



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Proteção Contra Falhas Dupla Em Redes SDM-EON Explorando Bandas de Espectro Com Crosstalk

Paulo José de Souza Júnior

Tese apresentada como requisito parcial para
conclusão do Doutorado em Informática

Orientador

Prof. Dr. Marcelo Antonio Marotta

Brasília
2026

**Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

SS729p Souza Júnior, Paulo José de
Proteção contra falhas dupla em redes SDM-EON explorando
bandas de espectro com crosstalk
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Antonio Marotta /
Coordenadora do programa de Pós-graduação em Informática:
Profa. Dra. Cláudia Nalon
2026.
156 p.
Tese (Doutorado em Informática) -- Universidade de
Brasília,
2026.
1. Redes ópticas elásticas. 2. Redes SDM-EON. 3.
Proteção dedicada. 4. Falhas duplas. 5. Crosstalk.



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Proteção Contra Falhas Dupla Em Redes SDM-EON Explorando Bandas de Espectro Com Crosstalk

Paulo José de Souza Júnior

Tese apresentada como requisito parcial para
conclusão do Doutorado em Informática

Prof. Dr. Marcelo Antonio Marotta (Orientador)
PPGI/CIC/UnB

Prof. Dr. José Rezende
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Profa. Dra. Priscila América Solís Mendez Barreto
PPGI/CIC/UnB

Prof. Dr. Helder May Nunes da Silva Oliveira
Universidade de São Paulo

Profa. Dra. Cláudia Nalon
Coordenadora do Programa de Pós-graduação em Informática

Brasília, 28 de Julho de 2026

Dedicatória

À minha esposa, **Anna Karine de Figueiredo Farias**,
companheira de todas as jornadas, cujo amor, incentivo e compreensão
foram essenciais para que este sonho se tornasse realidade.

Aos meus filhos, **Matheus Figueiredo de Souza** e
Maria Isadora Figueiredo de Souza,
razão maior da minha dedicação e perseverança ,
e ao meu **orientador Marcelo Antonio Marotta**.

Que este trabalho
sirva de inspiração para acreditarem que, com esforço, disciplina e
determinação, é possível transformar sonhos em conquistas.

Com todo o meu amor, dedico esta tese a vocês.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, nosso Senhor Jesus Cristo, e à Mãe Maria Santíssima, pelo amparo constante ao longo desta jornada. A fé foi fonte de força, serenidade e perseverança para enfrentar os desafios acadêmicos e pessoais que marcaram o período do doutorado. Agradeço profundamente à minha família, em especial à minha esposa, Ana Karine, e aos meus filhos, Matheus Figueiredo e Isadora. O apoio, a compreensão e o carinho de vocês foram fundamentais para que eu pudesse concluir este trabalho. Peço desculpas pelas ausências ao longo desse período, muitas vezes impostas pela dedicação exigida pelo doutorado, e registro minha gratidão por todo o suporte incondicional. Aos professores e colegas que contribuíram diretamente para esta trajetória acadêmica, registro meu sincero agradecimento. Ao professor Jacir Bordin, agradeço pela confiança inicial, pela oportunidade concedida no CIC e pela indicação que viabilizou meu ingresso no doutorado. Ao professor André Drummond, meu orientador em etapa inicial do percurso, agradeço pelos ensinamentos e pela condução técnica que contribuíram significativamente para minha formação. Agradeço ao professor Lucas Rodrigues, colega de pesquisa e parceiro em diversos trabalhos, cuja colaboração acadêmica e troca constante de ideias foram essenciais para o desenvolvimento deste doutorado. Sua atuação foi determinante para superar desafios técnicos e científicos ao longo do processo. Registro também meu agradecimento ao professor e amigo Caetano, inicialmente aluno e posteriormente colega, hoje professor doutor da Universidade de Brasília, cuja contribuição e indicação foram decisivas para o encaminhamento desta pesquisa e para a continuidade do trabalho acadêmico. Por fim, agradeço de forma especial ao meu orientador atual, professor Marcelo Antônio Marotta. Sua postura ética, paciência, dedicação e rigor acadêmico foram fundamentais para a conclusão deste doutorado. Mais do que orientar, ensinou com clareza, justiça e comprometimento, exercendo um papel decisivo na consolidação deste trabalho e na minha formação como pesquisador.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do Acesso ao Portal de Periódicos.

Resumo

Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial (SDM-EONs) aumentam significativamente a capacidade de transmissão ao explorar múltiplos núcleos em fibras multicore; no entanto, essa expansão introduz novos desafios estruturais relacionados à diafonia entre núcleos e à viabilidade de mecanismos de proteção robustos. Em particular, a proteção dedicada contra falhas duplas permanece pouco explorada na literatura devido ao alto consumo de recursos envolvido e à prática predominante de tratar regiões degradadas por interferência apenas como critérios de bloqueio. Esta tese aborda explicitamente esse problema, propondo um mecanismo de proteção dedicado capaz de lidar com falhas duplas em SDM-EONs, mantendo níveis de serviço comparáveis aos alcançados por esquemas de proteção contra falhas únicas. A estratégia proposta, denominada Proteção de Caminho Dedicada contra Falha Dupla (DPPDF), organiza os núcleos das fibras multicore por meio de especialização funcional, alternando núcleos atribuídos a caminhos ópticos ativos e núcleos reservados para caminhos de proteção inativos. Essa organização estrutural permite o uso controlado e condicional de regiões espectrais afetadas por diafonia para acomodar o segundo caminho de proteção, por meio de uma abordagem híbrida que combina prevenção estrutural com verificação óptica seletiva durante a ativação. Como resultado, o DPPDF explora o espectro que permanece não utilizado nas técnicas baseadas em XT-avoid e XT-estimated, sem comprometer a estabilidade do tráfego ativo. O trabalho também apresenta uma heurística operacional que permite a aplicação prática do DPPDF em cenários de tráfego dinâmico, incorporando verificações estruturais e ópticas para evitar efeitos dominó durante a recuperação. Resultados numéricos obtidos para as topologias USANet e PanEuro demonstram que o DPPDF mantém as métricas de taxa de bloqueio (BR) e taxa de bloqueio de largura de banda (BBR) em níveis comparáveis aos observados sob proteção contra falha única, enquanto simultaneamente converte regiões espectralmente degradadas em capacidade útil para proteção contra falha dupla. Ganhos de utilização espectral de até 25% na USANet e 21% na PanEuro são alcançados em comparação com abordagens convencionais. Esses percentuais expressam o reaproveitamento de capacidade espectral reservada para o segundo caminho de proteção inativo; não representam aumento de transmissões ópticas ativas durante a operação normal da rede. A

principal contribuição desta tese reside na formulação e validação do DPPDF como um mecanismo de proteção dedicado que aproveita, de forma controlada, regiões afetadas por diafonia para fornecer resiliência contra falhas duplas, preservando o tráfego ativo. Os resultados demonstram que a especialização funcional do núcleo pode ser empregada como um elemento de projeto estrutural para aprimorar tanto a resiliência quanto a utilização espectral em EONs de SDM.

Palavras-chave: Redes SDM, Falhas Dupla, Proteção Dedicada, Crosstalk

Abstract

Spatial Division Multiplexing Elastic Optical Networks (SDM-EONs) increase transmission capacity through the simultaneous use of multiple cores in multicore fibers. However, inter-core crosstalk imposes severe constraints on spectrum allocation and makes dedicated protection against double failures a largely unexplored problem in the literature, due to the high resource consumption and the dominant practice of treating degraded spectrum regions solely as a blocking criterion. As a consequence, existing schemes are mostly limited to single-failure protection or rely on conservative strategies that reduce the spectral efficiency of the network. This thesis explicitly addresses this problem by proposing a dedicated protection mechanism capable of handling double failures in SDM-EONs without degrading the level of service observed in single-failure protection schemes. The proposed strategy, named Dedicated Path Protection against Double Failure (DPPDF), organizes the cores of multicore fibers through functional specialization, alternating cores assigned to active optical paths and inactive protection paths. This structural organization enables the controlled and conditional use of spectrum regions affected by crosstalk to accommodate the second protection path, through a hybrid approach that combines structural prevention with selective optical verification during activation. In this way, DPPDF exploits spectrum that remains unused in techniques based on XT-avoid and XT-estimated, without compromising the stability of active traffic. The thesis also presents an operational heuristic that enables the application of DPPDF in dynamic demand-arrival scenarios, incorporating structural and optical checks to prevent domino effects during recovery. Numerical results obtained on the USANet and PanEuro topologies demonstrate that DPPDF maintains blocking rate (BR) and bandwidth blocking rate (BBR) metrics at levels equivalent to those observed for single-failure protection, while simultaneously converting degraded spectrum regions into useful capacity for double-failure protection. Spectral utilization gains reach up to 25% in USANet and 21% in PanEuro when compared to conventional approaches. These percentages express the reuse of spectral capacity reserved for the inactive second protection path; they do not represent an increase in active optical transmissions during normal network operation. The main contribution of this thesis lies in the formulation and validation of DPPDF as a dedicated

protection mechanism that leverages crosstalk-affected regions in a controlled manner to provide resilience against double failures, while preserving active traffic. The results demonstrate that core specialization can be employed as a structural element to enhance both resilience and spectral efficiency in SDM-EONs.

Keywords: SDM Networks, Double Failures, Dedicated Protection, Crosstalk

Sumário

Agradecimentos	v
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Hipótese	5
1.3 Objetivos	6
1.4 Principais Contribuições	6
1.5 Organização	7
2 Fundamentação Teórica	9
2.1 Redes SDM	9
2.2 Crosstalk em Redes SDM-EON	14
2.2.1 Cálculo de Crosstalk	16
2.2.1.1 Exemplo de aplicação da Coupled Power Theory (CPT)	22
2.2.2 Técnicas de Mitigação de Crosstalk	26
2.3 Roteamento, Modulação, Espectro e Alocação de Núcleos (RMSCA)	27
2.3.1 Roteamento em Redes Ópticas	28
2.3.2 Alocação de Modulação	29
2.3.3 Alocação de Espectro	29
2.3.4 Alocação de Núcleos	30
2.4 Fragmentação	30
2.5 Falhas em Redes Ópticas	31
2.6 Proteção	32
2.6.1 Falhas Simples versus Falhas Duplas	33
2.6.2 Tipos de proteção em redes ópticas	33
2.6.2.1 Dedicated Path Protection (DPP)	33
2.6.2.2 Dedicated Link Protection (DLP)	34
2.6.2.3 Shared Path Protection (SPP)	35
2.6.2.4 Shared Link Protection (SLP)	37

2.6.3	Variantes de Proteção Dedicada	38
2.6.3.1	Proteção Total versus Proteção Parcial	40
2.6.4	Exemplo de falhas em mecanismos de proteção	40
3	Estado da Arte	43
3.1	Proteção contra Falhas Duplas	43
3.2	Estratégias Baseadas em XT-Estimated	49
3.3	Estratégias Baseadas em XT-Avoid	53
3.4	Lacunas e Desafios da Literatura	56
4	Proposta	60
4.1	Proteção por Caminhos Dedicados contra Falhas Duplas	60
4.1.1	Prevenção do efeito dominó	64
4.1.2	Modelo do Sistema	71
4.1.2.0.1	Premissas de sobrevivência	72
4.1.3	Definição do Problema	72
4.1.4	Metodologia de Solução	73
4.1.5	Fase 1: Pré-processamento <i>Offline</i> da Topologia	76
4.1.5.1	Descrição Matemática	76
4.1.5.1.1	Conjuntos	76
4.1.5.1.2	Parâmetros	76
4.1.5.1.3	Variáveis	77
4.1.5.1.4	Geração das Rotas Candidatas	77
4.1.5.1.5	Ordenação das Rotas Candidatas	78
4.1.5.1.6	Comprimento Físico das Rotas	78
4.1.5.1.7	Viabilidade Quanto ao Alcance	78
4.1.5.1.8	Seleção do Formato de Modulação	79
4.1.5.1.9	Registro das Rotas Candidatas	79
4.1.5.1.10	Saída da Fase 1	80
4.1.6	Fase 2: Construção das Triplas Candidatas de Proteção	80
4.1.6.1	Descrição Matemática	80
4.1.6.1.1	Conjuntos	80
4.1.6.1.2	Parâmetros	81
4.1.6.1.3	Restrições	81
4.1.7	Fase 3: Seleção das Triplas de Proteção e Alocação de Recursos	83
4.1.7.1	Descrição Matemática	84
4.1.7.1.1	Conjuntos	84
4.1.7.1.2	Parâmetros	85

4.1.7.1.3	Variáveis	85
4.1.7.1.4	Restrições de Seleção das Triplas de Proteção e Alocação de Recursos	85
4.1.7.1.5	Conjuntos	86
4.1.7.1.6	Parâmetros Adicionais	89
4.1.7.1.7	Escopo da garantia de proteção	90
4.1.7.1.8	Conjuntos Adicionais	91
4.1.7.1.9	Parâmetros	91
4.1.7.1.10	Variáveis Auxiliares	91
4.1.7.1.11	Entrada da Fase	92
4.1.7.1.12	Resultado da Fase	94
4.1.7.1.13	Implementação Computacional	94
4.1.8	Heurística DPPDF	95
4.1.8.1	Função de pré-processamento	96
4.1.8.2	Função CANALLOC	98
4.1.8.3	Verificação do efeito dominó	100
4.1.8.4	Complexidade Computacional	101
4.1.8.4.1	Etapa de pré-processamento (<i>offline</i>).	101
4.1.8.4.2	Etapa de decisão (<i>online</i>).	102
5	Resultados	104
5.1	Análise Comparativa Preliminar	105
5.2	Comparação entre a Formulação Matemática e a Heurística	108
5.3	Resultados Numéricos	109
5.3.1	Configuração Experimental	111
5.3.2	Métricas de Avaliação	115
5.3.2.1	Disponibilidade e proteção compartilhada	116
5.3.2.2	Taxa de Bloqueio	120
5.3.2.3	Taxa de Bloqueio de Banda	122
5.3.2.4	Uso de Espectro	125
5.4	Conclusão	127
6	Conclusão	130
	Referências	133
	Anexo	139

I	Publicações no Doutorado	140
I.1	Publicações em periódicos	140
I.2	Publicações em anais de conferências e afins	140

Lista de Figuras

1.1	Relação entre a variação temporal do tráfego, a utilização de enlaces e diferentes níveis de proteção. O painel superior compara as políticas EC-PAC, D-PAC e S-PAC; o painel inferior apresenta o perfil temporal do número de conexões. Adaptado de Dikbiyik et al. [1].	4
2.1	Configurações de fibras multinúcleo com 7, 12 e 19 núcleos.	9
2.2	Restrições da tecnologia SDM	10
2.3	Ortogonalidade no domínio do tempo.	12
2.4	Ortogonalidade no domínio da frequência.	13
2.5	Representação na fibra óptica (um núcleo).	13
2.6	Ortogonalidade matemática entre subportadoras.	13
2.7	Instantes de amostragem das subportadoras OFDM.	14
2.8	XT entre núcleos.	15
2.9	Estrutura Espacial das Modulações	16
2.10	Seção transversal de uma fibra multinúcleo e pares de núcleos adjacentes. .	17
2.11	Acoplamento de potência entre dois núcleos adjacentes.	18
2.12	Influência do espaçamento entre núcleos no acoplamento óptico.	18
2.13	Influência do perfil de índice de refração no confinamento do modo óptico.	19
2.14	Influência da curvatura da fibra no acoplamento entre núcleos.	19
2.15	Topologia e rotas ópticas do exemplo de aplicação da CPT.	23
2.16	Adjacência dos núcleos para o <i>lightpath</i> analisado.	23
2.17	Coexistência espectral no enlace N3–N4 do exemplo.	24
2.18	Fragmentação em SDM-EONs	31
2.19	DPP	34
2.20	DLP	35
2.21	SPP	36
2.22	Exemplo de proteção compartilhada por <i>p-cycle</i> e comparação com DPP. .	37
2.23	Exemplo de funcionamento da SLP.	38
2.24	Variantes de DPP	39
2.25	Proteção total versus proteção parcial.	40

2.26	Falhas únicas, simples, múltiplas e duplas nos modelos SPP e DPP.	41
4.1	Alocação especializada de núcleos.	63
4.2	Passo 1: primeira demanda estabelecida. Os caminhos α e β estão ativos, enquanto γ permanece reservado como segundo caminho de proteção. . . .	64
4.3	Passo 2: entrada da demanda vizinha D_2 , entre os nós G e H . A linha pontilhada representa seu segundo caminho de proteção inativo.	65
4.4	Passo 3: formação do efeito dominó. Os X pretos indicam as falhas naturais; o X vermelho indica a falha induzida por XT após a ativação de $D_{1\gamma}$	65
4.5	Passo 4: prevenção do efeito dominó. A rota alternativa $G - F - I - H$ permanece disjunta dos enlaces envolvidos na recuperação de D_1	66
4.6	Exemplo de aplicação da DPPDF em topologia de 6 nós e 7 núcleos por enlace.	68
4.7	Metodologia para proteção dedicada contra falhas duplas.	74
5.1	Estratégia XT-avoid.	106
5.2	Estratégia XT-estimated.	106
5.3	DPPDF com especialização funcional dos núcleos: caminhos ativos em núcleos pares e caminhos de proteção em núcleos ímpares.	107
5.4	Topologia PanEuro modificada.	114
5.5	Topologia USANet modificada.	114
5.6	Taxa de bloqueio de banda no estudo de Júnior et al. [2]: topologia USANet.	117
5.7	Taxa de bloqueio de banda no estudo de Júnior et al. [2]: topologia PanEuro.	118
5.8	Sobrecarga de indisponibilidade no estudo de Júnior et al. [2]: topologia USANet.	119
5.9	Sobrecarga de indisponibilidade no estudo de Júnior et al. [2]: topologia PanEuro.	120
5.10	Taxa de bloqueio (BR) na topologia USANet.	121
5.11	Taxa de bloqueio (BR) na topologia PanEuro.	122
5.12	Taxa de bloqueio de banda (BBR) na topologia USANet.	123
5.13	Taxa de bloqueio de banda (BBR) na topologia PanEuro.	124
5.14	Uso de espectro na topologia USANet.	126
5.15	Uso de espectro na topologia PanEuro.	127

Lista de Tabelas

2.1	Símbolos utilizados no cálculo de <i>crosstalk</i>	20
2.2	Parâmetros dos formatos de modulação e limites de <i>inter-core crosstalk</i> . . .	22
2.3	Dados da rota e dos <i>lightpaths</i> envolvidos no exemplo	24
2.4	Interferentes em co-canal por enlace	24
2.5	Parâmetros físicos da fibra	25
2.6	Políticas de alocação de espectro	30
2.7	Valores típicos de MTTR em componentes ópticos [3].	32
2.8	Desempenho dos esquemas de proteção [1]	42
3.1	Comparação das principais estratégias de proteção contra falhas múltiplas e abordagens relacionadas	48
3.2	Comparação das principais abordagens <i>XT-Estimated</i> em SDM-EONs . . .	53
3.3	Comparação entre abordagens XT-Avoid e a proposta DPPDF	56
4.1	Caminhos disjuntos alocados para a demanda $A \rightarrow B$	69
4.2	Caminhos disjuntos alocados para a demanda $C \rightarrow B$	70
4.3	Caminhos disjuntos alocados para a demanda $C \rightarrow E$	70
5.1	Comparação entre as estratégias de alocação espectral.	107
5.2	Comparação entre o <i>framework</i> PLI e a heurística DPPDF.	108
5.3	Crescimento da formulação matemática em função do número de demandas.109	

Capítulo 1

Introdução

O crescimento contínuo do tráfego amplia a demanda por capacidade nas redes ópticas e aumenta a quantidade de serviços que podem ser afetados por uma interrupção. Segundo a União Internacional de Telecomunicações, o tráfego global de banda larga fixa foi estimado em 6 ZB em 2024, ante 5,1 ZB no ano anterior, enquanto o tráfego de banda larga móvel se aproximou de 1,3 ZB [4]. Expandir a transmissão e preservar sua disponibilidade são, portanto, requisitos complementares: uma rede de alta capacidade somente cumpre sua função quando consegue manter os serviços críticos diante das falhas previstas em seu projeto [5].

A proteção contra falhas duplas é particularmente relevante porque mecanismos planejados para uma única falha podem perder simultaneamente o caminho principal e sua primeira alternativa de recuperação. Estudos recentes tratam falhas múltiplas e correlacionadas como um problema prático de sobrevivência em redes ópticas [6, 7]. Portanto, limitar a proteção ao cenário de falha simples deixa sem resposta uma classe relevante de eventos.

Entre os mecanismos de sobrevivência, a *Dedicated Path Protection* (DPP) oferece recursos previamente provisionados e exclusivos para a recuperação. Essa característica elimina a disputa por capacidade de *backup* no instante da falha, reduz a dependência de decisões tomadas após a interrupção e proporciona maior previsibilidade operacional [1, 8]. Em contrapartida, a proteção dedicada contra falhas duplas requer três caminhos mutuamente disjuntos e amplia o consumo de recursos espectrais e espaciais [9]. Esse custo explica por que muitas propostas recorrem ao compartilhamento, à proteção parcial ou à restauração dinâmica para reduzir a capacidade previamente reservada [10, 11, 12].

Paralelamente ao desafio da sobrevivência, a aproximação das fibras mononúcleo de seus limites físicos levou ao desenvolvimento da *Spatial Division Multiplexing* (SDM). Nas SDM-EONs, fibras multinúcleo introduzem canais espaciais adicionais e ampliam a capacidade da infraestrutura. A literatura reporta ganhos de capacidade de até 30% e,

em cenários específicos de redes troncais e submarinas, reduções de até 37% em CAPEX e aproximadamente 8% em OPEX [13, 14, 15]. A dimensão espacial oferece, portanto, recursos adicionais para absorver o crescimento do tráfego e cria novas possibilidades de organização dos caminhos ópticos.

Essa ampliação vem acompanhada do *inter-core crosstalk*, interferência entre transmissões que utilizam regiões espectrais sobrepostas em núcleos adjacentes. O XT pode reduzir a margem de qualidade de transmissão e restringir a utilização de modulações espectralmente eficientes [16]. As estratégias *XT-Avoid* previnem a interferência por meio de regras estruturais, com menor esforço de avaliação, mas podem deixar recursos inutilizados [17, 18]. As estratégias *XT-Estimated* admitem maior reutilização mediante o cálculo da interferência, ao custo de avaliações adicionais durante o provisionamento ou a reconfiguração [16, 19, 15]. Em ambas, o XT é predominantemente tratado como uma restrição a evitar, estimar ou corrigir.

1.1 Motivação

Os *Service Level Agreements* (SLAs) estabelecem compromissos de disponibilidade e limites para interrupções, cujo descumprimento pode provocar penalidades financeiras e perda de confiabilidade [5]. Sob a perspectiva de *Quality of Protection* (QoP), serviços distintos podem requerer garantias diferentes de recuperação [20]: demandas críticas podem justificar recursos de proteção exclusivos, enquanto outros serviços podem admitir maior compartilhamento. Assim, o SLA não atua apenas como uma exigência técnica; ele também oferece uma justificativa operacional e econômica para a adoção seletiva de mecanismos com maior garantia de proteção [21].

O custo da DPP deve ser analisado também em redes cujos períodos de pico se alternam com intervalos de capacidade excedente. Dikbiyik et al. [1] demonstram que essa capacidade não utilizada pode apoiar a migração entre esquemas com diferentes níveis de disponibilidade, tempo de comutação e reserva de *backup*. A diferenciação de serviços sob crescimento de tráfego também permite associar níveis de proteção às obrigações estabelecidas pelos SLAs [21]. Esses resultados destacam como carga, capacidade excedente e classe de serviço condicionam a viabilidade de mecanismos com maior reserva de proteção.

A Figura 1.1 ilustra essa relação. O painel inferior apresenta um perfil de tráfego com dois ciclos diários: o número de conexões cresce durante os períodos de maior atividade e diminui acentuadamente nos intervalos de menor demanda. Como a infraestrutura precisa ser dimensionada para suportar os picos, parte da capacidade instalada permanece ociosa nos vales de tráfego. Dikbiyik et al. [1] analisam o emprego temporário dessa capacidade para oferecer níveis mais elevados de proteção sem exigir expansão imediata da rede.

O painel superior compara três políticas de proteção. A proteção dedicada no nível da conexão (*D-PAC*) mantém recursos exclusivos de *backup* e, por isso, apresenta maior utilização de enlaces, em contrapartida às maiores garantias de disponibilidade e ao menor tempo de comutação. A proteção compartilhada (*S-PAC*) consome menos recursos, mas oferece menor disponibilidade porque diferentes conexões dependem da mesma capacidade de recuperação. Entre esses extremos, a política baseada em capacidade excedente (*EC-PAC*) adapta o mecanismo empregado: quando há recursos ociosos, conexões podem migrar para esquemas com maior reserva de proteção; quando a carga cresce, parte delas retorna a esquemas menos exigentes em capacidade. A variação da curva EC-PAC relaciona, portanto, a qualidade da proteção disponível ao estado de ocupação da rede [1].

No escopo desta tese, a proteção dedicada é analisada considerando-se seu consumo no pior caso, a carga, a capacidade excedente e os requisitos de disponibilidade definidos pelos SLAs. A DPPDF atua na dimensão espectro-espacial: o segundo caminho dedicado é reservado em regiões que as políticas convencionais deixam subutilizadas em razão do *inter-core crosstalk*. A Figura 1.1 caracteriza a relação entre capacidade subutilizada e níveis distintos de proteção, que contextualiza a reserva adicional explorada pela proposta.

Considerando conjuntamente a dimensão espacial e as regiões limitadas pelo XT, esta tese investiga a redução do impacto da reserva exigida pela proteção dedicada contra falhas duplas. Caminhos de proteção que permanecem inativos em operação normal não produzem interferência óptica enquanto apenas reservados, embora ocupem capacidade espectral. A especialização funcional dos núcleos permite separar os recursos destinados aos caminhos ativos daqueles reservados ao segundo caminho de proteção e restringir a avaliação explícita do XT ao contexto em que essa proteção possa ser ativada. Como discutido no Capítulo 3, não foram identificadas propostas que combinem, simultaneamente, três caminhos dedicados disjuntos, especialização funcional de núcleos e reutilização controlada de regiões espectrais degradadas por XT.

A revisão bibliográfica desta tese identificou iniciativas relacionadas à proteção em SDM-EONs, como o mecanismo baseado em *p-cycles* FIPP, compartilhamento de espectro e *traffic grooming* de Oliveira e Fonseca [22], e a proteção por caminhos de *backup* compartilhados para múltiplos tipos de falha investigada por Zheng et al. [23]. Entretanto, até onde alcança a literatura examinada, não foi identificado trabalho que reúna três caminhos dedicados e disjuntos, especialização funcional dos núcleos e utilização controlada de recursos sujeitos a XT exclusivamente para a proteção inativa.

Esse controle é realizado por uma alocação híbrida. Os caminhos ópticos ativos são distribuídos segundo a política *XT-Avoid*, que impede a sobreposição espectral em núcleos adjacentes e evita o XT entre transmissões ativas. Para o segundo caminho de proteção, que permanece inativo durante a operação normal, a política *XT-Estimated* é aplicada de

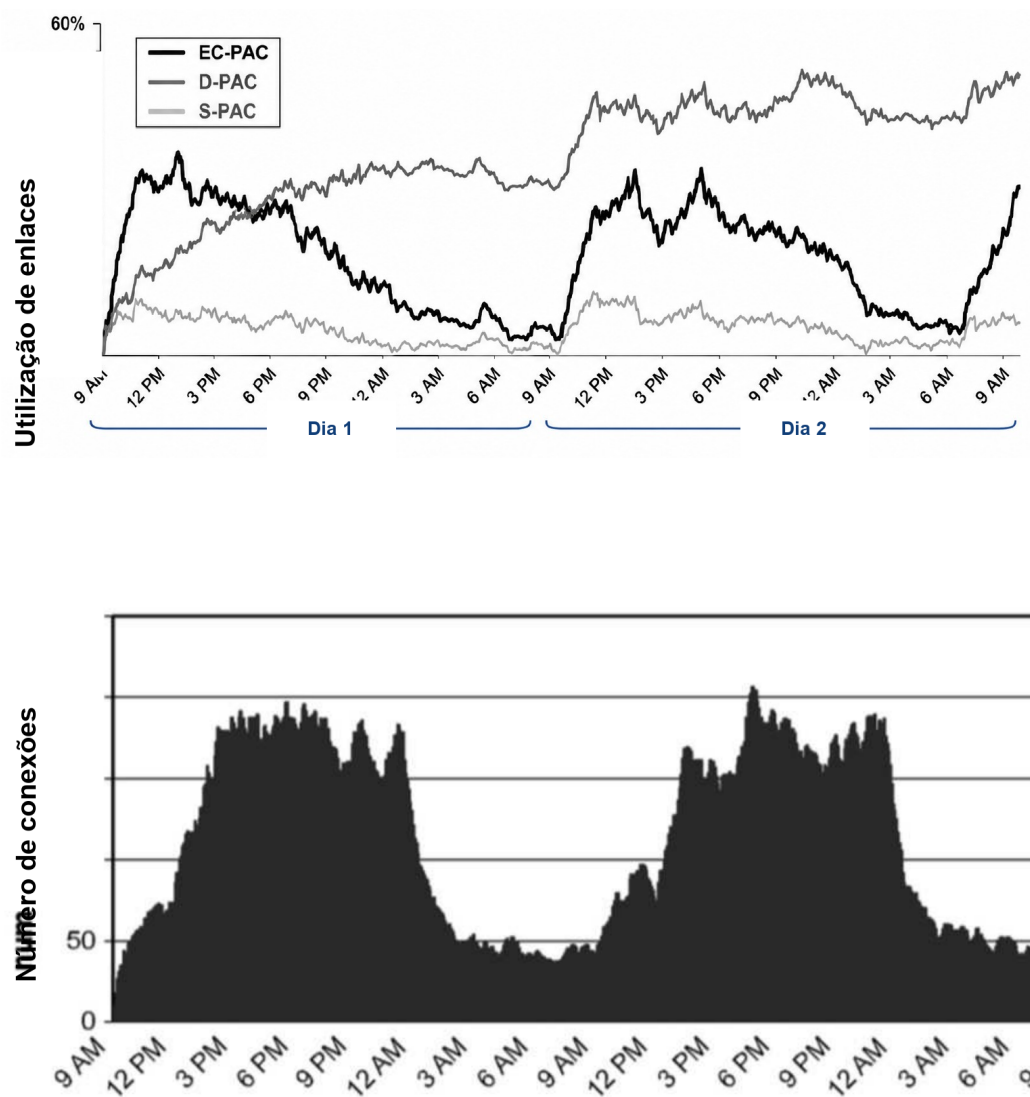


Figura 1.1: Relação entre a variação temporal do tráfego, a utilização de enlaces e diferentes níveis de proteção. O painel superior compara as políticas EC-PAC, D-PAC e S-PAC; o painel inferior apresenta o perfil temporal do número de conexões. Adaptado de Dikbiyik et al. [1].

forma seletiva: o XT é estimado somente quando existe interação potencial com caminhos ativos co-canais, e o candidato é aceito apenas quando o valor calculado permanece dentro do limite suportado pela modulação.

A proteção dedicada contra falhas duplas requer a reserva de recursos adicionais. Nesse contexto, a DPPDF explora recursos espectro-espaciais subutilizados para viabilizar essa proteção em redes SDM-EONs.

1.2 Hipótese

Um mecanismo de alocação capaz de considerar, de forma controlada, os efeitos do inter-core crosstalk na alocação de caminhos de proteção inativos pode viabilizar a proteção dedicada contra falhas duplas, minimizando o impacto da interferência sobre os caminhos ópticos ativos, a continuidade do tráfego e as taxas de bloqueio.

A avaliação considera, sob as mesmas topologias, cargas, sementes e parâmetros ópticos, as métricas BR e BBR das estratégias de proteção dupla utilizadas como referência. A viabilidade óptica dos caminhos de proteção é assegurada pelas restrições de XT e pelo procedimento de verificação descritos no Capítulo 4.1. O uso do espectro complementa essa análise ao quantificar a capacidade reservada para os caminhos úteis de proteção.

A partir dessa hipótese, este trabalho investiga o problema de proteção dedicada contra falhas duplas em SDM-EONs por meio de estratégias de escalonamento de recursos capazes de reutilizar, de forma controlada, regiões espectrais afetadas por *crosstalk*. Para isso, propõe-se o mecanismo *Dedicated Path Protection against Double Failure* (DPPDF), fundamentado na integração entre a especialização funcional de núcleos e a reutilização controlada de regiões espectrais degradadas por *crosstalk*. A especialização funcional organiza estruturalmente os caminhos ativos e de proteção inativos, enquanto o reaproveitamento seletivo do espectro degradado amplia a disponibilidade de recursos para viabilizar a proteção dedicada contra falhas duplas em SDM-EONs.

Diferentemente das abordagens tradicionais, que apenas evitam o *crosstalk* ou estimam limites aceitáveis de interferência, a proposta utiliza esse fenômeno de forma controlada como recurso estratégico de sobrevivência, reinterpretando limitações físicas da camada óptica como oportunidades para ampliação da resiliência da rede. Além disso, a adoção da SDM amplia a complexidade do problema de alocação, que evolui do tradicional RSA (*Routing and Spectrum Allocation*) para o RMSCA (*Routing, Modulation, Spectrum and Core Allocation*). Nesse contexto, cada demanda protegida contra falhas duplas deve possuir três caminhos mutuamente disjuntos, expandindo significativamente o espaço de soluções e o custo computacional associado ao problema.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta tese é propor e avaliar uma estratégia de alocação de recursos capaz de viabilizar a proteção dedicada contra falhas duplas em SDM-EONs, assegurando a continuidade do tráfego e controlando o impacto sobre as métricas de desempenho da rede, considerando explicitamente a presença de *crosstalk* no processo decisório.

Os objetivos específicos desta tese são:

- Analisar as limitações das abordagens clássicas de proteção, em especial SPP e DPP, em cenários de falhas duplas em redes ópticas;
- Identificar e formalizar restrições estruturais, espectrais e ópticas relevantes para a alocação de caminhos primários e de proteção em SDM-EONs, considerando explicitamente os efeitos do *inter-core crosstalk*;
- Avaliar o uso controlado de regiões espectrais degradadas por *crosstalk* na alocação de caminhos de proteção inativos, analisando seus impactos sobre a disponibilidade, a utilização do espectro e a viabilidade da proteção dedicada contra falhas duplas.

1.4 Principais Contribuições

As principais contribuições desta tese para o avanço do estado da arte em redes ópticas elásticas com multiplexação espacial (SDM-EONs) resilientes são:

(i) **Nova estratégia de alocação:**

Proposição de uma estratégia baseada na especialização funcional de núcleos e no uso controlado de regiões espectrais degradadas por *crosstalk* para prover proteção dedicada contra falhas duplas, reinterpretando limitações físicas da camada óptica como recursos exploráveis de forma segura.

(ii) **Modelagem do problema:**

Desenvolvimento de uma formulação em Programação Linear Inteira (PLI) para o problema RMSCA em SDM-EONs sob requisitos de proteção dedicada contra falhas duplas, incorporando restrições estruturais, espectrais e ópticas relacionadas ao uso controlado de *crosstalk* e à especialização funcional de núcleos.

(iii) **Solução algorítmica:**

Desenvolvimento de uma heurística operacional capaz de implementar, em tempo de provisão dinâmica, estratégias de reutilização seletiva de espectro degradado, preservando a estabilidade óptica da rede e evitando efeitos dominó durante processos de recuperação.

(iv) **Análise comparativa e validação:**

Avaliação de desempenho por meio de simulações em topologias de referência da literatura (USANet e PanEuro), estabelecendo um referencial comparativo frente às estratégias clássicas baseadas em *XT-avoid* e *XT-estimated*, utilizando métricas de taxa de bloqueio, bloqueio de banda e a utilização do espectro.

Essas contribuições consolidam uma base conceitual e prática para a proteção dedicada contra falhas duplas em SDM-EONs. A originalidade da proposta reside na integração entre a especialização funcional de núcleos e a reutilização controlada de regiões espectrais degradadas por *crosstalk*, permitindo que limitações físicas da camada óptica sejam exploradas, de forma segura, como recursos de engenharia de tráfego para ampliar a resiliência da rede sem comprometer o tráfego ativo.

1.5 Organização

O restante deste trabalho está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 2** — apresenta os conceitos fundamentais necessários à compreensão dos mecanismos de proteção em redes ópticas, com ênfase nas arquiteturas SDM. O capítulo aborda os aspectos da *camada física* que influenciam decisões de proteção, parâmetros e restrições de projeto, além de revisar os mecanismos clássicos de proteção. Também contextualiza o problema RMSCA (roteamento, modulação, espectro e núcleo), incluindo agregação de tráfego, fragmentação e *crosstalk*, estabelecendo a base conceitual necessária para as soluções propostas em redes SDM.
- **Capítulo 3** — revisa o estado da arte sobre mecanismos de proteção contra falhas duplas em SDM-EONs. A Seção 3.1 sintetiza os principais esquemas propostos na literatura, destacando suas estratégias, limitações e desafios estruturais. O capítulo discute especialmente a ausência de mecanismos dedicados voltados a falhas duplas e a necessidade de políticas de alocação *crosstalk-aware*. Ao final, são identificadas as lacunas às quais se relaciona a estratégia DPPDF apresentada no capítulo seguinte.
- **Capítulo 4** — apresenta a proposta DPPDF em sua totalidade. O capítulo detalha o uso controlado do *crosstalk*, a especialização funcional de núcleos, o modelo físico adotado e as regras de aceitação que sustentam a solução híbrida, combinando *XT-avoid* na operação regular e *XT-estimated* de forma restrita à ativação do caminho de proteção inativo em BPSK. Além disso, é desenvolvida uma formulação em Programação Linear Inteira (PLI) para o problema RMSCA com proteção dedicada contra falhas duplas, incorporando restrições de continuidade espectral, disjunção

de caminhos, especialização de núcleos e controle de *crosstalk*. O capítulo também apresenta o modelo de sistema, a função objetivo, as restrições de alocação, a verificação de QoT baseada em *crosstalk* residual, o pseudocódigo do algoritmo heurístico e sua análise de complexidade computacional. Todo o conteúdo deste capítulo refere-se exclusivamente à especificação técnica da DPPDF, enquanto a avaliação de desempenho é apresentada no capítulo seguinte.

- **Capítulo 5** — apresenta a avaliação numérica da DPPDF em SDM-EONs. O capítulo descreve a configuração experimental, incluindo topologias, modelos de tráfego, formatos de modulação e parâmetros físicos, bem como as métricas de desempenho adotadas (BR, BBR e utilização espectral). São realizadas comparações com abordagens clássicas da literatura, demonstrando que a DPPDF mantém níveis de BR e BBR compatíveis com estratégias tradicionais de proteção, ao mesmo tempo em que amplia o uso do espectro por meio da reutilização controlada de regiões degradadas por *crosstalk*, preservando o desempenho do tráfego ativo.
- **Capítulo 6** — apresenta as conclusões da tese e as perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais necessários para a compreensão e o planejamento de estratégias de proteção em redes ópticas, com foco em arquiteturas baseadas em Space Division Multiplexing (SDM).

2.1 Redes SDM

A evolução das redes ópticas evidencia a transição de arquiteturas baseadas em WDM para EONs e, mais recentemente, para SDM-EONs [24]. Enquanto as EONs introduziram elasticidade espectral por meio da alocação dinâmica de slots, as SDM-EONs preservam esse princípio e incorporam a dimensão espacial, permitindo a operação paralela de múltiplos núcleos em uma mesma fibra. Nesse contexto, as redes baseadas em *Spatial Division Multiplexing* (SDM) exploram a multiplexação espacial para ampliar a capacidade de transmissão, sendo tipicamente implementadas por fibras multinúcleo, nas quais diversos núcleos coexistem em uma única fibra física. A Figura 2.1 ilustra exemplos típicos de configurações de fibras multinúcleo utilizadas em redes SDM.

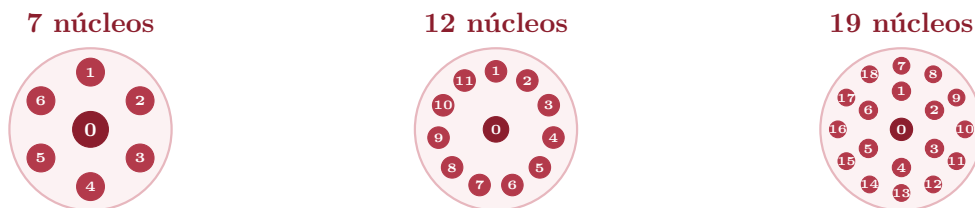


Figura 2.1: Configurações de fibras multinúcleo com 7, 12 e 19 núcleos.

Além dos ganhos técnicos associados ao aumento de capacidade, estudos indicam que a adoção das SDM-EONs também é motivada por vantagens econômicas e operacionais, com reduções de até 37% no uso de amplificadores multicore, CAPEX, e de até 8% em

estratégias de comutação conjunta, OPEX, resultando em ganhos de CAPEX e OPEX em redes troncais e submarinas [13, 14, 15].

Apesar desses benefícios, as SDM-EONs estão sujeitas a um conjunto de restrições físicas e operacionais que condicionam diretamente o estabelecimento dos caminhos ópticos e delimitam o espaço de decisão do problema de alocação de recursos. Além das restrições clássicas das EONs, como continuidade e contiguidade espectral, a multiplexação espacial introduz a necessidade de selecionar núcleos ao longo da rota óptica. A continuidade espectral e espacial impõe que os mesmos índices de slots e o mesmo núcleo sejam mantidos em todos os enlaces do caminho fim a fim. A contiguidade espectral, por sua vez, determina que os slots atribuídos à conexão formem um bloco adjacente e não fragmentado no espectro. Também devem ser consideradas as bandas de guarda entre caminhos ópticos adjacentes e a escolha do formato de modulação, que deve respeitar os limites de alcance e qualidade de transmissão.

A utilização de bandas de guarda é necessária para separar caminhos ópticos adjacentes em um mesmo núcleo, evitando interferência espectral. O formato de modulação adotado deve respeitar os limites impostos pela qualidade de transmissão, em particular o alcance máximo associado à distância percorrida. Por fim, a interferência entre núcleos adjacentes, conhecida como crosstalk inter-core, impõe restrições adicionais ao uso simultâneo de slots idênticos em núcleos vizinhos, afetando diretamente a qualidade de transmissão e tornando necessária sua consideração explícita no processo de alocação em SDM-EONs.

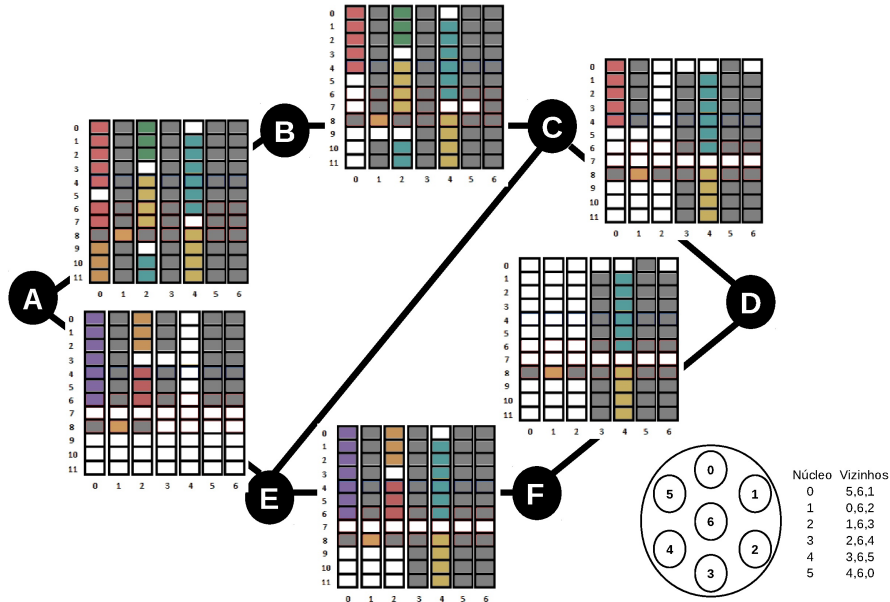


Figura 2.2: Restrições da tecnologia SDM

A Figura 2.2 reúne as restrições de alocação consideradas em redes SDM-EON. Cada

matriz associada a um enlace apresenta os sete núcleos nas colunas, identificados de 0 a 6, e os *slots* espectrais nas linhas, identificados de 0 a 11. As cores distinguem os diferentes caminhos ópticos estabelecidos: blocos da mesma cor pertencem à mesma conexão ao longo de seus enlaces. As células brancas correspondem a recursos livres e as células cinzas a recursos indisponíveis em razão do XT.

A continuidade espectral e de núcleo exige que um caminho óptico utilize a mesma faixa de *slots* e o mesmo núcleo em todos os enlaces da rota. Como exemplo, os blocos rosas representam uma conexão que ocupa o núcleo 0 e os *slots* de 0 a 4 nos enlaces A–B e B–C. A repetição da mesma cor, da mesma coluna e das mesmas posições espectrais nesses dois enlaces evidencia simultaneamente a continuidade de núcleo e a continuidade espectral. Os demais blocos coloridos representam outras conexões, como as faixas verdes, amarelas, azuis e laranjas. A contiguidade exige que os *slots* de cada cor formem um único bloco consecutivo em cada enlace; por isso, uma conexão não pode combinar, por exemplo, os *slots* 0, 2 e 4 de um mesmo núcleo. As linhas demarcadas entre blocos ocupados indicam as bandas de guarda, reservadas entre conexões vizinhas no mesmo núcleo para limitar a interferência espectral.

A figura também evidencia a fragmentação espectral. A fragmentação horizontal ocorre quando *slots* livres de um mesmo núcleo aparecem separados por blocos ocupados, como nos núcleos que alternam células brancas e coloridas. A fragmentação vertical corresponde ao desalinhamento desses espaços livres entre os núcleos de um mesmo enlace, reduzindo as alternativas para uma nova alocação que precisa selecionar simultaneamente núcleo e faixa espectral. Por fim, o XT é relevante quando dois núcleos fisicamente vizinhos utilizam faixas espectrais coincidentes: a disposição de vizinhança é apresentada no detalhe da fibra, e as células cinzas indicam as posições que não podem ser usadas sob a política de prevenção de *crosstalk*.

Nas EONs, a flexibilidade espectral decorre da grade formada por *frequency slots* de largura fixa: a rede pode agrupar quantidades distintas de *slots* contíguos para formar canais ajustados à taxa solicitada. Assim, os *slots* constituem as unidades de alocação de espectro. O OFDM é uma base tecnológica importante das EONs, pois suas subportadoras ortogonais permitem implementar canais ópticos com larguras ajustáveis. A elasticidade da alocação, contudo, é formalizada pela granularidade dos *frequency slots*, e não pela utilização isolada das subportadoras.

O OFDM é uma tecnologia de transmissão que implementa canais por meio de múltiplas subportadoras ortogonais. Essa ortogonalidade estabelece independência matemática entre as subportadoras: no domínio do tempo, cada uma completa um número inteiro de ciclos no intervalo de símbolo T_s ; no domínio da frequência, os zeros de seu espectro coincidem com os instantes de amostragem das demais. Assim, subportadoras espectralmente próximas podem ser transmitidas simultaneamente no mesmo núcleo da fibra sem interferência intra-canal. Como o espaçamento entre as frequências centrais é igual a $1/T_s$, essa organização combina elevada eficiência espectral com a recuperação independente de cada subportadora no receptor. As figuras a seguir detalham esses aspectos no tempo, na frequência, na transmissão óptica, na formulação matemática e no processo de amostragem.

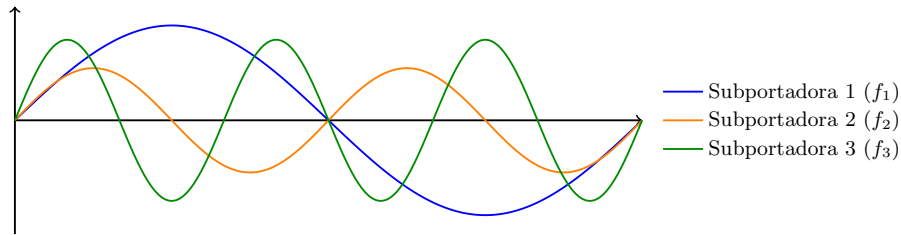


Figura 2.3: Ortogonalidade no domínio do tempo.

Na Figura 2.3, as subportadoras f_1 , f_2 e f_3 são sinais senoidais de frequências distintas. No intervalo de símbolo T_s , cada uma completa um número inteiro de ciclos, fazendo com que o produto interno entre duas subportadoras diferentes seja nulo nesse intervalo. Em consequência, embora os sinais coexistam temporalmente, cada subportadora pode ser recuperada sem interferência das demais quando a recepção é realizada nos instantes de amostragem definidos pelo sistema OFDM.

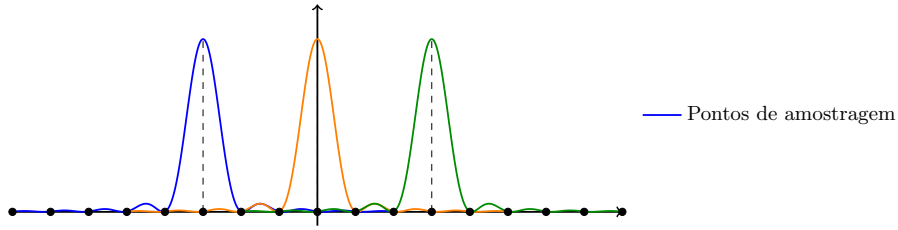


Figura 2.4: Ortogonalidade no domínio da frequência.

A Figura 2.4 mostra que os espectros das subportadoras podem se sobrepor no domínio da frequência. Cada curva colorida possui máximo em sua frequência central e apresenta zeros nos pontos de amostragem das demais subportadoras. Assim, ao amostrar o sinal na frequência central de uma subportadora, as contribuições das outras são nulas. Essa coincidência entre os zeros espectrais e os pontos de amostragem é o que permite o uso eficiente do espectro sem interferência intra-canal.

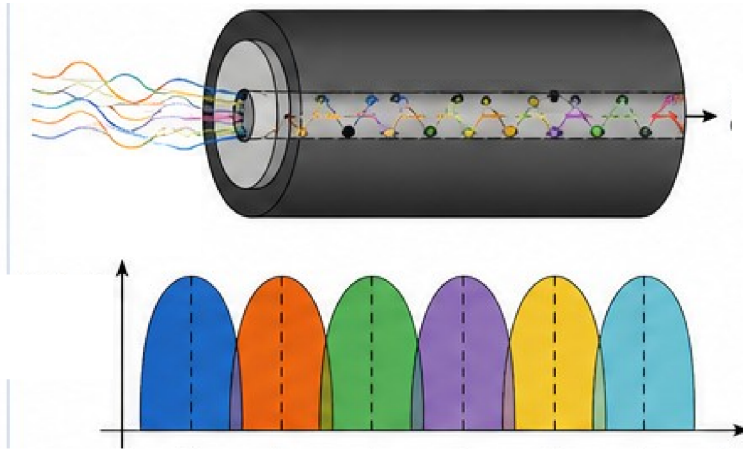


Figura 2.5: Representação na fibra óptica (um núcleo).

A Figura 2.5 representa a transmissão simultânea de múltiplas subportadoras no mesmo núcleo da fibra óptica. Na parte superior, as ondas coloridas compõem um único sinal OFDM propagado pelo núcleo; na parte inferior, as mesmas subportadoras ocupam faixas espectrais próximas e parcialmente sobrepostas. A separação entre as frequências centrais é definida pelo intervalo de símbolo, de modo que a sobreposição espectral não produz interferência intra-canal nos instantes de amostragem.

$$\int_0^{T_s} e^{j2\pi f_m t} e^{-j2\pi f_n t} dt = \int_0^{T_s} e^{j2\pi(f_m - f_n)t} dt = 0, \quad m \neq n.$$

Figura 2.6: Ortogonalidade matemática entre subportadoras.

A Figura 2.6 expressa a condição matemática de ortogonalidade entre duas subportadoras distintas, de frequências f_m e f_n , associadas, respectivamente, às subportadoras de índices m e n . A variável t representa o tempo, enquanto T_s define a duração do intervalo de símbolo OFDM. O termo $j = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária e a exponencial complexa $e^{j2\pi ft}$ descreve a rotação de fase de uma componente senoidal de frequência f . No intervalo $[0, T_s]$, o produto interno entre os dois sinais é nulo quando $m \neq n$. Assim, nos instantes de amostragem, uma subportadora não transfere energia para a outra, o que permite separá-las no receptor mesmo quando ocupam faixas espectrais adjacentes.

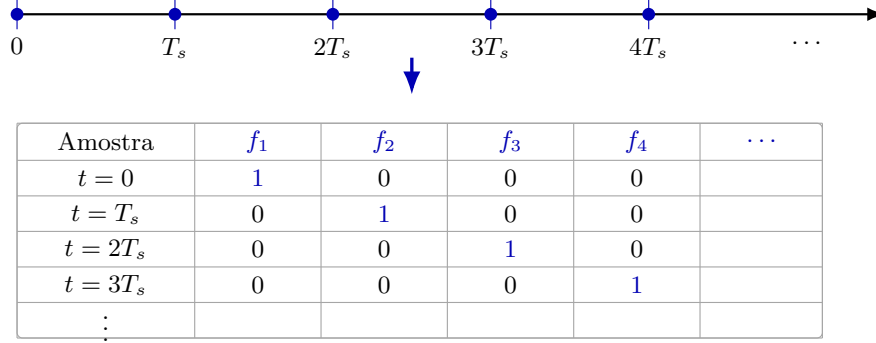


Figura 2.7: Instantes de amostragem das subportadoras OFDM.

A Figura 2.7 apresenta a detecção das subportadoras nos instantes discretos $t = kT_s$, com $k = 0, 1, 2, \dots$. A tabela associa cada instante de amostragem às componentes f_1 , f_2 , f_3 e f_4 : em cada linha, apenas a subportadora correspondente apresenta valor diferente de zero, enquanto as demais são nulas. Essa propriedade operacional da ortogonalidade permite recuperar cada componente do sinal OFDM sem interferência intra-canal das subportadoras vizinhas.

2.2 Crosstalk em Redes SDM-EON

Em redes SDM-EON, o XT torna-se relevante quando *lightpaths* estabelecidos em núcleos adjacentes ocupam simultaneamente faixas espectrais coincidentes ou parcialmente sobrepostas. Nessa condição, parte da potência óptica pode ser transferida para os núcleos vizinhos, produzindo interferência cujo nível acumulado deve permanecer abaixo do limite máximo tolerado pelo formato de modulação empregado para assegurar a Qualidade de Transmissão (QoT) da conexão [16, 25, 17, 15].

Embora o *crosstalk* tenha origem em fenômenos físicos de propagação óptica, seus efeitos estendem-se ao planejamento e à operação das redes SDM-EON, influenciando diretamente as decisões de roteamento, seleção de núcleos, alocação espectral e escolha

do formato de modulação. Por essa razão, a compreensão de seus mecanismos físicos e de seus impactos operacionais constitui um requisito para o desenvolvimento de estratégias eficientes de alocação de recursos.

A Figura 2.8 ilustra esse mecanismo, evidenciando que o XT não decorre de uma propriedade intrínseca de um núcleo isolado, mas da coexistência de caminhos ópticos em núcleos fisicamente adjacentes que utilizam a mesma faixa espectral.

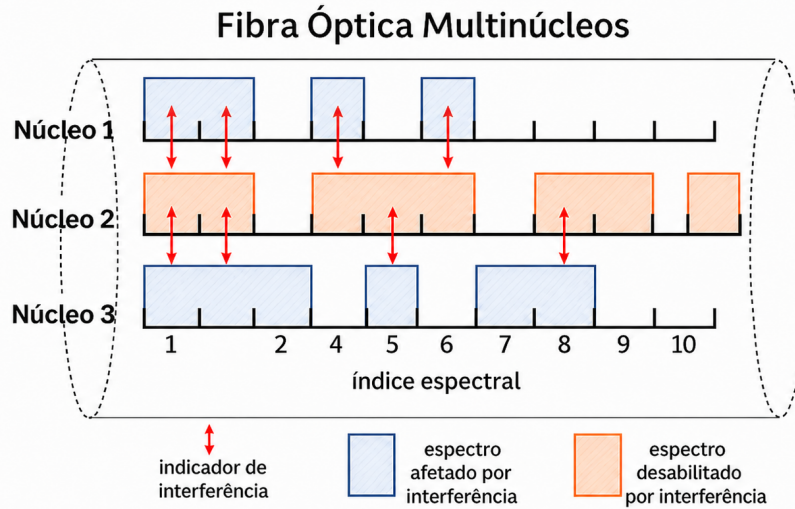


Figura 2.8: XT entre núcleos.

Na Figura 2.8, os blocos espectrais alocados em núcleos adjacentes ilustram situações de coincidência parcial ou total de espectro. As setas bidirecionais indicam o acoplamento de potência óptica entre núcleos vizinhos e, portanto, o surgimento de XT nos dois sentidos da interação. Os blocos azuis representam espectro afetado pela interferência: o caminho óptico correspondente está degradado, mas pode permanecer em operação quando o XT acumulado se mantém abaixo do limite tolerado pela modulação utilizada. Assim, uma modulação mais robusta pode viabilizar um caminho que seria inadequado para uma modulação de ordem mais elevada. Os blocos alarançados representam espectro desabilitado porque, na condição de modulação considerada, o XT acumulado ultrapassa o limiar de QoT. Essa distinção mostra que o XT não é uma condição binária: sua consequência depende simultaneamente da intensidade da interferência e da tolerância do formato de modulação.

Do ponto de vista da Qualidade de Transmissão (*Quality of Transmission* – QoT), o *crosstalk* atua como uma fonte adicional de interferência que pode comprometer a correta recepção do sinal óptico. À medida que o nível de XT acumulado aumenta, torna-se mais difícil distinguir corretamente os símbolos transmitidos, elevando a probabilidade de erros de transmissão. Por esse motivo, cada formato de modulação possui um limite máximo de

crosstalk tolerável, acima do qual a conexão deixa de atender aos requisitos de QoT. Dessa forma, a avaliação do XT tornou-se um dos principais critérios utilizados para verificar a viabilidade óptica de conexões em redes SDM-EON.

Essa característica evidencia que a avaliação do *crosstalk* não pode ser tratada como um critério binário restrito à conexão em estabelecimento. A inserção de um novo *lightpath* modifica o nível de interferência dos circuitos vizinhos, ao mesmo tempo em que passa a receber interferência deles. Assim, a viabilidade de uma nova alocação depende não apenas do XT recebido pela conexão candidata, mas também do impacto que ela produz sobre as conexões já estabelecidas, exigindo uma avaliação conjunta dos níveis de interferência na rede.

Conforme ilustrado na Figura 2.9, formatos de modulação mais densos, como 32QAM e 64QAM, apresentam menor separação entre símbolos na constelação, tornando-se mais sensíveis ao *crosstalk*. Em contrapartida, modulações mais robustas, como BPSK e QPSK, possuem maior distância entre símbolos e, conseqüentemente, maior tolerância à interferência inter-core. Dessa forma, um nível de XT que inviabiliza uma modulação de alta ordem pode permanecer aceitável para formatos mais robustos.

Em situações sem coincidência espectral entre *lightpaths* estabelecidos em núcleos adjacentes, o acoplamento inter-core tende a ser desprezível. Essa característica reforça a importância da alocação conjunta de espectro e núcleo em redes SDM-EON e fundamenta o uso de limiares de XT como critério de viabilidade óptica.

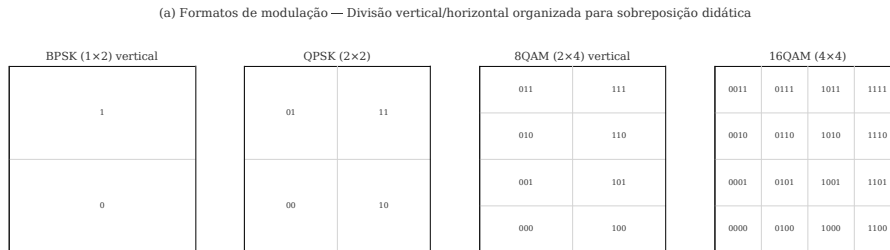


Figura 2.9: Estrutura Espacial das Modulações

Essas características tornam evidente que a avaliação do *crosstalk* deve considerar simultaneamente a disposição espacial dos núcleos, a ocupação espectral da rede e os parâmetros físicos da fibra. Por essa razão, modelos analíticos capazes de estimar o XT acumulado ao longo da rota tornaram-se parte fundamental do processo de alocação de recursos em redes SDM-EON.

2.2.1 Cálculo de Crosstalk

A estimativa do *inter-core crosstalk* (XT) desempenha um papel fundamental no processo de alocação de recursos em redes SDM-EON, pois permite avaliar o nível de interferência

óptica entre núcleos adjacentes durante o estabelecimento dos *lightpaths*. Para essa finalidade, a literatura emprega predominantemente a *Coupled Power Theory* (CPT), modelo que descreve a transferência média de potência óptica entre núcleos adjacentes durante a propagação do sinal [26, 16, 25, 27, 28].

Com base na *Coupled Power Theory* (CPT), o nível de *crosstalk* é estimado a partir de três fatores principais: o coeficiente médio de acoplamento óptico (h_e), que representa a intensidade do acoplamento entre núcleos adjacentes; o comprimento do enlace (L_e), responsável pelo acúmulo da interferência ao longo da propagação; e o número de núcleos interferentes (n_e), correspondente à quantidade de núcleos adjacentes que utilizam simultaneamente a mesma faixa espectral. De forma simplificada, a CPT pode ser representada por uma função do tipo $XT = f(h_e, L_e, n_e)$, indicando que o nível de *crosstalk* aumenta à medida que qualquer um desses parâmetros se eleva.

Antes da formulação matemática, as Figuras 2.10–2.14 detalham os elementos físicos sintetizados por h_e . A adjacência define quais pares de núcleos podem interagir; o campo evanescente explica a transferência de potência entre esses pares; e o espaçamento, o perfil de índice de refração e a curvatura determinam o grau de confinamento e de sobreposição dos campos ópticos.

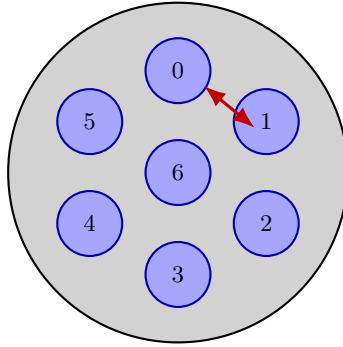


Figura 2.10: Seção transversal de uma fibra multinúcleo e pares de núcleos adjacentes.

A Figura 2.10 mostra uma fibra com sete núcleos: seis periféricos e um núcleo central. A seta destaca um par de núcleos adjacentes, para o qual pode ocorrer acoplamento de potência. A vizinhança física não envolve todos os núcleos da fibra indistintamente; ela define os pares considerados na avaliação do XT e, em cada enlace, contribui para determinar o número de interferentes n_e .

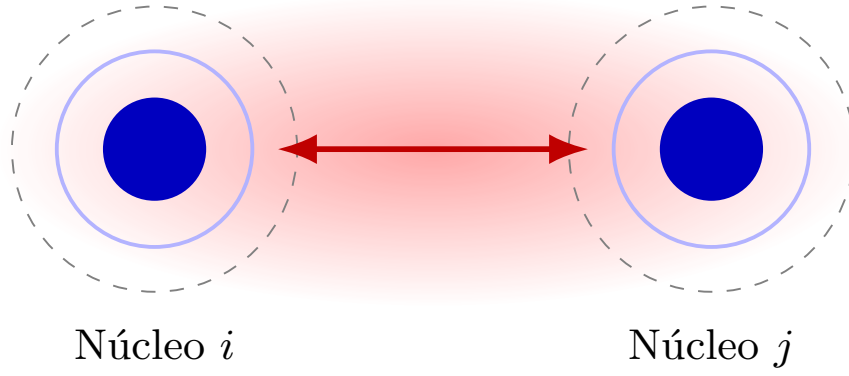


Figura 2.11: Acoplamento de potência entre dois núcleos adjacentes.

Na Figura 2.11, a luz guiada no núcleo i apresenta um campo evanescente que se estende além de sua região de confinamento. Quando esse campo se sobrepõe ao do núcleo adjacente j , uma parcela da potência pode ser transferida entre os núcleos. Essa transferência é a origem física do *inter-core crosstalk* e corresponde ao acoplamento cuja intensidade média é representada por h_e .



Figura 2.12: Influência do espaçamento entre núcleos no acoplamento óptico.

A Figura 2.12 compara dois espaçamentos entre núcleos, indicados por d . No arranjo de maior separação, a sobreposição entre os campos evanescentes é reduzida e o acoplamento tende a ser menor. No arranjo de menor separação, os campos se aproximam e a transferência de potência torna-se mais intensa. Portanto, o espaçamento entre núcleos, representado por w_{tr} na Eq. (2.1), influencia diretamente o valor de h_e .

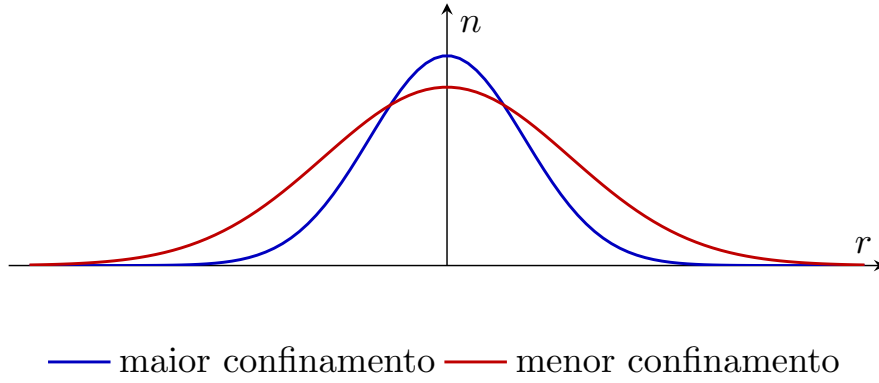


Figura 2.13: Influência do perfil de índice de refração no confinamento do modo óptico.

A Figura 2.13 ilustra o efeito do perfil de índice de refração sobre o confinamento do modo óptico. Um perfil com maior contraste de índice mantém o campo mais concentrado no núcleo, diminuindo o vazamento para a região adjacente. Um confinamento menor, por sua vez, amplia o campo evanescente e aumenta a possibilidade de acoplamento, efeito incorporado ao coeficiente modal k da Eq. (2.1).

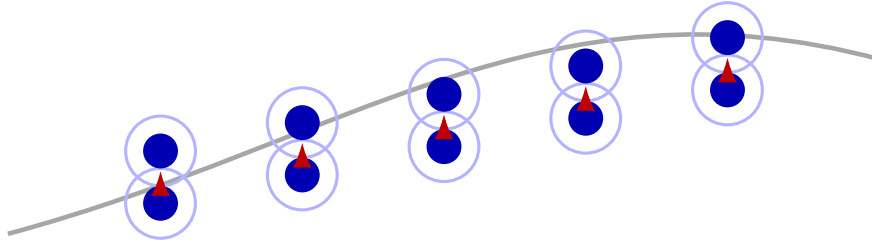


Figura 2.14: Influência da curvatura da fibra no acoplamento entre núcleos.

A Figura 2.14 representa uma fibra sob curvatura. A deformação altera o confinamento e a trajetória dos modos ópticos, podendo aproximar a distribuição de potência dos núcleos adjacentes e elevar o acoplamento. Por isso, além do projeto geométrico e do perfil de índice, a curvatura e outras perturbações externas, como microcurvaturas e variações de temperatura, devem ser consideradas na caracterização de h_e .

Em síntese, h_e expressa a propensão física da fibra ao acoplamento. Depois de determinado a partir desses parâmetros estruturais, ele é combinado com o comprimento do enlace L_e e com o número de núcleos adjacentes ativos em co-canal n_e para estimar o XT de cada enlace pela CPT. A formulação matemática desses parâmetros é apresentada a seguir.

Embora o *inter-core crosstalk* (XT) represente apenas um dos fatores que afetam a Qualidade de Transmissão (QoT), ele é amplamente utilizado na literatura como critério

prático de viabilidade física em redes SDM-EON. Isso ocorre porque os demais efeitos de propagação, como ruído ASE, dispersão e não linearidades, normalmente já estão contemplados nos limites de alcance associados a cada formato de modulação. Dessa forma, em vez de recalcular o *Optical Signal-to-Noise Ratio* (OSNR) a cada tentativa de alocação, estima-se apenas o XT acumulado ao longo da rota, comparando-o com o limite máximo tolerado pela modulação utilizada. Essa simplificação reduz significativamente o custo computacional dos algoritmos de alocação, preservando uma representação física amplamente adotada na literatura.

A Tabela 2.1 resume a notação e os principais parâmetros empregados na formulação matemática do cálculo de *crosstalk* apresentada nesta seção.

Tabela 2.1: Símbolos utilizados no cálculo de *crosstalk*

Símbolo	Descrição
l	Identificador do <i>lightpath</i> avaliado.
$p(l)$	Sequência de enlaces que compõem a rota do pedido l .
$e \in p(l)$	Enlace pertencente à rota $p(l)$.
$M(l)$	Formato de modulação empregado pelo caminho l (por exemplo, BPSK, QPSK e 16QAM).
L_e	Comprimento físico do enlace e .
n_e	Número de núcleos adjacentes ativos em co-canal no enlace e .
h_e	Coefficiente médio de acoplamento óptico entre núcleos no enlace e , conforme a Eq. (2.1).
k	Coefficiente modal de acoplamento da fibra óptica.
r	Raio de curvatura da fibra.
β	Constante de propagação do modo óptico.
w_{tr}	Espaçamento entre núcleos (<i>core pitch</i>).
$XT(l, e)$	XT médio em escala linear no enlace e da rota de l , calculado pela Eq. (2.2).
$XT_{tot}(l)$	XT acumulado em escala linear ao longo da rota $p(l)$, conforme a Eq. (2.3).
$XT_{dB}(l)$	XT acumulado em decibéis para o caminho l , conforme a Eq. (2.4).
$XT_{th}(M(l))$	Limiar máximo de XT tolerável pela modulação $M(l)$, utilizado na condição de aceitação da Eq. (2.5).

O coeficiente médio de acoplamento óptico por unidade de comprimento no enlace e é dado por:

$$h_e = \frac{2k^2r}{\beta w_{tr}}, \quad (2.1)$$

em que k representa o coeficiente modal de acoplamento da fibra óptica, que quantifica a intensidade do acoplamento entre os modos ópticos propagados em núcleos adjacentes;

r corresponde ao raio de curvatura da fibra; β denota a constante de propagação do modo óptico fundamental; e w_{tr} representa o espaçamento entre núcleos (*core pitch*).

A Eq. (2.1) modela a intensidade média do acoplamento óptico entre núcleos adjacentes, reunindo os principais parâmetros físicos da fibra que influenciam o fenômeno de *inter-core crosstalk*. Como esses parâmetros dependem exclusivamente das características da fibra multicore, o valor de h_e permanece constante para todos os *lightpaths* estabelecidos nessa fibra. Assim, seu cálculo é realizado apenas uma vez e posteriormente reutilizado na estimativa do *crosstalk* dos diferentes enlaces da rede.

Com base na formulação clássica da *Coupled Power Theory* (CPT) [26, 16, 25], o *inter-core crosstalk* médio recebido pelo *lightpath* l no enlace $e \in p(l)$ é estimado por:

$$XT(l, e) = \frac{n_e - n_e \exp[-(n_e + 1) 2h_e L_e]}{1 + n_e \exp[-(n_e + 1) 2h_e L_e]}. \quad (2.2)$$

em que n_e representa o número de núcleos adjacentes ativos em co-canal no enlace considerado, L_e corresponde ao comprimento físico do enlace e h_e é o coeficiente médio de acoplamento óptico obtido pela Eq. (2.1).

A Eq. (2.2) estima o nível médio de *crosstalk* produzido em um único enlace da rota. O valor obtido aumenta à medida que cresce o número de núcleos interferentes em co-canal (n_e), o comprimento do enlace (L_e) ou a intensidade do acoplamento óptico entre núcleos (h_e). Assim, enlaces mais longos ou sujeitos a maior interferência tendem a contribuir mais significativamente para o *crosstalk* acumulado da conexão.

O *crosstalk* acumulado ao longo da rota é obtido pela soma das contribuições produzidas em cada enlace percorrido pelo *lightpath*. Assim, o XT total associado ao caminho l é dado por:

$$XT_{\text{tot}}(l) = \sum_{e \in p(l)} XT(l, e). \quad (2.3)$$

em que $p(l)$ representa o conjunto de enlaces que compõem a rota do *lightpath* l , e $XT(l, e)$ corresponde ao *crosstalk* estimado para cada enlace pela Eq. (2.2).

A Eq. (2.3) expressa o caráter acumulativo do *inter-core crosstalk*, considerando que a interferência gerada em cada enlace contribui para a degradação total da conexão. Dessa forma, rotas mais longas ou com maior incidência de interferentes em co-canal tendem a apresentar valores mais elevados de XT acumulado.

Como os limites de *crosstalk* tolerados pelos diferentes formatos de modulação são normalmente expressos em decibéis (dB), o valor acumulado obtido pela Eq. (2.3) é convertido da escala linear para a escala logarítmica por meio de:

$$XT_{\text{dB}}(l) = 10 \log_{10}(XT_{\text{tot}}(l)). \quad (2.4)$$

em que $XT_{\text{tot}}(l)$ corresponde ao *crosstalk* acumulado em escala linear ao longo da rota e $XT_{\text{dB}}(l)$ representa o mesmo valor expresso em decibéis.

O critério de aceitação adotado consiste em comparar o *crosstalk* acumulado, expresso em decibéis, com o limite máximo tolerado pelo formato de modulação utilizado. A conexão é considerada fisicamente viável quando o valor estimado de $XT_{\text{dB}}(l)$ permanece inferior ao limiar correspondente à modulação empregada. Caso esse limite seja excedido, o *lightpath* não atende aos requisitos de Qualidade de Transmissão (QoT) e, consequentemente, deve ser rejeitado ou realocado.

$$XT_{\text{dB}}(l) \leq XT_{\text{th}}(M(l)). \quad (2.5)$$

Os limiares máximos de XT variam de acordo com o formato de modulação, refletindo a diferente sensibilidade de cada técnica à interferência entre núcleos adjacentes. Em geral, modulações que transmitem maior quantidade de informação por símbolo apresentam menor tolerância ao *crosstalk*, enquanto modulações mais robustas, como BPSK, suportam níveis mais elevados de interferência. A Tabela 2.2 apresenta os parâmetros considerados neste trabalho e os respectivos limites de XT adotados com base na literatura [26, 16, 15, 17].

Tabela 2.2: Parâmetros dos formatos de modulação e limites de *inter-core crosstalk*.

Formato	Bits/símbolo	Gb/s por slot	Alcance Máx. (km)	Limite de XT (dB)
BPSK	1	12.5	8000	−22.75
QPSK	2	25.0	4000	−25.76
8QAM	3	37.5	2000	−28.77
16QAM	4	50.0	1000	−31.79
32QAM	5	62.5	500	−34.80
64QAM	6	75.0	250	−37.81

2.2.1.1 Exemplo de aplicação da Coupled Power Theory (CPT)

A seguir, apresenta-se um exemplo de aplicação da *Coupled Power Theory* (CPT) ao longo de uma rota óptica em uma rede SDM-EON. O exemplo é organizado em três etapas visuais: primeiro, identifica-se a rota e os caminhos ópticos presentes na topologia; em seguida, determina-se quais núcleos são adjacentes ao núcleo do *lightpath* analisado; por fim, verifica-se, em cada enlace, a coincidência espectral entre o caminho analisado e os caminhos em núcleos adjacentes. Essas informações definem os valores de L_e e n_e utilizados nas equações da CPT. O cálculo numérico do XT por enlace e sua acumulação ao longo da rota são apresentados posteriormente nesta subseção.

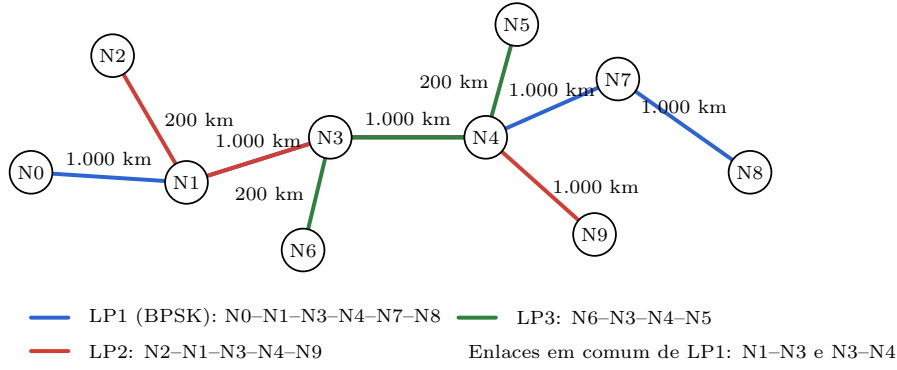


Figura 2.15: Topologia e rotas ópticas do exemplo de aplicação da CPT.

A Figura 2.15 apresenta a rede usada no exemplo e os três caminhos ópticos nela estabelecidos. Um caminho óptico é a sequência de enlaces percorrida por uma conexão entre sua origem e seu destino. O LP1, em azul e modulado em BPSK, é a conexão cuja interferência será avaliada. Os caminhos LP2, em vermelho, e LP3, em verde, são mantidos no exemplo porque compartilham alguns enlaces com LP1 e, nas etapas seguintes, podem atuar como fontes de *crosstalk*. Para cada enlace percorrido por LP1, seu comprimento L_e é utilizado no cálculo da CPT.

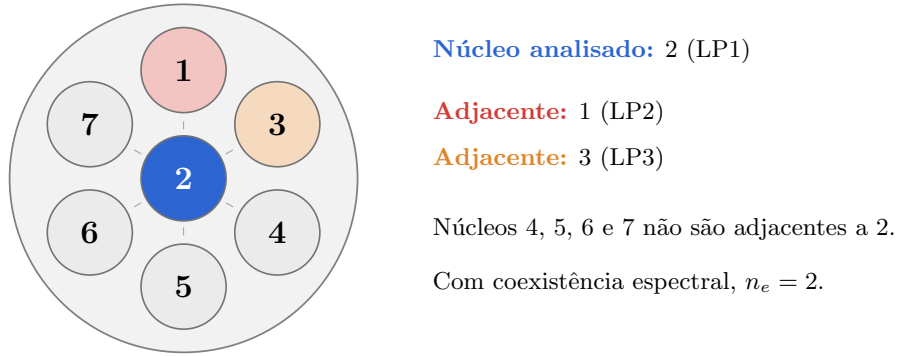


Figura 2.16: Adjacência dos núcleos para o *lightpath* analisado.

A Figura 2.16 mostra a seção transversal da fibra em um dos enlaces da rota. O LP1 utiliza o núcleo 2, localizado no centro. Apenas os núcleos 1 e 3 são fisicamente adjacentes a ele; por isso, somente os caminhos que utilizam esses núcleos podem transferir potência óptica diretamente para o LP1. Como LP2 ocupa o núcleo 1 e LP3 ocupa o núcleo 3, ambos são candidatos a interferentes. Os núcleos 4, 5, 6 e 7 não são vizinhos diretos do núcleo 2 e não contribuem diretamente para o XT desse caminho. Quando LP2 e LP3 também utilizam a mesma faixa espectral de LP1, há dois núcleos adjacentes ativos e, portanto, $n_e = 2$.

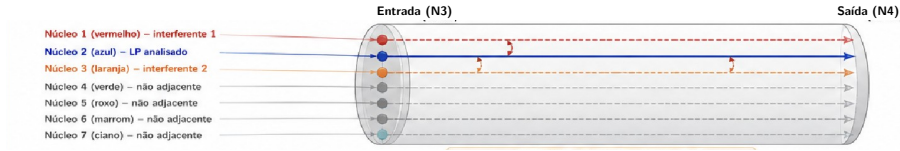


Figura 2.17: Coexistência espectral no enlace N3–N4 do exemplo.

A Figura 2.17 detalha a situação no enlace entre os nós N3 e N4, cujo comprimento é de 1.000 km. A linha azul representa o LP1 no núcleo 2; as linhas vermelha e laranja representam LP2 e LP3 nos núcleos adjacentes 1 e 3. As setas indicam a transferência de uma pequena parcela de potência óptica dos núcleos adjacentes para o núcleo analisado. Como os três caminhos ocupam *slots* coincidentes nesse enlace, LP2 e LP3 produzem XT sobre LP1. A CPT calcula essa contribuição local e, ao final, as contribuições dos enlaces da rota de LP1 são acumuladas para obter o XT total recebido pela conexão.

As tabelas a seguir apresentam os dados da rota analisada, os *lightpaths* interferentes identificados em cada enlace e os parâmetros físicos da fibra necessários para a aplicação da *Coupled Power Theory* (CPT).

Tabela 2.3: Dados da rota e dos *lightpaths* envolvidos no exemplo

Parâmetro	Valor
<i>Lightpath</i> analisado	LP1 (azul)
Modulação de LP1	BPSK
Núcleo de LP1	2
Slots de LP1	{4, 5, 6}
$p(l)$	$\{(N0, N1), (N1, N3), (N3, N4), (N4, N7), (N7, N8)\}$
$ p(l) $	5 enlaces
L_{tot}	5000 km
LP2 interferente	núcleo 1, slots {2, 4, 5, 6, 7}
LP3 interferente	núcleo 3, slots {4, 5, 6}
Núcleos adjacentes ao núcleo 2	{1, 3}

Tabela 2.4: Interferentes em co-canal por enlace

Enlace	Comprimento	Interferentes co-canal	n_e
$(N0, N1)$	1000 km	–	0
$(N1, N3)$	1000 km	LP2	1
$(N3, N4)$	1000 km	LP2, LP3	2
$(N4, N7)$	1000 km	–	0
$(N7, N8)$	1000 km	–	0

Tabela 2.5: Parâmetros físicos da fibra

Variável	Valor	Descrição
k	3.16×10^{-5}	Coefficiente de acoplamento entre modos ópticos da fibra.
r	0.055 m	Raio de curvatura da fibra.
β	$4.0 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$	Constante de propagação do modo óptico.
w_{tr}	$45 \times 10^{-6} \text{ m}$	Espaçamento entre núcleos (<i>core pitch</i>).
L_e	1000 km = 10^6 m	Comprimento físico de cada enlace.

Os valores apresentados na Tabela 2.5 são inicialmente substituídos na Eq. (2.1) para determinar o coeficiente médio de acoplamento óptico da fibra.

Utilizando os valores da Tabela 2.5, obtém-se:

$$h_e = \frac{2 (3.16 \times 10^{-5})^2 (0.055)}{(4.0 \times 10^6) (45 \times 10^{-6})}. \quad (2.6)$$

Efetutando a substituição numérica, obtém-se:

$$h_e = 6.10 \times 10^{-13} \text{ m}^{-1}. \quad (2.7)$$

Com o coeficiente médio de acoplamento óptico determinado, a Eq. (2.2) pode ser aplicada para estimar o *crosstalk* recebido pelo *lightpath* analisado em cada enlace de sua rota. Como o XT decorre do acoplamento entre transmissões simultâneas em núcleos adjacentes utilizando a mesma faixa espectral, apenas os enlaces que apresentam interferentes em co-canal contribuem para o cálculo. De acordo com a Tabela 2.4, essa condição ocorre apenas nos enlaces $(N1, N3)$ e $(N3, N4)$, que são analisados a seguir.

Para o enlace $(N1, N3)$, tem-se:

$$n_e = 1, \quad L_e = 10^6 \text{ m}, \quad h_e = 6.10 \times 10^{-13} \text{ m}^{-1}.$$

Substituindo esses valores na Eq. (2.2), obtém-se:

$$XT(l, (N1, N3)) = \frac{1 - \exp[-2(2)(6.10 \times 10^{-13})(10^6)]}{1 + \exp[-2(2)(6.10 \times 10^{-13})(10^6)]} = 1.22 \times 10^{-6}. \quad (2.8)$$

De forma análoga, para o enlace $(N3, N4)$, tem-se:

$$n_e = 2, \quad L_e = 10^6 \text{ m}, \quad h_e = 6.10 \times 10^{-13} \text{ m}^{-1}.$$

Assim,

$$XT(l, (N3, N4)) = \frac{2 - 2 \exp[-3(2)(6.10 \times 10^{-13})(10^6)]}{1 + 2 \exp[-3(2)(6.10 \times 10^{-13})(10^6)]} = 2.44 \times 10^{-6}. \quad (2.9)$$

Os valores de XT obtidos para cada enlace representam a interferência recebida pelo *lightpath* ao longo de sua rota. Como o *crosstalk* se acumula durante a propagação do sinal, o nível total de interferência é obtido pela soma das contribuições individuais de cada enlace:

$$XT_{\text{tot}}(l) = \sum_{e \in p(l)} XT(l, e). \quad (2.10)$$

Como os enlaces $(N0, N1)$, $(N4, N7)$ e $(N7, N8)$ não apresentam interferentes em co-canal, sua contribuição para o XT acumulado é nula. Assim, o valor de $XT_{\text{tot}}(l)$ resulta apenas da soma das contribuições dos enlaces $(N1, N3)$ e $(N3, N4)$:

$$XT_{\text{tot}}(l) = XT(l, (N1, N3)) + XT(l, (N3, N4)). \quad (2.11)$$

Como os limiares de *crosstalk* são expressos em decibéis, o valor acumulado de XT é convertido da escala linear para a escala logarítmica por meio da seguinte expressão:

$$XT_{\text{dB}}(l) = 10 \log_{10}(XT_{\text{tot}}(l)). \quad (2.12)$$

Substituindo o valor obtido para $XT_{\text{tot}}(l)$, resulta:

$$XT_{\text{dB}}(l) = 10 \log_{10}(3.66 \times 10^{-6}). \quad (2.13)$$

$$XT_{\text{dB}}(l) \approx -54.36 \text{ dB}. \quad (2.14)$$

O valor obtido deve ser comparado ao limite máximo de *crosstalk* tolerado pelo formato de modulação empregado. Como o *lightpath* LP1 utiliza modulação BPSK, aplica-se o respectivo limite apresentado na Tabela 2.2. Como

$$-54.36 \text{ dB} < -22.75 \text{ dB}, \quad (2.15)$$

o *lightpath* satisfaz o requisito de Qualidade de Transmissão (QoT) associado ao *inter-core crosstalk*, sendo considerado fisicamente viável.

2.2.2 Técnicas de Mitigação de Crosstalk

Uma vez que o *inter-core crosstalk* pode comprometer a Qualidade de Transmissão (QoT) das conexões ópticas, diversos trabalhos passaram a incorporar mecanismos específicos para controlar os níveis de interferência durante o processo de roteamento e alocação de recursos em SDM-EONs. A partir das estimativas de XT obtidas por modelos como a *Coupled Power Theory* (CPT), a literatura consolidou duas estratégias principais para

lidar com esse problema: *XT-Avoid* [17, 18] e *XT-Estimated* [19, 15, 16, 25]. Essas abordagens diferem fundamentalmente na forma como utilizam a informação de XT durante o processo de alocação.

A abordagem *XT-Avoid* trata o *crosstalk* como uma restrição estrutural de ocupação espectral, impondo que núcleos adjacentes não utilizem simultaneamente os mesmos índices espectrais. Nessa estratégia, a coexistência espectral entre núcleos vizinhos é evitada preventivamente, dispensando o cálculo explícito do XT durante o estabelecimento das conexões. Como consequência, a complexidade computacional do processo de alocação é reduzida, uma vez que não há necessidade de avaliar continuamente os níveis de interferência. Entretanto, essa simplificação tende a produzir decisões conservadoras, pois regiões espectrais potencialmente utilizáveis podem permanecer ociosas mesmo quando os níveis reais de XT seriam compatíveis com os limites de QoT exigidos pela modulação empregada.

Em contraste, a estratégia *XT-Estimated* incorpora explicitamente o XT como critério de decisão durante a alocação dos recursos. Nessa abordagem, os níveis de interferência são estimados com base nos núcleos efetivamente ativos, nas faixas espectrais ocupadas e nas características físicas dos enlaces, utilizando formulações como as apresentadas na seção anterior. O XT acumulado ao longo da rota é então comparado aos limiares de aceitação da modulação selecionada para verificar a viabilidade física da conexão. Essa abordagem permite maior aproveitamento espectral e decisões menos restritivas do que as obtidas por *XT-Avoid*. Por outro lado, a necessidade de recalcular continuamente os níveis de XT durante o provisionamento aumenta significativamente o custo computacional do processo de alocação, sobretudo quando também se verifica o impacto da nova conexão sobre os *lightpaths* já estabelecidos potencialmente afetados.

De modo geral, as abordagens *XT-Avoid* e *XT-Estimated* representam formas distintas de controlar o impacto do *crosstalk* em redes SDM-EON. Enquanto a primeira reduz a complexidade ao evitar preventivamente situações de interferência, a segunda amplia o aproveitamento espectral ao admitir alocações condicionadas à verificação dos limiares de QoT.

2.3 Roteamento, Modulação, Espectro e Alocação de Núcleos (RMSCA)

O problema de *Routing, Modulation, Spectrum and Core Allocation* (RMSCA) consiste na alocação conjunta dos recursos necessários ao estabelecimento de um *lightpath* em redes SDM-EON [15, 19]. Embora, por razões didáticas, seus componentes sejam apresentados separadamente nas subseções seguintes, na prática essas decisões são fortemente interde-

pendentes, uma vez que a escolha da rota influencia a modulação viável, que determina a quantidade de espectro necessária e a seleção do núcleo, considerando simultaneamente as restrições de continuidade, contiguidade, bandas de guarda e *inter-core crosstalk*. Essa interdependência torna o problema RMSCA significativamente mais complexo em cenários com mecanismos de proteção, nos quais múltiplos caminhos devem ser estabelecidos simultaneamente respeitando todas essas restrições.

Nesta tese, *rota* designa a sequência de nós e enlaces selecionada entre uma origem e um destino. Um *caminho óptico* (*lightpath*), por sua vez, é a conexão óptica estabelecida sobre uma rota, com formato de modulação, núcleo e bloco espectral definidos. Em uma conexão *multi-hop*, uma mesma rota pode ser atendida por dois ou mais caminhos ópticos consecutivos, interligados por regeneração. Essa distinção é adotada em todo o texto: rotas são geradas, ordenadas e verificadas quanto à disjunção topológica; caminhos ópticos são provisionados sobre elas e recebem os recursos ópticos.

2.3.1 Roteamento em Redes Ópticas

O roteamento em redes ópticas pode ser organizado em três formas de operação: estático, dinâmico e alternativo. No roteamento estático (*off-line*), a rota e o caminho óptico são definidos antecipadamente e permanecem estabelecidos durante o intervalo de planejamento ou de operação considerado [29, 30]. Essa persistência permite que fluxos compatíveis sejam encaminhados por caminhos ópticos já existentes e, quando há capacidade disponível, agregados à sua capacidade, reduzindo a necessidade de criar uma nova alocação óptica para cada fluxo individual. A agregação pode ser realizada no próprio domínio óptico ou por comutação eletrônica em nós intermediários; esta tese não otimiza esse processo, mas o considera uma consequência operacional possível da manutenção de caminhos ópticos estáticos.

O pré-provisionamento é um exemplo dessa lógica de planejamento antecipado. No estudo de Júnior et al. [2], recursos de proteção e caminhos ópticos são preparados antes da chegada de demandas específicas, de modo que a capacidade previamente configurada possa atender o tráfego previsto com menor tempo de estabelecimento. Assim, o pré-provisionamento cria opções prontas para encaminhamento e para agregação de demandas compatíveis, enquanto o provisionamento convencional precisa configurar os recursos no instante da chegada. Na DPPDF, esse princípio aparece no pré-processamento de rotas e triplas candidatas: as alternativas de proteção são conhecidas previamente, embora seus recursos só sejam efetivamente reservados quando a demanda é aceita.

Convém distinguir essa antecipação do uso do caminho γ da DPPDF. Como γ é um recurso de proteção dedicada, ele permanece inativo e exclusivo da recuperação contra falha dupla; utilizá-lo para transportar uma demanda ordinária retiraria a garantia de

recuperação da demanda protegida. Portanto, a relação com o pré-provisionamento está na preparação antecipada de alternativas e na redução do tempo de configuração, e não no compartilhamento do caminho de proteção dedicado γ .

No roteamento dinâmico (*on-line*), a rota e os recursos ópticos são definidos quando uma nova requisição chega à rede e liberados quando seu atendimento termina [31]. Já no roteamento alternativo, um conjunto ordenado de rotas candidatas é previamente obtido para cada par origem-destino; quando a primeira alternativa não satisfaz as restrições de recursos ou de qualidade de transmissão, as alternativas seguintes são examinadas. A DPPDF emprega essa última forma: o pré-processamento gera rotas e triplas candidatas disjuntas, enquanto a seleção e a alocação ocorrem sequencialmente para cada demanda recebida.

As conexões podem ser estabelecidas em uma rota *single-hop* ou *multi-hop*. No modelo *single-hop*, a rota é atendida por um único caminho óptico fim a fim, resultando em menor consumo de transponders e caracterizando redes transparentes. No modelo *multi-hop*, a rota é atendida por dois ou mais *lightpaths* consecutivos, aumentando a flexibilidade de conectividade ao custo de maior consumo de transponders e processamento adicional, com potencial redução da taxa de bloqueio em redes translúcidas.

2.3.2 Alocação de Modulação

A escolha do formato de modulação é central no problema de RMSCA, pois define o compromisso entre alcance máximo, Qualidade de Transmissão (QoT) e consumo espectral. Cada modulação se diferencia pelo número de bits por símbolo e pela taxa suportada por slot, conforme a Tabela 2.2, impactando diretamente o número de slots necessários para atender uma demanda.

2.3.3 Alocação de Espectro

O processo de RMSCA prossegue com a alocação de espectro, que consiste na seleção dos slots atribuídos a cada conexão. Essa alocação deve respeitar as restrições de *contiguidade espectral*, *continuidade espectral* e *continuidade de núcleo* [32, 15].

A Tabela 2.6 resume as principais políticas de alocação de espectro.

Tabela 2.6: Políticas de alocação de espectro

Política	Descrição	Vantagens / Desvantagens
First-Fit (FF)	Seleciona o primeiro bloco de slots livres de menor índice que satisfaça a demanda.	+ Simplicidade de implementação; + baixo custo computacional; – concentração no início do espectro.
Random-Fit (RF)	Escolhe aleatoriamente entre os blocos disponíveis que atendam à demanda.	+ Distribui a ocupação do espectro; – menor previsibilidade; – resultados variáveis.
Best-Fit (BF)	Seleciona o bloco de slots cujo tamanho mais se aproxima da demanda.	+ Reduz desperdício; + melhora o aproveitamento do espectro; – maior custo computacional.
Worst-Fit (WF)	Seleciona o maior bloco disponível, mesmo que superior à demanda.	+ Preserva blocos menores; – desperdício em demandas pequenas; – risco de bloqueio futuro.
Fragmentation-Aware (FA)	Avalia o impacto da alocação no espectro global antes da decisão.	+ Reduz fragmentação ao longo do tempo; + adequada a tráfego dinâmico; – alto custo computacional; – difícil uso em tempo real.

2.3.4 Alocação de Núcleos

Em redes SDM-EONs, após a definição da rota, do formato de modulação e do bloco espectral, o processo de RMSCA requer a seleção de um núcleo para o estabelecimento do lightpath sujeito à restrição de continuidade de núcleo, segundo a qual a conexão deve permanecer alocada no mesmo núcleo ao longo de toda a rota fim a fim, de forma análoga à continuidade espectral [19].

2.4 Fragmentação

Em redes SDM-EON, o *crosstalk* inter-core atua como um fator estrutural que induz fragmentação espectral, mesmo na presença de espectro livre. Diferentemente da fragmentação horizontal observada na tecnologia EONs, em SDM-EONs a interferência entre núcleos impõe restrições adicionais ao alinhamento espectral.

Nesse contexto, distinguem-se dois efeitos diretamente associados ao crosstalk. O primeiro é a fragmentação vertical, que ocorre quando índices espectrais livres deixam de se alinhar entre núcleos adjacentes devido à necessidade de evitar a co-propagação em faixas idênticas. Mesmo quando um determinado slot está livre em múltiplos núcleos, o risco de interferência impede sua utilização simultânea, tornando parte do espectro efetivamente indisponível. O segundo efeito, fragmentação Horizontal, está relacionado

à restrição de modulação imposta pelo XT: níveis elevados de interferência forçam o uso de formatos mais robustos, aumentando o número de slots necessários por conexão e ampliando indiretamente a ocupação espectral. Esse comportamento explica por que, em SDM-EONs, a fragmentação não pode ser interpretada apenas como consequência da dinâmica de tráfego. A Figura 2.18 ilustra esses efeitos de forma integrada.

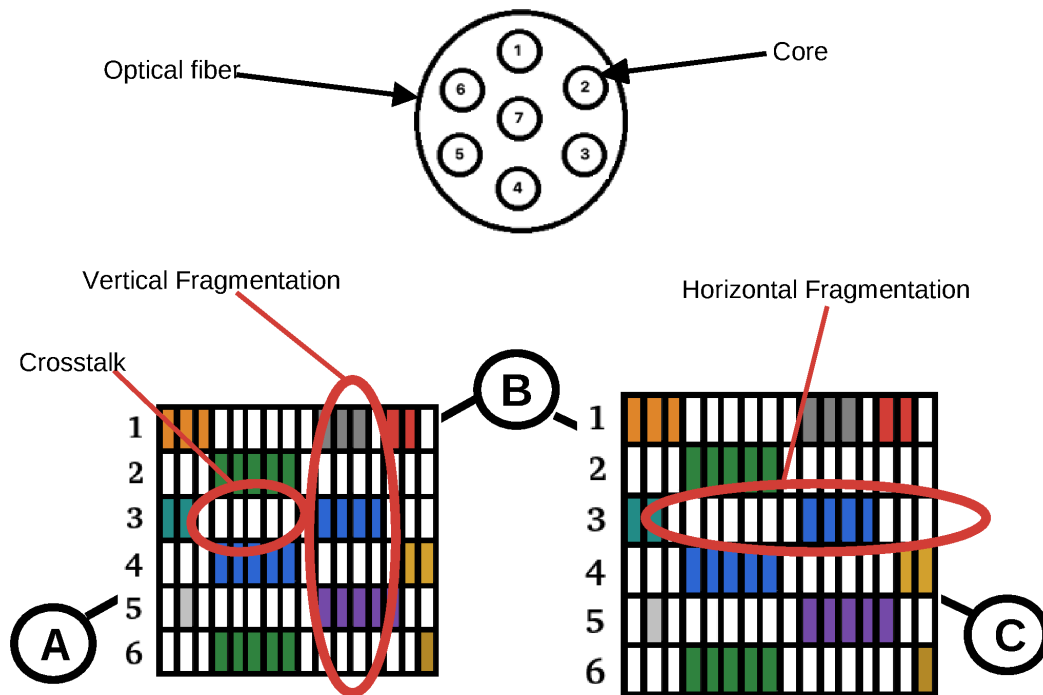


Figura 2.18: Fragmentação em SDM-EONs

2.5 Falhas em Redes Ópticas

Em redes SDM-EON, a ocorrência de falhas afeta diretamente a disponibilidade das conexões e impõe restrições adicionais ao processo de alocação de recursos, uma vez que múltiplos *lightpaths* compartilham a mesma infraestrutura física. As falhas podem ser classificadas, quanto à sua origem, em falhas em nós ou falhas em enlaces.

As falhas em nós [33] correspondem a eventos ocorridos em *data centers* ou centrais de telecomunicações que comprometem a comutação, o processamento ou a transmissão do sinal óptico. Em redes modernas de transporte, esse tipo de falha é frequentemente mitigado por arquiteturas redundantes, espelhamento de equipamentos e mecanismos de proteção em nível de nó, o que reduz tanto sua frequência quanto seu impacto sistêmico.

As falhas em enlaces [34], por sua vez, referem-se a interrupções ao longo do meio físico de transmissão, incluindo rompimentos de fibra óptica, falhas em amplificadores ópticos

ou defeitos em dispositivos instalados ao longo do enlace. Essas falhas são particularmente críticas em redes ópticas de transporte porque um único enlace pode transportar simultaneamente um grande número de conexões, de modo que sua indisponibilidade provoca a interrupção correlacionada de múltiplos serviços. Além disso, falhas em enlaces estão sujeitas a causas externas — como obras civis, acidentes ou condições ambientais — e, diferentemente das falhas em nós, exigem intervenção física para reparo.

Quanto à forma de manifestação, distinguem-se as falhas brandas (*soft failures*) [35], caracterizadas por degradações graduais da qualidade de transmissão, observáveis por métricas como *Optical Signal-to-Noise Ratio* (OSNR) e *Bit Error Rate* (BER). Em muitos casos, essas falhas podem ser temporariamente toleradas por mecanismos de correção de erros, como o *Forward Error Correction* (FEC). Em contraste, as falhas duras (*hard failures*) [36] correspondem a interrupções abruptas e completas da transmissão óptica, resultando na perda imediata da conectividade.

Do ponto de vista da proteção, definem-se ainda as falhas simples, nas quais apenas o caminho principal de uma conexão é interrompido, e as falhas duplas, que se caracterizam pela interrupção simultânea do caminho principal e do respectivo caminho de proteção. Esse último cenário representa um desafio relevante para o planejamento de redes ópticas, pois compromete os mecanismos clássicos de proteção e exige estratégias mais robustas.

No contexto das falhas duras, um aspecto crítico é o *Mean Time To Repair* (MTTR). Em casos de rompimento de fibra óptica, o tempo necessário para localizar, acessar e reparar o enlace pode variar de várias horas até um dia inteiro, dependendo da localização da falha e das condições de acesso [37]. A Tabela 2.7 apresenta valores típicos de MTTR observados em redes ópticas de transporte.

Tabela 2.7: Valores típicos de MTTR em componentes ópticos [3].

Componente	MTTR (otimista)	MTTR (nominal)	MTTR (conservador)
Amplificador óptico	2 h	6 h	9 h
Multiplexador/Demultiplexador	2 h	6 h	9 h
Transponder	2 h	6 h	9 h
Fibra óptica enterrada	9 h	12 h	24 h
Optical Cross-Connect (OXC)	2 h	6 h	9 h

2.6 Proteção

A proteção corresponde a um conjunto de mecanismos planejados com o objetivo de assegurar a continuidade do funcionamento de um sistema diante de falhas previstas [38, 8, 39]. O princípio central da proteção é a antecipação: identificar potenciais pontos de falha e disponibilizar previamente os meios necessários para manter a operação [40]. Caso

o sinal não alcance o destino devido a uma falha, a comutação ocorre automaticamente para o caminho de backup, assegurando a continuidade do tráfego. Embora a lógica de comutação seja comum aos diferentes mecanismos de proteção, suas variantes diferem na forma como organizam os recursos de backup, no grau de compartilhamento desses recursos e no tempo necessário para a recuperação.

2.6.1 Falhas Simples versus Falhas Duplas

As falhas são classificadas, quanto ao impacto sobre uma conexão protegida, em falhas simples, duplas e múltiplas. Neste trabalho, o evento de falha corresponde à indisponibilidade de enlace. Uma falha simples interrompe um dos caminhos ativos e aciona o caminho de proteção disponível. A falha dupla ocorre quando dois enlaces distintos interrompem simultaneamente os dois caminhos ativos da mesma demanda, tornando necessária a ativação de um segundo caminho de proteção. Falhas múltiplas abrangem eventos com três ou mais enlaces indisponíveis e não fazem parte do escopo de garantia da proposta.

Para uma demanda ser admitida, sua origem e seu destino devem possuir três rotas mutuamente disjuntas em enlaces. Assim, a remoção de quaisquer dois enlaces não desconecta esse par origem–destino no modelo considerado: no máximo dois dos três caminhos ópticos podem ser interrompidos. A avaliação considera todos os pares de enlaces distintos associados aos caminhos da demanda; quando o par atinge os caminhos principal e de proteção primária, o segundo caminho de proteção é ativado. Nos demais pares, pelo menos um dos caminhos ativos permanece disponível. Falhas de nós e eventos de grupo de risco compartilhado não são modelados.

2.6.2 Tipos de proteção em redes ópticas

A literatura distingue quatro categorias principais de proteção: Dedicated Path Protection (DPP) [41], Dedicated Link Protection (DLP) [2], Shared Path Protection (SPP) [42, 43] e Shared Link Protection (SLP) [44]. A literatura também descreve esquemas de proteção parcial, que buscam reduzir o custo de reserva ao proteger apenas partes críticas da rota [45].

2.6.2.1 Dedicated Path Protection (DPP)

No esquema de *Dedicated Path Protection* (DPP), cada caminho principal ativo é acompanhado por um caminho de backup totalmente disjunto e previamente estabelecido [46]. Esse ganho vem acompanhado de um custo elevado, uma vez que transponders, espectro e enlaces permanecem dedicados e não podem ser compartilhados, resultando em aumentos

de 2,1 a 3,5 vezes no consumo de CAPEX, energia e espectro em comparação a cenários sem proteção [47, 46]. Essa reserva exclusiva elimina a necessidade de disputa por recursos durante a recuperação, proporcionando elevada disponibilidade, previsibilidade operacional e reduzido tempo de comutação em comparação aos mecanismos baseados em compartilhamento de recursos [1, 8].

As variantes do DPP, apresentadas na Figura 2.19, diferenciam-se pelo modo de utilização dos recursos e pelo tempo de recuperação.

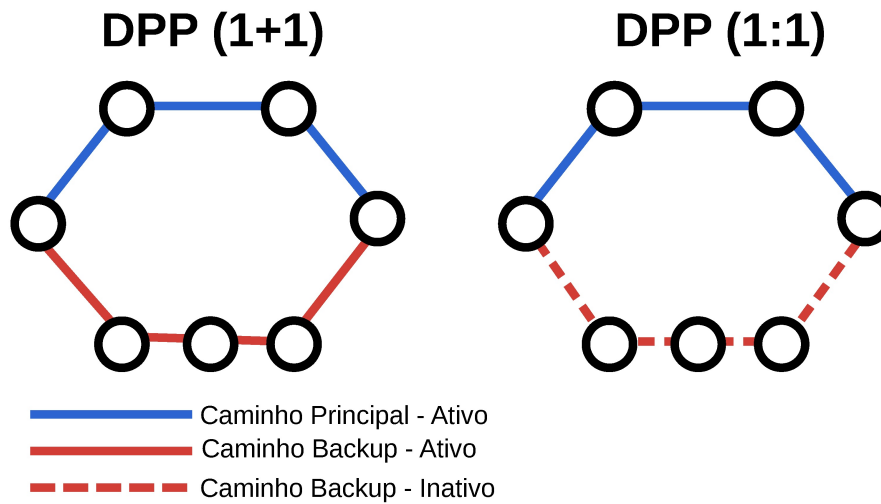


Figura 2.19: DPP

2.6.2.2 Dedicated Link Protection (DLP)

Na Dedicated Link Protection (DLP), a proteção ocorre em nível de enlace: cada enlace do caminho principal é acompanhado por um enlace alternativo totalmente disjunto e previamente estabelecido. Em caso de falha localizada, o tráfego é redirecionado apenas para o segmento afetado, sem necessidade de comutar todo o caminho óptico. Essa característica faz da DLP um dos mecanismos com menor tempo de recuperação, uma vez que a falha é detectada diretamente no enlace afetado e o tráfego pode ser rapidamente redirecionado para o caminho de proteção [8]. Como consequência, a DLP apresenta elevada disponibilidade, sendo amplamente reconhecida como uma das abordagens mais rápidas para recuperação de conexões ópticas. A Figura 2.20 destaca também suas variantes.

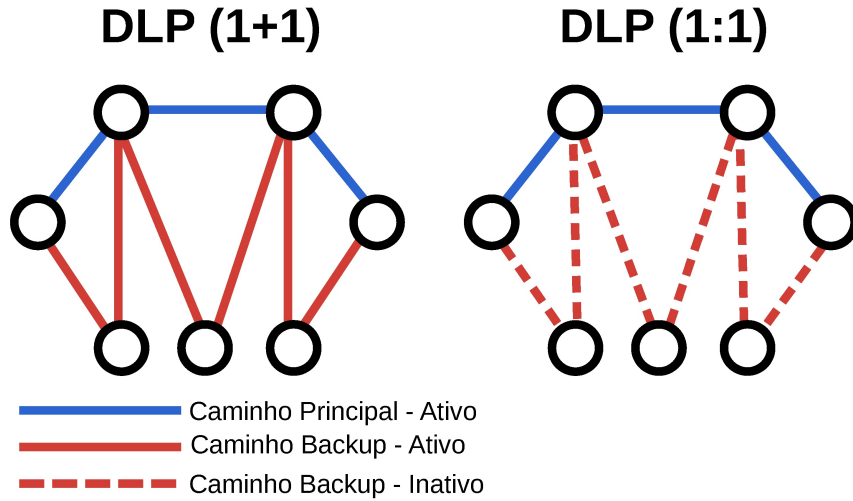


Figura 2.20: DLP

2.6.2.3 Shared Path Protection (SPP)

Na *Shared Path Protection* (SPP), cada demanda possui um caminho de proteção, mas sua capacidade pode ser compartilhada por demandas cujos caminhos principais não são afetados pelo mesmo cenário de falha. Essa estratégia reduz o consumo de recursos, pois evita reservar exclusivamente transponders e espectro para cada conexão em operação normal [48]. Em contrapartida, a recuperação depende de a capacidade compartilhada permanecer disponível quando ocorre a falha, o que pode reduzir a disponibilidade em situações de falhas múltiplas ou contenção por recursos de recuperação, quando comparada aos mecanismos dedicados [49, 1].

Um *p-cycle* ilustra uma forma de organizar capacidade compartilhada de proteção: um ciclo previamente configurado reserva capacidade em seus enlaces e, quando um enlace protegido falha, o tráfego pode contorná-lo pelo arco remanescente do ciclo. Em sua forma convencional, o *p-cycle* é um mecanismo de proteção de enlace; por isso, ele é utilizado nesta discussão como exemplo de compartilhamento por ciclo, e não como sinônimo de proteção compartilhada de caminho. Extensões baseadas em *p-cycles*, como o FIPP, podem empregar essa estrutura em esquemas de proteção de caminho [22].

A capacidade compartilhada de um ciclo também evidencia uma limitação importante: se duas falhas atingem simultaneamente enlaces do mesmo *p-cycle*, os dois arcos disponíveis para o desvio podem ser comprometidos. Nessa situação, o ciclo deixa de oferecer a alternativa necessária para alguns dos enlaces que protege. Essa limitação é própria da estrutura cíclica e ajuda a distinguir o compartilhamento em ciclos da reserva exclusiva adotada em mecanismos de proteção dedicada.

Essa diferença é também evidenciada pela avaliação de disponibilidade apresentada em Júnior et al. [2]. No Ham-p-Cycle, utilizado naquele estudo como representante de SPP, a capacidade de *backup* é compartilhada pelo ciclo e o percurso de recuperação precisa ser configurado quando a falha ocorre. Já na DPP e na DLP, os recursos de proteção são exclusivos e previamente reservados para cada conexão ou enlace protegido. Portanto, a proteção dedicada garante a disponibilidade da capacidade de recuperação para o conjunto de falhas previsto pelo esquema; a proteção compartilhada reduz a reserva de recursos, mas sua recuperação permanece condicionada à integridade e à capacidade disponível do ciclo compartilhado.

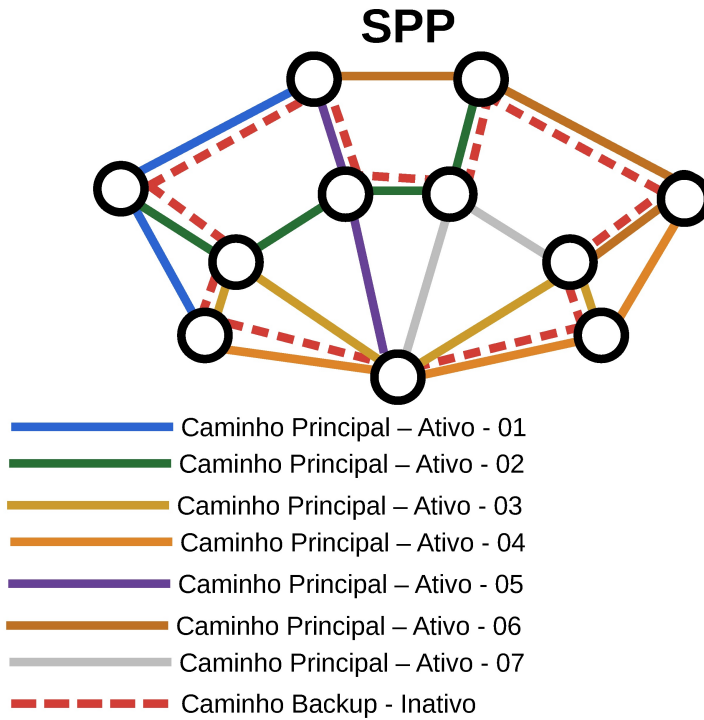


Figura 2.21: SPP

Apesar de sua elevada eficiência na utilização dos recursos de proteção, a SPP reduz a capacidade de *backup* necessária ao permitir seu compartilhamento entre demandas compatíveis [50, 51, 52]. A Figura 2.22 apresenta um exemplo de utilização de um *p-cycle*: a capacidade reservada no ciclo pode desviar o tráfego de enlaces protegidos entre seus nós de origem e destino. Quando duas falhas atingem simultaneamente enlaces do mesmo ciclo, os dois sentidos de desvio podem tornar-se indisponíveis e parte do tráfego deixa de encontrar alternativa pelo ciclo. Em contraste, a DPP reserva previamente um caminho de proteção exclusivo para cada demanda, proporcionando maior previsibilidade para o conjunto de falhas considerado pelo esquema de proteção [53, 1].

A comparação de resultados entre Ham-p-Cycle, DPP e DLP em Júnior et al. [2] ilustra esse compromisso: o compartilhamento reduz o bloqueio de banda por reutilizar a capacidade de *backup*, mas amplia o tempo de recuperação e a indisponibilidade relativa; os mecanismos dedicados consomem mais recursos, porém mantêm uma alternativa exclusiva, sem contenção no instante da comutação.

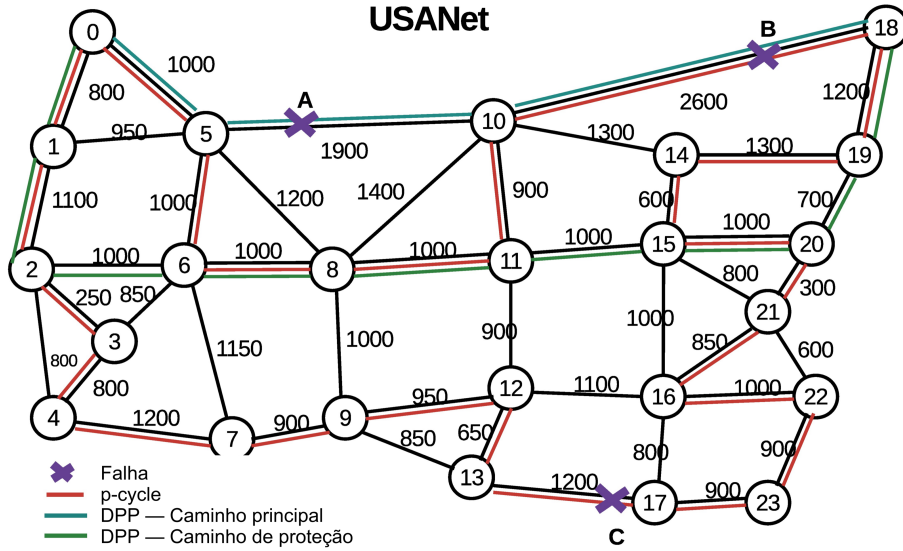


Figura 2.22: Exemplo de proteção compartilhada por *p-cycle* e comparação com DPP.

2.6.2.4 Shared Link Protection (SLP)

A Shared Link Protection (SLP) aplica o princípio de compartilhamento em nível de enlace [44, 43, 1]. Essa abordagem aumenta a complexidade de planejamento, já que cada enlace requer reservas próprias.

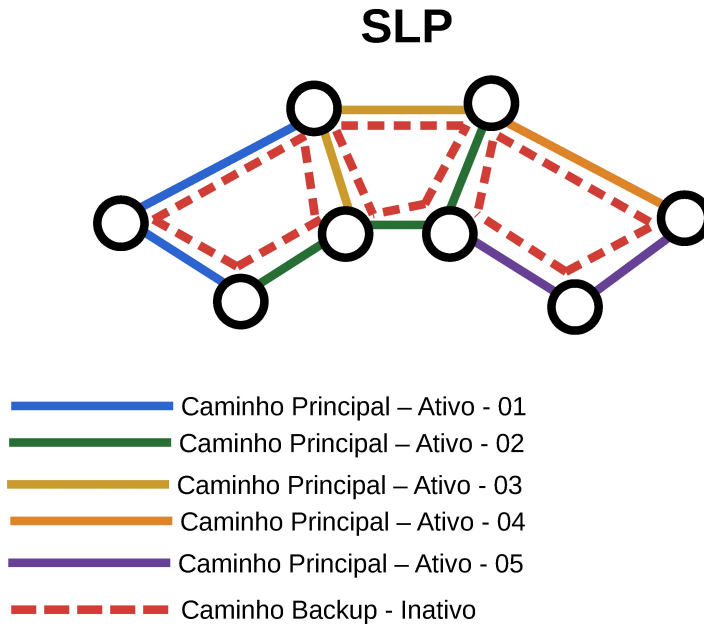


Figura 2.23: Exemplo de funcionamento da SLP.

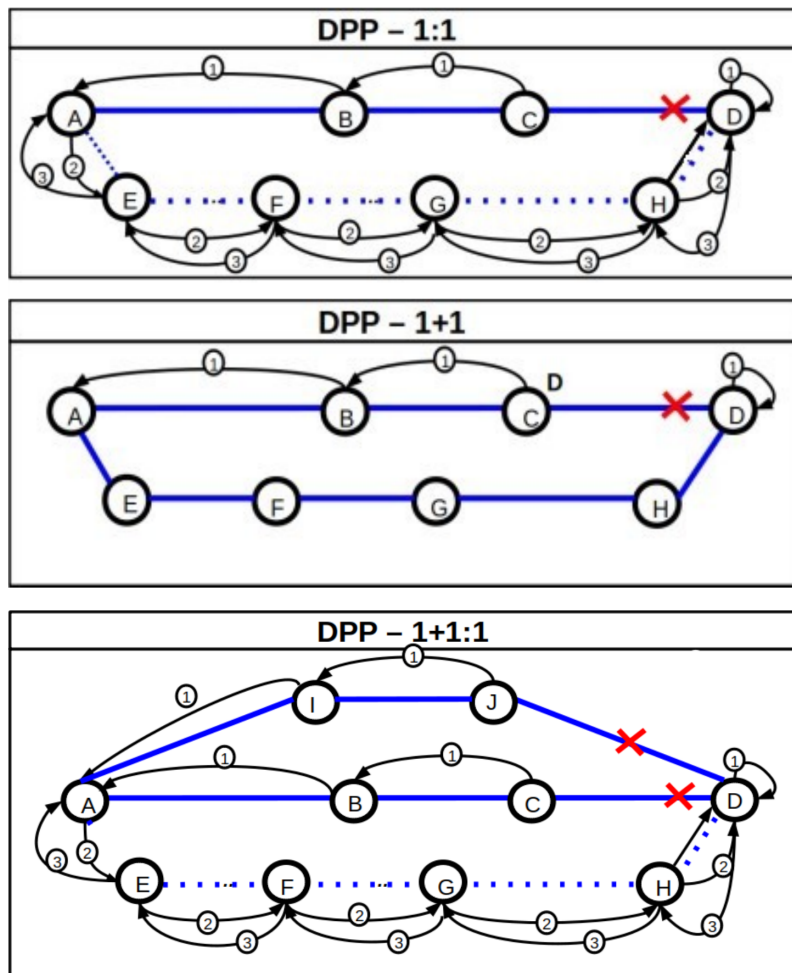
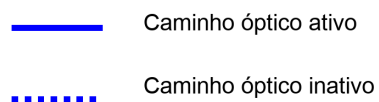
2.6.3 Variantes de Proteção Dedicada

As variantes de proteção diferenciam-se principalmente pela forma como os caminhos de backup são mantidos durante a operação normal da rede. Em termos gerais, esses caminhos podem permanecer ativos ou inativos, o que determina a necessidade — ou não — de comutação explícita quando ocorre uma falha [54].

Três variantes clássicas de proteção dedicada:

- 1+1: o tráfego é transmitido simultaneamente pelo caminho principal e pelo caminho de proteção [54].
- 1:1: apenas o caminho principal permanece ativo, enquanto o caminho de proteção é ativado após a falha.
- 1+1:1: introduz um segundo caminho de proteção inativo, ativado apenas quando falhas simultâneas afetam o caminho principal e o primeiro backup, oferecendo proteção dedicada contra falhas duplas [2].

A Figura 2.24 ilustra essas variantes no contexto do *Dedicated Path Protection (DPP)*.



- ① O nó terminal do enlace com falha envia uma mensagem de falha de enlace aos nós de origem e de destino da conexão afetada.
- ② O nó de origem da conexão envia uma mensagem de configuração ao longo da rota de proteção até o nó de destino.
- ③ O nó de destino da conexão envia uma mensagem de confirmação ao longo da rota de proteção até o nó de origem.

Figura 2.24: Variantes de DPP

2.6.3.1 Proteção Total versus Proteção Parcial

Os mecanismos de proteção em redes ópticas também podem ser classificados em proteção total e proteção parcial.

Na proteção total, cada conexão é acompanhada por um caminho de backup totalmente redundante com a mesma capacidade do caminhos principal. Na proteção parcial, apenas uma fração da banda requisitada é protegida ou parte do tráfego é distribuída em caminhos alternativos disjuntos [45]. Apesar da economia espectral, a proteção parcial pode exigir maior número de transponders e maior complexidade operacional.

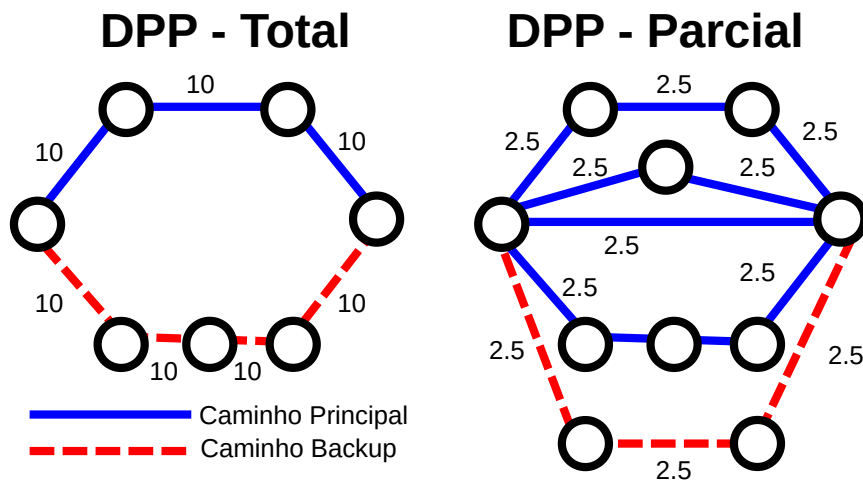


Figura 2.25: Proteção total versus proteção parcial.

2.6.4 Exemplo de falhas em mecanismos de proteção

Na Figura 2.26, os casos rotulados como “A” e “B” representam falhas simples, em que apenas um dos caminhos ativos é interrompido. O par “A” e “C” ilustra uma falha dupla que atinge simultaneamente os dois caminhos ativos da proteção dedicada. Já os cenários “D” e “E” representam falhas múltiplas, com três ou mais enlaces indisponíveis simultaneamente.

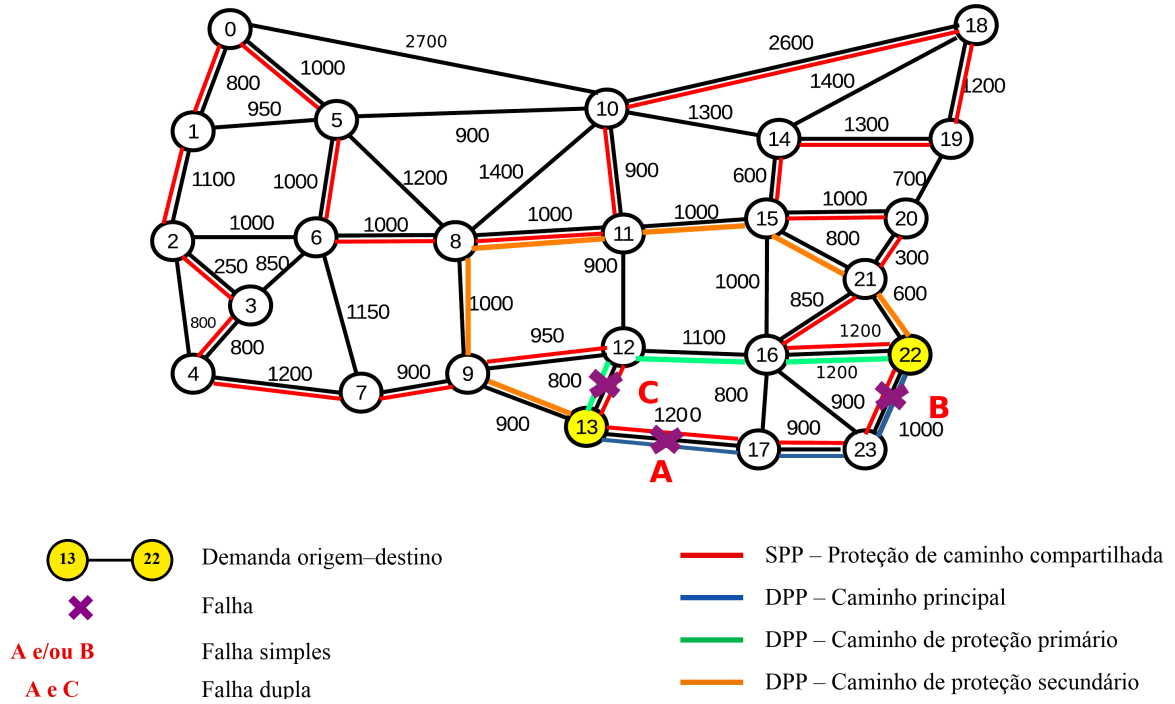


Figura 2.26: Falhas únicas, simples, múltiplas e duplas nos modelos SPP e DPP.

A Figura também mostra como os esquemas de proteção por compartilhamento (SPP) e por dedicação (DPP) se comportam frente a esses cenários.

Na representação de proteção compartilhada da Figura 2.26, o *p-cycle* atua como recurso comum para os enlaces por ele protegidos. Em uma falha simples de enlace, o tráfego afetado pode ser desviado pelo arco remanescente do ciclo. Entretanto, se falhas simultâneas comprometem os dois sentidos desse ciclo, a alternativa de desvio deixa de estar disponível, resultando em bloqueio para os enlaces que dependem dessa estrutura compartilhada.

Na proteção dedicada (DPP), cada demanda possui caminhos de backup exclusivos. Por exemplo, para uma conexão $13 \rightarrow 22$, o caminho primário pode seguir $13-12-16-22$, enquanto o backup primário segue $13-17-23-22$. Em caso de falha simples (como nos enlaces “A” ou “B”), o tráfego é redirecionado para o backup sem competição por recursos. Além disso, um segundo caminho totalmente disjunto pode ser reservado como backup secundário, garantindo recuperação mesmo em falhas duplas (como “A” e “C”). Dessa forma, evidencia-se a diferença estrutural: enquanto o SPP depende do compartilhamento, o DPP mantém enlaces dedicados, oferecendo maior previsibilidade em cenários severos.

A escolha da categoria de proteção torna-se fundamental ao se considerar seu impacto sobre a disponibilidade da rede, parâmetro diretamente associado ao tempo de resposta do mecanismo de recuperação. Quanto menor a indisponibilidade, mais rápida é a recu-

peração do tráfego em caso de falha, o que representa o aspecto mais crítico em redes ópticas de transporte. Entretanto, não se deve considerar apenas a disponibilidade: também é essencial analisar o uso de recursos, que influencia diretamente o custo, e o esforço computacional, relacionado à complexidade de implementação e ao tempo necessário para o estabelecimento dos caminhos.

A Tabela 2.8 [1] compara o desempenho de esquemas clássicos de proteção segundo três métricas: uso de recursos, que quantifica o volume de capacidade reservado (por exemplo, enlaces, espectro e transponders) para viabilizar a recuperação; esforço computacional, que representa o custo algorítmico associado ao planejamento e/ou à seleção de caminhos de proteção (isto é, o grau de complexidade para calcular e manter as configurações de proteção); e disponibilidade, que expressa a probabilidade de o serviço permanecer operacional ao longo do tempo, incorporando a capacidade do esquema em restaurar conexões sob falhas.

Tabela 2.8: Desempenho dos esquemas de proteção [1]

Uso de recursos $DLP > DPP > SLP > SPP$
Esforço computacional $SLP > SPP > DLP > DPP$
Disponibilidade $DLP > DPP > SLP > SPP$

A Tabela 2.8 evidencia o compromisso inerente entre disponibilidade, utilização de recursos e esforço computacional nos diferentes esquemas de proteção. De modo geral, mecanismos dedicados apresentam maior disponibilidade e menor esforço computacional durante a recuperação, em contrapartida ao maior consumo de recursos. Já os mecanismos compartilhados reduzem a capacidade de proteção necessária, porém demandam maior complexidade de gerenciamento e, em determinadas situações, podem apresentar menor disponibilidade devido ao compartilhamento dos recursos de recuperação. A escolha entre esses mecanismos depende, portanto, dos requisitos de disponibilidade e das restrições de recursos impostos pela aplicação e pela infraestrutura da rede.

Capítulo 3

Estado da Arte

Este capítulo apresenta o estado da arte dos mecanismos de proteção contra falhas duplas e das estratégias de tratamento de *crosstalk* em redes ópticas, com ênfase em redes SDM-EON. A análise organiza os trabalhos segundo seus princípios, vantagens e limitações. Para isso, são considerados três eixos centrais: mecanismos de proteção contra falhas duplas, estratégias fundamentadas em *XT-Estimated* e estratégias baseadas em *XT-Avoid*. Cada eixo é examinado quanto à previsibilidade da proteção, ao consumo de recursos, à complexidade computacional e ao tratamento dos efeitos do *crosstalk* inter-core.

Nas SDM-EONs, a provisão de mecanismos de proteção contra falhas duplas enfrenta desafios adicionais quando comparada às EONs tradicionais. Além da necessidade de reservar múltiplos caminhos disjuntos para garantir a restauração do tráfego, essas redes também estão sujeitas aos efeitos da fragmentação horizontal, da fragmentação vertical e do *crosstalk* inter-core, que restringem a utilização simultânea de recursos espectrais em núcleos adjacentes. Nesse contexto, políticas baseadas em *XT-Avoid* e *XT-Estimated* buscam mitigar os impactos do *crosstalk*, porém frequentemente resultam em subaproveitamento da capacidade disponível ou em aumento da complexidade computacional. Dessa forma, o principal desafio consiste em combinar mecanismos de proteção capazes de tolerar falhas duplas com estratégias eficientes de tratamento do *crosstalk*, permitindo a provisão de múltiplos caminhos dedicados sem comprometer o aproveitamento dos recursos espectrais nem a previsibilidade dos mecanismos de proteção.

3.1 Proteção contra Falhas Duplas

O elevado custo da proteção dedicada para cenários de falhas múltiplas constitui um desafio central nas redes ópticas. A extensão da *Dedicated Path Protection* (DPP) para proteção contra falhas duplas exige a reserva prévia de múltiplos recursos de recuperação, resultando em elevado consumo de capacidade. No contexto da proteção de enlace, Rama-

subramanian e Chandak [10] propuseram a *Backup Link Mutual Exclusion* (BLME), que combina características da *Dedicated Link Protection* (DLP) e da *Shared Link Protection* (SLP). Como na DLP, cada enlace possui um caminho de *backup* previamente planejado; como na SLP, a capacidade desses caminhos pode ser compartilhada por enlaces compatíveis. A restrição de exclusão mútua impede que dois enlaces que possam falhar simultaneamente utilizem um ao outro em seus caminhos de *backup*, evitando conflitos de recuperação em eventos de falha dupla.

Em SDM-EONs, Oliveira e Fonseca [22] investigam a proteção contra duas falhas simultâneas por meio do algoritmo *Sharing Slot and Straddling p-Cycle FIPP* (SSSPF). A proposta combina caminhos de proteção baseados em *Failure-Independent Path Protecting p-Cycles* (FIPP), compartilhamento de espectro e *traffic grooming*, buscando reduzir o consumo de recursos normalmente associado aos mecanismos de proteção dedicados. O algoritmo utiliza uma formulação baseada na *Coupled Power Theory* (CPT) para modelar o *inter-core crosstalk*, incorporando esse efeito na avaliação da qualidade de transmissão das conexões. Seu desempenho é analisado sob diferentes cargas por meio da métrica *Crosstalk per Slot* (CpS), que quantifica o nível médio de interferência associado à ocupação espectral dos núcleos. Enquanto o SSSPF explora o compartilhamento de recursos por meio de FIPP, espectro compartilhado e *grooming*, a DPPDF investiga a reserva dedicada de três caminhos disjuntos, a especialização funcional dos núcleos e o tratamento híbrido do *crosstalk*. As abordagens adotam, portanto, compromissos distintos entre compartilhamento de recursos e disponibilidade da recuperação.

A busca por reduzir o consumo de recursos sem eliminar completamente as garantias de recuperação também motivou o desenvolvimento de mecanismos híbridos que combinam proteção dedicada e restauração dinâmica. Nesse contexto, Pruk et al. [11] propuseram uma abordagem na qual o caminho principal é protegido por DPP 1+1, garantindo comutação imediata em caso de falha, enquanto a indisponibilidade do caminho de *backup* é tratada por meio de restauração *on-line*. Essa estratégia reduz a quantidade de recursos previamente reservados para proteção, tornando o modelo mais eficiente em termos de utilização da capacidade da rede. Em contrapartida, a recuperação do caminho de *backup* passa a depender da disponibilidade de recursos no momento da falha, característica inerente aos mecanismos de restauração dinâmica. Dessa forma, a abordagem substitui parte da previsibilidade proporcionada pela proteção integralmente pré-provisionada por maior flexibilidade na utilização dos recursos da rede. Os resultados reforçam uma tendência recorrente na literatura: reduzir o custo da proteção contra falhas múltiplas por meio de arquiteturas híbridas, nas quais parte da recuperação é assegurada por mecanismos de proteção previamente provisionados e parte depende de estratégias de restauração dinâmica. Diferentemente da proteção, a restauração não reserva previamente os recursos de

recuperação, realizando a busca e a alocação de novos caminhos apenas após a ocorrência da falha.

Em Elastic Optical Networks (EONs), surgiram estratégias que buscam reduzir o consumo de recursos sem comprometer a capacidade de recuperação em cenários de falhas duplas. Nesse contexto, Assis et al. [55] propuseram o esquema *Squeezed Protection* (BSR), que combina DPP com redução controlada da taxa de transmissão (*rate squeezing*) para viabilizar a ativação de um segundo caminho de *backup*. A abordagem preserva a continuidade do tráfego durante falhas duplas por meio da redução controlada da largura de banda disponibilizada às conexões protegidas, reduzindo a quantidade de recursos previamente reservados para proteção. Como consequência, a recuperação é obtida com degradação controlada da qualidade do serviço, refletida na diminuição da taxa de transmissão e no aumento do atraso. Os resultados mostram que essa degradação pode ser mantida em níveis aceitáveis, tornando a solução uma alternativa para cenários em que a continuidade do serviço é priorizada em relação à manutenção integral do desempenho. O trabalho evidencia outra tendência observada na literatura: reduzir o custo da proteção contra falhas duplas por meio da degradação controlada da qualidade do serviço, em vez da reserva integral dos recursos de recuperação.

A busca por reduzir os custos da proteção motivou ainda o desenvolvimento de esquemas de proteção parcial. Nessa linha, Tan et al. [12] propuseram variantes *multipath* baseadas em capacidade fixa (MPPF) e capacidade variável (MPPU), nas quais apenas uma fração da capacidade originalmente provisionada é garantida após a ocorrência de falhas. Diferentemente da DPP tradicional, essas abordagens dimensionam explicitamente a capacidade de recuperação para apenas parte do tráfego protegido, permitindo reduzir significativamente a quantidade de recursos previamente reservados para proteção. Na MPPF, a capacidade de recuperação permanece fixa e previamente definida em cada caminho de *backup*, garantindo a recuperação imediata da parcela protegida após a falha. Já a MPPU flexibiliza essa reserva ao ajustar dinamicamente a capacidade recuperada de acordo com a demanda efetivamente atendida. Em ambos os casos, a economia de recursos decorre da proteção parcial da capacidade originalmente provisionada. Os resultados demonstram que essa estratégia representa uma alternativa eficiente para reduzir a quantidade de recursos dedicados à proteção, preservando a continuidade de parte do serviço durante cenários de falha.

Em continuidade a essa linha de pesquisa, surgiram propostas baseadas na segmentação e no compartilhamento dos recursos de proteção. O esquema *Enhanced Shared Protection* (ESP) permite que múltiplas conexões utilizem parcialmente uma mesma infraestrutura de *backup*, reduzindo a quantidade de capacidade previamente reservada para proteção [56]. De forma semelhante, o *Split Light Trails Protection* (SLTP) segmenta

trilhas ópticas em blocos protegidos individualmente, aumentando a flexibilidade da recuperação e a sobrevivência da rede em cenários de falhas múltiplas [57]. Em ambos os casos, a economia de recursos decorre da reorganização dos caminhos de proteção e do compartilhamento seletivo da capacidade de *backup*, reduzindo a redundância de recursos sem eliminar completamente a capacidade de recuperação.

Além das variantes de proteção, a literatura também investigou mecanismos de restauração como alternativa para reduzir a quantidade de recursos previamente reservados para recuperação de falhas. Diferentemente dos esquemas de proteção, nos quais os recursos de *backup* permanecem previamente provisionados, os mecanismos de restauração estabelecem novos caminhos apenas após a ocorrência da falha. Essa estratégia reduz a capacidade ociosa mantida para recuperação, porém transfere para o instante da falha o processo de seleção e alocação dos recursos necessários à restauração. Nesse contexto, Ramalho et al. [58] propuseram o modelo *Probability-aware Restoration with Path Avoidance* (PRPA), que busca reduzir o impacto de falhas sucessivas por meio da seleção de caminhos alternativos com menor probabilidade de comprometimento. Os resultados demonstram redução na quantidade de serviços interrompidos, evidenciando que informações probabilísticas podem aumentar a efetividade dos processos de restauração. O trabalho reforça outra tendência observada na literatura: reduzir o consumo de recursos por meio da substituição parcial da proteção previamente provisionada por mecanismos de restauração dinâmica, nos quais os caminhos de recuperação são estabelecidos somente após a ocorrência da falha.

Outra linha de pesquisa explora estruturas de proteção baseadas em planejamento antecipado. Nesse contexto, Henry et al. [59] propuseram o esquema *Ring Cover*, que organiza a proteção em ciclos previamente estabelecidos para restaurar rapidamente enlaces afetados por falhas. A abordagem reduz o tempo de recuperação ao utilizar ciclos já configurados, eliminando a necessidade de calcular novos caminhos após a ocorrência da falha. Em contrapartida, exige um planejamento cuidadoso da cobertura da rede e da construção desses ciclos, de modo a assegurar que os cenários de falha considerados permaneçam protegidos. O trabalho representa outra tendência observada na literatura: reduzir o tempo de recuperação por meio do planejamento antecipado dos recursos de proteção, em substituição ao cálculo de caminhos durante o processo de restauração.

Mais recentemente, a literatura passou a investigar cenários de SDM-EONs, nos quais os mecanismos de proteção devem considerar simultaneamente restrições espectrais, distribuição espacial dos núcleos e diferentes fontes de falha. Nesse contexto, Zheng et al. [23] investigaram o *Shared Backup Path Protection* (SBPP) considerando falhas em *Shared Risk Link Groups* (SRLGs), enlaces, nós e núcleos. Um SRLG representa um conjunto de enlaces que compartilham um mesmo risco físico de falha, permitindo mode-

lar eventos correlacionados capazes de afetar simultaneamente múltiplos componentes da rede. A abordagem emprega técnicas de otimização robusta para selecionar caminhos de proteção compartilhados capazes de atender diferentes cenários de falha, representando um dos primeiros esforços voltados ao tratamento integrado de múltiplos tipos de falha em ambientes SDM-EON. Os resultados demonstram que a combinação entre otimização robusta e compartilhamento dos recursos de proteção amplia a capacidade de recuperação da rede mantendo reduzido o consumo de recursos. O trabalho evidencia outra tendência observada na literatura: ampliar a abrangência dos mecanismos de proteção por meio da consideração conjunta de diferentes tipos de falha, preservando a eficiência na utilização dos recursos da rede.

Avanços também foram obtidos com o emprego de sistemas ópticos coerentes. Nakagawa et al. [56] exploraram a utilização conjunta de informações de amplitude, fase e polarização para ajustar dinamicamente os caminhos de *backup*, aumentando a capacidade de adaptação da rede frente a diferentes condições operacionais. A abordagem explora os recursos adicionais proporcionados pela transmissão coerente para tornar os mecanismos de recuperação mais adaptativos, conciliando maior capacidade de reconfiguração com redução do consumo de recursos de proteção. Os resultados demonstram que a utilização de sistemas coerentes amplia a flexibilidade operacional dos mecanismos de recuperação sem comprometer a eficiência no uso dos recursos. O trabalho evidencia outra tendência observada na literatura: explorar as capacidades oferecidas pelas tecnologias de transmissão coerente para tornar os mecanismos de proteção mais adaptáveis às condições dinâmicas da rede.

Júnior et al. [2] investigam o pré-provisionamento de recursos de proteção em EONs, comparando mecanismos dedicados DPP e DLP com o Ham-p-Cycle, representante da proteção compartilhada por caminho. A proposta combina a preparação antecipada de recursos de proteção com o provisionamento sob demanda, avaliando simultaneamente o bloqueio de banda e a disponibilidade do serviço. Os resultados mostram o compromisso entre as alternativas: a proteção compartilhada reduz a capacidade de *backup* reservada, enquanto os mecanismos dedicados preservam recursos exclusivos de recuperação e apresentam menor indisponibilidade. Esse trabalho constitui um antecedente para a discussão de planejamento antecipado e disponibilidade dos mecanismos de proteção.

Observa-se, portanto, uma evolução gradual das estratégias de proteção contra falhas duplas, caracterizada pela busca contínua por reduzir o consumo de recursos sem comprometer a capacidade de recuperação da rede. As diferentes abordagens analisadas exploram mecanismos como compartilhamento de recursos de proteção, proteção parcial, degradação controlada do serviço, planejamento antecipado e integração com estratégias de restauração, refletindo os diversos compromissos entre disponibilidade, consumo de

capacidade e complexidade operacional.

Tabela 3.1: Comparação das principais estratégias de proteção contra falhas múltiplas e abordagens relacionadas

Referência	Tecnologia	Mecanismo	Falhas	Estratégia de redução de recursos	Característica / Escopo
Ramasubramanian e Chandak (2008) [10]	WDM	DLP / SLP	Múltiplas (duplas)	Compartilhamento seletivo de enlaces de proteção (BLME)	Combina caminhos de <i>backup</i> previamente planejados com compartilhamento entre enlaces compatíveis.
Oliveira e Fonseca (2017) [22]	SDM-EON	FIPP p-cycle (SLP)	Duas falhas de enlace simultâneas	Compartilhamento de espectro e <i>traffic grooming</i>	Utiliza p-cycles e avaliação baseada em CPT para proteção em SDM-EON com múltiplos núcleos.
Pruk et al. (2020) [11]	WDM	Híbrido	Duplas	Proteção 1+1 combinada com restauração <i>on-line</i>	Combina proteção previamente provisionada e restauração dinâmica do caminho de backup.
Assis et al. (2021) [55]	EON	DPP	Duplas	Degradação controlada da taxa de transmissão	Mantém conectividade sob falhas duplas com redução temporária de QoS.
Tan et al. (2021) [12]	WDM	Proteção parcial	Múltiplas	Proteção parcial da capacidade (MPPF / MPPU)	Dimensiona a recuperação para frações da capacidade originalmente provisionada.
Nakagawa et al. (2022) [56]	WDM	SPP	Múltiplas	Compartilhamento segmentado de recursos (ESP)	Permite compartilhamento de recursos de backup entre múltiplas conexões.
Bhadra et al. (2023) [57]	WDM	SPP	Múltiplas	Segmentação de trilhas ópticas (SLTP)	Segmenta trilhas ópticas em blocos protegidos para maior flexibilidade de recuperação.
Ramalho et al. (2023) [58]	WDM	Restauração	Múltiplas	Seleção probabilística de caminhos alternativos (PRPA)	Utiliza informação probabilística para orientar restauração após falhas.
Henry et al. (2023) [59]	WDM	SLP	Múltiplas	Proteção baseada em ciclos pré-configurados (<i>Ring Cover</i>)	Emprega ciclos pré-planejados para acelerar recuperação de enlaces.
Zheng et al. (2023) [23]	SDM-EON	SBPP	Múltiplas falhas correlacionadas	Compartilhamento robusto com otimização sob falhas correlacionadas	Considera SRLGs, nós, enlaces e núcleos com otimização robusta; não se restringe ao cenário de duas falhas de enlace.
Júnior et al. (2025) [2]	EON	DPP / DLP e SPP	Simples	Pré-provisionamento de recursos de proteção	Avalia pré-provisionamento e provisionamento sob demanda, comparando disponibilidade e bloqueio de mecanismos dedicados e compartilhados.
Proposta DPPDF	SDM-EON	DPP	Duplas	Reutilização controlada de espectro sujeito a degradação por crosstalk	Integra três caminhos disjuntos, especialização funcional de núcleos e verificação seletiva de XT para proteção dedicada contra falhas duplas.

Em síntese, a literatura demonstra que o elevado custo da proteção contra falhas duplas motivou o desenvolvimento de diferentes estratégias voltadas à redução do consumo de recursos. Entre elas destacam-se o compartilhamento de caminhos de *backup*, os mecanismos de restauração, a degradação controlada da qualidade de serviço, a proteção parcial da capacidade e a segmentação dos recursos de proteção. Em comum, essas abordagens procuram reduzir a quantidade de capacidade previamente reservada, flexibilizando, em diferentes níveis, as garantias tradicionalmente oferecidas pelos esquemas de proteção totalmente dedicados.

Essa evolução evidencia uma das principais linhas de pesquisa em proteção óptica: reduzir o consumo de recursos sem comprometer a capacidade de recuperação da rede. Nos esquemas de proteção compartilhada, essa economia é obtida pelo compartilhamento dos próprios recursos de proteção entre diferentes conexões, tornando a recuperação depen-

dente das hipóteses adotadas pelo mecanismo de compartilhamento. Em contrapartida, os esquemas de proteção dedicada preservam a independência entre os caminhos de recuperação, porém ao custo de maior consumo de capacidade.

Nos cenários de SDM-EON, esse compromisso torna-se ainda mais desafiador devido à necessidade de considerar simultaneamente as restrições espectrais, a distribuição espacial dos núcleos e os efeitos do *inter-core crosstalk*. Apesar dos avanços observados na literatura, não foram identificadas propostas que combinem proteção dedicada contra falhas duplas com reutilização controlada de espectro degradado por *crosstalk*. Da mesma forma, não foram encontrados trabalhos que integrem simultaneamente três caminhos totalmente disjuntos, especialização funcional de núcleos e verificação seletiva da viabilidade óptica durante a ativação da proteção. Essa lacuna motiva o desenvolvimento da proposta DPPDF apresentada nesta tese, cuja estratégia reduz o consumo de recursos não por meio do compartilhamento dos caminhos de proteção, mas pelo reaproveitamento seguro de espectro previamente degradado, preservando a independência entre os caminhos de recuperação.

3.2 Estratégias Baseadas em XT-Estimated

O tratamento do *crosstalk* por meio de estratégias *XT-Estimated* baseia-se na estimação explícita dos níveis de interferência inter-core ao longo das etapas de planejamento, provisionamento ou reconfiguração das conexões. Diferentemente das abordagens *XT-Avoid*, que evitam preventivamente a utilização simultânea de espectros em núcleos adjacentes, os métodos *XT-Estimated* adotam políticas que permitem a coexistência espacial e espectral desde que o nível de interferência estimado permaneça abaixo dos limites de qualidade de transmissão associados ao formato de modulação empregado. Nessas abordagens, o *crosstalk* é incorporado ao processo de tomada de decisão por meio de modelos analíticos ou métricas heurísticas capazes de avaliar a viabilidade óptica de cada alocação candidata.

Klinkowski (2018) [16] contribui para a fundamentação física das abordagens *XT-Estimated* ao investigar o impacto do *inter-core crosstalk* sobre o desempenho de redes SDM-EON. O trabalho demonstra quantitativamente que o aumento do XT reduz o alcance de transmissão das modulações, eleva o consumo de espectro e reduz a capacidade de suporte de tráfego, evidenciando a dependência entre os parâmetros físicos da fibra multicore e o desempenho da rede. Além disso, o autor classifica a literatura em duas categorias principais: abordagens de evasão (*best-effort*) e abordagens baseadas em restrições estritas (*strict constrained*). Para estas últimas, destaca que a avaliação fisicamente mais rigorosa envolve a verificação simultânea dos níveis de XT do *lightpath* candidato e dos *lightpaths* previamente estabelecidos potencialmente afetados pela nova conexão. O

trabalho ressalta, entretanto, que essa estratégia depende do estado dinâmico da rede e envolve elevada complexidade computacional, motivo pelo qual abordagens de pior caso são frequentemente adotadas para simplificar o processo de provisionamento. Embora não proponha um algoritmo de alocação de recursos, o artigo estabelece a base conceitual e física que serviu de suporte para o desenvolvimento das abordagens dinâmicas de estimação de *crosstalk* propostas posteriormente.

Zhao et al. [25] caracterizam uma abordagem *XT-Estimated*, pois utilizam estimativas explícitas de *crosstalk* como critério de decisão durante o processo de desfragmentação espectral em redes SDM-EON com fibras multicore. Os autores propõem o algoritmo CASD (*Crosstalk-Aware Spectrum Defragmentation*), no qual a desfragmentação é acionada quando a compactação espectral (*Spectrum Compactness* – SC) de um núcleo ou enlace fica abaixo de um limiar predefinido, sendo que as realocações são realizadas de forma a manter o *crosstalk* inter-core dentro dos limites de qualidade de transmissão estabelecidos. O CASD executa duas operações complementares: (i) SS-DC (*Same Spectrum-Different Core*), que transfere conexões para outro núcleo mantendo os mesmos slots espectrais, desde que a viabilidade em termos de *crosstalk* e QoT seja atendida; e (ii) DS-SC (*Different Spectrum-Same Core*), que realoca a conexão para outro bloco espectral contíguo no mesmo núcleo ao longo de todo o *lightpath*, sendo aplicada quando não há núcleos alternativos viáveis ou quando os níveis de *crosstalk* excedem os limites aceitáveis. Em ambas as operações, a decisão de realocação depende da avaliação do *crosstalk* e da comparação com um limiar previamente definido. Dessa forma, o CASD incorpora o XT diretamente ao processo de tomada de decisão, utilizando-o como mecanismo de validação das realocações. Os resultados mostram que a consideração explícita do *crosstalk* durante a desfragmentação reduz a fragmentação espectral e melhora a utilização dos recursos da rede. O trabalho evidencia que a integração do XT aos mecanismos de reconfiguração permite reorganizar o espectro sem comprometer a qualidade de transmissão, reforçando o papel do *crosstalk* como parâmetro de decisão em processos de reconfiguração de redes SDM-EON.

Klinkowski (2019) [60] representa uma das principais abordagens *XT-Estimated* para provisionamento dinâmico em redes SDM-EON ao operacionalizar em algoritmo a estratégia conceitual discutida em trabalhos anteriores. O autor compara métodos baseados em estimativas de pior caso (*Worst-Case XT*) com abordagens de estimação dinâmica (*Precise XT*), ambas fundamentadas na *Coupled Power Theory* (CPT). Diferentemente das abordagens de pior caso, a formulação *Precise XT* considera o estado instantâneo da rede, identificando inicialmente o conjunto Q de *lightpaths* previamente estabelecidos potencialmente afetados pela nova conexão. Em seguida, o algoritmo avalia o conjunto formado pelo *lightpath* candidato l e por Q , recalculando explicitamente o *crosstalk* tanto do

novo *lightpath* quanto dos circuitos potencialmente afetados, aceitando a conexão apenas quando todos permanecem dentro do limite de XT permitido pela modulação utilizada. Essa estratégia reduz o conservadorismo das estimativas de pior caso, melhora a probabilidade de bloqueio, aumenta a utilização de modulações de maior eficiência espectral e reduz a necessidade de regenerações motivadas por *crosstalk* nos cenários avaliados. O artigo também quantifica experimentalmente o custo computacional dessa abordagem por meio de medições do tempo médio de processamento das diferentes variantes do algoritmo, evidenciando o trade-off entre maior precisão na estimação do XT e maior complexidade computacional.

Ítalo (2020) [26] apresenta uma análise comparativa dos principais modelos de *cross-talk* inter-core propostos para redes SDM-EON, constituindo referência relevante para as abordagens classificadas como *XT-Estimated*. Os modelos analisados baseiam-se na *Coupled Power Theory* (CPT) para a estimação explícita do *crosstalk*, amplamente utilizada para descrever o acúmulo de interferência ao longo da propagação óptica. O trabalho compara diferentes formulações fundamentadas na CPT, destacando a influência do número de núcleos adjacentes ativos, do comprimento dos enlaces e das características físicas da fibra sobre os níveis de interferência observados. Embora não proponha mecanismos de roteamento ou alocação de recursos, o estudo consolida fundamentos teóricos amplamente utilizados na literatura *XT-Estimated*, evidenciando os principais parâmetros responsáveis pelo acúmulo de *crosstalk*. Dessa forma, o trabalho serve como base conceitual para algoritmos que incorporam a estimação do XT no processo de tomada de decisão para avaliação da viabilidade óptica das conexões.

Kawaguchi (2024) [61] representa uma abordagem *XT-Estimated*, pois utiliza estimativas explícitas de *crosstalk* para orientar a seleção dos formatos de modulação em redes SDM-EON. O trabalho emprega a formulação baseada na *Coupled Power Theory* (CPT) para estimar o nível médio de interferência em função do número de *lightpaths* adjacentes, do coeficiente de acoplamento óptico e da distância de propagação. A partir dessa estimativa, o algoritmo realiza um processo de seleção adaptativa de modulação, no qual formatos de maior eficiência espectral podem ser substituídos por formatos mais robustos ao *crosstalk*, quando o aumento da tolerância à interferência favorece a viabilidade das conexões. Diferentemente de abordagens que utilizam o XT apenas como critério de validação ou rejeição durante o provisionamento, o método incorpora essa estimativa no processo de decisão da modulação, buscando equilibrar eficiência espectral e robustez à interferência inter-core. Os resultados indicam que essa estratégia aumenta a quantidade de conexões suportadas em cenários com maior interferência entre núcleos adjacentes, ampliando a capacidade de atendimento da rede quando comparada a esquemas baseados na seleção fixa de modulação de maior eficiência espectral. Dessa forma, o trabalho

evidencia que estimativas de *crosstalk* podem ser utilizadas não apenas como restrição de viabilidade óptica, mas também como elemento de adaptação do processo de seleção de modulação em redes SDM-EON.

Selles (2025) [19] representa uma abordagem *XT-Estimated*, pois utiliza estimativas explícitas de *crosstalk* para orientar decisões de reconfiguração em redes SDM-EON. Diferentemente de trabalhos que empregam o XT apenas como critério de admissão de novas conexões, o autor utiliza a estimação da interferência para apoiar a identificação de circuitos associados à degradação da Qualidade de Transmissão (QoT), especialmente em situações próximas ao bloqueio. A estratégia proposta, denominada *Crosstalk-aware Circuit ReAllocation* (CCRA), seleciona circuitos interferentes e busca novas posições espectrais capazes de maximizar a margem entre o XT observado e o limite tolerado pela modulação utilizada. Dessa forma, a estimativa de XT deixa de atuar apenas como uma condição de viabilidade óptica e passa a ser incorporada como mecanismo de suporte à reconfiguração da rede. Os resultados indicam que a abordagem atinge níveis de bloqueio comparáveis aos obtidos por algoritmos tradicionais de desfragmentação espectral, porém com menor número de reconfigurações e redução da latência de realocação. Esse resultado evidencia uma tendência na literatura na qual o *crosstalk* passa a ser tratado como um fenômeno gerenciável por mecanismos de reconfiguração, em vez de permanecer exclusivamente como restrição de provisionamento. O trabalho demonstra que estimativas de XT podem ser utilizadas para orientar ações corretivas após o estabelecimento das conexões, permitindo manter circuitos operacionais por meio de reconfigurações direcionadas e ampliando o papel das abordagens *XT-Estimated* na gestão dinâmica de redes SDM-EON. Em síntese, as abordagens *XT-Estimated* procuram aumentar o aproveitamento dos recursos da rede por meio da estimação explícita do *crosstalk*. Os trabalhos analisados demonstram diferentes formas de incorporar essa informação ao processo de tomada de decisão, incluindo mecanismos de avaliação da viabilidade óptica, seleção de modulação, alocação RMSCA, desfragmentação espectral e reconfiguração de circuitos. Em comparação às abordagens *XT-Avoid*, essas estratégias tendem a reduzir o conservadorismo associado ao uso dos recursos espectrais e espaciais da rede, porém ao custo de maior complexidade computacional decorrente da necessidade de estimar continuamente os níveis de interferência. A literatura também evidencia uma evolução gradual do papel do *crosstalk*, que deixa de ser tratado exclusivamente como uma restrição de QoT e passa a atuar como parâmetro de otimização, reconfiguração e gerenciamento da rede.

Tabela 3.2: Comparação das principais abordagens *XT-Estimated* em SDM-EONs

Referência	Modelo de XT	Verificação explícita dos LPs existentes	Objetivo	Extratatégia	Principal contribuição
Ítalo (2020)	Revisão de modelos baseados em CPT	Não aplicável	Fundamentação teórica	Não aplicável	Consolida modelos analíticos de <i>crosstalk</i> baseados em CPT, discutindo suas características físicas e aplicações em SDM-EONs.
Klinkowski (2018)	CPT (<i>Worst-Case</i>)	Não	Fundamentação física	Baixa	Relaciona o <i>crosstalk</i> ao alcance de transmissão, à modulação e ao uso do espectro, estabelecendo base física para estudos posteriores.
Klinkowski (2019)	CPT (<i>Worst-Case</i> e <i>Precise XT</i>)	Sim	Provisionamento dinâmico	Alta	Propõe a reavaliação explícita do XT do <i>lightpath</i> candidato e de circuitos potencialmente afetados, evidenciando o compromisso entre precisão e custo computacional.
Zhao (2018)	CPT	Parcial	Desfragmentação espectral	Média	Utiliza estimativas de XT para validar realocações espectrais durante o processo de desfragmentação, preservando a QoT das conexões.
Rodrigues (2021)	Métrica heurística (CpS)	Não	RMSCA	Baixa	Emprega uma métrica baseada em ocupação espectral para estimar o potencial de interferência entre núcleos adjacentes, reduzindo o custo de avaliação do XT.
Kawaguchi (2024)	CPT	Não	Seleção de modulação	Média	Utiliza estimativas de XT para orientar a seleção dinâmica de formatos de modulação mais robustos à interferência inter-core.
Selles (2025)	CPT linearizado	Sim	Reconfiguração dinâmica	Média	Utiliza estimativas de XT para identificar circuitos associados à degradação de QoT e orientar reconfigurações seletivas da rede.
Proposta DPPDF	Verificação seletiva baseada em CPT	Seletiva (γ)	Proteção dedicada	Baixa	Restringe a verificação de XT ao caminho de proteção inativo durante sua ativação, permitindo o reaproveitamento de espectro degradado sem reavaliação contínua de todos os circuitos ativos.

3.3 Estratégias Baseadas em XT-Avoid

O tratamento do *crosstalk* por meio de estratégias *XT-Avoid* baseia-se na prevenção estrutural da interferência entre núcleos adjacentes. Nessas abordagens, a ocorrência de *crosstalk* é evitada por meio de restrições de alocação que impedem a utilização simultânea de faixas espectrais coincidentes em núcleos vizinhos, dispensando a necessidade de estimar continuamente os níveis de interferência durante a operação da rede. Dessa forma, o *crosstalk* é tratado de forma preventiva, sendo incorporado ao processo de tomada de decisão como uma condição de viabilidade da alocação.

O principal benefício dessa estratégia é a redução da complexidade computacional, uma vez que elimina os cálculos recorrentes de interferência exigidos pelas abordagens *XT-Estimated*. Em contrapartida, essas restrições ao reuso espectral tendem a reduzir a flexibilidade da alocação, aumentando a fragmentação vertical e podendo levar à subutilização dos recursos espectrais e espaciais disponíveis na rede.

Chatterjee et al. [18] representam uma abordagem baseada em *XT-Avoid*, pois tratam o *crosstalk* por meio de restrições estruturais de alocação, sem realizar a estimação explícita dos níveis de interferência. Os autores propõem um mecanismo de alocação baseado em prioridades para mitigar simultaneamente o *inter-core crosstalk* e o *inter-mode crosstalk* em redes SS-EON. A estratégia constrói um grafo auxiliar cujos vértices repre-

sentam combinações núcleo–modo e cujas arestas conectam pares considerados adjacentes sob a perspectiva de interferência. A prioridade de cada vértice é definida a partir de seu grau de adjacência, de modo que recursos associados a menor potencial de interferência sejam selecionados primeiro. Durante a alocação, os mesmos slots espectrais não podem ser utilizados em núcleos ou modos adjacentes, o que previne a ocorrência de *crosstalk* e elimina a necessidade de estimar continuamente os níveis de interferência para cada nova conexão. Dessa forma, o *crosstalk* é tratado como uma condição de viabilidade da alocação, em vez de uma métrica física a ser avaliada dinamicamente, o que simplifica o processo de decisão. Os resultados demonstram redução da probabilidade de bloqueio e aumento da carga de tráfego admissível em até 40% quando comparado a esquemas convencionais baseados em *First-Fit*. Entretanto, esses ganhos são obtidos mediante restrições adicionais ao compartilhamento espectral entre recursos adjacentes, o que pode reduzir a flexibilidade da alocação e limitar o aproveitamento de regiões espectrais que seriam viáveis em abordagens baseadas em *XT-Estimated*.

Qihan et al. [17] representam uma abordagem baseada em *XT-Avoid*, aplicada ao problema de *Virtual Optical Network Embedding* (VONE) em redes SDM-EON com fibras multicore heterogêneas. O trabalho parte da observação de que a interferência inter-core ocorre quando serviços utilizam frequências coincidentes em núcleos adjacentes. Em vez de calcular ou estimar explicitamente os níveis de *crosstalk*, os autores adotam uma restrição estrutural denominada *IC-XT-avoid constraint*, que impede a sobreposição de frequências centrais entre núcleos vizinhos. Dessa forma, o *crosstalk* é tratado como uma condição binária de viabilidade da alocação, eliminando a necessidade de modelos físicos ou avaliações dinâmicas da interferência durante o provisionamento. Como consequência, a formulação torna-se mais simples e apresenta menor custo computacional quando comparada às abordagens baseadas em *XT-Estimated*. Os resultados experimentais mostram que a estratégia aumenta em até 72% a razão de frequência disponível (*Available Frequency Ratio* – AFR) e reduz aproximadamente 35% da fragmentação espectral, evidenciando a eficácia da prevenção estrutural da interferência em cenários SDM-EON. Entretanto, a abordagem mantém o *crosstalk* como uma restrição de exclusão, o que preserva indisponíveis regiões espectrais que poderiam ser exploradas por mecanismos capazes de gerenciar explicitamente os níveis de interferência.

Ahmed et al. [50] apresentam uma análise das estratégias *XT-Avoid* em redes SS-EON, com o objetivo de avaliar seus impactos sobre a utilização dos recursos e o custo dos processos de alocação. Os autores adotam restrições estruturais que impedem a utilização simultânea dos mesmos slots espectrais em núcleos ou modos adjacentes, eliminando a necessidade de calcular explicitamente os níveis de *crosstalk* durante o provisionamento das conexões. Como consequência, a abordagem simplifica o processo de tomada de

decisão e reduz o esforço computacional quando comparada às soluções baseadas em estimação explícita de XT. Os resultados mostram que essa estratégia diminui o tempo de processamento e facilita o gerenciamento dos recursos da rede. Entretanto, os autores também observam que a prevenção estrutural da interferência gera regiões espectrais livres que permanecem inutilizadas devido às restrições de adjacência impostas pelo mecanismo *XT-Avoid*. Dessa forma, o trabalho evidencia o trade-off típico dessa classe de soluções: a redução do esforço computacional ocorre em detrimento de uma menor flexibilidade na utilização dos recursos espectrais, o que pode limitar o aproveitamento da capacidade disponível da rede.

Heera et al. [62] apresentam uma análise comparativa entre três estratégias de tratamento do *crosstalk* em redes SDM-EON: *XT-Ignore*, *XT-Avoid* e *XT-Aware*. Na abordagem *XT-Avoid*, os autores restringem a utilização de um slot espectral em um núcleo quando o mesmo slot já está ocupado em qualquer núcleo adjacente, eliminando a necessidade de estimar explicitamente os níveis de interferência durante o provisionamento. Dessa forma, o *crosstalk* é tratado como uma condição estrutural de alocação, característica típica das estratégias *XT-Avoid*. Os resultados mostram que essa política reduz a complexidade operacional e simplifica o processo de decisão, porém aumenta a probabilidade de bloqueio devido à menor reutilização espectral entre núcleos adjacentes. Os autores destacam que essa limitação decorre da existência de regiões espectrais que permanecem inutilizadas apenas para evitar a ocorrência de *crosstalk*, mesmo quando poderiam permanecer operacionalmente viáveis sob mecanismos capazes de avaliar ou gerenciar explicitamente os níveis de interferência. O trabalho reforça o trade-off clássico entre simplicidade de decisão e eficiência no uso dos recursos espectrais observado nas abordagens *XT-Avoid*.

Lacerda Jr. et al. [63] propõem o algoritmo FraCA para redes SDM-EON. A estratégia combina a prevenção estrutural do XT com a redução de fragmentação espectral, priorizando regiões distintas do espectro em núcleos adjacentes e dispensando a estimação explícita de XT durante a seleção de novos caminhos ópticos. O trabalho representa uma aplicação recente de *XT-Avoid* como mecanismo de baixa complexidade para alocação de núcleo e espectro. Entretanto, seu escopo permanece voltado ao atendimento de demandas e à fragmentação, sem incorporar proteção dedicada contra falhas duplas nem a reutilização de recursos degradados para caminhos inativos.

Em síntese, as abordagens *XT-Avoid* buscam mitigar o *crosstalk* por meio de restrições estruturais que impedem a utilização simultânea de recursos potencialmente interferentes. Os trabalhos analisados indicam que essa estratégia está associada à redução do esforço computacional e à simplificação do processo de alocação, uma vez que dispensa a estimação contínua dos níveis de interferência. Entretanto, tais benefícios são geralmente

obtidos à custa de uma menor flexibilidade na utilização dos recursos espectrais e espaciais da rede, resultando em regiões espectrais que permanecem não utilizadas para evitar a ocorrência de *crosstalk*. A literatura também sugere que essas abordagens não têm como objetivo principal a provisão de mecanismos de proteção dedicada contra falhas duplas, concentrando-se predominantemente na mitigação preventiva da interferência inter-core.

Tabela 3.3: Comparação entre abordagens XT-Avoid e a proposta DPPDF

Trabalho	Tratamento do XT	Processamento	Suporte a falhas duplas	Características / Escopo
Qihan et al. (2022) [17]	IC-XT-Avoid	Baixo	Não	Impede a sobreposição espectral entre núcleos adjacentes por meio de restrições estruturais de alocação.
Chatterjee et al. (2021) [18]	XT-Avoid por prioridade núcleo-modo	Baixo	Não	Utiliza restrições estruturais baseadas em adjacência para evitar a ocorrência de interferência entre recursos.
Ahmed et al. (2022) [50]	XT-Avoid	Baixo	Não	Adota restrições de adjacência espectral, reduzindo o esforço de decisão durante o processo de alocação.
Heera et al. (2022) [62]	XT-Avoid por bloqueio de adjacência	Baixo	Não	Baseia-se em regras de ocupação que restringem o reuso espectral entre recursos adjacentes.
Lacerda Jr. et al. (2024) [63]	XT-Avoid com priorização de regiões espectrais	Baixo	Não	Combina prevenção estrutural de XT e redução de fragmentação, priorizando faixas espectrais distintas em núcleos adjacentes.
DPPDF (Proposta)	Especialização funcional de núcleos + verificação seletiva de XT	Moderado	Sim	Utiliza especialização de núcleos e verificação seletiva de crosstalk para suportar a ativação de caminhos de proteção inativos em cenários de falhas duplas.

3.4 Lacunas e Desafios da Literatura

A análise dos trabalhos revisados permite identificar três principais lacunas na literatura sobre redes SDM-EON. A primeira está relacionada ao subaproveitamento de regiões espectrais afetadas por *crosstalk*. A segunda refere-se à ausência de mecanismos capazes de utilizar a interferência inter-núcleo como elemento operacional nas estratégias de alocação e proteção. A terceira está associada ao maior esforço de processamento das abordagens baseadas em *XT-Estimated*. As lacunas são discutidas a seguir.

1. **Subaproveitamento do espectro degradado por *crosstalk*.** Os estudos revisados consideram o *crosstalk* principalmente como um fator limitante da qualidade de transmissão (QoT), resultando na exclusão ou restrição do uso de regiões espectrais sujeitas à interferência. Esse tratamento conservador reduz a utilização dos

recursos disponíveis e pode levar à subutilização de capacidade nos núcleos mais degradados, mesmo quando tais regiões poderiam ser exploradas para finalidades específicas, como tráfego de proteção ou *backups* inativos. Não foram identificadas, na literatura analisada, propostas que utilizem de forma controlada espectros degradados por *crosstalk* como elemento operacional das estratégias de rede.

2. **Ausência de utilização operacional do *crosstalk*.** Embora abordagens recentes realizem estimativas cada vez mais detalhadas do *crosstalk*, considerando informações espectrais, adjacência entre núcleos e características físicas da fibra, essas informações são, de forma geral, utilizadas para validar, rejeitar ou reconfigurar alocações. Nas abordagens analisadas, o *crosstalk* permanece predominantemente tratado como uma restrição de qualidade de transmissão (QoT), a ser mantida abaixo de determinados limiares operacionais. Não foram identificadas abordagens que explorem a interferência inter-núcleo como um elemento operacional capaz de apoiar mecanismos de proteção, diferenciação funcional de caminhos ou reutilização estratégica de regiões espectrais degradadas.
3. **Maior esforço de processamento das abordagens *XT-Estimated* e reavaliação dinâmica do *crosstalk*.** Os métodos baseados em estimação explícita de *crosstalk* tendem a exigir avaliações adicionais durante o processo de provisionamento, frequentemente considerando informações espectrais, adjacência entre núcleos e parâmetros físicos da fibra para estimar os níveis de interferência. Embora diversos trabalhos indiquem ganhos em termos de utilização espectral e redução das taxas de bloqueio, observa-se menor ênfase na literatura quanto ao impacto associado a essas avaliações em cenários de tráfego dinâmico. Em particular, são limitadas as análises que relacionam o grau de detalhamento do modelo de *crosstalk* com métricas de escalabilidade, latência de decisão e *overhead* de processamento em controladores SDM-EON. Como consequência, permanece relativamente pouco investigado o compromisso entre precisão na estimação do XT e desempenho operacional da rede.

Superar essas limitações exige enfrentar três desafios operacionais diretamente relacionados à proposta deste trabalho:

1. **Reutilização segura de espectro degradado.** O DPPDF introduz o conceito de reaproveitamento intencional de regiões sujeitas a *crosstalk*, reservando núcleos degradados para a alocação de *backups* inativos. Essa estratégia busca reduzir o desperdício de espectro e ampliar o aproveitamento dos recursos disponíveis, mantendo a qualidade de transmissão (QoT) dos caminhos ativos.

2. **Redução do esforço de avaliação do XT.** Diferentemente das abordagens *XT-Estimated* convencionais, que frequentemente exigem a reavaliação de múltiplas conexões durante o provisionamento ou a reconfiguração da rede, a DPPDF restringe a verificação explícita do *crosstalk* aos caminhos de proteção inativos. Essa característica reduz o volume de cálculos necessários para garantir a viabilidade óptica da proteção.
3. **Prevenção do efeito dominó durante a ativação da proteção.** Como os *backups* inativos podem ocupar regiões sujeitas a XT, torna-se necessário garantir que sua ativação não comprometa conexões vizinhas. Para isso, o modelo verifica previamente a existência de alternativas disjuntas para os circuitos potencialmente afetados, buscando evitar falhas correlacionadas e assegurando a restauração em cenários de falhas duplas.

A proposta DPPDF busca endereçar as lacunas identificadas na literatura por meio da reutilização controlada de regiões espectrais degradadas por *crosstalk* em mecanismos de proteção dedicada. Em vez de tratar a interferência inter-núcleo exclusivamente como uma restrição de viabilidade óptica, o modelo propõe explorar sua presença de forma seletiva e planejada na alocação de *backups* inativos. Além disso, a estratégia reduz a dependência de avaliações contínuas de XT ao restringir a análise explícita da interferência aos caminhos de proteção, reduzindo o esforço computacional associado às abordagens tradicionais *XT-Estimated*. Essa combinação busca ampliar o aproveitamento espectral, mantendo a QoT dos caminhos ativos, e introduz uma perspectiva complementar para o tratamento do XT em redes SDM-EON.

A análise da literatura indica que a proteção contra falhas duplas ainda recebe atenção limitada, tanto em EONs tradicionais quanto em SDM-EONs. A principal razão apontada está relacionada ao aumento significativo no consumo de recursos decorrente da utilização de múltiplos caminhos de proteção, o que direcionou a maior parte das propostas para mecanismos de proteção compartilhada. Entretanto, tais abordagens não garantem restauração dedicada sob múltiplas falhas, mantendo em aberto a necessidade de soluções que ofereçam maior previsibilidade e isolamento entre cenários de falha.

A proteção contra falhas duplas é relevante quando um mesmo evento interrompe simultaneamente o caminho principal e o primeiro caminho de proteção de uma demanda, situação em que a proteção dedicada convencional contra falha simples não dispõe de alternativa adicional. Sua adoção é limitada porque exige um terceiro caminho disjunto e a reserva prévia de sua capacidade, aumentando substancialmente o consumo de recursos. Em cenários nos quais o requisito de disponibilidade justifica proteção adicional e existem recursos espectro-espaciais que permaneceriam sem uso sob políticas conservadoras de XT, essa terceira alternativa pode ampliar a capacidade de recuperação sem competir

diretamente com o tráfego ativo. A DPPDF preserva os dois caminhos ativos empregados nesse esquema convencional e acrescenta um segundo caminho de proteção, mantido inativo durante a operação normal. Esse caminho adicional é reservado em regiões espectrais sujeitas a *crosstalk*, que seriam evitadas pelas políticas conservadoras de alocação, e é ativado somente quando a falha dupla exige sua utilização. Assim, a proposta busca ampliar a capacidade de recuperação sem reservar o terceiro caminho nas mesmas regiões espectrais destinadas ao tráfego ativo.

No que se refere ao tratamento do *crosstalk*, observa-se que, apesar dos avanços na modelagem física e nas estratégias de mitigação, o XT permanece predominantemente utilizado como uma restrição operacional. As soluções baseadas em *XT-Avoid* adotam prevenção estrutural da interferência, enquanto as abordagens *XT-Estimated* utilizam estimativas analíticas para validar, rejeitar ou reconfigurar alocações. Em ambos os casos, regiões espectrais sujeitas a degradação tendem a permanecer subutilizadas, e o *crosstalk* permanece essencialmente como uma condição de restrição.

Em conjunto, os resultados da literatura sugerem que o potencial de utilização controlada de regiões degradadas por *crosstalk* ainda não é explorado de forma sistemática em mecanismos de proteção. Adicionalmente, permanece pouco investigado o impacto associado à estimação contínua do XT em cenários dinâmicos de larga escala. Essas observações motivam o desenvolvimento da estratégia DPPDF, apresentada na seção seguinte, a qual combina caminhos disjuntos dedicados, reutilização seletiva de espectros degradados, especialização funcional de núcleos e verificação seletiva de XT para suportar proteção dedicada contra falhas duplas com maior previsibilidade e melhor aproveitamento espectral.

Capítulo 4

Proposta

Este capítulo descreve a proposta *Dedicated Path Protection against Double Failure* (DPPDF), voltada à proteção dedicada contra falhas duplas em redes SDM-EON. A abordagem explora de forma controlada o *inter-core crosstalk*, a especialização funcional dos núcleos e a alocação de três caminhos ópticos disjuntos: o caminho principal (α), o *backup* primário (β) e o *backup* secundário inativo (γ). Durante a operação normal, os caminhos ativos são alocados segundo o princípio *XT-avoid*, de modo a manter as transmissões livres de interferência. Em cenários de falha dupla, a ativação de γ utiliza modulação BPSK e uma verificação restrita baseada em abordagem do tipo *XT-estimated*. Ao longo da seção, são apresentados o modelo do sistema, a definição do problema, a metodologia de solução, a formulação ILP, a heurística proposta e sua complexidade computacional.

4.1 Proteção por Caminhos Dedicados contra Falhas Duplas

A estratégia DPPDF fornece proteção de caminho dedicada contra falhas duplas em redes SDM-EON por meio do reaproveitamento controlado de regiões espectralmente degradadas pelo *inter-core crosstalk* (XT), frequentemente tratadas como não utilizáveis sob critérios conservadores de qualidade de transmissão (QoT). Em contraste com abordagens que consideram o XT apenas como uma limitação física a ser evitada, a DPPDF o incorpora como um elemento do projeto de proteção. Para isso, a estratégia combina o reaproveitamento de regiões sujeitas à interferência com a especialização funcional dos núcleos da fibra, mantendo os *lightpaths* ativos em regiões livres de XT e reservando as regiões degradadas para caminhos de proteção inativos. O modelo define três caminhos ópticos: o caminho principal (α), o *backup* primário (β) e o *backup* secundário inativo

(γ). Este último permanece desativado durante a operação normal e é ativado apenas em cenários de falha dupla, utilizando modulação BPSK para aumentar sua tolerância ao *crosstalk*. Além disso, a formulação exige que a ativação de γ preserve alternativas de recuperação para demandas vizinhas por meio de caminhos disjuntos, reduzindo o risco de propagação de falhas na rede.

Do ponto de vista operacional, a DPPDF combina *XT-Avoid* e *XT-Estimated* de forma seletiva. Durante a operação normal, os caminhos ativos são alocados em núcleos funcionalmente distintos; assim, a interferência entre caminhos ativos é eliminada por construção e não é necessário recalculá-la para todos os caminhos ópticos já estabelecidos, como ocorre nas abordagens *XT-Estimated* convencionais.

A avaliação analítica de XT é acionada somente quando há possibilidade de interação com o caminho de proteção inativo γ , que opera em BPSK e utiliza os núcleos reservados às regiões espectrais potencialmente degradadas. O primeiro gatilho ocorre quando uma rota candidata é provisionada como γ : calcula-se o XT recebido por esse caminho a partir dos caminhos ativos co-canais em núcleos adjacentes. O segundo ocorre quando a alocação de um caminho ativo em BPSK pode compartilhar enlaces, posições espectrais e núcleos adjacentes com um γ previamente reservado: nesse caso, recalcula-se apenas o incremento de XT imposto ao caminho inativo afetado. Não há avaliação de XT entre caminhos ativos, pois eles permanecem separados pela política *XT-Avoid*.

A tabela de coexistência BPSK atua como filtro inicial para essas duas situações; somente os candidatos que passam por esse filtro exigem o cálculo analítico do XT acumulado. A verificação é, portanto, bidirecional e local: considera o XT recebido pelo novo γ e o XT adicional que uma nova alocação ativa pode introduzir sobre os γ já reservados. Essa seleção do conjunto de interações substitui a recomputação global de todos os *lightpaths* por verificações apenas nos pares ativo-inativo potencialmente interferentes, reduzindo o custo computacional sem abandonar a preservação da viabilidade óptica do caminho destinado à recuperação em falha dupla.

A ativação de γ não é modelada como uma condição de ausência absoluta de interferência sobre todos os caminhos ativos vizinhos. O caminho γ é fixado em BPSK, formato mais tolerante ao XT, enquanto os caminhos ativos podem utilizar formatos de modulação de ordem mais alta e, portanto, mais sensíveis à interferência. Quando γ passa a transmitir, ele pode suportar o XT que recebe e, ao mesmo tempo, introduzir XT em um caminho ativo co-canal situado em núcleo adjacente. Essa assimetria é precisamente a interação que torna necessário o mecanismo de prevenção do efeito dominó. A DPPDF exige que qualquer demanda potencialmente afetada preserve uma alternativa de recuperação disjunta da tripla ativada. Assim, a ativação de γ pode produzir uma degradação local, mas não pode eliminar todas as alternativas de atendimento da demanda vizinha

nem iniciar uma sequência de recuperações sem saída.

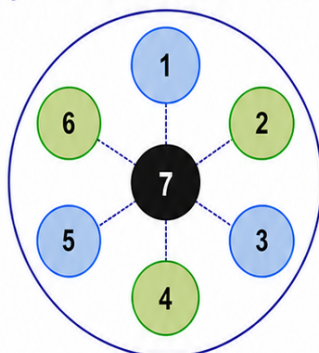
A modulação BPSK é adotada em γ por sua maior tolerância ao XT. Essa escolha não define o papel do caminho como principal ou de proteção: seu papel decorre da política de alocação, que o reserva como segundo caminho de proteção e o mantém inativo até a ocorrência de uma falha dupla.

A organização espacial da estratégia DPPDF é ilustrada na Figura 4.1, que apresenta a especialização funcional dos núcleos e o mapeamento espectral dos três caminhos ópticos da estratégia. A figura é composta por duas partes complementares. À esquerda, é mostrado o arranjo físico da fibra multinúcleo, constituída por sete núcleos. Os núcleos periféricos são funcionalmente especializados, de modo que aqueles destinados às transmissões ativas, utilizadas pelos caminhos α e β , permanecem separados dos núcleos reservados ao caminho de proteção secundário (γ), enquanto o núcleo central permanece bloqueado e não utilizado pela estratégia. À direita, é apresentada a distribuição espectral dos *lightpaths* em cada núcleo, evidenciando a ocupação contígua dos slots e a utilização de uma banda de guarda de um slot entre alocações adjacentes, além das regiões espectrais destinadas à proteção.

Os caminhos ativos, representados em azul (α) e amarelo (β), são alocados em núcleos destinados à operação livre de interferência, enquanto o caminho de proteção secundário (γ), representado em vermelho, permanece inativo durante a operação normal e ocupa núcleos potencialmente sujeitos ao *inter-core crosstalk* quando ativado. Essa organização espacial implementa a política de especialização funcional dos núcleos adotada pela DPPDF, permitindo que as transmissões ativas operem segundo o princípio do *XT-Avoid*, enquanto o caminho γ explora, de forma controlada, regiões espectralmente degradadas. Dessa forma, a figura sintetiza o arranjo físico da fibra, a distribuição dos caminhos α , β e γ , a alocação espectral e a relação entre a vizinhança física dos núcleos e as possíveis regiões de interferência durante a ativação do caminho de proteção secundário.

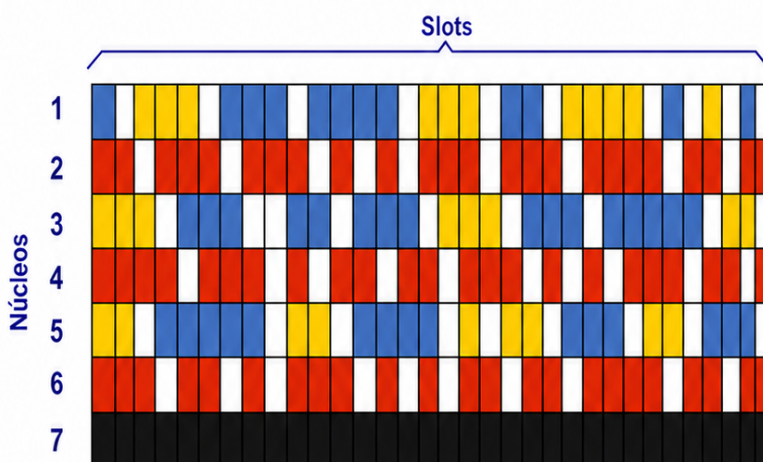
A especialização funcional estabelece também uma separação espacial entre os caminhos ópticos ativos. Os caminhos α e β são alocados exclusivamente nos núcleos ímpares, enquanto os núcleos pares, intercalados entre eles, são reservados aos caminhos γ , inativos durante a operação normal. Assim, não há caminhos ativos co-canaís em núcleos adjacentes de um mesmo enlace: a DPPDF aplica o princípio *XT-Avoid* às transmissões ativas e elimina a interferência vertical causada pelo *inter-core crosstalk* entre esses caminhos.

Arranjo físico da fibra multinúcleo (7 núcleos)



- Núcleos ímpares (1, 3 e 5): caminhos ativos (α e β)
- Núcleos pares (2, 4 e 6): backup secundário (γ) inativo; separam os caminhos ativos e evitam interferência vertical.
- Núcleo central (7): bloqueado (não utilizado)

Distribuição Espectral



Mapa de slots

- | | |
|---|--|
| ■ α – Caminho principal (ativo) | Slot livre |
| ■ β – Backup primário (ativo) | Banda de guarda (1 slot) |
| ■ γ – Backup secundário (inativo) | |
| ■ Núcleo bloqueado (não utilizado) | |

Figura 4.1: Alocação especializada de núcleos.

4.1.1 Prevenção do efeito dominó

A principal condição adicional da DPPDF não é apenas recuperar a demanda diretamente atingida pela falha dupla. É também impedir que a ativação de seu segundo caminho de proteção provoque, por *crosstalk*, a indisponibilidade de uma demanda vizinha e inicie uma cascata de recuperações. O risco somente existe quando os caminhos envolvidos utilizam pelo menos um enlace comum, núcleos fisicamente adjacentes e a mesma faixa de *slots* espectrais. Sem sobreposição espectral, a vizinhança entre núcleos não produz XT e não há efeito dominó.

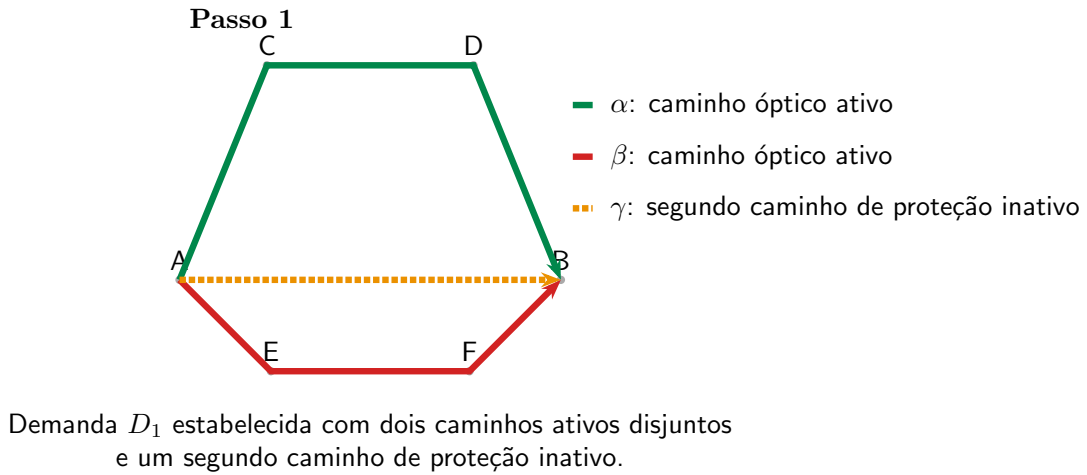


Figura 4.2: Passo 1: primeira demanda estabelecida. Os caminhos α e β estão ativos, enquanto γ permanece reservado como segundo caminho de proteção.

No Passo 1, a demanda D_1 possui dois caminhos ópticos ativos mutuamente disjuntos e o caminho $D_{1\gamma}$, reservado para recuperação em caso de falha dupla. Como $D_{1\gamma}$ está inativo, ele não interfere na operação normal da rede.

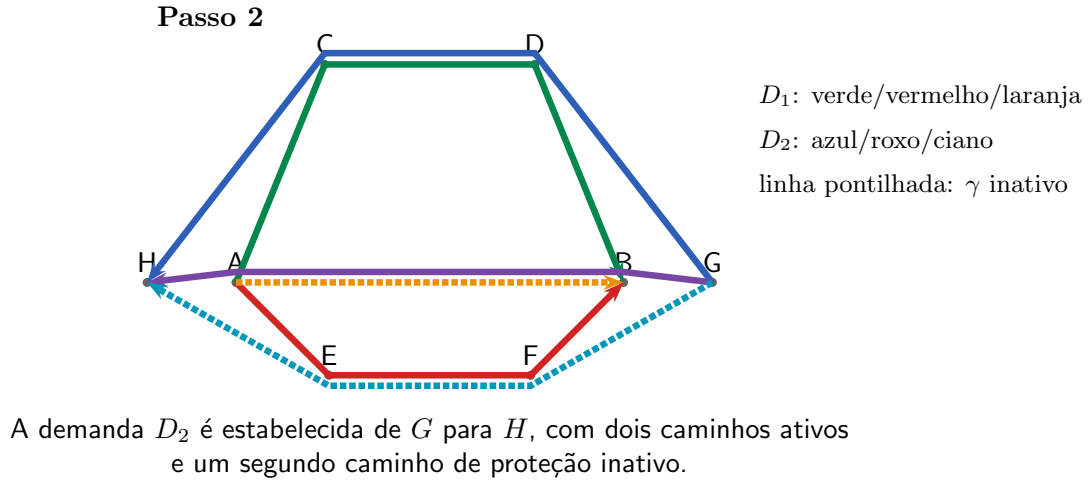


Figura 4.3: Passo 2: entrada da demanda vizinha D_2 , entre os nós G e H . A linha pontilhada representa seu segundo caminho de proteção inativo.

No Passo 2, a demanda D_2 é adicionada com seus próprios caminhos ativos e de proteção. A configuração evidencia uma interação potencial entre $D_{1\gamma}$ e o segundo caminho ativo de D_2 : eles percorrem o enlace $A - B$ em núcleos adjacentes e na mesma faixa espectral. Essa condição co-canal é apenas potencial enquanto $D_{1\gamma}$ permanece inativo.

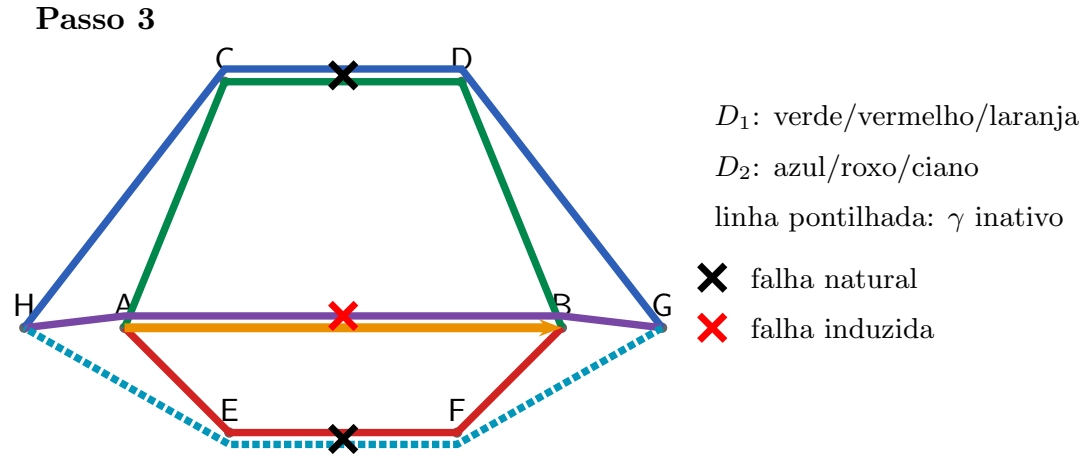


Figura 4.4: Passo 3: formação do efeito dominó. Os X pretos indicam as falhas naturais; o X vermelho indica a falha induzida por XT após a ativação de $D_{1\gamma}$.

No Passo 3, as falhas naturais nos enlaces $C - D$ e $E - F$ interrompem os dois caminhos ativos de D_1 , ativando $D_{1\gamma}$ no enlace $A - B$. A ativação torna efetiva a interação co-canal com o segundo caminho ativo de D_2 e induz sua falha por XT. Ao mesmo tempo, as falhas naturais já atingiram o primeiro e o segundo caminho de proteção de D_2 . Sem uma alternativa adicional disjunta, D_2 perde todos os caminhos e a recuperação de D_1 passa a provocar uma terceira falha para a demanda vizinha: esse é o efeito dominó.

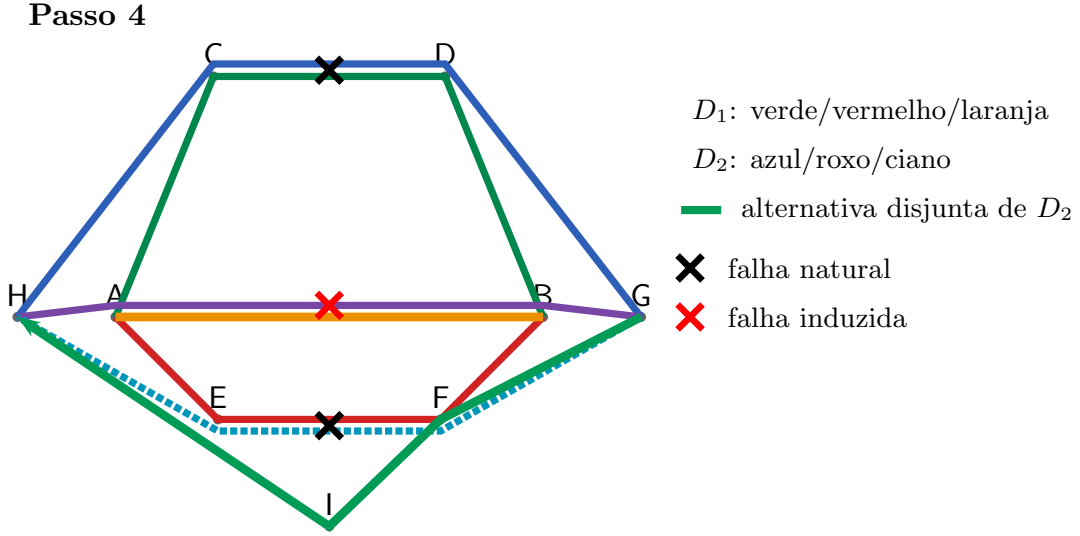


Figura 4.5: Passo 4: prevenção do efeito dominó. A rota alternativa $G - F - I - H$ permanece disjunta dos enlaces envolvidos na recuperação de D_1 .

No Passo 4, a demanda D_2 dispõe da alternativa $G - F - I - H$, formada pelos enlaces $G - F$, $F - I$ e $I - H$. Essa alternativa não utiliza os enlaces naturais falhos $C - D$ e $E - F$, nem o enlace $A - B$ que transporta $D_{1\gamma}$. Portanto, ela permanece disponível após a ativação da proteção de D_1 e absorve a falha induzida sem propagar a recuperação. A DPPDF somente aceita uma nova tripla quando a verificação CHECKDOMINO encontra, para cada demanda potencialmente afetada, uma alternativa com essa propriedade de disjunção.

A especialização funcional dos núcleos cria a oportunidade de reutilização de regiões espectralmente degradadas, frequentemente tratadas na literatura como uma limitação associada às redes SDM-EON, no contexto de mecanismos de proteção contra falhas duplas. Conforme discutido no Capítulo 3, as abordagens existentes tratam o *inter-core crosstalk* predominantemente como uma restrição a ser evitada ou, quando considerado, como um critério de viabilidade física para novas alocações. Até onde foi possível verificar na literatura analisada, não foram identificados trabalhos que explorem explicitamente a utilização dessas regiões degradadas como recurso dedicado em mecanismos de proteção. Nesse contexto, a DPPDF investiga essa possibilidade de forma estruturada, permitindo explorar espectros afetados pelo *crosstalk* como suporte adicional à proteção, sem necessidade de expansão dos recursos espectrais disponíveis na rede.

O impacto dessa escolha é quantificado na Seção 5.3.2.4, por meio da razão entre os *slots* ocupados e o espectro total disponível. A comparação com as estratégias de referência permite observar quanto espectro adicional é empregado para reservar o segundo caminho

de proteção e em que medida regiões normalmente evitadas por XT passam a contribuir para a recuperação em falha dupla.

A Figura 4.6 apresenta um exemplo de aplicação da DPPDF em uma topologia composta por seis nós (A, B, C, D, E e F), interligados por doze enlaces bidirecionais. Cada enlace é constituído por uma fibra multinúcleo com sete núcleos e dezesseis slots por núcleo. As linhas representam os enlaces físicos da rede, enquanto as tabelas associadas a cada enlace mostram a ocupação dos recursos espectrais, permitindo observar a distribuição espacial dos *lightpaths* e sua alocação em cada núcleo. Os blocos coloridos indicam os intervalos de slots ocupados por cada caminho óptico, enquanto as regiões em branco representam os recursos ainda disponíveis. As três estruturas de proteção são identificadas pelas cores vermelho (DPP1), azul (DPP2) e verde (DPP3).

Em todas as estruturas, os caminhos principal (α) e de *backup* ativo (β) são posicionados em núcleos destinados às transmissões ativas, enquanto o caminho de *backup* secundário (γ) é alocado em núcleos destinados à proteção, que podem estar potencialmente sujeitos ao *inter-core crosstalk* quando o caminho é ativado. Essa organização mantém a separação física entre os caminhos ativos e contribui para o reaproveitamento controlado de regiões espectralmente degradadas.

A figura sintetiza, em uma única representação, a topologia da rede, a distribuição espacial e espectral dos caminhos ópticos e a política de especialização funcional dos núcleos proposta pela DPPDF. Essa integração permite observar como diferentes demandas podem reutilizar os mesmos intervalos espectrais em núcleos distintos, sem afetar a operação dos caminhos ativos. Assim, a figura evidencia o princípio central da proposta, no qual regiões afetadas pelo *inter-core crosstalk* podem ser exploradas de forma controlada como parte de mecanismos de proteção contra falhas duplas, ampliando o aproveitamento do espectro sob restrições de viabilidade óptica.

Para complementar a representação apresentada na Figura 4.6, as Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam a alocação obtida para cada demanda na ordem operacional da DPPDF. Em cada uma delas, α e β são os caminhos ativos durante a operação normal, enquanto γ é o segundo caminho de proteção, mantido inativo. As colunas de núcleo e faixa de slots permitem identificar, além da disjunção em enlaces, as situações em que a ativação futura de um γ pode incidir sobre um caminho ativo de uma demanda vizinha que utiliza o mesmo enlace, slots coincidentes e núcleo adjacente.

A leitura das tabelas é, portanto, evolutiva: primeiro são estabelecidos os dois caminhos que mantêm a demanda atendida; em seguida, reserva-se γ em núcleo destinado à proteção. Quando uma falha dupla exige sua ativação, a verificação do efeito dominó considera precisamente as interações reveladas por essas alocações. Os três casos a seguir detalham essa leitura.

Cabe ressaltar que, embora as simulações considerem falhas simultâneas em dois enlaces, apenas aquelas que afetam simultaneamente os caminhos α e β de uma mesma demanda são consideradas como falhas duplas, sendo nesses casos necessária a ativação do caminho γ .

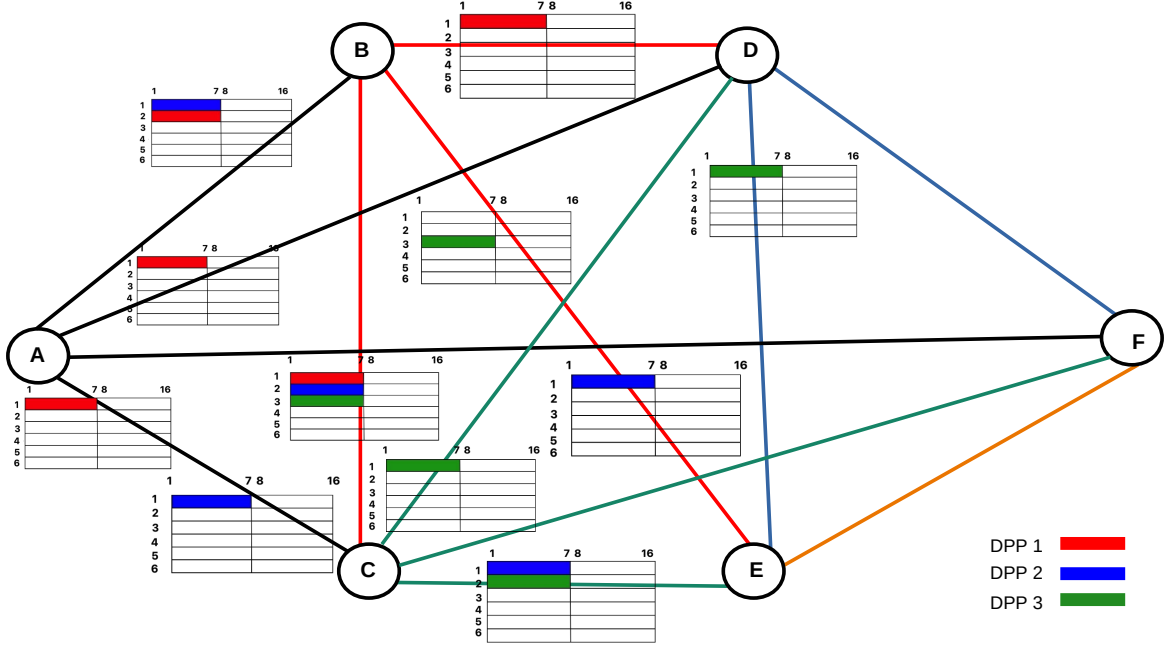


Figura 4.6: Exemplo de aplicação da DPPDF em topologia de 6 nós e 7 núcleos por enlace.

Antes da análise individual de cada proteção, define-se o conjunto

$$E_{\alpha\beta} = E_{\alpha} \cup E_{\beta},$$

que reúne todos os enlaces pertencentes aos caminhos ativos (α e β). Nesse contexto, são consideradas no modelo como falhas duplas as ocorrências simultâneas de falhas em enlaces pertencentes a caminhos ativos distintos, isto é, um enlace de α e outro de β . A ocorrência simultânea de falhas em dois enlaces pertencentes ao mesmo caminho afeta apenas uma das rotas ativas, mantendo a outra disponível para recuperação.

A Tabela 4.1 apresenta a configuração completa da proteção DPP1 para a demanda $A \rightarrow B$, ilustrando o funcionamento da estratégia DPPDF. O caminho principal é $\alpha = ACB$, enquanto o caminho de *backup* ativo é $\beta = ADB$. Ambos estão associados ao caminho de proteção secundário $\gamma = AB$, reservado exclusivamente para ativação em cenários de falha dupla. Para essa demanda,

$$E_{\alpha\beta} = \{AC, CB, AD, DB\},$$

de modo que os pares (AC, AD) , (AC, DB) , (CB, AD) e (CB, DB) correspondem às situações em que ambos os caminhos ativos são afetados simultaneamente.

A Tabela 4.1 mostra que, na operação normal, α e β ocupam o núcleo 1, em enlaces mutuamente disjuntos, e mantêm a demanda atendida. O caminho $\gamma = AB$ ocupa a mesma faixa de slots 1–7 no núcleo 2, mas permanece inativo. Se uma falha dupla atingir simultaneamente um enlace de α e um de β , γ é ativado para restabelecer a demanda $A \rightarrow B$.

Essa ativação torna relevante a interação com a DPP2: no enlace AB , γ da DPP1 utiliza o núcleo 2 e o caminho ativo $\alpha = CAB$ da DPP2 utiliza o núcleo 1, ambos na faixa de slots 1–7. Assim, a ativação de γ pode induzir XT sobre esse caminho ativo. A alocação da DPP2, detalhada a seguir, preserva $\beta = CEB$ em enlaces distintos; logo, a indisponibilidade induzida de α não interrompe a demanda vizinha. É essa preservação de um caminho ativo alternativo que mantém a recuperação localizada e evita o início do efeito dominó neste caso.

Tipo	δ	Caminho	Núcleo c	Slot Inicial	Slot Final	Enlaces
Backup2	γ	AB	2	1	7	AB
Principal	α	ACB	1	1	7	AC, CB
Backup1	β	ADB	1	1	7	AD, DB

Tabela 4.1: Caminhos disjuntos alocados para a demanda $A \rightarrow B$.

A Tabela 4.2 apresenta a proteção DPP2 para a demanda $C \rightarrow B$. Nessa configuração, o caminho principal é $\alpha = CAB$, o caminho de *backup* ativo é $\beta = CEB$ e o caminho de proteção secundário é $\gamma = CB$. De forma análoga ao exemplo anterior,

$$E_{\alpha\beta} = \{CA, AB, CE, EB\},$$

sendo considerados no modelo como cenários de falha dupla aqueles nos quais ocorrem falhas simultâneas em enlaces pertencentes aos caminhos α e β .

Nesta segunda alocação, $\alpha = CAB$ e $\beta = CEB$ são os caminhos ativos, ambos no núcleo 1 e na faixa de slots 1–7. O caminho $\gamma = CB$, reservado no núcleo 2 e na mesma faixa de slots, somente é ativado se uma falha dupla atingir simultaneamente os dois caminhos ativos. A tabela permite observar também a relação com as demandas vizinhas: no enlace CB , a ativação de γ pode introduzir XT sobre caminhos ativos co-canaís em núcleos adjacentes.

O tratamento não consiste em ignorar essa interação, mas em verificar se cada demanda potencialmente afetada continua atendida por uma alternativa. Em particular, quando o caminho reservado da DPP2 interage com a DPP3, o caminho $\beta = CDE$ da DPP3 não

utiliza o enlace CB e permanece disponível. De modo análogo, a própria DPP2 mantém um caminho ativo quando apenas um de seus dois caminhos ativos é afetado. Portanto, a reserva de γ é aceita porque uma ativação eventual não transforma uma falha dupla em indisponibilidade sucessiva de outras demandas.

Tipo	δ	Caminho	Núcleo c	Slot Inicial	Slot Final	Enlaces
Backup2	γ	CB	2	1	7	CB
Principal	α	CAB	1	1	7	CA, AB
Backup1	β	CEB	1	1	7	CE, EB

Tabela 4.2: Caminhos disjuntos alocados para a demanda $C \rightarrow B$.

A Tabela 4.3 apresenta a proteção DPP3 para a demanda $C \rightarrow E$, completando o conjunto de exemplos utilizado para ilustrar o funcionamento da DPPDF. Os caminhos ativos são $\alpha = CBE$ e $\beta = CDE$, enquanto o caminho de proteção secundário é $\gamma = CE$. Para essa configuração,

$$E_{\alpha\beta} = \{CB, BE, CD, DE\},$$

sendo considerados no modelo como cenários de falha dupla aqueles nos quais ocorrem falhas simultâneas em enlaces pertencentes aos caminhos α e β .

A DPP3 completa a evolução do exemplo. Seus caminhos ativos são $\alpha = CBE$, no núcleo 3, na faixa de slots 1–7, e $\beta = CDE$, no núcleo 1, na faixa de slots 0–7; o caminho $\gamma = CE$, no núcleo 2, permanece inativo na faixa de slots 1–7. A tabela torna explícito que a avaliação de XT só é necessária quando há coincidência simultânea de enlace, slots e núcleos adjacentes.

Caso a ativação de $\gamma = CE$ interaja, no enlace CE , com o caminho $\beta = CEB$ da DPP2, a DPP2 ainda conserva seu caminho $\alpha = CAB$, que não percorre esse enlace. Assim, a própria alocação evidencia a regra aplicada pelo *CheckDomino*: a ativação de um caminho inativo pode degradar um caminho vizinho, mas não pode eliminar todas as possibilidades de atendimento dessa demanda. A solução é admitida porque cada interação potencial deixa uma alternativa operacional; se essa alternativa não existisse, a tripla candidata seria rejeitada durante a alocação.

Tipo	δ	Caminho	Núcleo c	Slot Inicial	Slot Final	Enlaces
Backup2	γ	CE	2	1	7	CE
Principal	α	CBE	3	1	7	CB, BE
Backup1	β	CDE	1	0	7	CD, DE

Tabela 4.3: Caminhos disjuntos alocados para a demanda $C \rightarrow E$.

Em conjunto, as três tabelas mostram como a prevenção do efeito dominó é incorporada à alocação: os caminhos ativos asseguram o atendimento normal; o caminho γ permanece inativo até a falha dupla; e, para cada interação potencial entre um γ ativado e uma demanda vizinha, deve subsistir pelo menos um caminho ativo que não seja afetado. As Figuras 4.2–4.5 apresentam a mesma lógica em sequência temporal, incluindo o caso em que é necessária uma alternativa adicional. Dessa forma, a verificação deixa de ser uma condição abstrata e passa a estar associada diretamente aos enlaces, núcleos e slots registrados nas alocações.

4.1.2 Modelo do Sistema

A rede SDM-EON considerada neste trabalho é representada por um grafo direcionado $G = (N, E)$, em que N representa o conjunto de nós ópticos e E o conjunto de enlaces ópticos. Cada enlace $e \in E$ é constituído por uma fibra multinúcleo composta por um conjunto de núcleos C , sendo cada núcleo associado a um conjunto de slots espectrais $F = \{1, \dots, F_{\max}\}$. Cada slot representa uma unidade discreta de espectro disponível para alocação de recursos ópticos. Assume-se que cada slot possui largura espectral fixa Δf , e que as alocações devem respeitar as propriedades de continuidade e contiguidade espectral ao longo de toda a rota selecionada.

Cada demanda $d \in \mathcal{D}$ é definida pela tupla (s_d, t_d, bw_d) , em que $s_d \in N$ e $t_d \in N$ representam, respectivamente, os nós de origem e destino, enquanto bw_d corresponde à largura de banda requerida. Para o atendimento de cada demanda, o modelo de otimização deve determinar conjuntamente a rota, o núcleo, o formato de modulação e o bloco contíguo de slots espectrais a ser utilizado. Seja $\mathcal{M}$ o conjunto de formatos de modulação disponíveis. Cada modulação $m \in \mathcal{M}$ é caracterizada por sua eficiência espectral, alcance máximo de transmissão e limiar de tolerância ao *inter-core crosstalk*. O número de slots requerido é determinado em função da largura de banda da demanda, do formato de modulação selecionado e da banda de guarda adotada.

O *inter-core crosstalk* é modelado por meio da relação de adjacência entre núcleos. Seja $\mathcal{N}(c) \subseteq C$ o conjunto de núcleos fisicamente adjacentes ao núcleo c , representando as relações potenciais de interferência entre canais ópticos. Essa estrutura de adjacência, em conjunto com os limiares de tolerância definidos para cada formato de modulação, é utilizada como base para a formulação das restrições de viabilidade associadas ao *crosstalk* no modelo de otimização.

O modelo adota as restrições clássicas do problema de *Routing, Modulation, Spectrum and Core Allocation* (RMSCA), impondo que: (i) os mesmos slots espectrais sejam utilizados ao longo de todos os enlaces pertencentes ao caminho óptico (continuidade espectral);

(ii) os slots alocados formem um único bloco contíguo (contiguidade espectral); e (iii) não haja sobreposição de alocações no mesmo núcleo, enlace e faixa espectral.

4.1.2.0.1 Premissas de sobrevivência O escopo de sobrevivência considera falhas de enlaces: um evento simples corresponde à indisponibilidade de um enlace, e um evento duplo corresponde à indisponibilidade simultânea de dois enlaces distintos. Não são modeladas, nesta formulação, falhas de nós, falhas de equipamentos terminais nem falhas correlacionadas por SRLG. Além disso, o atendimento de uma demanda pela DPPDF pressupõe a existência de pelo menos três caminhos mutuamente disjuntos em enlaces entre sua origem e seu destino. Em termos topológicos, para cada par (s_d, t_d) atendido, a conectividade local em enlaces deve satisfazer $\lambda_E(s_d, t_d) \geq 3$. O grau mínimo três de todos os nós é uma condição necessária, mas não suficiente, para essa propriedade; por isso, a existência dos três caminhos é verificada explicitamente durante o pré-processamento. Quando a condição não é satisfeita para um par origem–destino, a DPPDF não pode oferecer a garantia de proteção dupla definida neste trabalho e a respectiva demanda é rejeitada.

Sobre essa estrutura básica são incorporadas, na formulação do problema apresentada na próxima seção, as restrições adicionais que implementam a estratégia DPPDF, incluindo a proteção dedicada contra falhas duplas, a especialização funcional dos núcleos e a combinação de regras estruturais e avaliações baseadas em estimativas para o tratamento do *inter-core crosstalk*.

4.1.3 Definição do Problema

Com base no modelo de sistema descrito anteriormente, o problema de alocação de recursos em SDM-EONs é formulado como uma extensão do problema clássico de RMSCA, incorporando proteção dedicada contra falhas duplas, especialização funcional de núcleos e restrições de proteção sensíveis ao *crosstalk* entre núcleos. Dessa forma, a formulação integra conjuntamente o roteamento, a atribuição de formato de modulação, a alocação de espectro, a atribuição de núcleos e o provisionamento da proteção, preservando simultaneamente a viabilidade da camada física das SDM-EONs.

Dado um conjunto de demandas de tráfego $\mathcal{D}$, o objetivo consiste em selecionar, para cada demanda $d \in \mathcal{D}$, três rotas mutuamente disjuntas em enlaces, correspondentes aos papéis de rota principal (α), rota de proteção ativa (β) e rota de proteção inativa (γ). Após a atribuição de formato de modulação, núcleo espacial e bloco contíguo de espectro, cada rota selecionada dá origem ao respectivo caminho óptico. As três rotas associadas à mesma demanda devem ser mutuamente disjuntas em enlaces, garantindo que uma única falha física de enlace não possa afetar simultaneamente mais de um dos caminhos

ópticos estabelecidos. Esse requisito estrutural assegura a sobrevivência a falhas simples e estabelece a base para a proteção dedicada contra falhas duplas.

Além da disjunção estrutural, a alocação deve considerar as interações entre demandas vizinhas provocadas pelo *crosstalk* entre núcleos. Para isso, a formulação incorpora dois requisitos complementares de proteção. O primeiro estabelece que a ativação de um caminho de proteção inativo (γ) não pode eliminar todas as alternativas de recuperação das demandas protegidas vizinhas, implementando o princípio do *No Domino Effect*. O segundo exige que todo caminho de proteção inativo preserve sua Qualidade de Transmissão (*Quality of Transmission* – QoT) durante todo o processo de alocação. Assim, sempre que um novo caminho óptico é alocado em um núcleo adjacente a um caminho de proteção inativo previamente reservado, o *crosstalk* acumulado sobre esse caminho γ é reavaliado. A nova alocação somente é aceita se o *crosstalk* acumulado permanecer abaixo do limite admissível para transmissão em BPSK, garantindo que o caminho de proteção inativo permaneça disponível para ativação em condições de falha dupla.

Formalmente, o problema consiste em selecionar, para cada demanda de tráfego, uma tripla de proteção composta por três caminhos ópticos mutuamente disjuntos em enlaces e atribuir conjuntamente os núcleos e os blocos contíguos de espectro, de modo que:

1. sejam satisfeitas as restrições de continuidade espectral, contiguidade espectral e não sobreposição de recursos;
2. sejam respeitadas as restrições de roteamento, modulação, espectro e atribuição de núcleos;
3. seja preservada a Qualidade de Transmissão (QoT) dos caminhos ópticos ativos e inativos, incluindo a viabilidade do *crosstalk* dos caminhos de proteção inativos previamente reservados;
4. seja garantida a sobrevivência dedicada a falhas simples e duplas; e
5. a ativação de um caminho de proteção inativo não provoque falhas em cascata, conforme o princípio do *No Domino Effect*.

Essa formulação estende o problema convencional de RMSCA ao integrar, em um único modelo de otimização, a proteção dedicada contra falhas duplas, a especialização funcional de núcleos, a preservação da QoT sensível ao *crosstalk* e a prevenção da propagação de falhas induzidas por interferência.

4.1.4 Metodologia de Solução

A formulação proposta integra decisões de roteamento, seleção de modulação, alocação de espectro, seleção de núcleos e mecanismos de proteção dedicada contra falhas duplas,

caracterizando um problema de otimização inteira com forte acoplamento entre variáveis de decisão. A combinação simultânea desses elementos resulta em um problema de elevada complexidade combinatória, tipicamente associado a instâncias de grande porte da classe RMSCA estendida, o que dificulta sua resolução exata em tempo compatível com cenários operacionais dinâmicos.

Para reduzir essa complexidade, a estratégia DPPDF adota uma metodologia baseada na decomposição do problema em três etapas sequenciais, seguidas de uma fase de implantação operacional. Essa decomposição permite separar decisões estruturais das decisões de otimização global, reduzindo o espaço de busca da formulação completa ao restringir o conjunto de soluções candidatas avaliadas na etapa final.

A Figura 4.7 ilustra a metodologia de decomposição proposta, estruturada em três etapas principais seguidas de uma fase de implantação operacional. O fluxo apresentado evidencia a separação entre a geração de estruturas viáveis, a filtragem de candidatos, a composição de trios disjuntos e a seleção global baseada em otimização, culminando na aplicação em ambiente de provisão em lote.

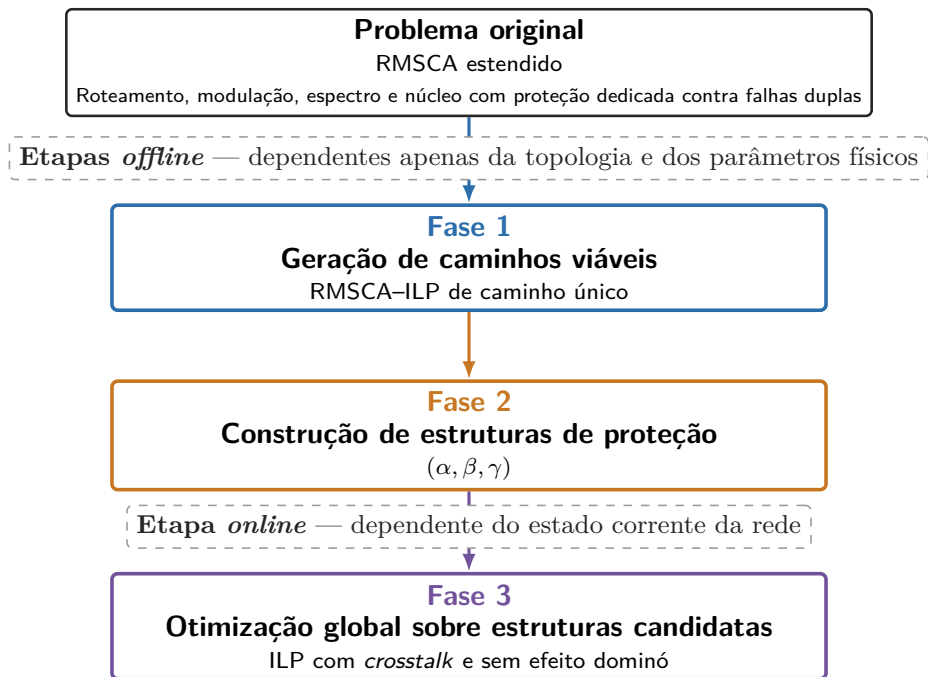


Figura 4.7: Metodologia para proteção dedicada contra falhas duplas.

A resolução conjunta do problema de Roteamento, Seleção de Modulação, Alocação de Espectro e Núcleo (RMSCA), associada à proteção dedicada contra falhas duplas, resulta em um problema de elevada complexidade combinatória, especialmente em redes ópticas com tráfego dinâmico. Nesse contexto, recalculando todas as possíveis rotas, modulações e

estruturas de proteção a cada nova requisição implicaria elevado custo computacional e limitaria a aplicação prática da estratégia proposta.

A metodologia DPPDF organiza a decisão em uma sequência de três fases. As duas primeiras são executadas *offline*, pois dependem apenas da topologia e dos parâmetros físicos da rede; a terceira usa o estado corrente de ocupação para transformar uma alternativa previamente preparada em uma alocação efetiva. Assim, a saída de cada fase constitui diretamente a entrada da fase seguinte.

Fase 1 – gerar rotas viáveis. A entrada é a topologia, o conjunto de formatos de modulação e o limite K de rotas por par origem–destino. Para cada par, são obtidas até K rotas candidatas, ordenadas por comprimento, e é associada a cada rota a modulação de maior ordem compatível com seu alcance. A saída é uma base de rotas com sequência de enlaces, comprimento e modulação. Nesta fase não são definidos núcleo, faixa espectral, largura de banda nem papéis de proteção; portanto, as rotas ainda não constituem caminhos ópticos.

Fase 2 – formar triplas de proteção. A entrada é a base de rotas da Fase 1. As rotas de um mesmo par origem–destino são combinadas somente quando são mutuamente disjuntas em enlaces. Para cada combinação válida, são definidos os papéis de rota principal (α), proteção ativa (β) e proteção inativa (γ); a menor rota da tripla é atribuída a γ e utiliza BPSK. A saída é a base $\mathcal{T}$ de triplas candidatas, com os papéis funcionais, as modulações e os conjuntos de núcleos admissíveis. Também nesta fase nenhum recurso óptico é reservado.

Fase 3 – selecionar e alocar. A entrada é a base $\mathcal{T}$, uma demanda de tráfego e o estado corrente da rede. A fase seleciona uma tripla e atribui núcleo e bloco espectral aos três caminhos ópticos, verificando disponibilidade, continuidade e contiguidade espectral, especialização funcional dos núcleos, viabilidade local de *crosstalk* e prevenção do efeito dominó. A saída é a demanda aceita com seus três caminhos ópticos alocados ou, quando não existe tripla viável, a decisão de bloqueio.

A Fase 3 possui duas formas de execução, com a mesma base de triplas e as mesmas restrições. Na PLI, as demandas de uma janela ΔT são tratadas conjuntamente para obter a referência exata em instâncias de porte tratável. Na heurística, cada demanda é processada sequencialmente no instante de sua chegada, representando a operação dinâmica da rede. Essa separação distingue a validação por otimização global da decisão operacional *online*, sem alterar a estrutura de proteção previamente construída nas Fases 1 e 2.

4.1.5 Fase 1: Pré-processamento *Offline* da Topologia

4.1.5.1 Descrição Matemática

A primeira fase realiza o pré-processamento *offline* das informações que dependem exclusivamente da topologia da rede e dos parâmetros físicos dos formatos de modulação. Para cada par ordenado de nós origem–destino, são geradas até K rotas candidatas distintas por meio do algoritmo de K caminhos mais curtos, sendo posteriormente ordenadas pelo comprimento físico total. Em seguida, a cada rota é associado o formato de modulação de maior ordem compatível com seu alcance de transmissão.

Como as demandas de tráfego ainda não são conhecidas nesta fase, não são determinados a largura de banda requerida, o número de *slots* espectrais, o *slot* inicial, o núcleo espacial ou os papéis funcionais α , β e γ . Consequentemente, esta fase não constitui um problema de otimização e, portanto, não possui variáveis de decisão nem função objetivo. Trata-se de um procedimento algorítmico de pré-processamento, cuja finalidade é gerar e caracterizar as rotas candidatas que serão utilizadas pelas fases subsequentes da metodologia.

4.1.5.1.1 Conjuntos

- N : conjunto de nós da rede;
- $E \subseteq N \times N$: conjunto de enlaces ópticos direcionados;
- $\mathcal{Q}$: conjunto de pares ordenados origem–destino, definido por

$$\mathcal{Q} = \{(s, t) \in N \times N \mid s \neq t\};$$

- $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$: conjunto dos índices das rotas candidatas geradas para cada par origem–destino;
- $\mathcal{M}$: conjunto dos formatos de modulação disponíveis;
- $\mathcal{P}_{s,t}^K$: conjunto de até K rotas candidatas geradas para o par origem–destino $(s, t) \in \mathcal{Q}$;
- $\mathcal{P}_{s,t}^V \subseteq \mathcal{P}_{s,t}^K$: conjunto das rotas candidatas viáveis quanto ao alcance de transmissão.

4.1.5.1.2 Parâmetros

- $D_{ij} \in \mathbb{R}_+$: comprimento físico, em quilômetros, do enlace direcionado $(i, j) \in E$;
- $K \in \mathbb{Z}_+$: número máximo de rotas candidatas geradas para cada par origem–destino;

- $W_m \in \mathbb{R}_+$: alcance máximo de transmissão, em quilômetros, do formato de modulação $m \in \mathcal{M}$;
- $\rho_m \in \mathbb{Z}_+$: ordem do formato de modulação m , crescente com sua eficiência espectral;
- $R_m \in \mathbb{R}_+$: taxa de transmissão suportada por um *slot* espectral utilizando o formato de modulação m , expressa em Gb/s por *slot*;
- $L_{s,t,k} \in \mathbb{R}_+$: comprimento físico total da rota candidata de índice k entre os nós s e t ;
- $ms, t, k \in \mathcal{M}$: formato de modulação de maior ordem associado à rota candidata viável de índice k .
- $L_{s,t,k} \in \mathbb{R}_+$: comprimento físico total da rota candidata de índice k entre os nós s e t ;
- $ms, t, k \in \mathcal{M}$: formato de modulação de maior ordem associado à rota candidata viável de índice k .

Os parâmetros W_m , ρ_m e R_m são definidos conforme a Tabela 2.2. Nesta fase, apenas o alcance máximo (W_m) e a ordem da modulação (ρ_m) são utilizados para determinar o formato de modulação associado a cada rota candidata. O parâmetro R_m é armazenado como uma característica do formato de modulação e será utilizado apenas nas fases posteriores para o cálculo do número de *slots* espectrais requeridos pelas demandas de tráfego.

4.1.5.1.3 Variáveis

- $a_{ij}^{s,t,k} \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se o enlace $(i, j) \in E$ pertence à rota candidata de índice k gerada para o par (s, t) , e 0 caso contrário;
- $z_m^{s,t,k} \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se o formato de modulação $m \in \mathcal{M}$ é associado à rota candidata de índice k do par (s, t) , e 0 caso contrário;
- $v_{s,t,k} \in 0, 1$: assume valor 1 se a rota candidata k do par (s, t) é viável quanto ao alcance de pelo menos um formato de modulação, e 0 caso contrário.

4.1.5.1.4 Geração das Rotas Candidatas Para cada par origem–destino $(s, t) \in \mathcal{Q}$, o conjunto de rotas candidatas é obtido por meio da execução de um algoritmo de K caminhos mais curtos:

$$\mathcal{P}_{s,t}^K = \text{KSP}(G, s, t, K), \quad \forall (s, t) \in \mathcal{Q}, \quad (4.1)$$

em que $G = (N, E)$ representa a topologia da rede e $\text{KSP}(\cdot)$ denota o algoritmo de geração dos K caminhos mais curtos adotado.

Como o número de rotas simples entre um determinado par origem–destino pode ser inferior a K , tem-se

$$|\mathcal{P}_{s,t}^K| \leq K, \quad \forall (s, t) \in \mathcal{Q}. \quad (4.2)$$

Cada elemento $p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^K$ representa uma rota simples entre os nós s e t , isto é, uma sequência de enlaces direcionados sem repetição de nós e, conseqüentemente, sem formação de ciclos.

4.1.5.1.5 Ordenação das Rotas Candidatas As rotas candidatas são ordenadas em ordem não decrescente de comprimento físico total. Assim, para cada par origem–destino $(s, t) \in \mathcal{Q}$, tem-se

$$L_{s,t,k} \leq L_{s,t,k+1}, \quad \forall (s, t) \in \mathcal{Q}, \quad k = 1, \dots, |\mathcal{P}_{s,t}^K| - 1. \quad (4.3)$$

Quando duas ou mais rotas apresentam o mesmo comprimento físico, o algoritmo pode adotar um critério determinístico de desempate, como o menor número de enlaces (*hop count*) ou a ordem lexicográfica dos identificadores dos enlaces, assegurando uma ordenação única e reproduzível.

4.1.5.1.6 Comprimento Físico das Rotas O comprimento físico total de cada rota candidata é obtido pela soma dos comprimentos dos enlaces que a compõem:

$$L_{s,t,k} = \sum_{(i,j) \in E} D_{ij} a_{ij}^{s,t,k}, \quad \forall p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^K. \quad (4.4)$$

4.1.5.1.7 Viabilidade Quanto ao Alcance Uma rota candidata é considerada viável quando existe pelo menos um formato de modulação cujo alcance máximo de transmissão seja igual ou superior ao seu comprimento físico. Assim, define-se o parâmetro binário de viabilidade por

$$v_{s,t,k} = \begin{cases} 1, & \text{se } \exists m \in \mathcal{M} \text{ tal que } L_{s,t,k} \leq W_m, \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad \forall (s, t) \in \mathcal{Q}, \quad \forall p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^K. \quad (4.5)$$

O conjunto das rotas viáveis é, portanto, definido por

$$\mathcal{P}_{s,t}^V = \{p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^K : v_{s,t,k} = 1\}, \quad \forall (s, t) \in \mathcal{Q}. \quad (4.6)$$

De forma equivalente,

$$\mathcal{P}_{s,t}^V = \left\{ p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^K : \exists m \in \mathcal{M} \text{ tal que } L_{s,t,k} \leq W_m \right\}, \quad \forall (s,t) \in \mathcal{Q}. \quad (4.7)$$

As rotas para as quais $v_{s,t,k} = 0$ são descartadas e não participam das fases subsequentes da metodologia.

4.1.5.1.8 Seleção do Formato de Modulação Para cada rota viável, é selecionado o formato de modulação de maior ordem cujo alcance máximo de transmissão seja compatível com o comprimento físico da rota:

$$m_{s,t,k} = \arg \max_{m \in \mathcal{M}} \{ \rho_m : L_{s,t,k} \leq W_m \}, \quad \forall (s,t) \in \mathcal{Q}, \forall p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^V. \quad (4.8)$$

A associação entre a rota candidata e o formato de modulação selecionado é representada pelo parâmetro binário

$$z_m^{s,t,k} = \begin{cases} 1, & \text{se } m = m_{s,t,k}, \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad \forall m \in \mathcal{M}, \forall p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^V. \quad (4.9)$$

Como exatamente um formato de modulação é associado a cada rota viável, tem-se

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} z_m^{s,t,k} = 1, \quad \forall (s,t) \in \mathcal{Q}, \forall p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^V. \quad (4.10)$$

A compatibilidade entre o comprimento da rota e o alcance da modulação selecionada é expressa por

$$L_{s,t,k} \leq \sum_{m \in \mathcal{M}} W_m z_m^{s,t,k}, \quad \forall (s,t) \in \mathcal{Q}, \forall p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^V. \quad (4.11)$$

Além disso, a escolha da modulação de maior ordem compatível implica que

$$z_m^{s,t,k} = 1 \Rightarrow L_{s,t,k} > W_{m'}, \quad \forall m' \in \mathcal{M} \text{ tal que } \rho_{m'} > \rho_m. \quad (4.12)$$

Isto é, nenhuma modulação de ordem superior à modulação selecionada possui alcance suficiente para suportar a rota.

4.1.5.1.9 Registro das Rotas Candidatas Cada rota candidata viável é armazenada na base de dados por meio do registro

$$\mathcal{R}_{s,t,k} = \left(s, t, k, p_{s,t}^k, \left\{ a_{ij}^{s,t,k} \right\}_{(i,j) \in E}, L_{s,t,k}, m_{s,t,k} \right), \quad \forall (s,t) \in \mathcal{Q}, \forall p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^V. \quad (4.13)$$

Como os parâmetros W_m e R_m são definidos pela Tabela 2.2, eles podem ser obtidos diretamente a partir da modulação armazenada $m_{s,t,k}$. Assim, sua inclusão explícita no registro é opcional e visa apenas reduzir consultas posteriores à tabela de modulações.

4.1.5.1.10 Saída da Fase 1 A saída da primeira fase é a base de dados das rotas candidatas viáveis, definida por

$$\mathcal{R} = \bigcup_{(s,t) \in \mathcal{Q}} \left\{ \mathcal{R}_{s,t,k} : p_{s,t}^k \in \mathcal{P}_{s,t}^V \right\}. \quad (4.14)$$

Essa base contém, para cada par origem–destino, até K rotas distintas, ordenadas pelo comprimento físico e associadas ao formato de modulação de maior ordem compatível com seu alcance de transmissão.

Como esta fase constitui apenas um procedimento de pré-processamento *offline*, nenhuma informação dependente das demandas de tráfego ou do estado de ocupação da rede é determinada. Em particular, não são definidos a largura de banda requerida, o número de *slots* espectrais, o *slot* inicial, o núcleo espacial, os papéis funcionais α , β e γ , nem são realizadas avaliações de *crosstalk* ou do *No Domino Effect*. Essas decisões são realizadas exclusivamente nas fases subsequentes da metodologia.

4.1.6 Fase 2: Construção das Triplas Candidatas de Proteção

4.1.6.1 Descrição Matemática

A segunda fase constrói, de forma *offline*, todas as triplas candidatas de proteção a partir das rotas candidatas viáveis geradas na Fase 1. Cada tripla é composta por três rotas mutuamente disjuntas em enlaces, às quais são atribuídos os papéis funcionais de rota principal (α), rota de proteção ativa (β) e rota de proteção inativa (γ). Além disso, a rota γ é sempre associada à rota de menor comprimento da tripla e configurada para operar utilizando modulação BPSK. Nenhum recurso espectral ou núcleo espacial é alocado nesta fase; portanto, a base construída contém triplas de rotas candidatas, que somente se tornam caminhos ópticos quando selecionadas e provisionadas na Fase 3.

4.1.6.1.1 Conjuntos

- $\mathcal{Q}$: conjunto dos pares origem–destino;
- $\mathcal{P}_{s,t}^V$: conjunto das rotas candidatas viáveis para o par origem–destino $(s, t) \in \mathcal{Q}$, obtido na Fase 1;
- $\mathcal{T}_{s,t}$: conjunto das triplas candidatas de proteção geradas para o par origem–destino (s, t) ;

- $\Delta = \{\alpha, \beta, \gamma\}$: conjunto dos papéis funcionais atribuídos às rotas da tripla.

4.1.6.1.2 Parâmetros

- $\mathcal{R}$: base de rotas candidatas viáveis produzida na Fase 1;
- $\Delta = \{\alpha, \beta, \gamma\}$: conjunto dos papéis funcionais atribuídos às rotas da tripla.

4.1.6.1.3 Restrições R1 – Formação das Triplas

Para cada par origem–destino $(s, t) \in \mathcal{Q}$, cada tripla candidata de proteção é composta exatamente por três rotas candidatas distintas pertencentes ao conjunto de rotas viáveis gerado na Fase 1:

$$\tau = (p_\alpha, p_\beta, p_\gamma), \quad p_\alpha, p_\beta, p_\gamma \in \mathcal{P}_{s,t}^V, \quad p_\alpha \neq p_\beta \neq p_\gamma, \quad \forall (s, t) \in \mathcal{Q}. \quad (4.15)$$

A Restrição (4.15) estabelece que cada tripla candidata de proteção seja formada por três rotas candidatas distintas associadas ao mesmo par origem–destino.

R2 – Disjunção Mútua de Enlaces

As três rotas que compõem cada tripla candidata devem ser mutuamente disjuntas em enlaces, isto é,

$$\begin{aligned} E(p_\alpha) \cap E(p_\beta) &= \emptyset, \\ E(p_\alpha) \cap E(p_\gamma) &= \emptyset, \\ E(p_\beta) \cap E(p_\gamma) &= \emptyset. \end{aligned} \quad (4.16)$$

A Restrição (4.16) garante que as três rotas candidatas que compõem a tripla sejam mutuamente disjuntas em enlaces físicos.

R3 – Atribuição dos Papéis Funcionais

Cada tripla candidata recebe os papéis funcionais de rota principal (α), rota de proteção ativa (β) e rota de proteção inativa (γ).

R4 – Seleção da Menor Rota para a Proteção Inativa

A rota designada ao papel funcional γ deve possuir o menor comprimento físico dentre as três rotas da tripla:

$$L_\gamma \leq L_\alpha, \quad (4.17)$$

$$L_\gamma \leq L_\beta. \quad (4.18)$$

As Restrições (4.17) e (4.18) asseguram que a rota destinada à proteção inativa seja sempre a de menor comprimento físico da tripla candidata.

R5 – Modulação da Proteção Inativa

A rota associada ao papel funcional γ é configurada para utilizar modulação BPSK:

$$m_\gamma = \text{BPSK}. \quad (4.19)$$

A Restrição (4.19) estabelece que a proteção inativa opere sempre com modulação BPSK. Entre os formatos considerados nesta tese, a BPSK apresenta o maior alcance e o maior limiar de tolerância ao *inter-core crosstalk*, conforme os parâmetros da Tabela 2.2, fundamentados em [26, 16, 17, 15]. Essa escolha prioriza a viabilidade óptica de γ no instante de sua ativação, quando ele poderá coexistir com transmissões co-canais em núcleos adjacentes. Em contrapartida, sua menor eficiência espectral aumenta o número de *slots* reservados para a mesma largura de banda. Portanto, a fixação em BPSK constitui uma decisão conservadora da DPPDF e não uma afirmação de otimalidade global. A seleção adaptativa da modulação de γ , que poderia equilibrar tolerância ao XT e consumo espectral segundo o estado da rede, não é avaliada nesta tese; trabalhos como o de Kawaguchi et al. [61] demonstram a relevância desse compromisso em estratégias de seleção de modulação sensíveis ao XT.

R6 – Preservação da Modulação

Sejam p_α e p_β as rotas candidatas associadas aos papéis funcionais α e β , respectivamente. Os formatos de modulação atribuídos a essas rotas durante a Fase 1 são preservados, isto é,

$$\begin{aligned} m_\alpha &= m(p_\alpha), \\ m_\beta &= m(p_\beta), \end{aligned} \quad (4.20)$$

em que $m(p)$ denota o formato de modulação associado à rota candidata p durante a Fase 1.

A Restrição (4.20) preserva os formatos de modulação originalmente associados às rotas principal e de proteção ativa, enquanto a rota designada ao papel funcional γ tem sua modulação redefinida para BPSK, conforme a Restrição (4.19).

R7 – Geração das Triplas Candidatas

Cada tripla candidata válida é armazenada em uma base de dados que constitui a saída da Fase 2 e a entrada da Fase 3. O registro de cada tripla preserva todas as informações estruturais necessárias para a etapa de otimização, evitando que características previamente determinadas sejam recalculadas durante a alocação de recursos. Em particular, são armazenados o par origem-destino, as três rotas candidatas que compõem a tripla,

seus respectivos comprimentos físicos e os formatos de modulação associados aos papéis funcionais. Como a rota designada ao papel funcional γ é sempre configurada para operar em BPSK, esse valor é armazenado explicitamente. Dessa forma, a formulação ILP da Fase 3 passa a decidir apenas sobre a seleção da tripla e a alocação dos recursos da rede, sem reexecutar cálculos de roteamento ou seleção de modulação.

Cada tripla candidata é registrada na forma

$$\mathcal{T}_{s,t,i} = (s, t, p_\alpha, p_\beta, p_\gamma, L_\alpha, L_\beta, L_\gamma, m_\alpha, m_\beta, \text{BPSK}), \quad (4.21)$$

em que i identifica a i -ésima tripla candidata gerada para o par origem-destino (s, t) .

A base de triplas candidatas é então definida por

$$\mathcal{T} = \bigcup_{(s,t) \in \mathcal{Q}} \{\mathcal{T}_{s,t,i} \mid \mathcal{T}_{s,t,i} \text{ satisfaz as Restrições R1–R6}\}. \quad (4.22)$$

A Restrição (4.22) define a base final de triplas candidatas de proteção produzida pela Fase 2. Essa base constitui a entrada da Fase 3, na qual são determinadas a seleção da tripla, a atribuição dos núcleos espaciais, a alocação dos blocos contínuos e contíguos de espectro e núcleos, a verificação do *No Domino Effect* e a avaliação do *crosstalk*, de acordo com o estado corrente da rede.

4.1.7 Fase 3: Seleção das Triplas de Proteção e Alocação de Recursos

A Fase 3 é executada de forma *online* sempre que um novo lote de demandas de tráfego chega à rede. Sua entrada é composta pelo lote corrente de demandas, pela base de triplas candidatas de proteção previamente gerada durante a Fase 2 e pelo estado atual de ocupação dos recursos da rede. Como o roteamento, a seleção dos formatos de modulação, a definição dos papéis funcionais dos caminhos ópticos e a construção das triplas candidatas já foram realizados durante as etapas de pré-processamento *offline*, a formulação ILP concentra-se exclusivamente na seleção das triplas candidatas e na alocação dos recursos da rede de acordo com seu estado corrente.

Para cada demanda pertencente ao lote corrente, a formulação ILP seleciona, no máximo, uma tripla candidata de proteção dentre aquelas previamente associadas ao respectivo par origem-destino. Em seguida, determina conjuntamente a atribuição dos núcleos espaciais e dos blocos contíguos de espectro necessários aos três caminhos ópticos da tripla selecionada, respeitando simultaneamente a política de especialização funcional dos núcleos proposta pela DPPDF, as restrições de continuidade do núcleo, continuidade espectral e contiguidade espectral, o princípio do *No Domino Effect*, a disponibilidade dos

recursos da rede e a avaliação local de *crosstalk*. Apenas as triplas que satisfazem simultaneamente todas essas restrições são consideradas viáveis para alocação.

Ao final da Fase 3 obtém-se o conjunto de demandas aceitas e suas respectivas triplas de proteção efetivamente alocadas, incluindo a atribuição dos núcleos espaciais e dos blocos contíguos de espectro correspondentes aos caminhos ópticos principal (α), de proteção ativa (β) e de proteção inativa (γ). As demandas para as quais não exista nenhuma tripla candidata capaz de satisfazer simultaneamente todas as restrições do modelo são bloqueadas.

A formulação ILP da Fase 3 está organizada nos seguintes componentes:

- seleção de, no máximo, uma tripla candidata de proteção para cada demanda de tráfego;
- atribuição conjunta dos núcleos espaciais e dos blocos contíguos de espectro associados à tripla selecionada;
- aplicação da política de especialização funcional dos núcleos da DPPDF;
- verificação das restrições de continuidade do núcleo, continuidade espectral, contiguidade espectral e não sobreposição de recursos;
- aplicação da restrição do *No Domino Effect*;
- avaliação local do *crosstalk* inter-núcleos, considerando simultaneamente o *crosstalk* recebido pelo caminho de proteção inativo candidato e o incremento de *crosstalk* introduzido nos caminhos de proteção inativos previamente reservados;
- função objetivo destinada a maximizar o número de demandas aceitas e, como critério secundário, minimizar o consumo dos recursos da rede.

4.1.7.1 Descrição Matemática

4.1.7.1.1 Conjuntos

- $\mathcal{D}$: conjunto de demandas de tráfego, indexado por d ;
- $\mathcal{T}$: base de triplas candidatas de proteção gerada na Fase 2, indexada por i ;
- $\mathcal{T}(d) \subseteq \mathcal{T}$: conjunto das triplas candidatas associadas ao par origem–destino da demanda d ;
- $Q = \alpha, \beta, \gamma$: conjunto dos papéis funcionais, indexado por q ;
- E : conjunto de enlaces físicos, indexado por e ;
- C : conjunto de núcleos espaciais, indexado por c ;

- F : conjunto de *slots* espectrais, indexado por f ;
- $\mathcal{M}$: conjunto dos formatos de modulação disponíveis, indexado por m ;
- $C_q \subseteq C$: conjunto dos núcleos admissíveis para o papel funcional q , de acordo com a política de especialização funcional da DPPDF;
- $\mathcal{N}(c) \subseteq C$: conjunto dos núcleos adjacentes ao núcleo c .

4.1.7.1.2 Parâmetros

- $t_d \in N$: nó de destino da demanda $d \in \mathcal{D}$;
- $b_d \in \mathbb{R}_+$: largura de banda requerida pela demanda $d \in \mathcal{D}$, expressa em Gb/s;
- $R_m \in \mathbb{R}_+$: taxa de transmissão suportada por um *slot* espectral utilizando o formato de modulação $m \in \mathcal{M}$, expressa em Gb/s por *slot*;
- $a_{d,i,q,e} \in \{0, 1\}$: parâmetro de incidência que assume valor 1 se a rota associada ao papel funcional $q \in Q$ da tripla candidata $i \in \mathcal{T}(d)$ percorre o enlace físico $e \in E$, e 0 caso contrário;
- $\phi_{e,c,f} \in \{0, 1\}$: parâmetro de disponibilidade que assume valor 1 se o recurso correspondente ao enlace $e \in E$, ao núcleo $c \in C$ e ao *slot* espectral $f \in F$ estiver disponível antes do processamento do lote corrente, e 0 caso contrário;
- $F_{\max} \in \mathbb{Z}_+$: número total de *slots* espectrais disponíveis em cada núcleo da rede.

4.1.7.1.3 Variáveis

- $x_{d,i} \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se a tripla candidata $i \in \mathcal{T}(d)$ for selecionada para atender à demanda $d \in \mathcal{D}$, e 0 caso contrário;
- $y_{d,i,q,c,f^{\text{ini}}} \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se a rota associada ao papel funcional $q \in Q$ da tripla candidata $i \in \mathcal{T}(d)$ for alocada ao núcleo $c \in C_q$, iniciando no *slot* espectral $f^{\text{ini}} \in F$, e 0 caso contrário;
- $o_{d,i,q,e,c,f} \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se a rota associada ao papel funcional $q \in Q$ da tripla candidata $i \in \mathcal{T}(d)$ ocupar o recurso (e, c, f) , e 0 caso contrário.

4.1.7.1.4 Restrições de Seleção das Triplas de Proteção e Alocação de Recursos

R1 – Seleção da Tripla Candidata

$$\sum_{i \in \mathcal{T}(d)} x_{d,i} \leq 1, \quad \forall d \in \mathcal{D}. \quad (4.23)$$

A Restrição (4.23) garante que, para cada demanda de tráfego, seja selecionada no máximo uma tripla candidata de proteção dentre aquelas previamente geradas na Fase 2 para o respectivo par origem–destino. Como podem existir diversas triplas candidatas para uma mesma demanda, a formulação ILP determina qual delas será efetivamente alocada de acordo com as restrições de disponibilidade de recursos, continuidade e contiguidade espectral, especialização funcional dos núcleos, *No Domino Effect* e viabilidade óptica. Consequentemente, cada demanda aceita é associada a uma única tripla de proteção.

R2 – Ativação da Alocação

$$\sum_{c \in C_q} \sum_{f^{\text{ini}} \in F} y_{d,i,q,c,f^{\text{ini}}} = x_{d,i}, \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in \mathcal{T}(d), \forall q \in Q. \quad (4.24)$$

A Restrição (4.24) estabelece o acoplamento entre a seleção da tripla candidata e a alocação de recursos. Sempre que uma tripla candidata é selecionada, cada uma das três rotas associadas aos papéis funcionais α , β e γ deve receber exatamente um núcleo admissível e um *slot* espectral inicial. Em contrapartida, quando a tripla não é selecionada, nenhuma rota pertencente a essa tripla pode receber recursos da rede.

R3 – Especialização Funcional dos Núcleos

$$y_{d,i,q,c,f^{\text{ini}}} = 0, \quad \forall c \notin C_q, \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in \mathcal{T}(d), \forall q \in Q, \forall f^{\text{ini}} \in F. \quad (4.25)$$

A Restrição (4.25) impõe a política de especialização funcional dos núcleos proposta pela DPPDF, restringindo cada papel funcional ao respectivo conjunto de núcleos admissíveis. Consequentemente, o caminho principal (α), o caminho de proteção ativo (β) e o caminho de proteção inativo (γ) somente podem ser alocados em seus respectivos subconjuntos de núcleos, eliminando previamente alocações inviáveis antes da verificação de disponibilidade de recursos e da viabilidade óptica.

R4 – Alocação de Núcleos, Continuidade do Núcleo, Continuidade Espectral e Contiguidade Espectral

4.1.7.1.5 Conjuntos

- $\mathcal{D}$: conjunto de demandas de tráfego, indexado por d ;
- $\mathcal{T}$: base de triplas candidatas de proteção gerada na Fase 2, indexada por i ;

- $\mathcal{T}(d) \subseteq \mathcal{T}$: conjunto das triplas candidatas associadas ao par origem–destino da demanda d ;
- $Q = \{\alpha, \beta, \gamma\}$: conjunto dos papéis funcionais, indexado por q ;
- E : conjunto de enlaces físicos, indexado por e ;
- C : conjunto de núcleos espaciais, indexado por c ;
- F : conjunto de *slots* espectrais, indexado por f ;
- $C_q \subseteq C$: conjunto dos núcleos admissíveis para o papel funcional q , de acordo com a política de especialização funcional da DPPDF;
- $\mathcal{N}(c) \subseteq C$: conjunto dos núcleos adjacentes ao núcleo c .

Na DPPDF, os conjuntos de núcleos admissíveis são definidos pela política de especialização funcional adotada. Os caminhos principal (α) e de proteção ativo (β) compartilham o mesmo conjunto de núcleos destinados aos caminhos ativos, enquanto o caminho de proteção inativo (γ) utiliza exclusivamente o conjunto de núcleos reservado aos caminhos de proteção inativa. Na implementação considerada neste trabalho, os núcleos ativos correspondem aos núcleos pares e os núcleos destinados à proteção inativa correspondem aos núcleos ímpares.

Seja $\delta_{d,i,q}$ o número de *slots* espectrais contíguos requeridos pela demanda d na rota associada ao papel funcional q da tripla candidata i . A estratégia DPPDF adota a política de alocação espectral *First-Fit*, na qual as possíveis posições iniciais do bloco espectral são avaliadas em ordem crescente do índice espectral. Apenas posições capazes de acomodar integralmente o bloco requerido são consideradas candidatas à alocação.

Para cada demanda, tripla candidata e papel funcional, define-se inicialmente o conjunto de posições válidas para o início do bloco espectral:

$$\mathcal{F}_{d,i,q}^{\text{ini}} = \left\{ f^{\text{ini}} \in F : f^{\text{ini}} + \delta_{d,i,q} - 1 \leq F_{\max} \right\}, \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in \mathcal{T}(d), \forall q \in Q. \quad (4.26)$$

A Equação (4.26) determina todas as posições espectrais nas quais um bloco contendo $\delta_{d,i,q}$ *slots* consecutivos pode ser iniciado sem ultrapassar o limite espectral disponível. Essas posições constituem os candidatos avaliados pela política *First-Fit* durante a alocação dos recursos.

Para cada posição inicial válida, define-se o bloco espectral correspondente por

$$\mathcal{B}_{d,i,q}(f^{\text{ini}}) = \left\{ f \in F : f^{\text{ini}} \leq f \leq f^{\text{ini}} + \delta_{d,i,q} - 1 \right\}. \quad (4.27)$$

A Equação (4.27) define o conjunto de *slots* consecutivos ocupado caso a posição inicial f^{ini} seja selecionada. Esse bloco representa exatamente os recursos espectrais que serão reservados para o caminho óptico.

As posições iniciais que não pertencem ao conjunto de posições válidas são eliminadas da formulação:

$$y_{d,i,q,c,f^{\text{ini}}} = 0, \quad \begin{aligned} &\forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in \mathcal{T}(d), \forall q \in Q, \\ &\forall c \in C_q, \forall f^{\text{ini}} \in F \setminus \mathcal{F}_{d,i,q}^{\text{ini}}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

A Restrição (4.28) impede que a formulação selecione posições iniciais incapazes de acomodar integralmente o bloco espectral requerido. Dessa forma, todas as soluções inviáveis são eliminadas antes da etapa de alocação dos recursos.

A ocupação efetiva de cada recurso enlace-núcleo-*slot* é determinada por

$$o_{d,i,q,e,c,f} = a_{d,i,q,e} \sum_{\substack{f^{\text{ini}} \in \mathcal{F}_{d,i,q}^{\text{ini}} \\ f \in \mathcal{B}_{d,i,q}(f^{\text{ini}})}} y_{d,i,q,c,f^{\text{ini}}}, \quad \begin{aligned} &\forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in \mathcal{T}(d), \forall q \in Q, \\ &\forall e \in E, \forall c \in C_q, \forall f \in F. \end{aligned} \quad (4.29)$$

A Restrição (4.29) propaga a decisão de alocação representada pela variável $y_{d,i,q,c,f^{\text{ini}}}$ para todos os enlaces pertencentes à rota previamente definida, identificados pelo parâmetro de incidência $a_{d,i,q,e}$.

Como a variável $y_{d,i,q,c,f^{\text{ini}}}$ define simultaneamente o núcleo espacial c e a posição inicial f^{ini} para a rota associada ao papel funcional q , a mesma decisão é propagada para todos os enlaces pertencentes à rota.

Além disso, como a Restrição 4.25 limita previamente os núcleos admissíveis ao conjunto C_q , a continuidade do núcleo é sempre preservada respeitando a política de especialização funcional da DPPDF. Assim, os caminhos principais (α) e de proteção ativa (β) somente podem utilizar os núcleos destinados aos caminhos ativos, enquanto o caminho de proteção inativa (γ) somente pode utilizar os núcleos destinados à proteção inativa.

Consequentemente, as Equações (4.26) e (4.27), juntamente com as Restrições (4.28) e (4.29), garantem simultaneamente:

- **Continuidade do núcleo (*Core Continuity*):** a mesma rota utiliza um único núcleo espacial em todos os seus enlaces, respeitando o conjunto de núcleos admissíveis definido para seu papel funcional pela Restrição 4.25;
- **Continuidade espectral (*Spectrum Continuity*):** o mesmo bloco espectral é mantido em todos os enlaces da rota;

- **Contiguidade espectral (*Spectrum Contiguity*):** os $\delta_{d,i,q}$ slots ocupados formam um único bloco consecutivo, sem lacunas.

Assim, uma alocação somente é considerada viável quando essas três propriedades são satisfeitas simultaneamente, garantindo a consistência da atribuição de recursos espectrais e espaciais adotada pela estratégia DPPDF.

R5 – *No Domino Effect*

O princípio do *No Domino Effect* garante que a seleção de uma tripla candidata de proteção não comprometa a recuperabilidade futura de outras demandas da rede. Em outras palavras, sempre que uma tripla de proteção for selecionada, toda demanda potencialmente afetada deverá preservar pelo menos uma alternativa de recuperação completamente disjunta dos enlaces utilizados por essa tripla.

4.1.7.1.6 Parâmetros Adicionais

- $\rho_{d,i,d'} \in \{0, 1\}$: parâmetro pré-computado que assume valor 1 quando a demanda $d' \in \mathcal{D}$ preserva pelo menos uma tripla candidata de proteção completamente disjunta da união dos enlaces pertencentes à tripla candidata $i \in \mathcal{T}(d)$ da demanda d , e assume valor 0 caso contrário.

O parâmetro $\rho_{d,i,d'}$ é calculado durante o pré-processamento da Fase 2, utilizando exclusivamente a topologia das triplas candidatas previamente geradas. Dessa forma, nenhuma informação referente à ocupação espectral, aos núcleos espaciais ou ao estado corrente da rede é necessária para sua determinação.

A seleção de uma tripla candidata somente é permitida quando todas as demandas potencialmente afetadas preservam pelo menos uma alternativa de recuperação completamente disjunta.

$$x_{d,i} \leq \rho_{d,i,d'}, \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall i \in \mathcal{T}(d), \forall d' \in \mathcal{D} \setminus \{d\}. \quad (4.30)$$

A Restrição (4.30) impede a seleção de qualquer tripla candidata cuja utilização elimine todas as possibilidades de recuperação de alguma demanda vizinha. Assim, somente permanecem viáveis as triplas que preservam a sobrevivência simultânea de todas as demandas potencialmente afetadas.

O parâmetro $\rho_{d,i,d'}$ é definido por

$$\rho_{d,i,d'} = 1 \iff \exists j \in \mathcal{T}(d') : E(j) \cap E(i) = \emptyset, \quad (4.31)$$

em que $E(i)$ representa a união dos enlaces pertencentes aos três caminhos ópticos (α, β, γ) da tripla candidata i , enquanto $E(j)$ representa a união dos enlaces pertencentes a uma tripla candidata da demanda d' .

A Equação (4.31) formaliza o princípio do *No Domino Effect*, exigindo que toda demanda potencialmente afetada pela seleção de uma tripla preserve pelo menos uma alternativa de recuperação completamente disjunta da união dos enlaces utilizados por essa tripla. Caso essa condição não seja satisfeita, a tripla candidata é automaticamente descartada pela Restrição (4.30).

4.1.7.1.7 Escopo da garantia de proteção A garantia fornecida pela DPPDF é condicionada ao modelo de falhas adotado nesta tese. Consideram-se duas falhas simultâneas de enlaces, sem falhas de nós ou eventos de grupo de risco compartilhado (*Shared Risk Link Group* – SRLG), e admite-se que o mecanismo de comutação consiga ativar um caminho previamente reservado que permaneça física e opticamente viável. Para cada demanda aceita, os caminhos α , β e γ são mutuamente disjuntos em enlaces. Consequentemente, quaisquer duas falhas de enlaces podem interromper, no máximo, dois desses três caminhos. Se α e β forem simultaneamente interrompidos, γ não contém nenhum dos enlaces falhos e constitui a alternativa dedicada de recuperação. Nos demais pares de falhas, pelo menos um dos caminhos ativos permanece disponível.

A disjunção dos três caminhos, isoladamente, não é suficiente para caracterizar a correção da proposta, pois a ativação de γ pode introduzir *crosstalk* sobre conexões co-canais em núcleos adjacentes. A DPPDF trata essa segunda condição por meio de duas verificações complementares. A Restrição R6 preserva a viabilidade óptica do próprio caminho γ , considerando o *crosstalk* recebido por ele. A Restrição R5, por sua vez, rejeita uma tripla quando alguma demanda que possa ser afetada não preserva uma alternativa de recuperação disjunta do conjunto de enlaces da tripla ativada. Portanto, mesmo no caso conservador em que a ativação de γ torne inviável um caminho ativo vizinho, a demanda afetada não fica sem alternativa por causa dos mesmos enlaces envolvidos no evento de recuperação.

Esse argumento estabelece uma *condição suficiente*, e não necessária, para a ausência de efeito dominó no modelo analisado. A quantificação sobre todas as demandas em (4.30) constitui uma aproximação conservadora: ela utiliza um superconjunto das demandas que efetivamente poderão apresentar adjacência espacial e sobreposição espectral quando γ for ativado. Essa escolha pode descartar triplas que seriam viáveis em um determinado estado da rede, mas impede que a garantia dependa de uma previsão específica da ocupação futura. Na heurística *online*, em que a ocupação já é conhecida no instante da decisão, a

verificação pode ser restrita ao conjunto de vizinhos co-canais efetivamente identificado.

R6 – Avaliação Local de *Crosstalk*

Após a seleção da tripla candidata de proteção e a alocação dos respectivos núcleos espaciais e blocos espectrais, a formulação verifica a viabilidade óptica local da solução obtida. Diferentemente das restrições anteriores, esta etapa depende do estado corrente da rede, pois considera simultaneamente o caminho de proteção inativo (γ) recém-alocado e os caminhos de proteção inativos previamente reservados que compartilham enlaces físicos, núcleos adjacentes e espectro sobreposto.

A avaliação é realizada em duas direções complementares: (i) verifica-se o *crosstalk* recebido pelo novo caminho de proteção inativo; e (ii) verifica-se o incremento de *cross-talk* introduzido nos caminhos de proteção inativos previamente estabelecidos pela nova alocação. A tripla candidata somente é considerada viável quando ambas as verificações satisfazem simultaneamente o limite máximo admissível para transmissões BPSK.

4.1.7.1.8 Conjuntos Adicionais

- $\mathcal{G}_{d,i}^{\text{loc}}$: conjunto formado pelo caminho de proteção inativo da tripla candidata i e pelos caminhos de proteção inativos previamente reservados localmente afetados por essa alocação;
- $\mathcal{A}_{d,i}^{\text{loc}}$: conjunto dos caminhos ópticos ativos que podem produzir interferência sobre algum caminho pertencente a $\mathcal{G}_{d,i}^{\text{loc}}$.

4.1.7.1.9 Parâmetros

- $\Gamma_{g,e,c,f} \in \{0,1\}$: assume valor 1 quando o caminho de proteção inativo g ocupa o recurso (e, c, f) , e 0 caso contrário;
- $A_{\ell,e,c,f} \in \{0,1\}$: assume valor 1 quando o caminho óptico ativo ℓ ocupa o recurso (e, c, f) , e 0 caso contrário;
- $\xi_e \in \mathbb{R}_+$: contribuição de *crosstalk* produzida por um caminho óptico ativo adjacente e co-canal no enlace físico e ;
- $XT_{\text{BPSK}}^{\text{th}} \in \mathbb{R}_+$: valor máximo admissível de *crosstalk* acumulado para transmissões utilizando modulação BPSK.

4.1.7.1.10 Variáveis Auxiliares

- $h_{d,i,g,\ell,e,c,c',f} \in \{0,1\}$: assume valor 1 quando o caminho de proteção inativo g e o caminho óptico ativo ℓ ocupam simultaneamente enlaces comuns, núcleos adjacentes e o mesmo *slot* espectral, e 0 caso contrário;

- $XT_{d,i,g} \in \mathbb{R}_+$: *crosstalk* acumulado incidente sobre o caminho de proteção inativo g após a seleção da tripla candidata i .

O indicador binário de interação entre um caminho de proteção inativo e um caminho óptico ativo é definido por

$$h_{d,i,g,\ell,e,c,c',f} = \Gamma_{g,e,c,f} \cdot A_{\ell,e,c',f}, \quad (4.32)$$

cuja implementação é realizada por meio da linearização binária padrão apresentada anteriormente.

O *crosstalk* acumulado incidente sobre cada caminho de proteção inativo é calculado por

$$XT_{d,i,g} = \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{c' \in \mathcal{N}(c)} \sum_{f \in F} \sum_{\ell \in \mathcal{A}_{d,i}^{\text{loc}}} \xi_e h_{d,i,g,\ell,e,c,c',f}. \quad (4.33)$$

Por fim, a condição de viabilidade óptica é imposta por

$$XT_{d,i,g} \leq XT_{\text{BPSK}}^{\text{th}}, \quad \forall g \in \mathcal{G}_{d,i}^{\text{loc}}. \quad (4.34)$$

A Restrição (4.34) garante que a seleção da tripla candidata preserve simultaneamente a qualidade de transmissão do novo caminho de proteção inativo e de todos os caminhos de proteção inativos previamente reservados localmente afetados pela nova alocação. Dessa forma, uma tripla candidata somente é aceita quando todos os caminhos pertencentes ao conjunto $\mathcal{G}_{d,i}^{\text{loc}}$ permanecem abaixo do limiar máximo admissível de *crosstalk* para transmissões BPSK, assegurando a viabilidade óptica local da solução.

Função Objetivo O objetivo da Fase 3 consiste em determinar a alocação ótima das triplas candidatas de proteção para o conjunto de demandas de tráfego pertencentes ao lote corrente de provisionamento. A duração da janela de provisionamento, denotada por ΔT , apenas define o conjunto de demandas $\mathcal{D}$ submetido à otimização, não aparecendo explicitamente na formulação matemática.

4.1.7.1.11 Entrada da Fase A entrada da Fase 3 é composta por:

- o conjunto de demandas de tráfego acumuladas durante a janela de provisionamento, representado por $\mathcal{D}$;
- a base de triplas candidatas de proteção previamente gerada na Fase 2, representada por $\mathcal{T}$;

- o estado atual de ocupação dos recursos da rede, representado pela disponibilidade dos recursos enlace–núcleo–*slot*.

Todas as informações dependentes da topologia da rede, incluindo as rotas candidatas, os formatos de modulação, os comprimentos das rotas, os conjuntos de núcleos admissíveis e as triplas candidatas de proteção, foram previamente determinadas nas fases executadas *offline* e encontram-se disponíveis para o processo de otimização.

A função objetivo é composta por três critérios hierárquicos, aplicados em ordem lexicográfica:

1. maximizar o número de demandas de tráfego atendidas;
2. minimizar o consumo total de recursos enlace–núcleo–*slot*;
3. minimizar o índice do *slot* espectral inicial, reproduzindo a política de alocação *First-Fit*.

A função objetivo é, portanto, definida por

$$\begin{aligned}
\max \quad & \omega_D \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{T}(d)} x_{d,i} \\
& - \omega_S \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{T}(d)} \sum_{q \in Q} \sum_{e \in E} \sum_{c \in C_q} \sum_{f \in F} o_{d,i,q,e,c,f} \\
& - \omega_F \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{T}(d)} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C_q} \sum_{f^{\text{ini}} \in F} f^{\text{ini}} y_{d,i,q,c,f^{\text{ini}}},
\end{aligned} \tag{4.35}$$

em que os pesos positivos satisfazem

$$\omega_D \gg \omega_S \gg \omega_F. \tag{4.36}$$

O primeiro termo maximiza o número de demandas efetivamente atendidas. Como a Restrição (4.23) permite a seleção de, no máximo, uma tripla candidata para cada demanda, a expressão

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{T}(d)} x_{d,i}$$

corresponde exatamente ao número de demandas aceitas pela formulação.

O segundo termo minimiza o consumo global de recursos da rede, reduzindo o número total de recursos enlace–núcleo–*slot* ocupados pelas triplas de proteção selecionadas.

O terceiro termo minimiza o índice do *slot* espectral inicial utilizado na alocação, induzindo naturalmente o comportamento da política *First-Fit*. Dessa forma, entre soluções

equivalentes em termos de demandas atendidas e consumo de recursos, a formulação prioriza aquelas que utilizam os menores índices espectrais disponíveis, promovendo maior compactação do espectro.

A relação lexicográfica definida pela Equação (4.36) assegura que a maximização do número de demandas atendidas tenha prioridade absoluta. Entre soluções equivalentes segundo esse primeiro critério, minimiza-se o consumo total de recursos da rede e, persistindo o empate, seleciona-se a solução que melhor reproduz a política de alocação *First-Fit*.

As restrições de especialização funcional dos núcleos, continuidade do núcleo, continuidade espectral, contiguidade espectral, disponibilidade de recursos, *No Domino Effect* e viabilidade óptica em termos de *crosstalk* são integralmente garantidas pelas restrições do modelo e, portanto, não aparecem explicitamente na função objetivo.

4.1.7.1.12 Resultado da Fase Ao término da otimização, obtém-se a alocação ótima das triplas candidatas de proteção para o lote corrente de demandas. Para cada demanda aceita, é selecionada exatamente uma tripla candidata de proteção, bem como o núcleo espacial e o bloco espectral contíguo atribuídos a cada um dos três caminhos ópticos funcionais (α , β e γ).

Todas as soluções obtidas satisfazem simultaneamente a política de especialização funcional dos núcleos, a disponibilidade de recursos, a continuidade do núcleo, a continuidade espectral, a contiguidade espectral, o princípio do *No Domino Effect* e as restrições de viabilidade óptica relacionadas ao *crosstalk*. As demandas para as quais não existe nenhuma tripla candidata capaz de satisfazer simultaneamente todas essas restrições são bloqueadas.

4.1.7.1.13 Implementação Computacional A formulação matemática proposta para a Fase 3 foi implementada em linguagem Python utilizando a biblioteca OR-Tools (*Operations Research Tools*), desenvolvida pelo Google. O modelo de Programação Linear Inteira (ILP) foi construído por meio da interface `pywraplp`, empregando o solucionador *Coin-or Branch and Cut* (CBC). Todas as variáveis de decisão, parâmetros e restrições apresentados nesta seção foram implementados diretamente na formulação computacional, preservando integralmente a correspondência entre o modelo matemático e sua implementação. Essa implementação foi utilizada para validar incrementalmente cada uma das restrições propostas (R1–R6), permitindo verificar individualmente a consistência da formulação e, posteriormente, avaliar o comportamento conjunto do modelo em diferentes cenários de alocação de recursos em SDM-EONs. Os experimentos computacionais foram

obtidos diretamente a partir dessa implementação, garantindo a correspondência entre a formulação matemática proposta e os resultados experimentais discutidos neste trabalho.

A Programação Linear Inteira (PLI) desempenha o papel de *benchmark* metodológico da proposta: para instâncias de porte tratável, ela permite obter uma solução global sujeita ao mesmo conjunto de restrições da DPPDF e, assim, verificar a correção da modelagem e qualificar a solução produzida pela heurística. Seu emprego, contudo, não é destinado à operação dinâmica em redes de grande escala. O número de variáveis binárias e de restrições cresce com o número de demandas do lote, de triplas de rotas candidatas, de núcleos e de posições espectrais, enquanto as restrições de disponibilidade, *crosstalk* e proteção acoplam as decisões entre as demandas. Como consequência, o tempo de resolução por ramificação e corte pode crescer rapidamente com o tamanho da instância. Os resultados da Seção 5.2 ilustram essa diferença de escala: a PLI obtém soluções ótimas para os ensaios de duas e três demandas, enquanto a heurística processa um ensaio com 28 demandas. Esses resultados não são apresentados como uma medição direta de aceleração, pois as instâncias possuem tamanhos distintos, mas evidenciam a complementaridade entre a referência exata e o mecanismo operacional. A heurística é, portanto, adotada para a provisão *online*; a PLI permanece como referência de exatidão e de validação nas instâncias em que sua resolução é computacionalmente viável.

4.1.8 Heurística DPPDF

A heurística DPPDF implementa a estratégia de proteção proposta como uma alternativa computacionalmente viável à formulação de programação linear inteira apresentada na seção anterior. Enquanto o modelo ILP realiza uma otimização global considerando simultaneamente todas as demandas, a heurística foi desenvolvida para cenários de tráfego dinâmico, nos quais as requisições chegam sequencialmente e as decisões de alocação devem ser tomadas em tempo real, sem conhecimento das demandas futuras.

A heurística segue os mesmos princípios estabelecidos na formulação matemática da DPPDF. Em vez de resolver um problema global de otimização a cada nova requisição, o algoritmo realiza a alocação de forma incremental, preservando as mesmas restrições estruturais, a política de especialização funcional dos núcleos, o mecanismo híbrido de avaliação do *inter-core crosstalk* e a prevenção do efeito dominó. Dessa forma, a heurística constitui uma implementação online do modelo proposto.

O algoritmo opera sobre a base pré-processada $\mathcal{T}$ de triplas de rotas disjuntas (γ, α, β) . Essa base é gerada uma única vez para a topologia, antes da chegada das demandas, e armazena as rotas, seus comprimentos, as incidências de enlaces, os papéis funcionais e os

formatos de modulação. A janela espectral necessária não pertence ao pré-processamento, pois depende da largura de banda da demanda; ela é calculada quando uma requisição é recebida. Da mesma forma, os núcleos e os índices espectrais específicos somente são atribuídos durante a decisão *online*. Uma vez provisionadas, as rotas α e β originam caminhos ópticos ativos nos núcleos destinados às transmissões livres de interferência, enquanto a rota γ origina o caminho óptico reservado à proteção inativa.

O processo de decisão é dividido em dois níveis complementares de verificação. O primeiro nível, denominado R1, verifica a viabilidade estrutural da alocação, avaliando as restrições definidas no modelo do sistema, incluindo continuidade espectral, contiguidade espectral, continuidade do núcleo, política de especialização funcional e alocação espectral segundo a estratégia *First-Fit*. Candidatos que violam qualquer uma dessas condições são imediatamente descartados.

O segundo nível, denominado R2, verifica as condições associadas à ativação do caminho γ . Inicialmente, aplica-se um filtro estrutural baseado na tabela de coexistência BPSK, que limita o número máximo admissível de interferentes em núcleos adjacentes. Somente quando essa verificação estrutural não é suficiente para garantir a estabilidade óptica é realizada a avaliação analítica do *inter-core crosstalk*. Em seguida, verifica-se a preservação das alternativas de recuperação das demandas vizinhas, assegurando que a ativação de γ não elimine todos os seus caminhos de recuperação e, conseqüentemente, não provoque o efeito dominó.

4.1.8.1 Função de pré-processamento

O termo PREPROCESSING designa as Fases 1 e 2 da metodologia e não uma busca refeita a cada chegada. O procedimento recebe o grafo, os formatos de modulação e o limite K ; sua saída é a base persistente $\mathcal{T}$ de triplas candidatas. O Algoritmo 1 torna explícita a correspondência entre o procedimento computacional e as Restrições (4.16)–(4.22).

Algorithm 1 PREPROCESSING – geração *offline* das triplas candidatas

Require: grafo ponderado $G = (N, E)$, formatos $\mathcal{M}$ e limite de rotas K

Ensure: base de rotas $\mathcal{R}$ e base de triplas $\mathcal{T}$

```

1   $\mathcal{R} \leftarrow \emptyset; \mathcal{T} \leftarrow \emptyset$ 
2  for all  $(s, t) \in N \times N$  com  $s \neq t$  do
3     $\mathcal{P}_{s,t}^K \leftarrow \text{YENKSP}(G, s, t, K)$ 
4    for all  $p \in \mathcal{P}_{s,t}^K$  do
5       $L(p) \leftarrow \sum_{e \in E(p)} D_e$ 
6       $m(p) \leftarrow$  modulação de maior ordem tal que  $L(p) \leq W_{m(p)}$ 
7      if existe  $m(p)$  viável then
8         $\mathcal{R}_{s,t} \leftarrow \mathcal{R}_{s,t} \cup \{(p, E(p), L(p), m(p))\}$ 
9      end if
10   end for
11   for all  $\{p_1, p_2, p_3\} \subseteq \mathcal{R}_{s,t}$  do
12     if  $E(p_1), E(p_2)$  e  $E(p_3)$  são mutuamente disjuntos then
13        $p_\gamma \leftarrow \arg \min_{p \in \{p_1, p_2, p_3\}} L(p)$ 
14       atribua  $p_\alpha$  e  $p_\beta$  às duas rotas restantes
15        $m_\gamma \leftarrow \text{BPSK}$ ; preserve  $m_\alpha$  e  $m_\beta$ 
16       registre  $(p_\alpha, p_\beta, p_\gamma, L_\alpha, L_\beta, L_\gamma, m_\alpha, m_\beta, m_\gamma)$  em  $\mathcal{T}_{s,t}$ 
17     end if
18   end for
19 end for
20 return  $(\mathcal{R}, \mathcal{T})$ 

```

Quando existe empate entre rotas de menor comprimento, a implementação deve aplicar uma regra determinística de desempate, como a ordem em que as rotas aparecem na base. O mesmo vale para a atribuição dos papéis α e β às duas rotas restantes. Essa regra não altera a disjunção da tripla, mas deve ser registrada para permitir a reprodução exata da ordenação dos candidatos.

Na etapa *online*, a demanda $d = (s, t, b)$ apenas consulta $\mathcal{T}_{s,t}$. Para cada tripla recuperada, a largura de banda b e as modulações armazenadas determinam o número de *slots* requerido por cada papel. Portanto, o estado de ocupação, a posição espectral e o núcleo não participam do Algoritmo 1; essas decisões permanecem sob responsabilidade de CANALLOC.

O Algoritmo 2 apresenta o procedimento principal da heurística DPPDF.

Algorithm 2 Procedimento principal da heurística DPPDF

Require: demanda $d = (s, t, b)$, base *offline* $\mathcal{T}$ e estado corrente da rede σ

```
1  $\mathcal{I} \leftarrow \text{RETRIEVE\_TRIPLES}(\mathcal{T}_{s,t}, b)$ 
2 for all  $(\gamma, \alpha, \beta) \in \mathcal{I}$  do
3    $\sigma_{\text{tmp}} \leftarrow \text{BEGIN\_TEMPORARY\_ALLOCATION}(\sigma)$ 
4    $\mathcal{V}_\gamma \leftarrow$  vizinhos em núcleos adjacentes com sobreposição espectral
5   if not  $\text{CANALLOC}(d, \gamma, \Gamma, \mathcal{V}_\gamma, \mathcal{I}, \sigma_{\text{tmp}})$  then
6      $\text{ROLLBACK}(\sigma_{\text{tmp}})$ 
7     continue
8   end if
9    $\mathcal{V}_\alpha \leftarrow$  vizinhos em núcleos adjacentes com sobreposição espectral
10  if not  $\text{CANALLOC}(d, \alpha, \mathbf{A}, \mathcal{V}_\alpha, \mathcal{I}, \sigma_{\text{tmp}})$  then
11     $\text{ROLLBACK}(\sigma_{\text{tmp}})$ 
12    continue
13  end if
14   $\mathcal{V}_\beta \leftarrow$  vizinhos em núcleos adjacentes com sobreposição espectral
15  if not  $\text{CANALLOC}(d, \beta, \mathbf{B}, \mathcal{V}_\beta, \mathcal{I}, \sigma_{\text{tmp}})$  then
16     $\text{ROLLBACK}(\sigma_{\text{tmp}})$ 
17    continue
18  end if
19   $\text{COMMIT}(\sigma_{\text{tmp}}, \sigma)$ 
20  return  $\text{ALLOCATE}$ 
21 end for
22 return  $\text{BLOCK}$ 
```

O algoritmo principal recebe uma nova demanda, a base *offline* e o estado corrente da rede. A chamada `RETRIEVE\_TRIPLES` recupera somente as triplas associadas ao par (s, t) e calcula, a partir de b , a janela espectral requerida por cada papel. Como consequência, a fase *online* avalia apenas estruturas previamente viáveis sob o ponto de vista de roteamento, alcance e disjunção.

Durante a alocação, cada trio é analisado na ordem (γ, α, β) . Essa ordem garante que a viabilidade do caminho de proteção secundário seja verificada antes da avaliação dos caminhos ativos, evitando que sejam aceitas estruturas cuja proteção futura não possa ser garantida.

4.1.8.2 Função CANALLOC

A função `CANALLOC` constitui o núcleo decisório da heurística e reproduz, para uma rota candidata e para o estado instantâneo da rede, as verificações que a PLI impõe conjuntamente a todas as demandas do lote. Sua execução ocorre sobre uma alocação temporária: os recursos somente são confirmados quando os três caminhos ópticos da tripla são aprovados; caso uma verificação falhe, a reserva temporária é desfeita e a heurística prossegue para a próxima tripla.

Algorithm 3 CANALLOC – Verificação de viabilidade

Require: demanda d , caminho p , papel q , vizinhos $\mathcal{V}_p$

Require: trio corrente i , base de triplas $\mathcal{I}$ e estado temporário σ_{tmp}

```
// R1: Verificação estrutural
1 if not CHECKR1( $p, q, \sigma_{\text{tmp}}$ ) then
2   return false
3 end if

// R2: Prevenção do efeito dominó
4 if  $q = \Gamma$  then
5   if not CHECKDOMINO( $d, i, \mathcal{V}_p, \mathcal{I}, \sigma_{\text{tmp}}$ ) then
6     return false
7   end if
8 end if

// Filtro estrutural baseado na tabela BPSK
9 if IsBPSK( $p$ ) then
10  if not CHECKNMAX( $p, \mathcal{V}_p$ ) then
11    return false
12  end if

// Verificação óptica complementar
13  if not CHECKBPSKSTABILITY( $p, \mathcal{V}_p, \sigma_{\text{tmp}}$ ) then
14    if not MITIGATE( $p, q, \sigma_{\text{tmp}}$ ) then
15      return false
16    end if
17  end if
18 end if
19 RESERVETEMPORARILY( $p, q, \sigma_{\text{tmp}}$ )
20 return true
```

A primeira chamada, CHECKR1, verifica a viabilidade estrutural da alocação. Ela operacionaliza sequencialmente as condições que, na PLI, são impostas pelas Restrições (4.24), (4.25), (4.26), (4.27), (4.28) e (4.29). Em particular, verifica disponibilidade de recursos, continuidade de núcleo, continuidade espectral, contiguidade espectral, especialização funcional dos núcleos e escolha do primeiro bloco espectral viável segundo *First-Fit*.

Quando o papel avaliado é o da proteção inativa γ , a função CHECKDOMINO executa a verificação associada ao princípio *No Domino Effect*, correspondente à Restrição (4.30) e à condição de alternativa de recuperação disjunta expressa em (4.31). A partir dos vizinhos co-canais em núcleos adjacentes e enlaces compartilhados, ela identifica as demandas que podem ser afetadas pela ativação de γ e verifica se cada uma preserva ao menos uma tripla alternativa disjunta da tripla corrente. Se uma demanda potencialmente afetada não possuir essa alternativa de recuperação, a tripla é rejeitada antes da confirmação dos recursos.

A avaliação de *crosstalk* é realizada em duas etapas. Primeiro, CHECKNMAX consulta a tabela de coexistência BPSK e rejeita imediatamente configurações cujo número de interferentes em núcleos adjacentes excede o limite estrutural admissível. Esse filtro é uma condição computacional antecipada da viabilidade óptica imposta pela Restrição (4.34).

Para os candidatos que passam por esse filtro, CHECKBPSKSTABILITY calcula as interações co-canais e o *crosstalk* acumulado conforme as Eqs. (4.32) e (4.33), confirmando o limite de BPSK pela Eq. (4.34). Quando essa verificação identifica inviabilidade óptica, MITIGATE tenta reposicionar o bloco de *slots* espectrais dentro da rota e do conjunto de núcleos já admissível para o papel funcional avaliado. Na PLI, essa busca entre posições espectrais alternativas é representada pelas variáveis de início de bloco e pelas restrições de alocação da R4; na heurística, ela é realizada explicitamente. Se nenhum reposicionamento espectral restabelecer a viabilidade, a alocação temporária é rejeitada.

Essa sequência hierárquica reduz o custo computacional da heurística, pois a avaliação analítica do *crosstalk* é executada somente para candidatos que já satisfazem as verificações estruturais.

4.1.8.3 Verificação do efeito dominó

A função CHECKDOMINO, detalhada no Algoritmo 4, é executada quando se avalia o caminho $\gamma(d)$ da demanda corrente d . Sua entrada não é apenas o caminho candidato: a função recebe também sua janela espectral, o núcleo proposto, o conjunto das demandas já estabelecidas e a base de triplas alternativas produzida no pré-processamento. Primeiro são identificadas somente as demandas com caminhos ativos que compartilham pelo menos um enlace com $\gamma(d)$, utilizam núcleo adjacente e apresentam sobreposição espectral. Em seguida, para cada demanda vizinha d' , procura-se uma tripla alternativa cuja união de enlaces seja disjunta da união dos enlaces da tripla corrente. A inexistência dessa alternativa provoca a rejeição do candidato antes da confirmação de qualquer recurso.

Algorithm 4 CHECKDOMINO – verificação das alternativas de recuperação

Require: demanda corrente d , tripla candidata i , alocação proposta de $\gamma(d)$

Require: conjunto $\mathcal{D}_{\text{est}}$ de demandas estabelecidas e base $\mathcal{T}$

```

1  $\mathcal{V} \leftarrow \text{ACTIVECoCHANNELNEIGHBORS}(\gamma(d), \mathcal{D}_{\text{est}})$ 
2  $E_i \leftarrow E_\alpha(d) \cup E_\beta(d) \cup E_\gamma(d)$ 
3 for all  $d' \in \mathcal{V}$  do
4    $found \leftarrow \text{false}$ 
5   for all  $j \in \mathcal{T}(d')$  do
6     if  $E(j) \cap E_i = \emptyset$  then
7        $found \leftarrow \text{true}$ 
8       break
9     end if
10  end for
11  if not  $found$  then
12    return false
13  end if
14 end for
15 return true
```

O teste não pressupõe que todo vizinho será necessariamente interrompido pela ativação de γ . Ele adota deliberadamente o caso conservador: se houver adjacência co-canal, considera-se a demanda potencialmente afetada e exige-se antecipadamente uma alternativa. Desse modo, a correção estrutural não depende de assumir que o *crosstalk* será inofensivo. A verificação óptica subsequente continua necessária para garantir que o próprio γ suporte o *crosstalk* recebido durante sua ativação.

4.1.8.4 Complexidade Computacional

A estratégia DPPDF é organizada em duas etapas computacionalmente distintas, executadas em momentos diferentes da operação da rede. A primeira corresponde ao pré-processamento (*offline*), realizado antes da chegada das demandas, cujo objetivo é gerar previamente as estruturas candidatas de proteção que serão utilizadas durante toda a operação da rede. A segunda corresponde à etapa de decisão (*online*), executada sempre que uma nova demanda é recebida, utilizando apenas as estruturas previamente geradas para realizar a alocação. Como essas etapas possuem objetivos e momentos de execução distintos, suas complexidades são analisadas separadamente.

4.1.8.4.1 Etapa de pré-processamento (*offline*). O pré-processamento é responsável pela geração das estruturas candidatas de proteção utilizadas pela heurística durante a operação da rede. Inicialmente, para cada demanda, são geradas até K rotas candidatas por meio do algoritmo *K-Shortest Paths* (KSP), implementado a partir de sucessivas execuções do algoritmo de Dijkstra. Considerando um grafo com $|V|$ nós e $|E|$ enlaces, a geração dessas rotas apresenta custo assintótico

$$T_{\text{pre}} = O(K \cdot (|E| + |V| \log |V|)).$$

A partir das rotas obtidas são construídos todos os trios disjuntos (γ, α, β) e determinadas as respectivas janelas espectrais viáveis. Seja $\mathcal{I}$ o conjunto das estruturas candidatas de proteção. No pior caso, como cada estrutura resulta da combinação de três rotas mutuamente disjuntas escolhidas entre as K rotas candidatas, a cardinalidade desse conjunto é limitada por

$$|\mathcal{I}| = O(K^3).$$

Assim, o pré-processamento produz um conjunto de estruturas candidatas que permanece armazenado durante toda a operação da rede, sendo reutilizado em todas as decisões subsequentes. Como essa etapa é executada apenas uma vez, seu custo computacional é

amortizado ao longo da operação e não interfere diretamente no tempo de resposta da heurística.

4.1.8.4.2 Etapa de decisão (*online*). Durante a operação da rede, sempre que uma nova demanda é recebida, a heurística percorre o conjunto $\mathcal{I}$ de estruturas candidatas até encontrar uma solução viável ou até que todas as alternativas sejam descartadas. No pior caso, todas as estruturas pertencentes a $\mathcal{I}$ precisam ser avaliadas.

Para cada estrutura candidata (γ, α, β) são executadas até três chamadas da função CANALLOC, correspondentes aos caminhos γ , α e β . Como esse fator é constante, ele não altera a ordem assintótica da complexidade.

Conforme apresentado na Subseção 4.1.8.2, o custo dominante de uma chamada da função CANALLOC é a execução da verificação estrutural R1, responsável por verificar a continuidade espectral, a contiguidade espectral, a continuidade do núcleo, a política de especialização funcional e a alocação espectral segundo a estratégia *First-Fit*. Essa verificação percorre os enlaces pertencentes ao caminho avaliado e os recursos espectrais disponíveis em cada núcleo, apresentando custo assintótico

$$T_{\text{CANALLOC}} = O(|E(u)| \cdot S \cdot C),$$

em que $|E(u)|$ representa o número de enlaces do caminho candidato u , S o número de *slots* espectrais disponíveis por núcleo e C o número de núcleos da fibra.

Como cada estrutura candidata pode ser submetida a essa verificação, a complexidade da etapa de decisão *online* é dada por

$$T_{\text{online}} = O(|\mathcal{I}| \cdot |E(u)| \cdot S \cdot C).$$

Substituindo o limite superior para o número de estruturas candidatas, obtém-se

$$T_{\text{online}} = O(K^3 \cdot |E(u)| \cdot S \cdot C).$$

Observa-se, portanto, que o custo da etapa *online* cresce linearmente com o número de estruturas candidatas avaliadas e com o custo da função CANALLOC. A principal vantagem da decomposição proposta consiste em deslocar para o pré-processamento as operações mais custosas de geração das rotas candidatas e construção das estruturas de proteção. Assim, durante a operação dinâmica da rede, a heurística limita-se à avaliação de candidatos previamente construídos, reduzindo significativamente o tempo necessário para a tomada de decisão e tornando sua aplicação adequada a cenários de provisão dinâmica de conexões. A separação entre as etapas *offline* e *online* permite concentrar no pré-processamento as operações de geração das estruturas candidatas de proteção. Dessa

forma, durante a operação dinâmica da rede, a heurística realiza apenas a avaliação dessas estruturas previamente construídas, reduzindo significativamente o tempo necessário para a tomada de decisão. Consequentemente, o desempenho operacional da DPPDF é determinado pela complexidade da etapa *online*, enquanto a etapa *offline* atua como um mecanismo de preparação, cujo custo é amortizado ao longo da operação da rede.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo apresenta a avaliação numérica da estratégia *Dedicated Path Protection against Double Failure* (DPPDF), proposta para redes SDM-EON, com base no modelo de sistema, na formulação matemática e na heurística desenvolvidos no capítulo anterior. O objetivo da avaliação é analisar a capacidade da DPPDF de oferecer proteção dedicada contra falhas duplas preservando níveis de taxa de bloqueio de conexões (*Blocking Ratio* – BR) e taxa de bloqueio de banda (*Bandwidth Blocking Ratio* – BBR) próximos aos obtidos por mecanismos de proteção contra falhas simples, ao mesmo tempo em que promove o reaproveitamento controlado de regiões espectralmente degradadas pelo *inter-core crosstalk*.

Inicialmente, são apresentados o ambiente experimental e os parâmetros utilizados nas simulações, incluindo as topologias de rede, os modelos de tráfego, os formatos de modulação, as características físicas da fibra multinúcleo e os demais parâmetros empregados, de forma a garantir a reprodutibilidade dos experimentos. Em seguida, são analisadas, em seções específicas, as métricas de desempenho consideradas, comparando a DPPDF com estratégias clássicas de proteção contra falhas simples e com abordagens dedicadas de proteção contra falhas duplas.

A apresentação dos resultados inclui ainda uma evidência complementar sobre proteção compartilhada, extraída de Júnior et al. [2]. Nessa comparação, são analisadas conjuntamente a taxa de bloqueio de banda e a indisponibilidade em estratégias dedicadas e na proteção compartilhada por caminho (SPP). Assim, a avaliação distingue o ganho de utilização de recursos proporcionado pelo compartilhamento da disponibilidade associada ao tempo de recuperação de cada mecanismo.

Por fim, são discutidos os resultados obtidos, destacando o impacto da especialização funcional dos núcleos e do reaproveitamento controlado de regiões sujeitas ao *inter-core crosstalk* sobre o desempenho da rede. A análise busca evidenciar que a estratégia proposta torna viável a implementação de proteção dedicada contra falhas duplas em redes

SDM-EON, preservando a qualidade de transmissão e utilizando os recursos espectrais de forma mais eficiente.

5.1 Análise Comparativa Preliminar

Antes da avaliação em cenários completos de rede, apresenta-se uma análise comparativa preliminar entre as estratégias XT-avoid, XT-estimated e a proposta DPPDF. Em um cenário controlado, a análise ilustra como cada estratégia organiza os recursos espectrais e espaciais disponíveis. Ao utilizar o mesmo conjunto de demandas e a mesma política de alocação, torna-se possível isolar o impacto de cada técnica sobre o aproveitamento dos recursos espectrais, evidenciando seus princípios de funcionamento e suas diferenças estruturais.

O cenário considerado é composto por um único enlace SDM contendo sete núcleos, cada um com 16 *slots* espectrais disponíveis. Um conjunto de *lightpaths* com larguras espectrais crescentes é alocado segundo a estratégia *First-Fit*, adotando uma banda de guarda de um *slot* entre conexões consecutivas em um mesmo núcleo. Essa configuração simplificada elimina a influência do roteamento, do tráfego dinâmico e das características físicas da rede, permitindo observar diretamente como cada estratégia organiza os recursos espectrais e espaciais disponíveis.

Inicialmente, considera-se a estratégia XT-avoid, ilustrada na Figura 5.1. Nessa abordagem, um mesmo índice espectral não pode ser reutilizado em núcleos fisicamente adjacentes, eliminando completamente o *inter-core crosstalk*, porém reduzindo significativamente o aproveitamento espacial da fibra. Embora o enlace disponha de sete núcleos, apenas três deles permanecem efetivamente disponíveis para alocação. Para o conjunto de demandas considerado, foram estabelecidos oito *lightpaths*, ocupando 36 *slots* espectrais. Além disso, cinco *slots* correspondem às bandas de guarda, sete permanecem indisponíveis devido à ordem de chegada das requisições e quatro núcleos inteiros deixam de ser utilizados pela própria política XT-avoid. Como resultado, apenas 36 dos 112 *slots* disponíveis são efetivamente utilizados, correspondendo a um aproveitamento espectral de 32,1%.

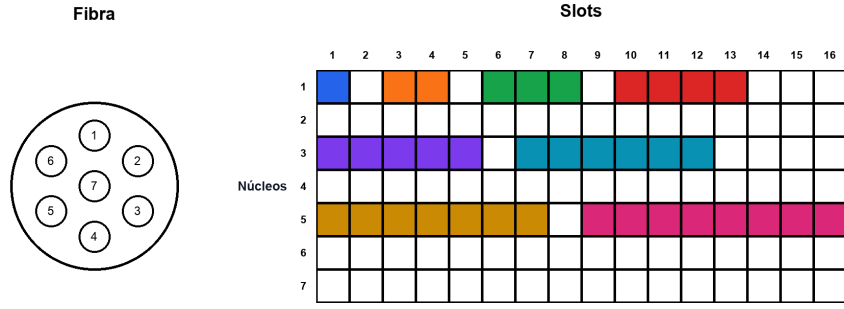


Figura 5.1: Estratégia XT-avoid.

A Figura 5.2 apresenta a estratégia XT-estimated. Diferentemente da abordagem anterior, essa técnica permite a reutilização de índices espectrais em núcleos adjacentes sempre que o *inter-core crosstalk* estimado permanecer inferior ao limite suportado pela modulação empregada. Mantendo o mesmo conjunto de demandas, também são estabelecidos oito *lightpaths*, ocupando 45 *slots* espectrais. Além disso, cinco *slots* são destinados às bandas de guarda, quatorze permanecem indisponíveis devido à ordem de chegada e outros 48 deixam de ser utilizados porque novas alocações ultrapassariam o limite admissível de *crosstalk*. Dessa forma, o aproveitamento espectral aumenta para 40,2%, evidenciando que a consideração explícita do XT permite explorar melhor os recursos da fibra, embora o acúmulo de interferência ainda limite a reutilização dos núcleos adjacentes.

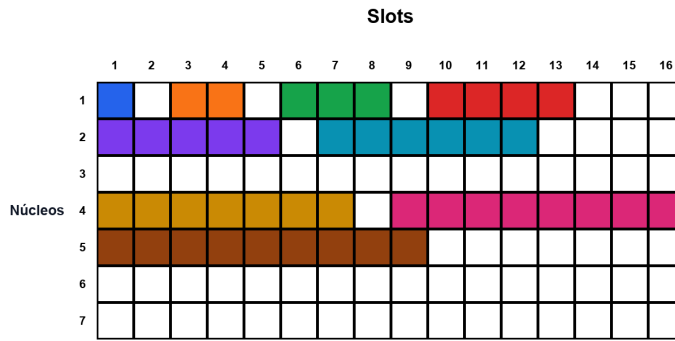


Figura 5.2: Estratégia XT-estimated.

A Figura 5.3 ilustra a estratégia proposta DPPDF. Nessa configuração, os núcleos são funcionalmente especializados: os núcleos pares são destinados aos *lightpaths* ativos, enquanto os núcleos ímpares são reservados aos caminhos de proteção secundários, que permanecem inativos durante a operação normal da rede. Mantendo-se exatamente o mesmo conjunto de demandas e a mesma ordem de alocação, são estabelecidos onze *light-*

paths, incluindo os caminhos de proteção, totalizando 66 *slots* ocupados. Além disso, cinco *slots* correspondem às bandas de guarda, vinte e cinco permanecem indisponíveis devido à ordem de alocação e dezesseis pertencem ao núcleo central reservado pela estratégia. Como consequência, 66 dos 112 *slots* disponíveis são efetivamente utilizados, resultando em um aproveitamento espectral de 58,9%.

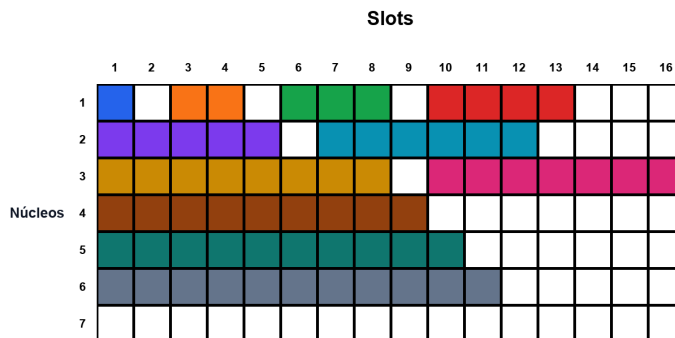


Figura 5.3: DPPDF com especialização funcional dos núcleos: caminhos ativos em núcleos pares e caminhos de proteção em núcleos ímpares.

A Tabela 5.1 resume os resultados obtidos pelas três estratégias. Observa-se que a DPPDF apresenta o maior aproveitamento espectral (58,9%), superando tanto a XT-estimated (40,2%) quanto a XT-avoid (32,1%). Esse ganho não decorre da disponibilidade de recursos adicionais na fibra, mas da forma como os núcleos são organizados funcionalmente. Enquanto as abordagens convencionais tratam as regiões sujeitas ao *inter-core crosstalk* como áreas a serem evitadas, a DPPDF reserva essas mesmas regiões para caminhos de proteção inativos, preservando os caminhos ativos em regiões livres de interferência.

Tabela 5.1: Comparação entre as estratégias de alocação espectral.

Estratégia	Lightpaths	Slots Utilizados	Aproveitamento Espectral (%)
XT-avoid	8	36	32,1
XT-estimated	8	45	40,2
DPPDF	11	66	58,9

Essa análise evidencia o princípio central da estratégia proposta. Em vez de considerar as regiões afetadas pelo *inter-core crosstalk* como recursos permanentemente indisponíveis, a DPPDF as reutiliza de forma controlada para acomodar caminhos de proteção que permanecem inativos durante a operação normal da rede. Dessa forma, a especialização funcional dos núcleos transforma uma limitação física da tecnologia SDM em um recurso adicional para proteção contra falhas duplas, ampliando o aproveitamento espectral sem comprometer as transmissões ativas. Nas próximas seções, esse comportamento é avaliado

em cenários completos de rede, considerando tráfego dinâmico, múltiplas topologias e as métricas tradicionais de desempenho, como taxa de bloqueio de conexões e taxa de bloqueio de banda.

5.2 Comparação entre a Formulação Matemática e a Heurística

Antes da avaliação numérica em cenários completos de rede, realiza-se uma comparação entre o *framework* de otimização baseado na formulação matemática e a heurística desenvolvidos para a estratégia DPPDF. A análise evidencia as funções complementares dos dois métodos: o *framework* baseado na formulação matemática é utilizado como referência de otimalidade para instâncias reduzidas, enquanto a heurística viabiliza a aplicação da proposta em cenários de maior escala.

O *framework* de otimização desenvolvido nesta tese integra etapas de geração de caminhos candidatos, construção de trios disjuntos, formação dos candidatos finais e resolução de uma formulação matemática modelada como um problema de Programação Linear Inteira (PLI). Essa abordagem permite verificar a consistência do modelo proposto e obter soluções ótimas para as instâncias reduzidas efetivamente resolvidas. Entretanto, à medida que o número de demandas aumenta, observa-se um crescimento expressivo do número de candidatos, das variáveis de decisão e das restrições, elevando significativamente o tempo de processamento necessário. A heurística, por sua vez, aplica sequencialmente os princípios de alocação da DPPDF, mas não executa uma otimização conjunta do lote nem garante o ótimo global.

A Tabela 5.2 apresenta uma comparação entre os tempos de execução obtidos pelo *framework* baseado na formulação matemática e pela heurística.

Tabela 5.2: Comparação entre o *framework* PLI e a heurística DPPDF.

Método	Demandas	Atendidas	Tempo (s)	Resultado
Framework PLI	2	2/2	83,57	Solução ótima
Framework PLI	3	3/3	156,23	Solução ótima
Heurística DPPDF	28	28/28	0,056	Todas alocadas

Observa-se que o *framework* baseado na formulação matemática obteve soluções ótimas para as instâncias reduzidas de duas e três demandas. Entretanto, mesmo para três demandas, o tempo total de processamento foi de aproximadamente 156 segundos. A heurística alocou, em outro ensaio, 28 demandas em aproximadamente 0,056 segundo.

Esses valores demonstram a diferença de escala operacional entre as implementações, mas não constituem uma comparação direta de aceleração, pois os métodos processam quantidades de demandas e espaços de busca distintos. Para medir ganho de tempo de forma estritamente comparável, ambos deveriam ser executados sobre as mesmas instâncias e no mesmo ambiente computacional.

Para compreender a origem desse aumento no tempo de processamento, a Tabela 5.3 apresenta a evolução do número de candidatos, das variáveis de decisão e das restrições da formulação matemática.

Tabela 5.3: Crescimento da formulação matemática em função do número de demandas.

Demandas	Candidatos	Variáveis x	Restrições	Tempo total (s)
2	218430	218430	2160	83,57
3	334800	334800	2592	156,23

Observa-se que a inclusão de apenas uma demanda adicional resultou em um crescimento expressivo do número de candidatos e, conseqüentemente, das variáveis de decisão e do tempo necessário para obtenção da solução ótima. Esse comportamento evidencia o elevado custo computacional associado à resolução exata do problema, característica inerente a formulações de Programação Linear Inteira aplicadas a problemas combinatórios de grande porte.

Esses resultados mostram que o *framework* baseado na formulação matemática constitui uma ferramenta adequada para validação da estratégia em instâncias reduzidas, garantindo soluções ótimas para cenários de pequeno porte. Entretanto, o crescimento da complexidade computacional torna sua aplicação progressivamente menos adequada à medida que aumenta a dimensão do problema. Nesse contexto, a heurística preserva os mesmos princípios de alocação definidos pelo *framework* de otimização, tornando possível a avaliação da estratégia DPPDF em cenários de maior escala sem comprometer sua viabilidade computacional. Por essa razão, todos os resultados experimentais apresentados nas seções seguintes deste capítulo foram obtidos por meio da heurística proposta.

5.3 Resultados Numéricos

Esta seção apresenta os resultados numéricos obtidos por meio de simulações realizadas nas topologias PanEuro e USANet, representadas nas Figuras 5.4 e 5.5. Para possibilitar a avaliação da proteção dedicada contra falhas duplas, ambas as topologias foram adaptadas de forma que todos os nós apresentem grau maior ou igual a três. Essa propriedade é necessária, mas não suficiente, para a existência de três caminhos disjuntos em enlaces.

Por essa razão, após a adaptação, o pré-processamento verificou explicitamente a existência de pelo menos três caminhos mutuamente disjuntos para cada par origem–destino incluído nos experimentos, conforme a premissa estabelecida no modelo do sistema.

O objetivo desta avaliação é analisar o impacto da estratégia DPPDF sobre o desempenho da rede, verificando sua capacidade de prover proteção dedicada contra falhas duplas sem comprometer significativamente a utilização dos recursos espectrais e a qualidade da transmissão. Para isso, a proposta é comparada com estratégias representativas da literatura que empregam diferentes políticas de tratamento do *inter-core crosstalk*, permitindo analisar simultaneamente o desempenho em termos de taxa de bloqueio (*Blocking Ratio* – BR), taxa de bloqueio de banda (*Bandwidth Blocking Ratio* – BBR) e utilização do espectro.

Além das comparações realizadas no mesmo cenário SDM-EON, esta seção apresenta os resultados de indisponibilidade e BBR reportados em Júnior et al. [2] para mecanismos dedicados e para o Ham-p-Cycle, representante da proteção compartilhada por caminho. Esses resultados complementam a análise ao mostrar como o compartilhamento de capacidade de backup se relaciona com as métricas de bloqueio e de disponibilidade.

As estratégias avaliadas representam diferentes compromissos entre isolamento óptico, custo computacional e aproveitamento dos recursos espectrais. Enquanto as abordagens baseadas em *XT-Avoid* eliminam o *crosstalk* por meio de restrições estruturais de alocação, as abordagens baseadas em *XT-Estimated* permitem maior reutilização espectral mediante a avaliação analítica da interferência acumulada. A estratégia DPPDF, por sua vez, combina especialização funcional dos núcleos com um mecanismo híbrido de tratamento do *inter-core crosstalk*, explorando regiões espectralmente degradadas para a proteção contra falhas duplas.

Os resultados são organizados em quatro etapas. Inicialmente, apresenta-se uma análise comparativa preliminar entre as estratégias de alocação espectral em um cenário controlado, com o objetivo de ilustrar seu comportamento estrutural. Em seguida, são descritos o ambiente experimental, as topologias, o modelo de tráfego e os parâmetros utilizados nas simulações. Posteriormente, são analisadas as métricas de desempenho adotadas, incluindo BR, BBR e utilização do espectro. Por fim, os resultados obtidos são discutidos, evidenciando o impacto da especialização funcional dos núcleos e do tratamento híbrido do *inter-core crosstalk* sobre o desempenho da rede.

A avaliação compara a DPPDF com três estratégias de proteção dedicada. A primeira corresponde à proteção contra falha simples adotada em Júnior et al. [2]. As duas estratégias seguintes consideram proteção contra falhas duplas e diferem apenas na política empregada para tratar o *inter-core crosstalk*. Dessa forma, os resultados permitem situar o desempenho da DPPDF em relação à proteção dedicada convencional e às abordagens

baseadas exclusivamente em XT-Avoid ou XT-Estimated.

- **Dedicated Path Protection para falha simples com XT-Avoid.** Esta estratégia, adotada em Júnior et al. [2], estabelece um caminho principal e um caminho de proteção dedicado para cada demanda. A política *XT-Avoid* impede a utilização simultânea dos mesmos índices espectrais em núcleos adjacentes, eliminando o *inter-core crosstalk* por construção, embora reduza o aproveitamento dos recursos espectrais. Ela representa a referência de desempenho da proteção dedicada contra falha simples.
- **Dedicated Path Protection para falhas duplas com XT-Avoid.** Nesta estratégia, cada demanda utiliza um caminho principal e dois caminhos de proteção dedicados. A alocação permanece baseada exclusivamente em *XT-Avoid*, impedindo a reutilização de índices espectrais em núcleos adjacentes. Assim, ela representa a extensão direta da proteção dedicada para falhas duplas quando o *crosstalk* é evitado por restrições de alocação.
- **Dedicated Path Protection para falhas duplas com XT-Estimated.** Esta estratégia também estabelece um caminho principal e dois caminhos de proteção dedicados. Diferentemente da abordagem XT-Avoid, admite a utilização de núcleos adjacentes quando o nível estimado de *inter-core crosstalk* permanece abaixo do limite suportado pela modulação. Ela representa a alternativa em que o tratamento do *crosstalk* é realizado exclusivamente pela verificação de viabilidade óptica.
- **Dedicated Path Protection para falhas duplas com especialização funcional dos núcleos (DPPDF).** A estratégia proposta utiliza três caminhos disjuntos e combina as duas formas de tratamento do *crosstalk*. Os caminhos ativos são alocados em núcleos destinados a transmissões livres de interferência, enquanto o caminho de proteção secundário é reservado em núcleos que permitem o reaproveitamento controlado de regiões espectralmente degradadas. Essa organização viabiliza a proteção dedicada contra falhas duplas com uma política híbrida de tratamento do *inter-core crosstalk*.

5.3.1 Configuração Experimental

As simulações da heurística foram executadas no *Optical Network Simulator* (ONS), um simulador de eventos discretos desenvolvido para a avaliação de redes ópticas WDM e EON [64]. O ONS organiza cada experimento a partir de um arquivo de configuração XML, que especifica a topologia física, os parâmetros de tráfego e os parâmetros da simulação. Para os experimentos desta tese, foram configuradas as topologias PanEuro e

USANet, a fibra multinúcleo de sete núcleos e os parâmetros de tráfego descritos nesta seção; adicionalmente, foram implementadas as estruturas de dados e os procedimentos específicos da DPPDF: especialização funcional dos núcleos, geração de triplas de rotas disjuntas, políticas híbridas de tratamento do XT e alocação dos três caminhos ópticos da estrutura de proteção. A descrição original do ONS foi publicada por Costa et al. [64], trabalho do qual o autor desta tese é coautor. Cada execução processou 100.000 requisições de conexão. Para cada ponto dos gráficos, foram utilizadas cinco sementes distintas do gerador pseudoaleatório, produzindo cinco execuções independentes; o valor reportado é a média dessas execuções, e os traços curtos associados às curvas representam os intervalos de confiança de 95%.

Foram utilizadas as topologias PanEuro e USANet, apresentadas nas Figuras 5.4 e 5.5. Para permitir uma comparação direta entre os resultados, ambas foram avaliadas sob a mesma configuração experimental. Cada enlace é composto por uma fibra multicore contendo sete núcleos, sendo cada núcleo dividido em 320 *slots* espectrais de 12,5 GHz, totalizando uma capacidade espectral de 4 THz por enlace. As adaptações topológicas asseguram grau mínimo três, enquanto a condição efetivamente utilizada para aceitar cada par origem–destino é a existência, verificada pelo pré-processamento, de pelo menos três caminhos mutuamente disjuntos em enlaces.

O tráfego é modelado como um processo de Poisson, assumindo chegadas independentes de requisições e tempo médio de retenção igual a uma unidade de tempo. A carga da rede é expressa em Erlangs e corresponde ao produto entre a taxa média de chegada de requisições (λ), o tempo médio de retenção (h) e a largura de banda média das demandas (bw), representando a ocupação média dos recursos espectrais ao longo do tempo. A variação da carga em Erlangs permite analisar o comportamento das estratégias avaliadas sob diferentes níveis de utilização da rede.

As requisições têm pares origem–destino selecionados uniformemente entre os pares de nós elegíveis de cada topologia, e os enlaces são considerados bidirecionais. Todos os algoritmos comparados são submetidos ao mesmo conjunto de parâmetros de tráfego, topologia, fibra e política de alocação espectral, de modo que as diferenças observadas decorram das estratégias de proteção e de tratamento do *crosstalk*.

As demandas são geradas com granularidades de 10, 20, 40, 100 e 200 Gb/s, cobrindo solicitações de baixa, média e alta capacidade compatíveis com a elasticidade espectral das EONs. A utilização de múltiplas granularidades impede que o desempenho seja avaliado apenas para um único tamanho de conexão e permite observar a capacidade das estratégias de acomodar diferentes quantidades de *slots*. Essa forma de compor o tráfego é também empregada em avaliações realizadas com o ONS por Costa [65], que considera diferentes taxas de transmissão para expor as estratégias a demandas com distintas exi-

gências de recursos. Seja $\mathcal{B} = \{10, 20, 40, 100, 200\}$ o conjunto das taxas consideradas. A probabilidade de selecionar uma taxa $b \in \mathcal{B}$ é

$$P(B = b) = \frac{1/b}{\sum_{b' \in \mathcal{B}} 1/b'}. \quad (5.1)$$

Após a normalização, obtêm-se aproximadamente 52,6%, 26,3%, 13,1%, 5,2% e 2,6%, respectivamente. A ponderação inversamente proporcional à taxa equilibra a carga oferecida pelas classes: antes da normalização, o produto $b \cdot (1/b)$ é o mesmo para todas as granularidades. Assim, uma classe de 200 Gb/s não domina a carga apenas pelo seu volume, mas permanece presente na avaliação; de forma complementar, as solicitações menores aparecem com maior frequência. Uma ponderação diretamente proporcional à taxa favoreceria as demandas de maior capacidade tanto pela frequência de chegada quanto pela quantidade de espectro requerida, concentrando artificialmente a carga nessas classes. O cenário resultante representa tráfego heterogêneo e permite comparar as estratégias sob contribuição equivalente das diferentes classes de largura de banda.

Foram considerados os formatos de modulação BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM, com os alcances e limiares de XT apresentados na Tabela 2.2. O roteamento utiliza o algoritmo dos K caminhos mais curtos sem ciclos de Yen [66]. Adota-se $K = 200$ como limite do conjunto inicial de rotas candidatas de cada par origem–destino. Esse valor amplia a diversidade topológica examinada para além das rotas mais curtas: quando os caminhos de menor comprimento não dispõem de núcleo ou bloco espectral contínuo disponível, a busca pode alcançar rotas mais longas que atravessam outras regiões da rede e ainda possuem recursos para acomodar a demanda.

Na DPPDF, essa diversidade é particularmente importante porque não basta encontrar uma rota com recursos disponíveis; é necessário formar uma tripla de rotas mutuamente disjuntas para os papéis α , β e γ . Um conjunto maior de rotas candidatas aumenta a possibilidade de localizar, de maneira global na topologia, combinações disjuntas e alternativas de recuperação que não seriam observadas se a busca ficasse restrita aos poucos caminhos mais curtos. O custo de gerar essas rotas é concentrado no pré-processamento *offline* e a base resultante é reutilizada durante a operação *online*; por isso, a estratégia explora antecipadamente uma quantidade maior de alternativas sem repetir o roteamento completo a cada demanda.

A alocação espectral emprega a política *First-Fit*, aplicada igualmente às estratégias comparadas. Para cada rota, núcleo e quantidade de slots requeridos, a política seleciona o primeiro bloco contíguo disponível ao percorrer o espectro em ordem crescente de índices. Essa escolha fornece um critério determinístico e amplamente utilizado de ocupação espectral, preserva a comparabilidade entre os algoritmos e evita que diferenças de

bloqueio sejam atribuídas a políticas distintas de escolha de slots.

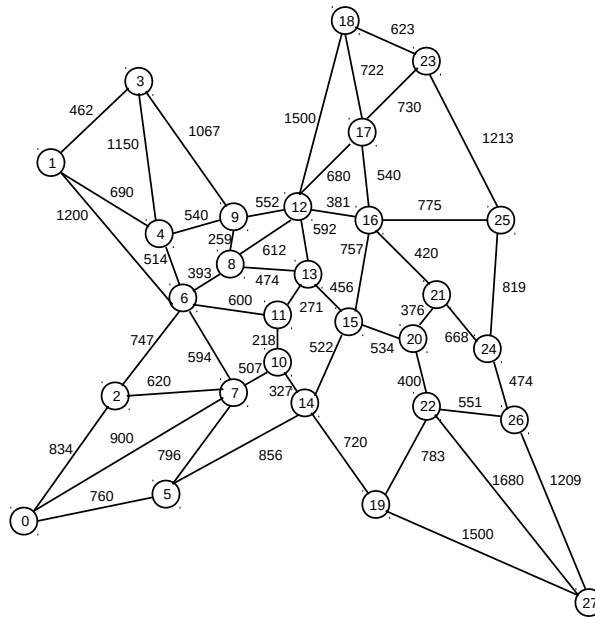


Figura 5.4: Topologia PanEuro modificada.

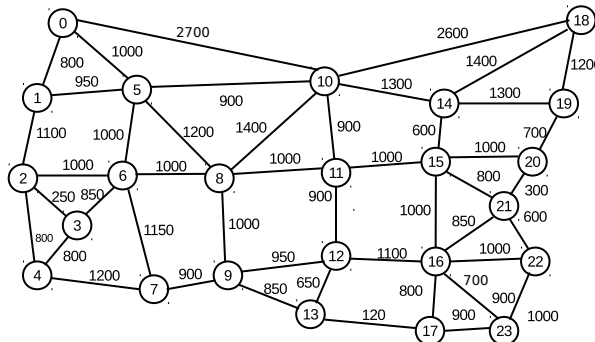


Figura 5.5: Topologia USANet modificada.

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam versões modificadas das topologias originais. As modificações asseguram grau mínimo de conectividade igual a três em todos os nós, condição necessária para que o pré-processamento busque três caminhos mutuamente disjuntos entre os pares origem-destino. Essa adaptação torna possível avaliar a proteção dedicada contra falhas duplas; a existência efetiva das três rotas é verificada individualmente antes da inclusão de cada par nos experimentos.

Embora ambas as topologias apresentem o mesmo número de nós e satisfaçam o requisito mínimo de conectividade para proteção contra falhas duplas, elas possuem características estruturais distintas. A PanEuro apresenta enlaces mais longos e maior número médio de saltos entre pares origem-destino (aproximadamente 4,2 saltos), aumentando

a probabilidade de compartilhamento de enlaces, a competição pelos recursos espectrais e o acúmulo de *inter-core crosstalk*. Por outro lado, a USANet possui uma malha mais compacta, com maior quantidade de ciclos curtos e distância média inferior entre os nós (aproximadamente 3,1 saltos), favorecendo a obtenção de caminhos disjuntos e reduzindo a competição por recursos. Em consequência, espera-se que a PanEuro represente um cenário mais desafiador para estratégias de proteção dedicada contra falhas duplas, apresentando níveis de bloqueio superiores aos observados na USANet.

Nas subseções seguintes são apresentados os resultados obtidos para as métricas de taxa de bloqueio (BR), taxa de bloqueio de banda (BBR) e utilização do espectro, permitindo comparar o desempenho da estratégia DPPDF com as demais abordagens avaliadas.

Em todas as figuras de resultados, os pontos tracejados associados a cada curva delimitam o intervalo de confiança de 95% correspondente.

5.3.2 Métricas de Avaliação

O desempenho das estratégias avaliadas é analisado por meio de três métricas amplamente empregadas na literatura de redes ópticas: a Taxa de Bloqueio (*Blocking Ratio* – BR), a Taxa de Bloqueio de Banda (*Bandwidth Blocking Ratio* – BBR) e o uso do espectro. Em conjunto, essas métricas permitem avaliar simultaneamente a capacidade da rede em atender às demandas de tráfego, a eficiência na utilização dos recursos espectrais e o impacto das diferentes estratégias de proteção sobre o desempenho global da rede. A BR corresponde à razão entre o número de requisições bloqueadas e o número total de requisições geradas durante a simulação, indicando a probabilidade de uma nova conexão não ser estabelecida por insuficiência de recursos ou por restrições impostas pelo algoritmo de alocação. Por sua vez, a BBR considera a largura de banda solicitada pelas demandas, sendo definida como a razão entre a largura de banda bloqueada e a largura de banda total requisitada. Dessa forma, essa métrica atribui maior peso ao bloqueio de conexões que demandam maior quantidade de recursos espectrais. O uso do espectro complementa essa análise ao quantificar a ocupação dos recursos espectrais disponíveis na rede ao longo da operação. Essa métrica permite avaliar a eficiência com que cada estratégia utiliza o espectro disponível, refletindo diretamente o impacto das decisões de roteamento, seleção de modulação, alocação espectral e organização espacial dos núcleos sobre o consumo de recursos. Em conjunto, BR, BBR e uso do espectro fornecem uma visão abrangente do comportamento das estratégias de proteção avaliadas, permitindo analisar simultaneamente sua capacidade de acomodar novas demandas, a eficiência na utilização dos recursos da rede e os efeitos da proteção dedicada contra falhas duplas sobre o desempenho global do sistema.

5.3.2.1 Disponibilidade e proteção compartilhada

Os resultados de Júnior et al. [2], artigo de autoria do autor desta tese, incluem o Ham-p-Cycle, mecanismo de proteção compartilhada por caminho (SPP), e as estratégias dedicadas DPP e DLP. O estudo avalia mecanismos de proteção em redes EON com base, simultaneamente, na taxa de bloqueio de banda e na disponibilidade do serviço. O comparativo abre a análise de resultados porque o compartilhamento de capacidade de backup tende a reduzir o bloqueio de banda, enquanto a disponibilidade permite observar o efeito do tempo de recuperação associado a cada mecanismo.

No estudo citado, a disponibilidade é avaliada por meio da indisponibilidade acumulada após falhas. Essa grandeza é determinada pelo tempo de estabelecimento da conexão (*Setup Time* – ST) e pelo tempo de comutação da proteção (*Protection Switch Time* – PST). O ST corresponde ao tempo necessário para configurar os recursos ópticos de uma conexão, enquanto o PST corresponde ao tempo necessário para transferir o tráfego ao caminho de proteção após a falha. Logo, menores valores de ST e PST resultam em menor indisponibilidade e, conseqüentemente, maior disponibilidade para o serviço.

As curvas apresentadas a seguir pertencem a duas famílias de mecanismos. O Ham-p-Cycle representa a proteção compartilhada por caminho (SPP): um ciclo de proteção pré-configurado mantém capacidade de *backup* que pode ser utilizada por múltiplos caminhos principais. Essa organização reduz a quantidade de capacidade reservada e, por isso, tende a produzir menor bloqueio de banda. Entretanto, a capacidade de recuperação não é exclusiva de cada conexão. A restauração depende de que o ciclo permaneça utilizável após a falha e de que a capacidade compartilhada esteja disponível para o conjunto de conexões afetadas; além disso, a configuração do percurso de recuperação integra o tempo de comutação. Por esse motivo, o Ham-p-Cycle não oferece a mesma garantia individual de recuperação de uma proteção dedicada para todos os cenários de falha, em especial quando falhas múltiplas comprometem o próprio ciclo ou concorrem pelos seus recursos.

Nas estratégias dedicadas, cada caminho principal possui recursos de proteção exclusivos e previamente reservados. Na DPP, a proteção é definida para o caminho fim a fim; na DLP, é definida por enlace do caminho principal, exigindo mais reservas, porém permitindo recuperação localizada. Assim, dentro do conjunto de falhas coberto pelo esquema e desde que os caminhos de proteção permaneçam disjuntos dos enlaces falhos, a capacidade de recuperação da conexão já está garantida e não disputa recursos com outras demandas no instante da falha. Essa diferença estrutural explica por que as alternativas dedicadas apresentam maior disponibilidade, embora consumam mais capacidade que o Ham-p-Cycle [2, 1].

A notação das curvas também distingue o momento em que os caminhos ópticos são configurados no algoritmo BPreProvEON. ProvDPP e ProvDLP representam o provisio-

namento reativo: a conexão e sua proteção são estabelecidas quando a demanda chega à rede. PreprovDPP e PreprovDLP representam o pré-provisionamento: caminhos ópticos são configurados e mantidos reservados antes da chegada de demandas específicas. Nas curvas PreprovX–ProvY, X indica o mecanismo usado para preparar a capacidade previamente reservada e Y indica o mecanismo empregado quando é necessário estabelecer novos caminhos na operação dinâmica. A combinação PreprovDLP–ProvDPP usa DLP no pré-provisionamento para proteger todos os enlaces da topologia e DPP no provisionamento para reduzir o custo de recursos das novas conexões.

As Figuras 5.6 e 5.7 mostram a vantagem de BBR do Ham-p-Cycle nas topologias USANet e PanEuro. A disponibilidade é apresentada nas Figuras 5.8 e 5.9 pela métrica de sobrecarga de indisponibilidade adotada no estudo. A combinação dedicada PreprovDLP–ProvDPP preserva maior disponibilidade, permanecendo entre 3% e 4% acima do valor ótimo de indisponibilidade. Em contraste, o Ham-p-Cycle apresenta menor disponibilidade, refletida em uma indisponibilidade média aproximadamente 170% superior ao ótimo. Em termos relativos, a indisponibilidade normalizada da estratégia dedicada é aproximadamente 61% a 62% menor que a do Ham-p-Cycle.

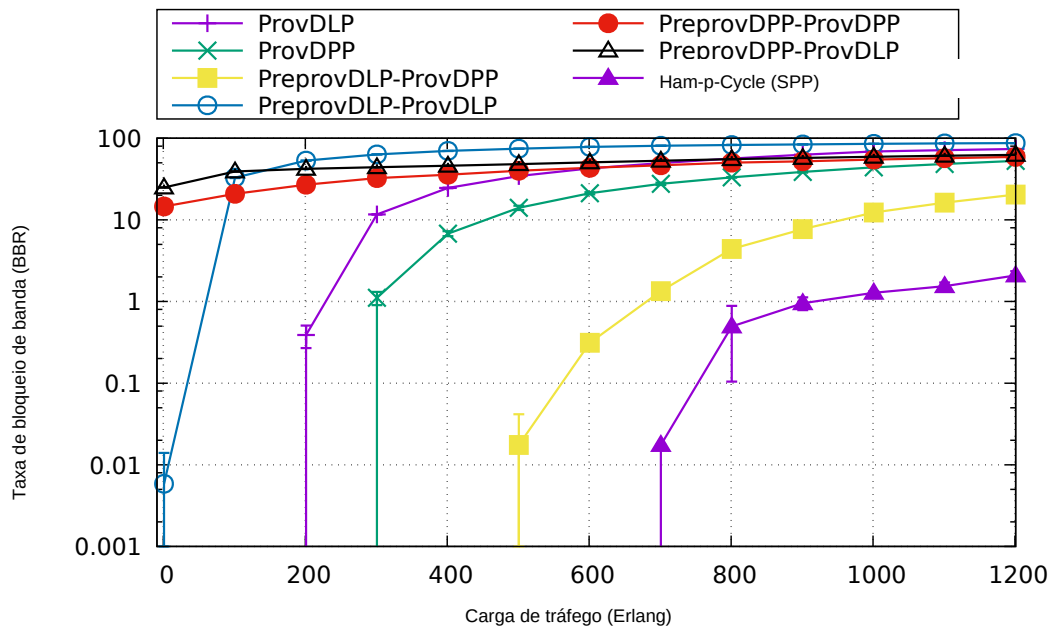


Figura 5.6: Taxa de bloqueio de banda no estudo de Júnior et al. [2]: topologia USANet.

Nesta figura, as curvas ProvX representam as estratégias sem pré-provisionamento que utilizam o esquema de proteção X, enquanto as curvas PreprovX–ProvY representam as combinações de proteção empregadas pelo algoritmo BPreProvEON. Entre essas combinações, o melhor resultado de BBR é obtido com PreprovDLP–ProvDPP. A escolha do esquema de proteção em cada etapa é determinante: o uso de DPP no pré-provisionamento

não protege todos os pares de comunicação e resulta em BBR maior, enquanto o uso de DLP no provisionamento aumenta o consumo de recursos. A combinação PreprovDLP–ProvDPP utiliza DLP para proteger os enlaces durante o pré-provisionamento e DPP para estabelecer a proteção com menor consumo de recursos durante o provisionamento.

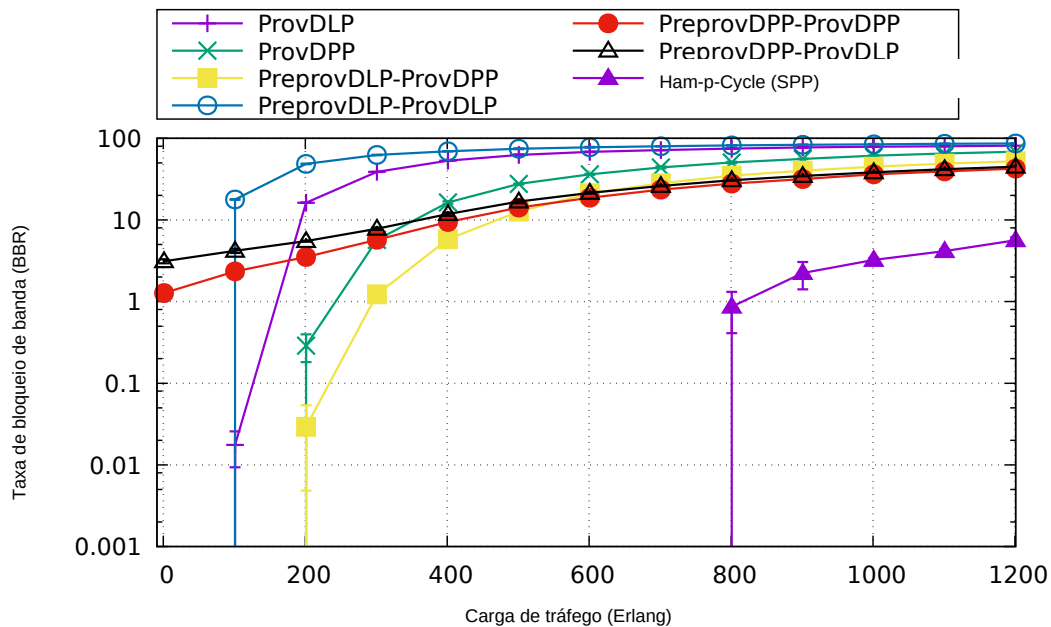


Figura 5.7: Taxa de bloqueio de banda no estudo de Júnior et al. [2]: topologia PanEuro.

Na PanEuro, a diferença entre as combinações de proteção é menor do que na USANet, pois a topologia é mais restritiva para a alocação de caminhos principais e de proteção disjuntos. Em cargas mais baixas, a redução de BBR entre PreprovDLP–ProvDPP e ProvDPP alcança uma ordem de grandeza, tornando-se próxima à das demais rotinas em cargas elevadas. Como esperado, o Ham-p-Cycle apresenta BBR inferior ao das demais soluções, pois implementa proteção compartilhada por caminho e reutiliza a mesma capacidade de backup do ciclo para múltiplos caminhos principais.

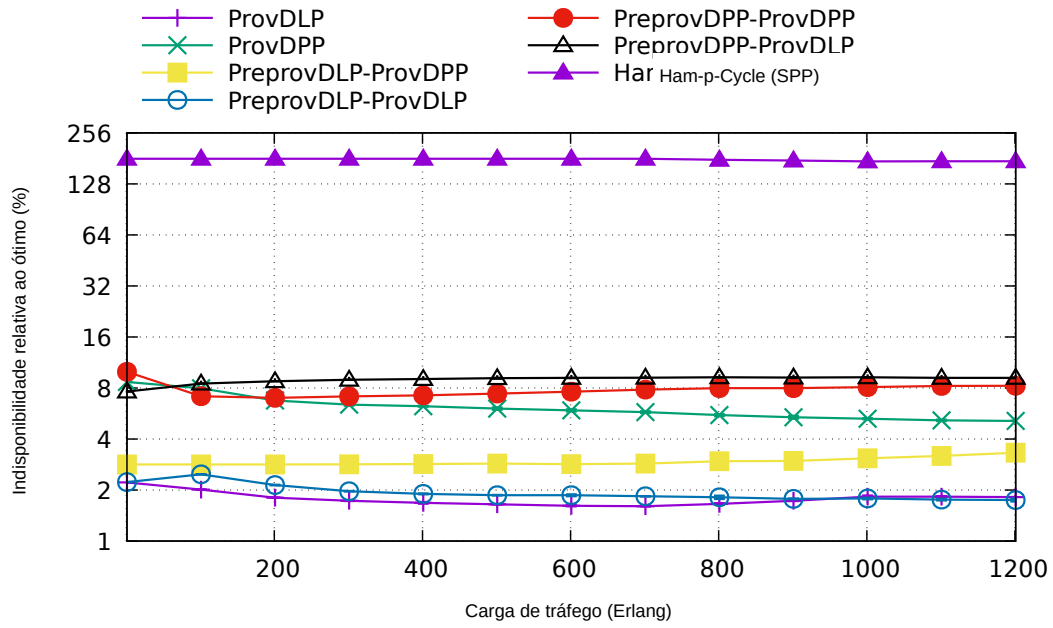


Figura 5.8: Sobrecarga de indisponibilidade no estudo de Júnior et al. [2]: topologia USANet.

A figura organiza as soluções em três grupos: aquelas baseadas predominantemente em DLP, aquelas baseadas predominantemente em DPP e a solução Ham-p-Cycle, baseada em SPP. As soluções DLP apresentam a maior disponibilidade, seguidas pelas soluções DPP e pela solução SPP. A combinação PreprovDLP–ProvDPP permanece entre 3% e 4% acima do valor ótimo de indisponibilidade, enquanto o Ham-p-Cycle apresenta sobrecarga média aproximadamente 170% superior ao ótimo.

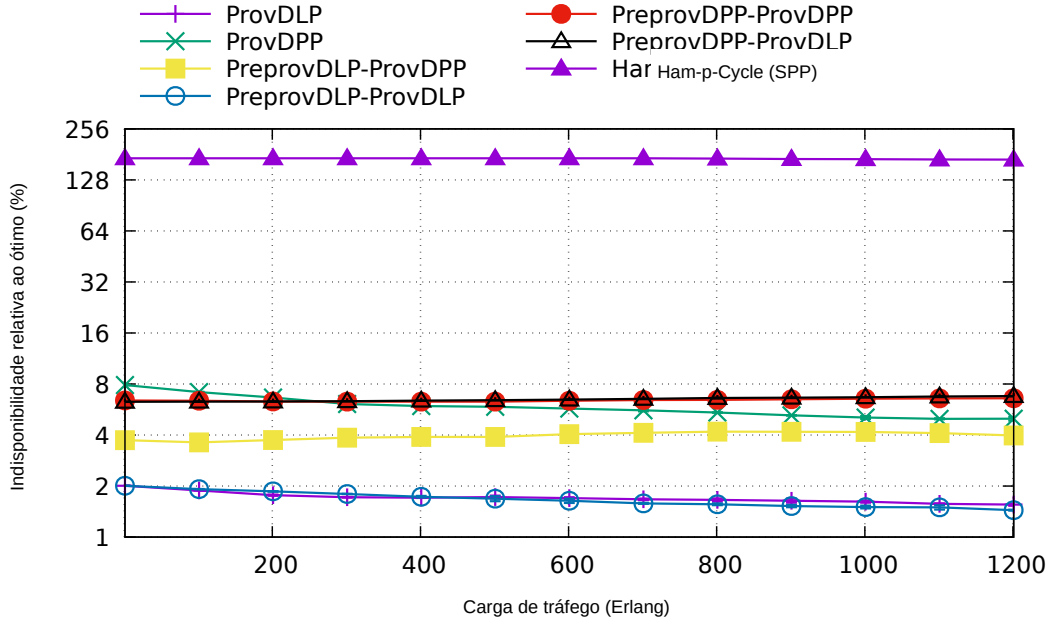


Figura 5.9: Sobrecarga de indisponibilidade no estudo de Júnior et al. [2]: topologia PanEuro.

O comportamento observado para a disponibilidade decorre do tempo de recuperação de cada mecanismo. As soluções DPP apresentam aproximadamente o dobro do tempo de indisponibilidade das soluções DLP. No Ham-p-Cycle, a recuperação utiliza o caminho de backup ao longo de todo o ciclo na direção oposta ao caminho principal, resultando em menor disponibilidade do que nas soluções dedicadas, embora o compartilhamento reduza a probabilidade de esgotamento dos recursos da rede.

5.3.2.2 Taxa de Bloqueio

A Taxa de Bloqueio (*Blocking Ratio* – BR) corresponde à razão entre o número de requisições bloqueadas e o número total de requisições geradas durante a simulação. Essa métrica permite avaliar a capacidade da rede em acomodar novas conexões sob diferentes níveis de carga e constitui um dos principais indicadores de desempenho em redes ópticas. No contexto deste trabalho, a BR é utilizada para avaliar o impacto da proteção dedicada contra falhas duplas sobre a capacidade de atendimento da rede.

A comparação considera quatro estratégias de proteção: proteção dedicada contra falha simples, proteção dedicada contra falhas duplas baseada em *XT-Avoid*, proteção dedicada contra falhas duplas baseada em *XT-Estimated* e a estratégia DPPDF proposta nesta tese. Enquanto as duas abordagens clássicas representam diferentes formas de tratamento do *inter-core crosstalk*, a DPPDF combina a especialização funcional dos núcleos com um mecanismo híbrido de controle da interferência, buscando preservar simultaneamente a capacidade de recuperação e o aproveitamento dos recursos espectrais.

Nas Figuras 5.10 e 5.11, a curva identificada como *dpp-1fail-xtavoid* corresponde ao benchmark de DPP para falha simples adotado em Júnior et al. [2]. As demais curvas representam as duas estratégias de falha dupla e a DPPDF analisadas nesta tese.

A Figura 5.10 apresenta os resultados obtidos para a topologia USANet. Observa-se que, à medida que a carga da rede aumenta, todas as estratégias apresentam crescimento da taxa de bloqueio, comportamento esperado em sistemas sujeitos à competição por recursos espectrais. Entretanto, a DPPDF mantém valores de BR muito próximos aos observados na proteção dedicada contra falha simples ao longo de toda a faixa de carga analisada. Para a carga de 1800 Erlangs, ambas apresentam BR de aproximadamente 5%, enquanto as estratégias baseadas em *XT-Avoid* e *XT-Estimated* alcançam aproximadamente 27% e 14%, respectivamente. Em relação a essas abordagens, a DPPDF reduz a taxa de bloqueio em cerca de 81,5% e 64,3%, respectivamente.

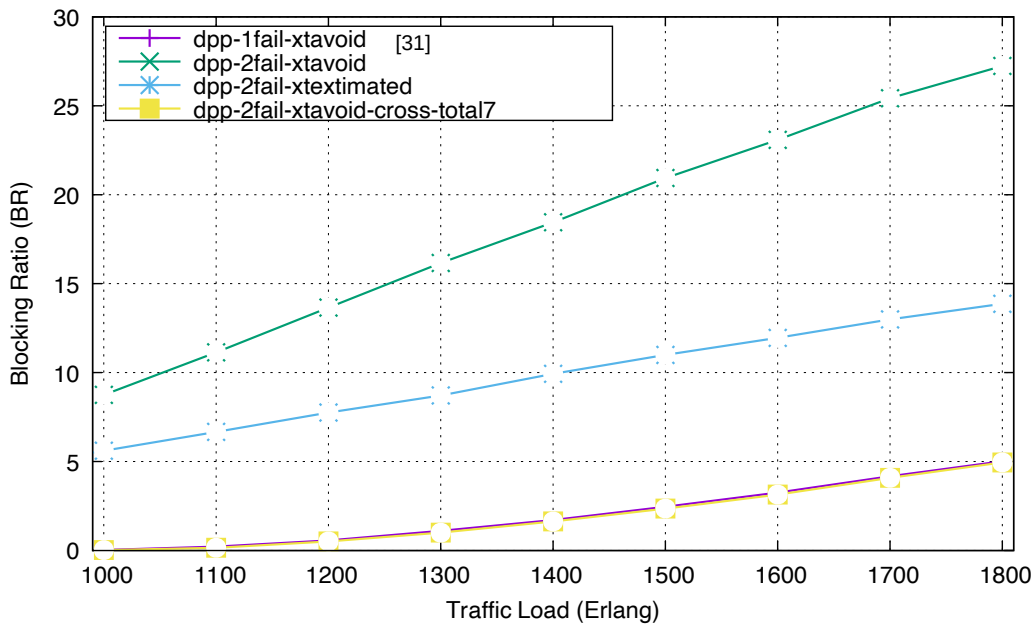


Figura 5.10: Taxa de bloqueio (BR) na topologia USANet.

A Figura 5.11 apresenta os resultados obtidos para a topologia PanEuro. Devido ao maior comprimento médio das rotas e à maior competição pelos recursos espectrais, essa topologia representa um cenário naturalmente mais restritivo. Mesmo nessas condições, a DPPDF mantém valores de BR muito próximos aos observados na proteção dedicada contra falha simples, apresentando aproximadamente 4,5% para a carga de 1800 Erlangs. Em contraste, as estratégias baseadas em *XT-Avoid* e *XT-Estimated* atingem aproximadamente 30,5% e 18,5%, respectivamente. Nessa condição, a DPPDF reduz a taxa de bloqueio em aproximadamente 85,2% em relação ao *XT-Avoid* e 75,7% em relação ao *XT-Estimated*.

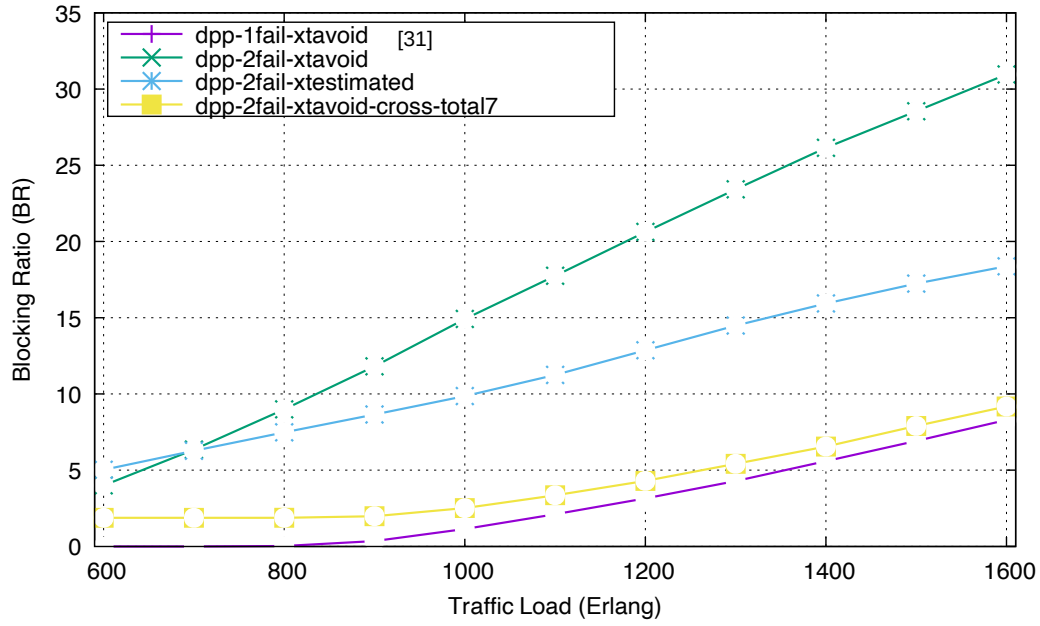


Figura 5.11: Taxa de bloqueio (BR) na topologia PanEuro.

Os resultados obtidos nas duas topologias mostram que a especialização funcional dos núcleos reduz significativamente o impacto da proteção dedicada contra falhas duplas sobre a capacidade de atendimento da rede. Enquanto as estratégias convencionais elevam a taxa de bloqueio em razão da maior competição pelos recursos espectrais ou da necessidade de avaliações contínuas de *inter-core crosstalk*, a DPPDF mantém valores de BR muito próximos aos observados na proteção dedicada contra falha simples.

Além disso, a consistência desse comportamento tanto na USANet quanto na PanEuro indica que a estratégia proposta permanece eficiente mesmo em topologias com diferentes características estruturais e distintos níveis de competição por recursos espectrais. Esses resultados fornecem evidências de que a organização espectro-espacial introduzida pela DPPDF reduz as limitações normalmente associadas à proteção dedicada contra falhas duplas, aspecto que será discutido de forma integrada na conclusão deste capítulo.

5.3.2.3 Taxa de Bloqueio de Banda

A Taxa de Bloqueio de Banda (*Bandwidth Blocking Ratio* – BBR) representa a razão entre a largura de banda total bloqueada e a largura de banda total solicitada durante as simulações. Diferentemente da Taxa de Bloqueio (BR), que contabiliza apenas o número de requisições rejeitadas, a BBR considera o volume efetivo de tráfego que deixa de ser atendido. Essa métrica é particularmente importante em redes ópticas, pois o bloqueio de conexões de alta capacidade pode produzir impacto significativamente maior sobre a utilização da rede do que o bloqueio de conexões de menor demanda.

A comparação considera as mesmas quatro estratégias analisadas anteriormente: proteção dedicada contra falha simples, proteção dedicada contra falhas duplas baseada em *XT-Avoid*, proteção dedicada contra falhas duplas baseada em *XT-Estimated* e a estratégia DPPDF. O objetivo é verificar se a especialização funcional dos núcleos também reduz o bloqueio de largura de banda, complementando a análise anteriormente realizada por meio da Taxa de Bloqueio (BR).

Nas Figuras 5.12 e 5.13, a curva *dpp-1fail-xtavoid* corresponde ao mesmo benchmark de DPP para falha simples de Júnior et al. [2], agora observado sob a métrica de bloqueio de banda.

A Figura 5.12 apresenta os resultados obtidos para a topologia USANet. Observa-se que o comportamento da BBR acompanha a tendência anteriormente observada para a BR. Na carga de 1250 Erlangs, a DPPDF apresenta BBR de aproximadamente 5%, valor muito próximo ao observado na proteção dedicada contra falha simples. Em contraste, as estratégias baseadas em *XT-Avoid* e *XT-Estimated* atingem aproximadamente 45% e 35%, respectivamente. Em relação a essas abordagens, a DPPDF reduz a BBR em aproximadamente 88,9% e 85,7%, respectivamente.

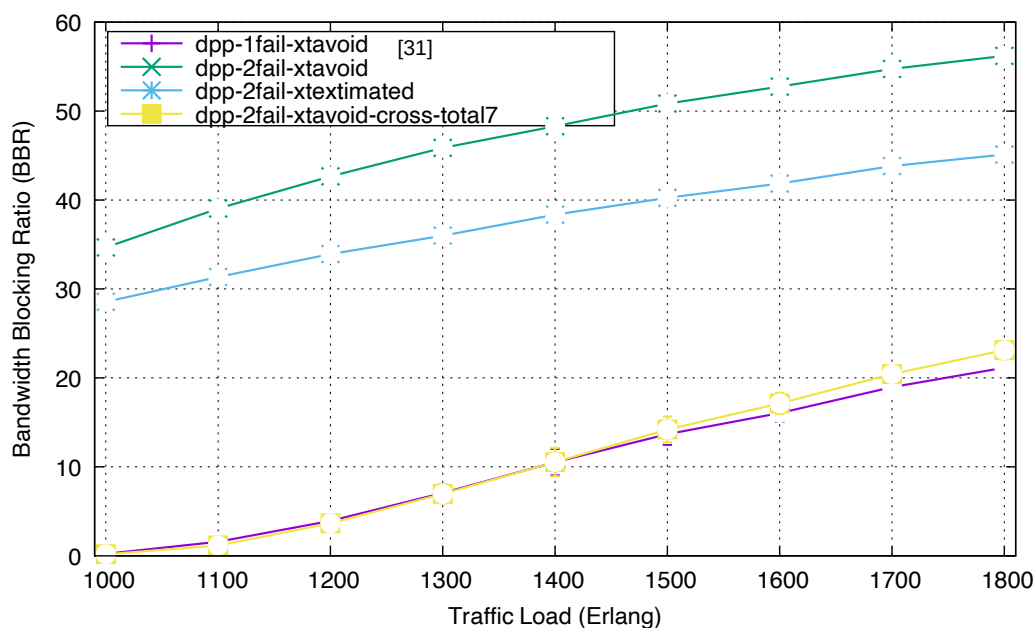


Figura 5.12: Taxa de bloqueio de banda (BBR) na topologia USANet.

A Figura 5.13 apresenta os resultados correspondentes para a topologia PanEuro. Embora essa topologia apresente maior comprimento médio das rotas e maior competição pelos recursos espectrais, a DPPDF mantém valores de BBR muito próximos aos observados na proteção dedicada contra falha simples, apresentando aproximadamente 5%. As estratégias baseadas em *XT-Avoid* e *XT-Estimated*, por sua vez, alcançam apro-

ximadamente 42% e 35%, respectivamente. Em comparação, a DPPDF reduz a BBR em aproximadamente 88,1% em relação ao *XT-Avoid* e 85,7% em relação ao *XT-Estimated*.

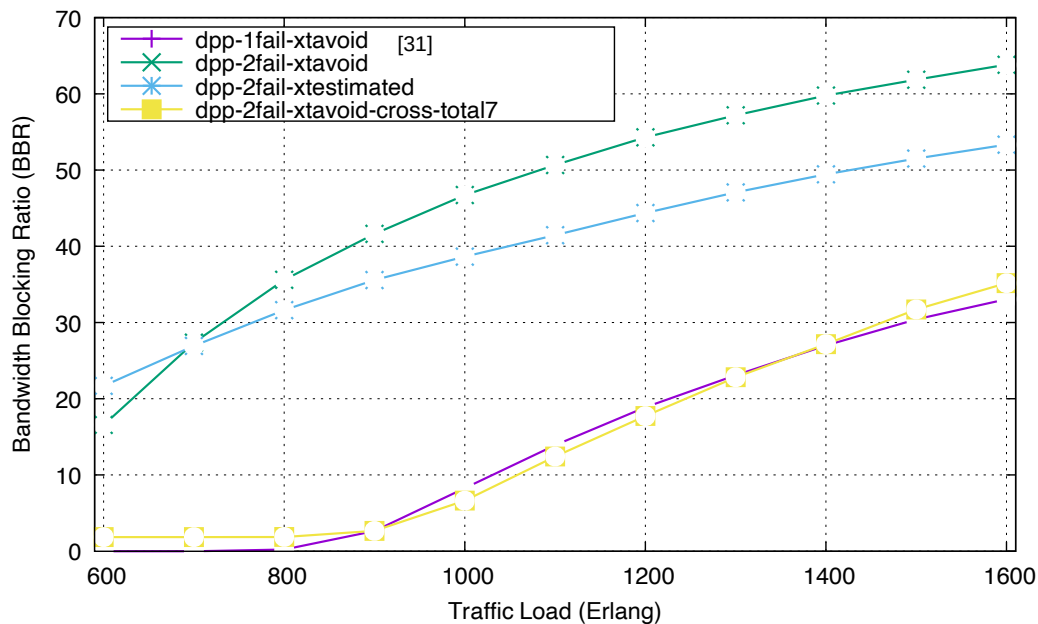


Figura 5.13: Taxa de bloqueio de banda (BBR) na topologia PanEuro.

Os resultados obtidos nas duas topologias mostram que a redução da taxa de bloqueio observada anteriormente também se reflete na quantidade de largura de banda efetivamente atendida pela rede. Em ambas as topologias, a DPPDF mantém valores de BBR muito próximos aos observados na proteção dedicada contra falha simples, enquanto as estratégias convencionais de proteção contra falhas duplas apresentam aumento expressivo dessa métrica.

Esse comportamento indica que a estratégia proposta preserva a capacidade da rede em acomodar demandas de diferentes larguras de banda mesmo na presença de um segundo caminho dedicado de proteção. Além disso, a consistência dos resultados obtidos na USANet e na PanEuro evidencia que esse comportamento se mantém em topologias com diferentes características estruturais e distintos níveis de competição por recursos espectrais.

Em conjunto com os resultados apresentados para a BR, a análise da BBR reforça que a estratégia DPPDF mantém desempenho próximo ao observado na proteção dedicada contra falha simples tanto em número de conexões estabelecidas quanto em largura de banda efetivamente atendida. A interpretação integrada desses resultados será apresentada na conclusão deste capítulo.

5.3.2.4 Uso de Espectro

O Uso de Espectro (*Spectrum Consumed Ratio*) representa a razão entre a quantidade de slots efetivamente ocupados e o total de slots disponíveis na rede. Essa métrica quantifica o nível de utilização dos recursos espectrais e permite avaliar a eficiência com que cada estratégia de proteção explora a capacidade disponível da rede. Como o uso de espectro está diretamente relacionado à quantidade de largura de banda alocada, sua análise é realizada na mesma faixa de Taxa de Bloqueio de Banda (*Bandwidth Blocking Ratio* – BBR). Diferentemente da Taxa de Bloqueio (BR), que considera apenas o número de requisições bloqueadas, a BBR pondera cada requisição pela largura de banda solicitada, refletindo de forma mais representativa a ocupação dos recursos espectrais. Assim, os resultados são comparados na faixa de carga em que a DPPDF apresenta aproximadamente 5% de BBR em cada topologia, permitindo avaliar a utilização do espectro sob condições equivalentes de atendimento de largura de banda.

Nas Figuras 5.14 e 5.15, a curva *dpp-1fail-xtavoid* corresponde ao benchmark de DPP para falha simples adotado em Júnior et al. [2]. Essa referência permite observar o custo espectral associado à extensão da proteção dedicada de falha simples para falhas duplas.

A Figura 5.14 apresenta os resultados obtidos para a topologia USANet. O eixo horizontal representa a carga da rede, em Erlangs, enquanto o eixo vertical indica o percentual médio de espectro ocupado. As simulações utilizam o mesmo modelo de tráfego empregado nas demais avaliações, com chegadas segundo um processo de Poisson e tempo médio de retenção igual a uma unidade.

Para manter consistência com a análise da Taxa de Bloqueio de Banda (BBR), a comparação é realizada na carga de aproximadamente 1300 Erlangs, ponto em que a BBR da estratégia DPPDF permanece próxima de 5%. Nessa condição, a DPPDF ocupa aproximadamente 37,2% do espectro disponível. Nas mesmas condições, a proteção dedicada contra falha simples utiliza cerca de 20,6%, enquanto as abordagens de proteção contra falhas duplas baseadas em *XT-Avoid* e *XT-Estimated* apresentam ocupações de aproximadamente 26,7% e 32,0%, respectivamente. Em relação a essas estratégias, a DPPDF apresenta utilização espectral aproximadamente 39,3% superior à abordagem *XT-Avoid* e cerca de 16,3% superior à abordagem *XT-Estimated*.

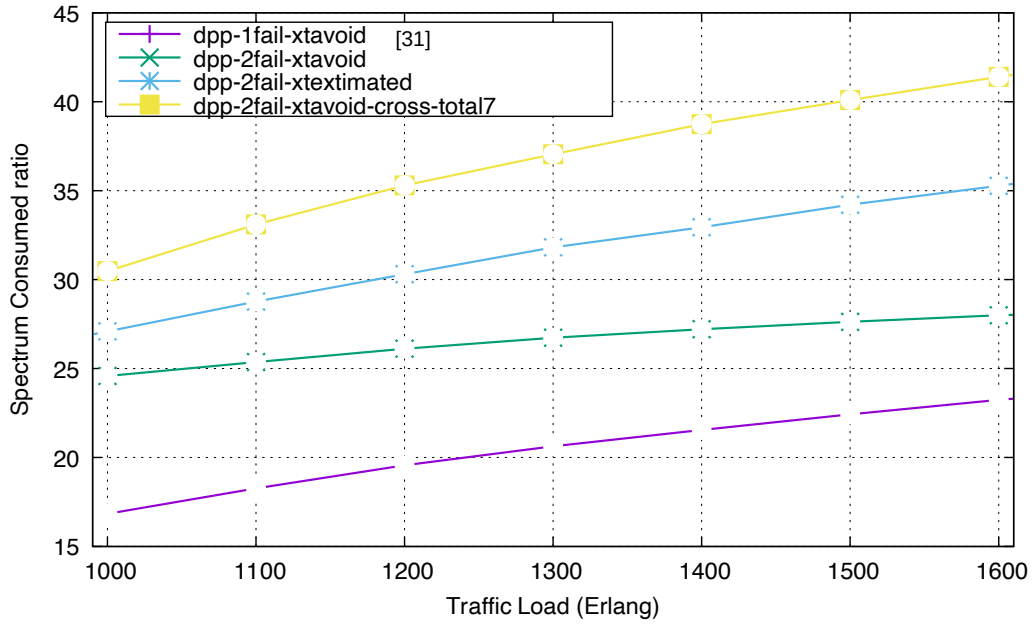


Figura 5.14: Uso de espectro na topologia USANet.

A Figura 5.15 apresenta os resultados obtidos para a topologia PanEuro. Para manter consistência com a análise da Taxa de Bloqueio de Banda (BBR), a comparação é realizada na carga de aproximadamente 1000 Erlangs, ponto em que a BBR da estratégia DPPDF permanece próxima de 5%. Nessa condição, a DPPDF utiliza aproximadamente 34% do espectro disponível. Nas mesmas condições, as estratégias baseadas em *XT-Estimated*, *XT-Avoid* e a proteção dedicada contra falha simples utilizam cerca de 29%, 25% e 19%, respectivamente. Em relação a essas estratégias, a DPPDF apresenta utilização espectral aproximadamente 17,2% superior à abordagem baseada em *XT-Estimated*, 36,0% superior à estratégia *XT-Avoid* e cerca de 78,9% superior à proteção dedicada contra falha simples. Esse resultado indica que a estratégia converte regiões espectrais anteriormente inutilizadas devido ao *inter-core crosstalk* em capacidade útil para os caminhos de proteção, preservando o desempenho observado nas métricas de bloqueio.

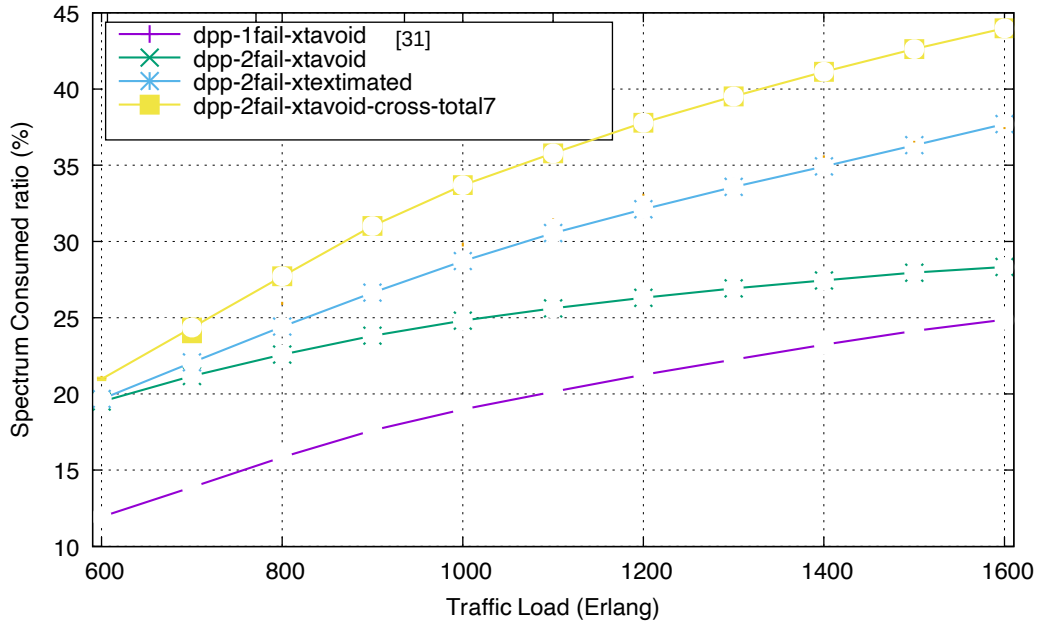


Figura 5.15: Uso de espectro na topologia PanEuro.

Os resultados mostram comportamento consistente nas duas topologias analisadas. A diferença observada entre as topologias pode ser atribuída principalmente às suas características estruturais. Embora ambas possuam grau mínimo de conectividade igual ou superior a três, a PanEuro apresenta maior comprimento médio das rotas, fazendo com que as conexões atravessem um número maior de enlaces. Esse aumento no número de saltos eleva a probabilidade de compartilhamento de recursos espectrais, intensifica o acúmulo de inter-core crosstalk ao longo dos caminhos e aumenta a competição por espectro. Como consequência, a PanEuro apresenta níveis ligeiramente superiores de bloqueio e menor aproveitamento relativo dos recursos quando comparada à USANet.

A DPPDF apresenta maior utilização espectral do que as estratégias convencionais de proteção dedicada, enquanto preserva as faixas de BR e BBR observados nas seções anteriores.

5.4 Conclusão

Os resultados apresentados neste capítulo mostram que, nos cenários avaliados, a estratégia DPPDF apresentou desempenho superior às abordagens convencionais de proteção dedicada contra falhas duplas. Em ambas as topologias analisadas, a proposta manteve valores de Taxa de Bloqueio (BR) e Taxa de Bloqueio de Banda (BBR) muito próximos aos observados na proteção dedicada contra falha simples, enquanto as variantes baseadas em *XT-Avoid* e *XT-Estimated* apresentaram aumentos significativamente maiores nessas métricas. Esses resultados indicam que, nas condições simuladas, a introdução de um

segundo caminho dedicado de proteção não compromete de forma significativa a capacidade de atendimento da rede quando associada à especialização funcional dos núcleos e às restrições de projeto adotadas pela DPPDF.

A proximidade entre os valores de BR e BBR obtidos pela DPPDF e aqueles observados na proteção dedicada contra falha simples é consistente com o projeto da heurística proposta, cuja concepção procura reduzir o impacto da introdução do terceiro caminho de proteção sobre o desempenho global da rede. Nesse contexto, a rota de proteção secundária (γ) é sempre selecionada entre as rotas disjuntas disponíveis com o menor comprimento, reduzindo seu potencial de acúmulo de *inter-core crosstalk* caso seja ativada. Após receber os recursos ópticos, essa rota constitui o caminho óptico de proteção secundário, que permanece inativo durante a operação normal da rede, não produz interferência vertical e não compete pelos recursos ópticos utilizados pelos caminhos ativos.

A análise do uso de espectro complementa esses resultados ao mostrar que a DPPDF não reduz a disponibilidade de recursos para o tráfego ativo. Pelo contrário, a estratégia reutiliza regiões espectrais que permanecem inutilizadas nas abordagens convencionais devido às restrições impostas pelo *inter-core crosstalk*. Nas condições simuladas, aproximadamente 75% a 77% do espectro permanecia indisponível após a alocação dos caminhos ativos. A DPPDF converteu aproximadamente um quarto dessa capacidade ociosa em recursos úteis para acomodar o segundo caminho de proteção, reutilizando cerca de 24,7% desse espectro na USANet e 26,7% na PanEuro.

Outro aspecto relevante é que esse aumento da utilização espectral não implica aumento das transmissões ópticas durante a operação normal da rede. Como o caminho de proteção secundário permanece inativo e somente é ativado em situações de falha dupla, os recursos adicionais permanecem apenas reservados, sem aumentar o número de transmissões simultâneas. Consequentemente, espera-se que a estratégia também não implique aumento do consumo energético associado às transmissões durante a operação normal da rede.

Embora a topologia PanEuro apresente maior comprimento médio das rotas e, consequentemente, maior potencial de acúmulo de *inter-core crosstalk* e maior competição pelos recursos espectrais, o comportamento relativo entre as estratégias permaneceu consistente nas duas topologias avaliadas. Esses resultados sugerem que os benefícios proporcionados pela especialização funcional dos núcleos não dependem exclusivamente da topologia considerada, mantendo comportamento semelhante mesmo em cenários estruturalmente mais desafiadores.

Em conjunto, os resultados experimentais corroboram a principal hipótese desta tese: a especialização funcional dos núcleos permite reutilizar, de forma controlada, regiões espectrais degradadas pelo *inter-core crosstalk*, transformando uma limitação física das

redes SDM-EON em um recurso destinado à proteção dedicada contra falhas duplas. Nos cenários simulados, essa estratégia preservou níveis de BR e BBR próximos aos observados na proteção dedicada contra falha simples, apresentou desempenho superior às demais estratégias de proteção dedicada contra falhas duplas, ampliou a utilização efetiva do espectro disponível e demonstrou a viabilidade da proteção dedicada contra falhas duplas sem comprometer a qualidade de transmissão nem a capacidade operacional da rede.

Capítulo 6

Conclusão

Esta tese investigou a proteção dedicada contra falhas duplas em redes ópticas elásticas com multiplexação espacial (SDM-EONs). O desafio considerado decorre do custo de reservar três caminhos mutuamente disjuntos para cada demanda: quando todos os recursos de proteção precisam permanecer livres de *inter-core crosstalk* (XT), a capacidade disponível para acomodar novas conexões é reduzida. O objetivo foi examinar se regiões espectrais que não são apropriadas para transmissões ativas poderiam contribuir, de forma controlada, para a reserva de proteção.

A contribuição central da tese é a estratégia *Dedicated Path Protection against Double Failure* (DPPDF). Cada demanda é organizada em três caminhos mutuamente disjuntos: o principal (α), o primeiro caminho de proteção (β) e o segundo caminho de proteção (γ). Os caminhos α e β , que podem transportar tráfego durante a operação normal, são alocados em núcleos separados da interferência. O caminho γ permanece inativo e é reservado em regiões espectrais potencialmente sujeitas a XT. Nesse contexto, o uso é controlado porque uma região que não pode ser ocupada por um caminho óptico ativo, devido à interferência que receberia ou causaria, é admitida somente para o caminho γ ; sua viabilidade é verificada antes da reserva e novamente no cenário de ativação. Portanto, a proposta não consiste apenas em acrescentar um terceiro caminho de proteção: ela organiza os recursos espectro-espaciais da fibra para que regiões degradadas possam formar uma reserva de recuperação controlada.

A DPPDF também considera as interações entre o caminho γ e as demandas vizinhas. Antes de uma reserva ser confirmada, a estratégia verifica a viabilidade óptica do caminho inativo e se sua ativação preserva ao menos uma alternativa de recuperação para cada demanda potencialmente afetada. Essa condição evita que a recuperação de uma falha dupla elimine todas as opções de recuperação de conexões vizinhas, caracterizando o tratamento do efeito dominó.

A avaliação foi realizada por meio de uma formulação de programação linear inteira

e de uma heurística para tráfego dinâmico. A formulação forneceu uma referência de exatidão em instâncias tratáveis, enquanto a heurística permitiu avaliar cenários de maior porte; assim, a proposta foi examinada tanto sob uma referência de otimização quanto em operação sequencial. A geração de rotas candidatas, a formação das triplas disjuntas e os filtros estruturais são executados previamente; durante a operação, a heurística seleciona e aloca candidatos compatíveis com o estado corrente da rede. Essa divisão entre pré-processamento e decisão *online* evita repetir o roteamento e as verificações físicas globais a cada nova requisição.

Os resultados numéricos nas topologias USANet e PanEuro indicam que a DPPDF mantém as métricas de bloqueio de requisições (BR) e de banda (BBR) no mesmo patamar da proteção dedicada contra falha simples, mesmo exigindo três caminhos disjuntos por demanda. Também foi observada a conversão de parte do espectro inutilizado na proteção simples em capacidade destinada ao segundo caminho de proteção: entre aproximadamente 20% e 25% do espectro ocioso é reaproveitado nos cenários avaliados, mostrando que a especialização de núcleos cria espaço adicional para acomodar falhas duplas sem aumento significativo do bloqueio.

Sob as mesmas condições de avaliação, as variantes que tratam o XT exclusivamente por *XT-Avoid* ou exclusivamente por *XT-Estimated* apresentam maior bloqueio. A reserva reaproveitada é destinada somente ao caminho γ , que permanece inativo durante a operação normal e, portanto, não acrescenta uma transmissão óptica ativa à rede.

Esses resultados mostram uma possibilidade de aplicação para serviços cujo requisito de continuidade justifique proteção dedicada contra duas falhas de enlace. A quantidade de regiões degradadas que permanecem viáveis, associada à topologia e à carga da rede, pode ser usada para definir quais demandas recebem o terceiro caminho de proteção. Dessa forma, a especialização funcional dos núcleos permite tratar a proteção contra falhas duplas como um nível de serviço direcionado às conexões que necessitam de maior resiliência.

As conclusões estão delimitadas pelos cenários avaliados: fibras de sete núcleos, duas topologias, um modelo específico de XT e falhas simultâneas em dois enlaces que afetam os caminhos ativos de uma mesma demanda. A investigação não substitui validações em plataformas experimentais nem abrange todos os aspectos de implantação, como latência de sinalização, tempo de comutação em campo, consumo energético dos equipamentos de controle e correlações físicas entre falhas. Também não se conclui que a proteção dedicada seja superior à proteção compartilhada em todas as situações, pois as duas abordagens estabelecem compromissos distintos entre reserva de recursos e disponibilidade de recuperação.

Como trabalhos futuros, propõe-se avaliar a especialização funcional dos núcleos também em mecanismos de proteção contra falha simples, verificando se o mesmo princípio de reutilização controlada pode reduzir a reserva espectral e ampliar a eficiência da proteção dedicada convencional. Outra direção consiste em formular políticas adaptativas que definam, conforme a carga, a criticidade do serviço e a quantidade de recursos degradados viáveis, a fração de demandas que receberá proteção contra falhas duplas. Estudos adicionais podem incluir fibras com maior número de núcleos, modelos de XT e de falhas correlacionadas mais detalhados, topologias adicionais, comparação de disponibilidade com proteção compartilhada e avaliação conjunta dos custos de controle, energia e recuperação.

Do ponto de vista do projeto da rede, a principal implicação é que a reserva para recuperação não precisa repetir integralmente a estrutura utilizada pelo tráfego ativo. Quando existem regiões espectrais degradadas que permanecem viáveis para o caminho inativo, a especialização dos núcleos permite incorporá-las à proteção sem deslocar as transmissões ativas para recursos adicionais. Essa separação entre o uso normal da rede e a reserva para uma condição excepcional de falha é o elemento que torna a proteção dedicada contra falhas duplas compatível com a operação dinâmica considerada nesta tese.

Em síntese, a DPPDF combina caminhos disjuntos, especialização funcional dos núcleos, verificação localizada de XT e prevenção do efeito dominó para reservar proteção dedicada contra falhas duplas. Nos cenários considerados, a estratégia mostrou que o XT pode deixar de ser apenas uma restrição de alocação e passar a compor, de forma controlada, a reserva necessária à recuperação. A tese oferece, assim, uma alternativa de projeto para redes SDM-EON que precisam associar maior resiliência a um uso mais criterioso dos recursos espectro-espaciais.

Referências

- [1] Dikbiyik, F., M. Tornatore e B. Mukherjee: *Exploiting excess capacity to improve robustness of wdm mesh networks*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 20(1):114–124, Feb 2012, ISSN 1063-6692. xiv, xvi, 1, 2, 3, 4, 34, 35, 36, 37, 42, 116
- [2] Júnior, Paulo J.S., Lucas R. Costa, André C. Drummond e Marcelo A. Marotta: *Minimizing unavailability in elastic optical networks: Pre-provisioning and provisioning protection strategy using dlp and dpp*. Computer Networks, 257:110928, 2025, ISSN 1389-1286. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128624007606>. xv, 28, 33, 36, 37, 38, 47, 48, 104, 110, 111, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 123, 125
- [3] Segovia, Juan, Eusebi Calle, Pere Vilà, Jose Marzo e János Tapolcai: *Topology-focused availability analysis of basic protection schemes in optical transport networks*. Journal of Optical Networking, 7, abril 2008. xvi, 32
- [4] International Telecommunication Union: *Measuring digital development: Facts and figures 2024*. Relatório Técnico, International Telecommunication Union, 2024. <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/2024/11/10/ff24-internet-traffic/>. 1
- [5] Nouredine, Staifi e Belguidoum Meriem: *Sl-sla-iot: an sla specification and monitoring framework for iot applications*. Em *2021 International Conference on Information Systems and Advanced Technologies (ICISAT)*, páginas 1–12, 2021. 1, 2
- [6] Kumar, Dinesh, Rajiv Kumar e Neeru Sharma: *A parallel cross-connection recovery scheme for dual link failure in elastic optical networks*. Journal of Optical Communications, 44(4):447–455, 2023. <https://doi.org/10.1515/joc-2020-0252>. 1
- [7] Kodama, Takahiro, Tomoya Nakagawa, Shota Eguchi, Keiji Shimada e Ryosuke Matsumoto: *Double-link-failure-tolerant shared protection for fully coupled/half-split switchable point-to-multipoint coherent optical systems*. Journal of Optical Communications and Networking, 16(9):832–842, 2024. 1
- [8] Lechowicz, Piotr, Aleksandra Knapieńska e Krzysztof Walkowiak: *Delayed squeezed dedicated path protection in spectrally-spatially flexible optical networks*. Em *2022 12th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM)*, páginas 1–7, 2022. 1, 32, 34

- [9] Tang, Fengxian, Gangxiang Shen e George N. Rouskas: *Crosstalk-aware shared backup path protection in multi-core fiber elastic optical networks*. Journal of Lightwave Technology, 39(10):3025–3036, 2021. 1
- [10] Ramasubramanian, Srinivasan e Amit Chandak: *Dual-link failure resiliency through backup link mutual exclusion*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 16(1):157–169, 2008. 1, 44, 48
- [11] Sasithong, Pruk, Le Quang Quynh, Poompat Saengudomlert, Pisit Vanichchanunt, Nguyen Hoang Hai e Lunchakorn Wuttisittikulkij: *Maximizing double-link failure recovery of over-dimensioned optical mesh networks*. Optical Switching and Networking, 36:100541, 2020, ISSN 1573-4277. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427719300219>. 1, 44, 48
- [12] Tan, Yiliu, Qian Wu, Yoshiki Nakano, Jiading Wang e Maiko Shigeno: *Network design models with partial protection schemes against multiple failures under optical-channel data unit constraints*. Em 2021 IEEE 6th Optoelectronics Global Conference (OGC), páginas 38–46, 2021. 1, 45, 48
- [13] Papapavlou, Charalampos, Konstantinos Paximadis e Giannis Tzimas: *Design and analysis of a new sdm submarine optical network for greece*. Em 2021 12th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA), páginas 1–8, 2021. 2, 10
- [14] Paximadis, Konstantinos e Charalampos Papapavlou: *Towards an all new submarine optical network for the mediterranean sea: Trends, design and economics*. Em 2021 12th International Conference on Network of the Future (NoF), páginas 1–5, 2021. 2, 10
- [15] Sharma, Anjali, Baljinder Singh Heera, Varsha Lohani e Yatindra Nath Singh: *Fragmentation-aware routing, core and spectrum assignment in multi-core fiber based sdm-eon*. Em 2022 Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP), páginas 01–02, 2022. 2, 10, 14, 22, 27, 29, 82
- [16] Klinkowski, Mirosław, Piotr Lechowicz e Krzysztof Walkowiak: *A study on the impact of inter-core crosstalk on sdm network performance*. Em 2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), páginas 404–408, 2018. 2, 14, 17, 21, 22, 27, 49, 82
- [17] Zhang, Qihan, Xu Zhang, Xiaoxue Gong e Lei Guo: *Crosstalk-avoid virtual optical network embedding over elastic optical networks with heterogeneous multi-core fibers*. Journal of Lightwave Technology, 40(24):7687–7700, 2022. 2, 14, 22, 27, 54, 56, 82
- [18] Chatterjee, Bijoy Chand, Abdul Wadud, Imran Ahmed e Eiji Oki: *Priority-based inter-core and inter-mode crosstalk-avoided resource allocation for spectrally-spatially elastic optical networks*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 29(4):1634–1647, 2021. 2, 27, 53, 56

- [19] Araújo, Selles G. F. Carvalho, Jurandir C. Lacerda e André C. B. Soares: *Evaluating the impact of circuit reallocation on inter-core crosstalk mitigation in sdm-eons*. Em *2025 25th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, páginas 1–4, 2025. 2, 27, 30, 52
- [20] Sun, Y. e A. Kumar: *Quality-of-protection (qop): A quantitative methodology to grade security services*. páginas 394–399, June 2008. 2
- [21] Dikbiyik, F., M. Tornatore e B. Mukherjee: *Exploiting excess capacity, part ii: Differentiated services under traffic growth*. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 23(5):1599–1609, Oct 2015, ISSN 1063-6692. 2
- [22] Oliveira, Helder M. N. S. e Nelson L. S. da Fonseca: *Sharing spectrum and straddling p-cycle fipp for protection against two simultaneous failures in sdm elastic optical networks*. Em *2017 IEEE 9th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, páginas 1–6, 2017. 3, 35, 44, 48
- [23] Zheng, Weichang, Mingcong Yang, Chenxiao Zhang, Yu Zheng e Yongbing Zhang: *Robust design against network failures of shared backup path protected sdm-eons*. *Journal of Lightwave Technology*, 41(10):2923–2939, 2023. 3, 46, 48
- [24] Singh, Alka e Gitanjali Chandwani Manocha: *Phase-wise gradual upgrade of eon to sdm-eon in optical backbone network*. *Optical Fiber Technology*, 93:104242, 2025, ISSN 1068-5200. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520025001178>. 9
- [25] Zhao, Y., L. Hu, R. Zhu, X. Yu, X. Wang e J. Zhang: *Crosstalk-aware spectrum defragmentation based on spectrum compactness in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multicore fiber*. *IEEE Access*, 6:15346–15355, 2018, ISSN 2169-3536. 14, 17, 21, 27, 50
- [26] Brasileiro Ítalo, Lucas Costa e André Drummond: *A survey on challenges of spatial division multiplexing enabled elastic optical networks*. *Optical Switching and Networking*, 38:100584, 2020, ISSN 1573-4277. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427720300461>. 17, 21, 22, 51, 82
- [27] Moghaddam, Elham Ehsani, Hamzeh Beyranvand e Jawad A. Salehi: *Crosstalk-aware resource allocation in survivable space-division-multiplexed elastic optical networks supporting hybrid dedicated and shared path protection*. *Journal of Lightwave Technology*, 38(6):1095–1102, 2020. 17
- [28] Kodama, Takahiro e Gabriella Cincotti: *All-optical mdm-ofdm system using a single mux/demux for future converged optical networks*. Em *2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)*, páginas 1–3, 2022. 17
- [29] Kudo, Takanori, Tomotaka Kimura, Yutaka Fukuchi e Kouji Hirata: *Static routing and spectrum allocation method for design of low-power elastic optical networks with multifiber environments*. *Optical Switching and Networking*, 40:100604,

2021, ISSN 1573-4277. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427721000011>. 28

- [30] Takezaki, Masaaki e Kouji Hirata: *Static lightpath establishment method with multi-path routing in elastic optical networks*. Em *2017 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, páginas 109–111, 2017. 28
- [31] Mantelet, Guillaume, Andrew M Cassidy, Christine Tremblay, David Plant, Paul Littlewood e Michel Bélanger: *Establishment of dynamic lightpaths in filterless optical networks*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 5:1057–1065, agosto 2013. 29
- [32] Li, Xuhong, Junling Yuan, Lihua Yang, Qikun Zhang e Zeqi Yu: *A crosstalk- and fragmentation-aware rmsca strategy in sdm-eons based on aligned prime-partition of spectrum resources*. *Optical Fiber Technology*, 72:102978, 2022, ISSN 1068-5200. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520022001614>. 29
- [33] Irsoy, Orkun e Osman Yagan: *Analysis and optimization of robustness in multiplex flow networks against cascading failures*. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, páginas 1–18, 2025. 31
- [34] Titouni, Salem, Idris Messaoudene, Yassine Himeur, Omar Alnaseri, Farouk Chetouah, Boualem Hammache, Massinissa Belazzoug, Shadi Atalla e Wathiq Mansoor: *Hybrid cnn-ensemble framework for intelligent optical fiber fault detection and diagnosis*. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 6:5626–5638, 2025. 31
- [35] Yeganehfallah, Azarm, Andrea Sgambelluri, Emilio Paolini, Kayol Soares Mayer, Moises Felipe Silva, Darli A. A. Mello e Luca Valcarengi: *Confidentiality-preserving real-time localization of soft failures in optical networks based on pca and mlaas*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 17(9):D137–D143, 2025. 32
- [36] Cruzes, Sergio: *Failure management overview in optical networks*. *IEEE Access*, 12:169170–169193, 2024. 32
- [37] Nyarko-Boateng, Owusu, Adebayo Felix Adekoya e Benjamin Asubam Weyori: *Predicting the actual location of faults in underground optical networks using linear regression*. *Engineering Reports*, 3(12):e12304, 2020. 32
- [38] Yu, Bing, Peng Xie, Yixuan Li, Yuhang Liu e Xiaosong Yu: *Fragmentation risk-aware spectrum allocation for protection path in elastic optical networks*. Em *2025 IEEE 5th International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*, páginas 37–41, 2025. 32
- [39] Sun, Peng, Zhidong He, Robert E. Kooij e Piet Van Mieghem: *Topological approach to measure the recoverability of optical networks*. *Optical Switching and Networking*, 41:100617, 2021, ISSN 1573-4277. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157342772100014X>. 32

- [40] Rak, Jacek, Rita Girão-Silva, Teresa Gomes, Georgios Ellinas, Burak Kantarci e Massimo Tornatore: *Disaster resilience of optical networks: State of the art, challenges, and opportunities*. Optical Switching and Networking, 42:100619, 2021, ISSN 1573-4277. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427721000163>. 32
- [41] Zhang, Xu, Hankun Zeng, Chuan Feng, Yuxin Xu, Fan Zhang, Xiaoxue Gong e Lei Guo: *Spectrum-efficient hybrid protection with dedicated and shared paths in elastic optical data center networks*. Journal of Network and Computer Applications, 242:104238, 2025, ISSN 1084-8045. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804525001353>. 33
- [42] Arpanaei, Farhad, Shayan Hajipour, Hamzeh Beyranvand, José Alberto Hernández e David Larrabeiti: *A comparative study on shared precomputed restoration and shared backup path protection in eons*. Em *2022 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, páginas 1–6, 2022. 33
- [43] Chebolu, Venkatesh, Sadananda Behera e Goutam Das: *Robust rmsa design for shared backup path protection based eon against nonlinear impairments*. Journal of Optical Communications and Networking, 14(8):640–653, 2022. 33, 37
- [44] Rezk, Nourhan, Mohamed Shehata, Safa M. Gasser e Mohamed S. El-Mahallawy: *Survivable network slicing using shared link protection*. IEEE Access, 11:81900–81913, 2023. 33, 37
- [45] Hai, Dao Thanh: *Three shades of partial protection in elastic optical networks*, 2021. <https://arxiv.org/abs/2105.01046>. 33, 40
- [46] Szcześniak, Ireneusz, Ireneusz Olszewski e Bożena Woźna-Szcześniak: *Towards an efficient and exact algorithm for dynamic dedicated path protection*. Entropy, 23(9):1116, agosto 2021, ISSN 1099-4300. <http://dx.doi.org/10.3390/e23091116>. 33, 34
- [47] Walkowiak, Krzysztof, Mirosław Klinkowski, Bartosz Rabiega e Róża Goścień: *Routing and spectrum allocation algorithms for elastic optical networks with dedicated path protection*. Optical Switching and Networking, 13:63–75, 2014, ISSN 15734277. 34
- [48] Ji, Fan, Xiaoliang Chen, Wei Lu, Joel J P C Rodrigues e Zuqing Zhu: *Dynamic p-cycle protection in spectrum-sliced elastic optical networks*. Journal of Lightwave Technology, 32(6):1190–1199, 2014, ISSN 07338724. 35
- [49] Kiaei, M.S., C. Assi e B. Jaumard: *A survey on the p-cycle protection method*. Communications Surveys Tutorials, IEEE, 11(3):53–70, rd 2009, ISSN 1553-877X. 35
- [50] Ahmed, Imran, Eiji Oki e Bijoy Chand Chatterjee: *Crosstalk-aware vs. crosstalk-avoided approaches in spectrally-spatially elastic optical networks: Which is the better choice?* Em *2022 Workshop on Recent Advances in Photonics (WRAP)*, páginas 1–2, 2022. 36, 54, 56

- [51] Zhang, Qihan, Xu Zhang, Xiaoxue Gong e Lei Guo: *Crosstalk-avoid virtual optical network embedding over elastic optical networks with heterogeneous multi-core fibers*. Journal of Lightwave Technology, 40(24):7687–7700, 2022. 36
- [52] Yang, Yuan, Mingwei Xu e Qi Li: *Fast rerouting against multi-link failures without topology constraint*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 26(1):384–397, 2018. 36
- [53] Gupta, V. e R. Asthana: *Study of wavelength converter placement in p(pre-configured)-cycle protection*. Em 2020 Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), páginas 459–464, 2020. 36
- [54] Klinkowski, Mirosław: *Evaluation of 1+1 and 1:1 optical protection architectures in passive wdm optical xhaul access networks*. Em 2025 25th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), páginas 1–4, 2025. 38
- [55] Assis, Karcus Day R., Raul C. Almeida, Leonardo P. Dias e Helio Waldman: *Squeezed protection in elastic optical networks subject to multiple link failures*. IEEE Transactions on Network and Service Management, 18(3):2612–2626, 2021. 45, 48
- [56] Kodama, Takahiro, Tomoya Nakagawa e Ryosuke Matsumoto: *Any-double-link failure tolerant bypass/backup switchable wdm-pon employing path-pair shared protection and bidirectional wavelength pre-assignment*. Em 2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), páginas 1–3, 2022. 45, 47, 48
- [57] Bhadra, Sampa Rani, Ashok Kumar Pradhan e Utpal Biswas: *Protection of split light trail(s) in wdm mesh networks against multiple link failures*. Em 2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), páginas 1–6, 2023. 46, 48
- [58] Ramalho, Guilherme S., Keiko O. Fonseca, Daniel F. Pigatto, Carlos Natalino, Paolo Monti, Gustavo B. Figueiredo e Juliana de Santi: *Cascading-failure-aware disaster recovery in optical cloud networks*. Em 2023 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), páginas 1–3, 2023. 46, 48
- [59] Naiho, Henry, Seleman Ngwira e Isaac O. Osunmakinde: *New insights on survivability in multiple link and node failures of optical networks*. Computer Science & IT Research Journal, 4(1):20–35, Oct. 2023. <https://www.fepbl.com/index.php/csitrj/article/view/591>. 46, 48
- [60] Klinkowski, Mirosław e Grzegorz Zalewski: *Dynamic crosstalk-aware lightpath provisioning in spectrally-spatially flexible optical networks*. Journal of Optical Communications and Networking, 11(5):213–225, 2019. 50
- [61] Kawaguchi, Kotaro, Yuya Seki, Yosuke Tanigawa, Yusuke Hirota e Hideki Tode: *Proactive modulation format allocation method with selective downgrading to enhance inter-core crosstalk tolerance in sdm-eons*. Em 2024 15th International Conference on Network of the Future (NoF), páginas 159–163, 2024. 51, 82

- [62] Heera, Baljinder Singh, Anjali Sharma, Varsha Lohani e Yatindra Nath Singh: *Crosstalk compliant routing, modulation, core and spectrum assignment techniques in sdm-eon*. Em *2022 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, páginas 261–264, 2022. 55, 56
- [63] Lacerda Jr., Jurandir C., Aline G. Morais, Adolfo V. T. Cartaxo e André C. B. Soares: *A new algorithm to mitigate fragmentation and crosstalk in multi-core elastic optical networks*. *Photonics*, 11(6):504, 2024. 55, 56
- [64] Costa, Lucas R., Leia S. de Sousa, Felipe R. de Oliveira, Kaio A. da Silva, Paulo J. S. Sousa Junior e Andre C. Drummond: *Ons: Simulador de eventos discretos para redes opticas wdm/eon*. *Salao de Ferramentas do XXXIV Simposio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuidos*, 2016. 111, 112
- [65] Costa, Lucas Rodrigues: *Eficiência Energética em Redes Ópticas Elásticas*. Tese de doutorado em informática, Universidade de Brasília, 2021. 112
- [66] Yen, Jin Y.: *Finding the k shortest loopless paths in a network*. *Management Science*, 17(11):712–716, 1971. 113

Anexo I

Publicações no Doutorado

Durante o período do doutorado, as seguintes publicações foram realizadas. Este anexo se divide primeiramente pela listagem das publicações em periódicos organizados dos mais recentes aos mais antigos. A seguir, os artigos que foram publicados em anais de conferências e demais eventos. Cada publicação será resumida e apresentada pelo seu título, seus autores, veículo de publicação e ano.

I.1 Publicações em periódicos

- Título: *Minimizing Unavailability in Elastic Optical Networks: Pre-Provisioning and Provisioning Protection Strategy Using DLP and DPP*
 - Autores: P. S. JÚNIOR, L. COSTA, A. DRUMMOND, E M. A. MAROTTA.
 - Veículo: Elsevier Computer Networks
 - Ano: 2025
- Título: *Spectrum Defragmentation Window in SDM-EON Networks*
 - Autores: P. S. JÚNIOR, L. COSTA, E M. A. MAROTTA.
 - Veículo: Journal of Internet Services and Applications
 - Ano: 2025

I.2 Publicações em anais de conferências e afins

- Título: *A Study on the Unavailability of EON with Protection Mechanisms Based on Pre-Provisioning*
 - Autores: P. J. Souza, M. A. Marotta, L. R. Costa, A. C. Drummond

- Veículo: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)
 - Ano: 2022
- Título: *Janela de desfragmentação de espectro em redes SDM-EON*
 - Autores: P. J. S. Júnior, L. R. Costa, E M. A. Marotta
 - Veículo: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)
 - Ano: 2023