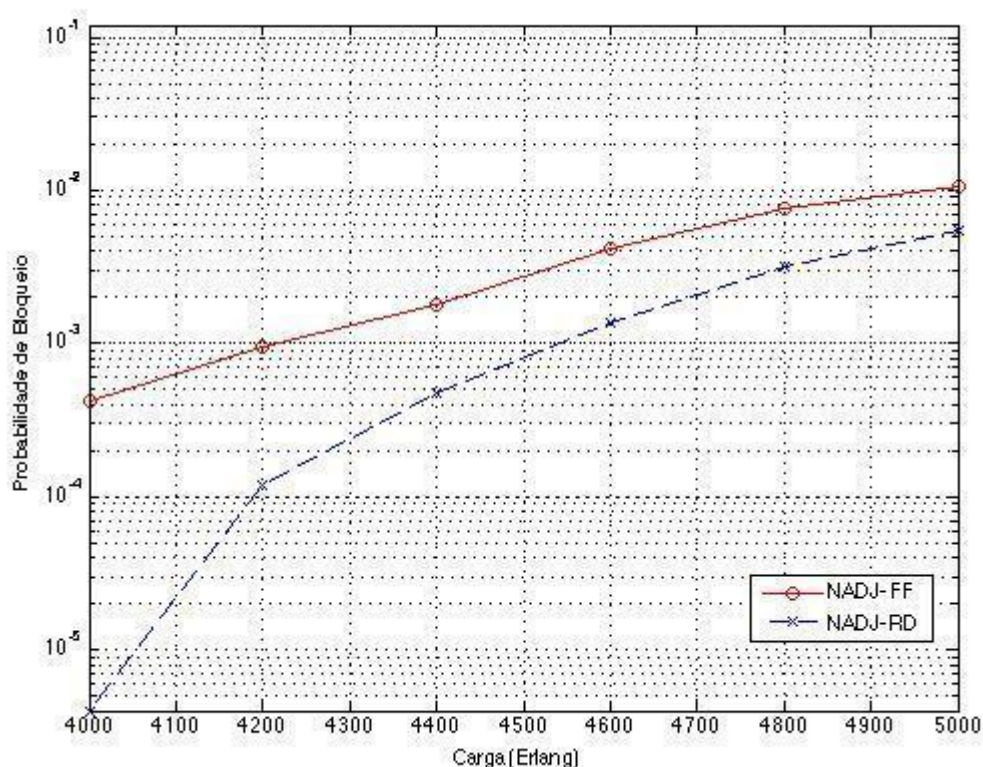
A seguir, apresenta-se os resultados preliminares relativos à probabilidade de bloqueio (BP) em função da carga comparando a solução *core prioritization* (CP) [75], preliminarmente denominada na qualificação de "não adjacência de núcleo" (NADJ), para o alocação de núcleo combinada com as estratégias *first-fit* (NADJ-FF) ou aleatória (NADJ-RD) para alocação no espectro a fim de resolver o problema RSCA.

O desempenho das estratégias (NADJ-FF e NADJ-RD) é mensurado através da probabilidade de bloqueio que será chamada de probabilidade de bloqueio total, pois será a soma das probabilidades de bloqueio relativa a recursos, OSNR e XT. Com o objetivo de comparar as soluções das estratégias, utiliza-se os seguintes cenários: 1) Somente conexões de 112 Gb/s e 2) Conexões de diversas capacidades (42.8, 112, 224, 448, 1120 Gb/s), ambos os cenários utilizam os seguintes formatos de modulação M-QAM (M= 64, 32, 16, 8, 4).

No cenário 1) comparamos as seguintes estratégias que utilizam o *K-shortest path* com a verificação de OSNR para o roteamento e as soluções NADJ-FF e NADJ-RD para o problema SCA.

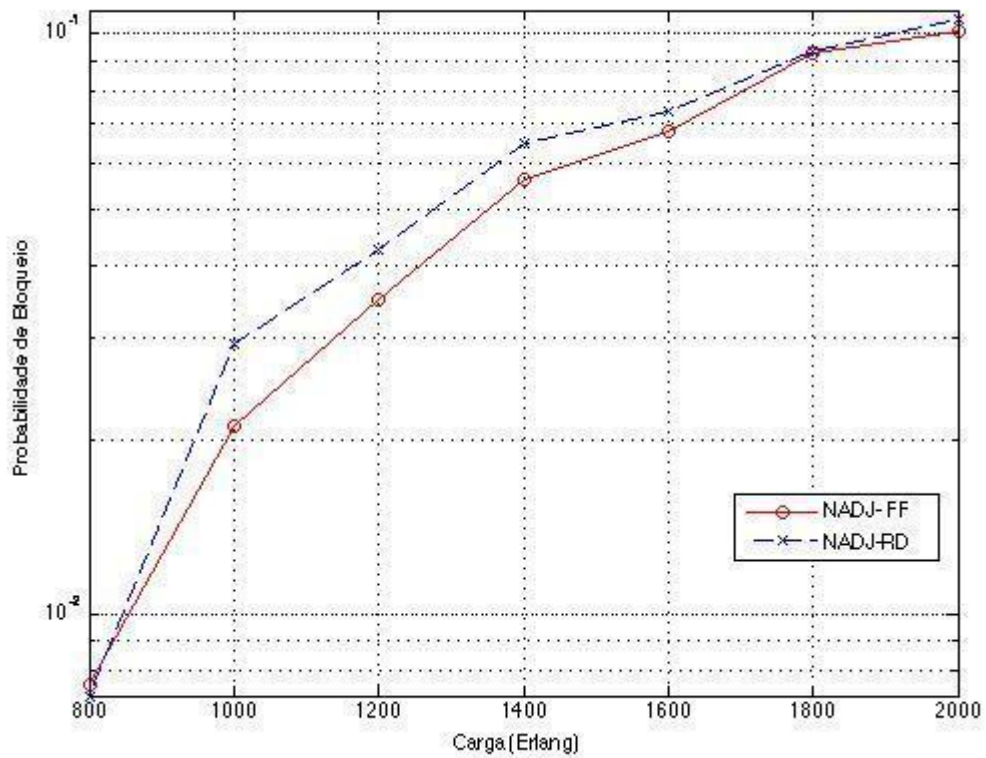
Na ilustração II.1, visualiza-se a comparação da PB entre NADJ-FF e NADJ-RD para o cenário 1. Percebe-se que o NADJ-FF tem um pior desempenho do que o NADJ-RD, pois mesmo evitando nas duas estratégias a alocação subsequente em núcleos adjacentes o bloqueio por diafonia utilizando o FF na alocação do espectro é predominante na PB total.

Ilustração II.1- PB entre NADJ-FF e NADJ-RD para o cenário 1.



Posteriormente, comparou-se as mesmas estratégias para o cenário 2). Na ilustração II.2, visualiza-se a comparação da PB entre NADJ-FF e NADJ-RD para o cenário 2. Percebe-se que o NADJ-RD tem um pior desempenho do que o NADJ-FF, pois como nas duas estratégias evita-se a alocação subsequente em cores adjacentes, nesse cenário o bloqueio por recurso utilizando o RD na alocação do espectro acaba aumentando a PB total.

Ilustração II.2- Comparação da Pb entre NADJ-FF e NADJ-RD para o cenário 2.



Nota-se em nos gráficos, principalmente no cenário 2, que há pequenas "quedas" nas curvas da PB, isto é causado pela variação das distribuições uniformes relativas à geração de tráfego influenciando em um crescimento maior ou menor nas PB total que é a soma das probabilidades de bloqueio relativas ao recurso, OSNR e XT.