

# RARP: Um Algoritmo Integrado de Roteamento, Alocação de Recursos e Proteção com Diferenciação de Serviço em SDM-EONs

Rafael Lopes<sup>1</sup>, Denis Rosário<sup>1</sup>, Eduardo Cerqueira<sup>1</sup>, Helder M. N. da S. Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Pará (UFPA) – Belém-PA, Brasil

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo (USP) – São Paulo-SP, Brasil

rafael.lopes@itec.ufpa.br, {denis, cerqueira}@ufpa.br

helderoliveira@ime.usp.br

**Abstract.** *The rapid growth of optical traffic has increased the need for SDM-EON architectures that jointly optimize routing and resource allocation while providing differentiated protection. This paper proposes RARP (Routing, Allocation of Resources, and Protection), a unified algorithm that combines distance-adaptive modulation, shared protection with Failure-Independent Path Protecting (FIPP) p-cycles, protection-as-primary, and priority-aware preemptive protection. Simulations on the USA and NSF topologies show that RARP reduces bandwidth blocking by up to  $\approx 70\%$  compared to state-of-the-art algorithms, while maintaining differentiated protection per class and improving energy efficiency under high load.*

**Resumo.** *O crescimento do tráfego óptico exige SDM-EONs capazes de otimizar, de forma conjunta, o roteamento e a alocação de recursos, garantindo níveis diferenciados de proteção. Este artigo propõe o RARP (Roteamento, Alocação de Recursos e Proteção), um algoritmo unificado que combina modulação adaptativa, proteção compartilhada com Failure-Independent Path Protecting (FIPP) p-cycles, proteção-as-primária e preempção preventiva orientada por prioridade. Simulações nas topologias USA e NSF indicam que o RARP reduz a taxa de bloqueio de banda em até  $\approx 70\%$  em relação à literatura, mantendo diferenciação de proteção por classe e melhorando a eficiência energética sob altas cargas.*

## 1. Introdução

O crescimento acelerado da demanda por aplicações de alta largura de banda, aliado à expansão contínua de serviços em nuvem e de data centers, tem pressionado os limites das redes ópticas tradicionais baseadas em Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM, do inglês *Wavelength Division Multiplexing*) de grade fixa. Nesse contexto, as Redes Ópticas Elásticas (EONs, do inglês *Elastic Optical Networks*) surgem como uma alternativa promissora ao oferecer flexibilidade espectral e elevada eficiência por meio da alocação adaptativa de espectro e de formatos de modulação flexíveis. Mais recentemente, o paradigma de Multiplexação por Divisão Espacial (SDM, do inglês *Spatial Division Multiplexing*) foi incorporado às EONs para superar estruturalmente o limite de capacidade por fibra, ao introduzir múltiplos núcleos ou fibras paralelas na

mesma infraestrutura [Oliveira and Da Fonseca 2018]. A combinação desses elementos, porém, cria um problema de alocação de recursos ainda mais complexo, multidimensional e altamente correlacionado, que demanda algoritmos avançados para garantir eficiência e resiliência [Pinto-Ríos et al. 2024, Mandloi et al. 2024, Hosseini et al. 2024, Asiri and Wang 2024].

Apesar dos avanços, a maior parte dos algoritmos de Roteamento, Alocação de Núcleo e Espectro (RCSA, do inglês *Routing, Core and Spectrum Allocation*) para SDM-EONs ainda trata o tráfego de forma uniforme. Essa suposição mostra-se inadequada em cenários com requisitos de serviço heterogêneos, resultando em uso ineficiente de recursos e degradação de desempenho. A isso soma-se a necessidade de mecanismos de proteção robustos que, quando implementados de forma conservadora, consomem grande parte da capacidade disponível [Sarma et al. 2025, Hosseini et al. 2024]. Assim, permanece aberta na literatura a necessidade de um algoritmo capaz de otimizar recursos, oferecer diferenciação de serviço e incorporar mecanismos de proteção eficientes em SDM-EONs [Zhao et al. 2025, Pinto-Ríos et al. 2024, Hosseini et al. 2024].

Para enfrentar esses desafios, este trabalho propõe o RARP (Roteamento, Alocação de Recursos e Proteção), um algoritmo unificado para SDM-EONs que operacionaliza a diferenciação de serviço por meio de três Classes de Serviço (CoS, do inglês *Classes of Service*), cada uma com políticas distintas de Qualidade de Proteção (QoP, do inglês *Quality of Protection*) e preempção. A otimização conjunta de recursos espectrais e espaciais é alcançada integrando modulação adaptativa, proteção compartilhada via *p*-cycles FIPP (do inglês *Failure-Independent Path Protection*), *protection-as-primary* (uso oportunista de capacidade ociosa de proteção por tráfego de menor prioridade, preempção sob falha) e preempção preventiva. Simulações em topologias USA e NSF demonstram que o RARP reduz a Taxa de Bloqueio de Banda (BBR, do inglês *Bandwidth Blocking Ratio*) em até  $\approx 41\%$  em relação ao SLA-DP e até  $\approx 70\%$  em relação ao SBPP em cargas de até 500 Erlangs, mantendo o BBR de CoS 1 abaixo de 2,2% (USA) e 4,4% (NSF), além de incrementar significativamente a eficiência energética.

As principais contribuições deste trabalho são a proposição do RARP, um algoritmo integrado de roteamento, alocação núcleo–espectro e proteção para SDM-EONs, com diferenciação por CoS e por políticas de QoP; o uso combinado de FIPP *p*-cycles e *protection-as-primary* para reduzir a sobrecarga de proteção e aumentar a capacidade efetiva da rede; a introdução de um mecanismo de preempção preventiva associado à proteção, incluindo a possibilidade de *backup virtual* ( $BP_{\text{virtual}}$ ), com critério de elegibilidade baseado na extração de subcaminhos e preservando o isolamento por prioridade; e, por fim, a avaliação extensiva em topologias reais (USA e NSF) sob cargas de 25 a 500 Erlangs, com comparação a algoritmos de referência e análise de BBR (global e por CoS) e eficiência energética.

O restante do artigo está organizado como se segue: a Seção 2 revisa os trabalhos relacionados; a Seção 3 detalha o RARP; a Seção 4 descreve a metodologia; a Seção 5 apresenta os resultados; e a Seção 6 conclui.

## 2. Trabalhos Relacionados

A literatura recente sobre SDM-EON evidencia que a comparação entre propostas ainda é dificultada pela variedade de parâmetros, métricas e baselines adotados, reforçando a

necessidade de algoritmos integrados e de avaliações consistentes. Nesse sentido, trabalhos de benchmarking e revisão ajudam a sistematizar eixos como (i) Roteamento, Modulação, Alocação de Espectro e Núcleo (RMCSA, do inglês *Routing, Modulation, Core and Spectrum Allocation*) e RCSA com restrições físicas (e.g., crosstalk), (ii) esquemas de proteção (dedicada/compartilhada e  $p$ -cycles), e (iii) diferenciação por prioridade/níveis de proteção [Pinto-Ríos et al. 2024].

Hai [Hai 2020] propõe uma proteção dedicada sensível à Qualidade de Serviço (QoS, do inglês *Quality of Service*), distinguindo tráfego *premium* de *best-effort* e oferecendo proteção com largura mínima necessária (*just-enough*) para o tráfego crítico. Layec et al. [Layec et al. 2018] estudam proteção sensível à QoS em redes flexgrid, explorando transponders de *baud-rate* variável para reduzir a ocupação espectral do caminho de proteção. Entretanto, esses trabalhos não consideram SDM nem mecanismos de preempção associados à proteção.

Hosseini et al. [Hosseini et al. 2024] propõem proteção diferenciada por SLA (do inglês *Service Level Agreement*) em EONs multibanda C+L, avaliando DPP (do inglês *Dedicated Path Protection*) e SBPP (do inglês *Shared Backup Path Protection*) com modulação adaptativa, porém sem SDM-EON nem preempção. Munasinghe et al. [Munasinghe et al. 2024] propõem alocação *impairment-aware* com duas prioridades de serviço, aplicando preempção quando a alta prioridade não pode ser acomodada, com ganhos de aproveitamento espectral e menor fragmentação; contudo, não contemplam SDM-EON nem proteção compartilhada.

No contexto de SDM-EONs, Tang et al. [Tang et al. 2021] tratam o RCSA com SBPP e restrições de crosstalk, mas modelam o tráfego de forma homogênea. Oliveira et al. [Oliveira and Da Fonseca 2018] integram proteção via  $p$ -cycles FIPP com modulação adaptativa em SDM-EON, reduzindo sobrecarga frente à proteção dedicada, porém sem diferenciação por CoS nem reutilização da capacidade ociosa. Zheng et al. [Zheng et al. 2023] propõem projeto robusto contra falhas com SBPP em SDM-EONs, com modulação adaptativa e otimização conjunta dos caminhos primário e de backup, mas sem diferenciação por classes nem preempção.

**Tabela 1. Comparação dos principais trabalhos relacionados.**

Trabalho	SDM	Dif. Serv.	Prot. Comp.	Preemp.	Mod. Adapt.
[Hai 2020]	✗	✓	✗	✗	✗
[Layec et al. 2018]	✗	✓	✗	✗	✗
[Hosseini et al. 2024]	✗	✓	✓	✗	✓
[Munasinghe et al. 2024]	✗	✓	✗	✓	✓
[Tang et al. 2021]	✓	✗	✓	✗	✗
[Oliveira and Da Fonseca 2018]	✓	✗	✓	✗	✓
[Zheng et al. 2023]	✓	✗	✓	✗	✓
<b>RARP</b>	✓	✓	✓	✓	✓

A Tabela 1 sumariza os principais trabalhos relacionados, onde **Dif. Serv.** = diferenciação de serviço por classes (QoS); **Prot. Comp.** = proteção compartilhada (SBPP ou  $p$ -cycles FIPP); **Preemp.** = preempção; **Mod. Adapt.** = modulação adaptativa.

Em síntese, observa-se uma fragmentação: (i) trabalhos QoS-aware em EONs tradicionais não contemplam SDM; (ii) propostas em SDM-EONs focam em crosstalk e na eficiência de RCSA/RMCSA, mas sem considerar diferenciação explícita por classes e políticas de proteção/preempção; e (iii) abordagens com  $p$ -cycles em SDM-EONs ainda não integram diferenciação por classe, preempção associada à proteção e reutilização sistemática da capacidade de proteção ociosa. O RARP se posiciona ao integrar esses elementos em um único algoritmo.

### 3. Algoritmo RARP

O algoritmo Roteamento, Alocação de Recursos e Proteção (RARP) foi projetado para explorar simultaneamente as dimensões espectral e espacial das SDM-EONs, impondo diferenciação de serviço por meio de QoP e preempção. O objetivo primário é reduzir o bloqueio de banda, atendendo a requisitos diferenciados de proteção por classes de serviço, melhorando a eficiência energética por meio do compartilhamento de proteção e *protection-as-primary*.

A rede SDM-EON é modelada por um grafo  $G(V, E)$ , em que  $V$  é o conjunto de nós e  $E$  o conjunto de enlaces. Cada enlace possui  $C = 7$  núcleos, com  $S = 320$  Unidades de Slots de Frequência (FSUs, do inglês *Frequency Slot Units*), cada com  $B_{\text{slot}} = 12,5$  GHz. Uma requisição é denotada por  $R(s, d, B, CoS)$ , em que  $s$  e  $d$  são, respectivamente, os nós de origem e destino,  $B$  é a largura de banda requisitada e  $CoS \in \{1, 2, 3\}$  é a classe de serviço.

Para facilitar a descrição, utilizamos a seguinte notação:

- $P_k$ : conjunto de  $k$  caminhos candidatos entre  $s$  e  $d$ .
- $WP$ : caminho de trabalho (*working path*) selecionado para a requisição.
- $BP$ : caminho de proteção (*backup path*), quando aplicável.
- $BP_{\text{virtual}}$ : proteção via preempção preventiva, registrada como *backup virtual*.
- $M$ : formato de modulação selecionado em função do alcance/QoT.
- $N_{\text{slots}}$ : número de FSUs requerido (Eq. 1).

A Tabela 2 resume as características de proteção por CoS, onde  $BP \text{ comp.}$  = backup compartilhado (SBPP),  $BP \text{ ded.}$  = backup dedicado,  $Preemp. (CoS X)$  = preempção sobre fluxos da CoS X e PaP = *protection-as-primary*.

**Tabela 2. Características de Proteção por Classe de Serviço no RARP.**

CoS	Proteção	Preemptível	Mecanismos	PaP
1	Obrigatória	Não	FIPP, BP comp., BP ded., Preemp. (CoS 2/3)	Não
2	Best-effort	Sim	BP comp., Preemp. (CoS 3)	Não
3	Não	Sim	PaP (reuso de backup ocioso)	Sim

O Algoritmo 1 apresenta o fluxo principal do RARP. Inicialmente, seleciona-se um  $WP$  via roteamento *distance-aware* e modulação adaptativa; caso nenhum  $WP$  viável seja encontrado, a requisição é bloqueada. Para CoS 3, a conexão é estabelecida apenas com  $WP$ , podendo explorar *protection-as-primary* [Cavalcanti et al. 2024]; para CoS 1/2, busca-se proteção por uma cascata que privilegia compartilhamento, recorrendo à preempção preventiva apenas como último recurso [Munasinghe et al. 2024,

Lopes et al. 2022]. A preempção registra um caminho de menor prioridade como  $BP_{\text{virtual}}$ , mantendo-o ativo até eventual acionamento, com critério de elegibilidade baseado em disjunção de enlaces e extração de subcaminhos.

---

**Algoritmo 1: RARP (procedimento principal)**

---

**Entrada:** Requisição  $R(s, d, B, CoS)$ , topologia  $G(V, E)$   
**Saída:** Estado da requisição (*aceita* ou *bloqueada*)

- 1  $permitePaP \leftarrow (CoS = 3)$
- 2  $(WP, M, N_{\text{slots}}) \leftarrow \text{SELECIONAWP}(G, R, permitePaP)$
- 3 **Se**  $WP = \emptyset$  **Então**
  - ▷ Sem WP não há conexão (todas as CoS)
- 4     **Retorna** *bloqueada*
- 5 **Fim Se**
- 6 **Se**  $CoS = 3$  **Então**
  - 7      $ok \leftarrow \text{ALOCAFF}(G, R, WP, \emptyset, \emptyset, M, N_{\text{slots}}, permitePaP = \text{verdadeiro})$
  - 8     **Se**  $ok = \text{falso}$  **Então**
    - 9         **Retorna** *bloqueada*
  - 10     **Fim Se**
  - 11     **Retorna** *aceita*
- 12 **Fim Se**
- 13  $(BP, BP_{\text{virtual}}) \leftarrow \text{PROVEPROTECAO}(G, R, WP, M, N_{\text{slots}})$
- 14 **Se**  $BP = \emptyset \wedge BP_{\text{virtual}} = \emptyset$  **Então**
  - 15     **Retorna** *bloqueada*
- 16 **Fim Se**
- 17  $ok \leftarrow \text{ALOCAFF}(G, R, WP, BP, BP_{\text{virtual}}, M, N_{\text{slots}}, permitePaP = \text{falso})$
- 18 **Se**  $ok = \text{falso}$  **Então**
  - 19     **Retorna** *bloqueada*
- 20 **Fim Se**
- 21 **Retorna** *aceita*

---

Para cada requisição de conexão, o RARP opera em três fases sequenciais, descritas em detalhes nas subseções seguintes.

### 3.1. Fase 1: Roteamento e Seleção Adaptativa de Modulação.

Dada uma requisição  $R(s, d, B, CoS)$ , o RARP calcula um conjunto de  $k$  caminhos candidatos  $P_k$  ( $k$ -shortest paths), com  $k = 3$  e pesos proporcionais à distância física dos enlaces. Cada candidato  $p \in P_k$  é avaliado pelo seu comprimento físico  $L(p)$  para selecionar a modulação adaptativa  $M$  de maior ordem viável à QoT e, assim, reduzir o consumo espectral. Para CoS 1, quando há  $p$ -cycles disponíveis, prioriza-se a seleção de caminhos transzonais (análogos aos *straddling spans* na literatura de  $p$ -cycles), isto é, candidatos em que par  $(s, d)$  pertence ao ciclo e ao menos um nó intermediário está fora dele, aumentando a diversidade estrutural [Oliveira and Da Fonseca 2018]; se não houver candidato transzonal viável, seleciona-se o primeiro caminho viável.

Uma vez definido  $M$ , o número de unidades de slots (FSUs) requerido, denotado por  $N_{\text{slots}}$ , é calculado como:

$$N_{\text{slots}} = \left\lceil \frac{B}{B_{\text{slot}} \cdot \eta(M)} \right\rceil + 1, \quad (1)$$

em que  $B_{\text{slot}}$  é a largura de banda de um slot (por exemplo, 12,5 GHz),  $\eta(M)$  é a eficiência espectral do formato de modulação (em bit/s/Hz) e o termo +1 representa um slot adicional de banda de guarda para mitigar interferência intercanal.

Com  $N_{\text{slots}}$  definido, o RARP percorre  $P_k$  e verifica a disponibilidade de um bloco contíguo de FSUs em todos os enlaces do candidato (política *first-fit*), selecionando o primeiro caminho candidato (de menor distância) viável como  $WP$ . A reserva efetiva de núcleo e espectro é realizada posteriormente pela função ALOCAFF, em conjunto com a eventual proteção. Caso nenhum candidato atenda à demanda, a requisição é bloqueada.

### 3.2. Fase 2: Provisão de Proteção Sensível à QoS.

Na Fase 2, o RARP determina a estratégia de proteção conforme a CoS da requisição. Para CoS 1, a proteção é buscada em cascata priorizando  $p$ -cycles FIPP [Oliveira and Da Fonseca 2018]: a capacidade reservada é pré-conectada em estruturas de anel, e os enlaces *straddling* (que conectam dois nós do ciclo mas não fazem parte dele) permitem tolerar até duas falhas simultâneas em arestas disjuntas com a mesma capacidade de proteção. O algoritmo prioriza  $p$ -cycles existentes cujos segmentos cubram o primário (incluindo caminhos transzonais); na ausência de ciclos adequados, recorre a backups simples (compartilhados/dedicados) e, em último caso, à preempção preventiva ( $BP_{\text{virtual}}$ ). Para CoS 2, a busca por  $BP$  compartilhado ocorre em regime *best-effort*: sem backup elegível, tenta-se preempção sobre CoS 3 ou a requisição é aceita sem BP; fluxos de CoS 2 disjuntos do primário podem servir como  $BP_{\text{virtual}}$  para CoS 1. CoS 3 não exige  $BP$ , podendo explorar *protection-as-primary* sobre capacidade de proteção ociosa e servir como  $BP_{\text{virtual}}$  para classes superiores quando disjunta do primário.

### 3.3. Fase 3: Alocação de Recursos e Resolução de Conflitos.

Na fase final, o RARP aloca núcleo, espectro e modulação para o WP e, quando aplicável, para o BP. Para a atribuição de núcleo e espectro é utilizada a política *First-Fit* (FF), buscando alocar  $N_{\text{slots}}$  FSUs contíguas e respeitando as restrições de continuidade e contiguidade espectral.

Quando não há  $BP$  físico disponível por  $p$ -cycles (CoS 1) ou simples (CoS 1/2), a preempção preventiva associada à proteção registra, logicamente, um caminho de menor prioridade como  $BP_{\text{virtual}}$ , mantendo-o ativo até que uma eventual falha no primário exija a liberação dos recursos. Quando o candidato não conecta diretamente o par  $(s, d)$ , a extração de subcaminhos é utilizada como critério de elegibilidade, identificando trechos úteis disjuntos que atendam à requisição [Lopes et al. 2022], sem implicar a divisão operacional do circuito original.

Os Algoritmos 2 e 3 formalizam, respectivamente, as sub-rotinas SELECIONAWP e PROVEPROTECAO. A sub-rotina ALOCAFF implementa a política *first-fit* padrão: percorre os slots de 0 a  $S - N_{\text{slots}}$  em cada núcleo, alocando o primeiro bloco contíguo disponível em todos os enlaces do caminho, com complexidade  $O(S \cdot C \cdot |WP|)$ . A política FF concentra alocações nas faixas iniciais do espectro, podendo induzir fragmentação em cargas moderadas.

No Algoritmo 2, a partir da requisição  $R(s, d, B, CoS)$ , são calculados  $k = 3$  caminhos candidatos pelo KSP, com pesos proporcionais à distância física dos enlaces. Para cada candidato  $p \in P_k$ , seleciona-se a modulação adaptativa  $M$  de maior

**Algoritmo 2: SELECIONAWP**


---

**Entrada:**  $G(V, E)$ ,  $R(s, d, B, CoS)$ ,  $permitePaP$   
**Saída:**  $(WP, M, N_{slots})$  ou  $\emptyset$

- 1  $P_k \leftarrow \text{KSP}(G, s, d, k=3, \text{pesos} = \text{distância})$
- 2  $melhor \leftarrow \emptyset$
- 3 **Para cada**  $p \in P_k$  **Faça**
- 4      $M \leftarrow \text{MaiorModulação}(L(p))$  ▷Adaptativa à distância
- 5      $N_{slots} \leftarrow \lceil B / (B_{slot} \cdot \eta(M)) \rceil + 1$
- 6     **Se**  $FF(p, N_{slots}, permitePaP) \neq \emptyset$  **Então** ▷Verifica contiguidade em todos os enlaces
- 7         **Se**  $CoS = 1$  e  $\exists p\text{-cycle } c/ \text{caminho transzonal}$  **Então**
- 8             **Retorna**  $(p, M, N_{slots})$  ▷Prioriza transzonal
- 9         **Fim Se**
- 10        **Se**  $melhor = \emptyset$  **Então**
- 11             $melhor \leftarrow (p, M, N_{slots})$
- 12        **Fim Se**
- 13     **Fim Se**
- 14 **Fim para cada**
- 15 **Retorna**  $melhor$  ▷ $\emptyset$  se nenhum candidato viável

---

ordem compatível com o alcance  $L(p)$  e calcula-se  $N_{slots}$  conforme a Eq. 1. Quando  $CoS = 1$  e há  $p$ -cycles disponíveis, a sub-rotina prioriza candidatos transzonais, isto é, aqueles cujos nós extremos pertencem a um ciclo existente, mas ao menos um nó intermediário está fora dele, retornando imediatamente o primeiro caminho transzonal viável. O parâmetro  $permitePaP$ , ativado para CoS 3, habilita o reuso de slots de proteção ociosa na verificação *first-fit*, ampliando as opções de alocação sem necessidade de reservas adicionais.

No Algoritmo 3, para CoS 1, a busca ocorre em cascata: tenta-se primeiro reutilizar um  $p$ -cycle FIPP existente cujos segmentos cubram o  $WP$ ; na ausência de um ciclo adequado, tenta-se criar um novo  $p$ -cycle em um grafo auxiliar disjunto; sem sucesso, recorre-se ao backup compartilhado (SBPP) e, em seguida, ao dedicado (DPP). Somente quando todas as alternativas físicas falham, é que a preempção preventiva é ativada como último recurso: seleciona-se um fluxo ativo de CoS 2 ou CoS 3 cujo caminho seja disjunto do  $WP$  (ou cujo subcaminho cubra o par  $(s, d)$ ) e registra-se como  $BP_{virtual}$ . Para CoS 2, a cascata é mais curta: busca-se SBPP em modo *best-effort* e, sem backup disponível, tenta-se preempção sobre CoS 3; quando nenhuma opção é viável, a requisição pode ser aceita sem proteção.

Para cada requisição, o algoritmo inicialmente seleciona um caminho de trabalho candidato e realiza a alocação de recursos por meio de SELECIONAWP, e em seguida define o esquema de proteção via PROVEPROTECAO. Considerando o processamento de uma única requisição, a complexidade computacional do algoritmo pode ser decomposta nessas duas rotinas principais. A sub-rotina SELECIONAWP executa  $k$  iterações de Dijkstra ( $O(|E| \log |V|)$ ) seguidas de verificação *first-fit* ( $O(S \cdot C \cdot L_{max})$ ), totalizando  $O(k(|E| \log |V| + S \cdot C \cdot L_{max}))$ . A rotina PROVEPROTECAO é dominada pela busca em  $p$ -cycles existentes e, no pior caso, por até duas execuções adicionais de Dijkstra em grafo disjunto para criação de um novo ciclo, resultando em  $O(|E| \log |V| + |P|)$ , onde  $|P|$  representa o número de  $p$ -cycles considerados. Assim, a complexidade total do algo-

**Algoritmo 3: PROVEPROTECAO**


---

**Entrada:**  $G(V, E), R(s, d, B, CoS), WP, M, N_{\text{slots}}$   
**Saída:**  $(BP, BP_{\text{virtual}})$  ou  $(\emptyset, \emptyset)$

```

1 Se  $CoS = 1$  Então
2    $BP \leftarrow \text{BuscaPCycleExistente}(WP)$                                 ▷Reuso FIPP
3   Se  $BP = \emptyset$  Então
4      $BP \leftarrow \text{CriaNovoPCycle}(G, WP)$                                 ▷Novo FIPP
5   Fim Se
6   Se  $BP = \emptyset$  Então
7      $BP \leftarrow \text{BuscaBPCompartilhado}(G, WP)$ 
8   Fim Se
9   Se  $BP = \emptyset$  Então
10     $BP \leftarrow \text{BuscaBPDedicado}(G, WP)$ 
11  Fim Se
12  Se  $BP = \emptyset$  Então
13     $BP_{\text{virtual}} \leftarrow \text{Preempção}(G, WP, CoS \geq 2)$                 ▷Último recurso
14  Fim Se
15 Fim Se
16 Senão se  $CoS = 2$  Então
17    $BP \leftarrow \text{BuscaBPCompartilhado}(G, WP)$ 
18   Se  $BP = \emptyset$  Então
19      $BP_{\text{virtual}} \leftarrow \text{Preempção}(G, WP, CoS = 3)$                 ▷Sobre CoS 3
20   Fim Se
21 Fim Se
22 Retorna  $(BP, BP_{\text{virtual}})$ 

```

---

ritmo por requisição é  $O(k(|E| \log |V| + S \cdot C \cdot L_{\text{max}}) + |E| \log |V| + |P|)$ , que pode ser simplificada para  $O(k(|E| \log |V| + S \cdot C \cdot L_{\text{max}}))$  quando  $k \geq 1$  e  $|P|$  é limitado.

#### 4. Metodologia de Avaliação

Esta seção descreve a metodologia empregada para avaliar o RARP, incluindo o modelo de rede, os parâmetros de simulação e as métricas de desempenho.

A arquitetura da rede simulada baseia-se em redes ópticas elásticas com multiplexação espacial (SDM-EONs). A infraestrutura física é composta por enlaces ópticos bidirecionais, cada um contendo sete núcleos adjacentes organizados em formato hexagonal. O espectro total disponível por núcleo é de 4 THz, subdividido em 320 unidades de slots de frequência (FSUs) de 12,5 GHz. Essa granularidade fina é essencial para uma alocação eficiente do espectro.

Para maximizar a eficiência espectral, o algoritmo utiliza modulação adaptativa sensível à distância, considerando 64QAM, 32QAM, 16QAM, 8QAM, QPSK e BPSK, com alcances máximos de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 km, respectivamente [Calderón et al. 2020]. Modulações de maior ordem aumentam a taxa por FSU (e.g., 75 Gb/s para 64QAM vs. 12,5 Gb/s para BPSK), mas reduzem o alcance, tornando a seleção ótima crucial [Lopes et al. 2022]. A rede opera sob transparência óptica total, respeitando as restrições de continuidade e contiguidade espectral. Nesta avaliação, não se consideram restrições de crosstalk internúcleo, isolando-se a contribuição algorítmica.

A avaliação de desempenho utilizou o simulador de eventos discretos FlexGridSim [Moura and Drummond 2018]. Nele, foram desenvolvidos módulos que

permitem simulações com diferenciação de serviços. Empregamos duas topologias de rede padrão baseadas em cenários reais: a topologia USA (Figura 1(a), com 24 nós e 43 enlaces) e a topologia NSF (Figura 1(b), com 14 nós e 21 enlaces), ilustradas na Figura 1. A chegada das requisições de tráfego segue um processo de Poisson, com tempos de permanência exponenciais (média 1,0), e a carga variou de 25 a 500 Erlangs, com passo de 25 Erlangs (Tabela 3). As taxas de bit são selecionadas uniformemente do conjunto 25/50/125/200/500/750/1000 Gb/s dentro de cada CoS. Cada ponto reporta a média de 10 *seeds* independentes, com 10.000 requisições por *seed*, totalizando 100.000 requisições por ponto experimental; os intervalos de confiança de 95% foram inferiores a 2% do valor médio da BBR em todos os pontos acima de 150 Erlangs. Adota-se a definição de Erlang como taxa média de chegada multiplicada pela duração média dos fluxos.

A distribuição de tráfego adotada foi de 8,33% (CoS 1), 16,66% (CoS 2) e 75% (CoS 3), refletindo a estimativa da literatura [Layec et al. 2018, Hai 2020] de que aproximadamente 25% do tráfego possui requisitos de resiliência. A eficácia da proteção é capturada indiretamente pela BBR; a injeção explícita de falhas e métricas de restauração por CoS são reservadas para trabalhos futuros.

**Tabela 3. Parâmetros de Simulação**

Parâmetro	Valor
Carga	25–500 Erlangs (passo 25)
Largura de banda	25/50/125/200/500/750/1000 Gb/s
# Núcleos	7
# Requisições	10.000 por seed (100.000 por ponto experimental)
Banda de guarda	1 slot

Nesta seção, as curvas rotuladas “RARP” representam o desempenho do algoritmo proposto. As curvas rotuladas “SLA-DP” correspondem ao algoritmo proposto em [Hosseini et al. 2024], que implementa classes diferenciadas de proteção baseadas em SLA. As curvas rotuladas “SBPP” representam a proteção de caminho de backup compartilhado para SDM-EONs, inspirado na proposta de [Zheng et al. 2023]. As curvas rotuladas “PERFECTA” representam o algoritmo proposto em [Oliveira and Da Fonseca 2018], que oferece proteção por meio de  $p$ -cycles FIPP. Todos os algoritmos foram executados sob os mesmos parâmetros de topologia e de tráfego; diferem apenas nas políticas de roteamento, alocação e proteção.

O desempenho do algoritmo RARP é avaliado por meio de métricas que capturam a eficiência de recursos e a diferenciação de serviços. A principal métrica é a BBR (Eq. 2), definida como a razão entre a largura de banda bloqueada e a largura de banda solicitada:

$$BBR = \frac{\sum_i B_i^{\text{bloq}}}{\sum_i B_i^{\text{req}}}. \quad (2)$$

Além disso, analisamos a BBR por classe de serviço, calculando a razão separadamente para cada CoS, o que evidencia a eficácia da política de diferenciação por classes na priorização do tráfego. Também avaliamos o número médio de saltos (*hops*) do caminho primário (WP) e do caminho de proteção (BP). Por fim, avalia-

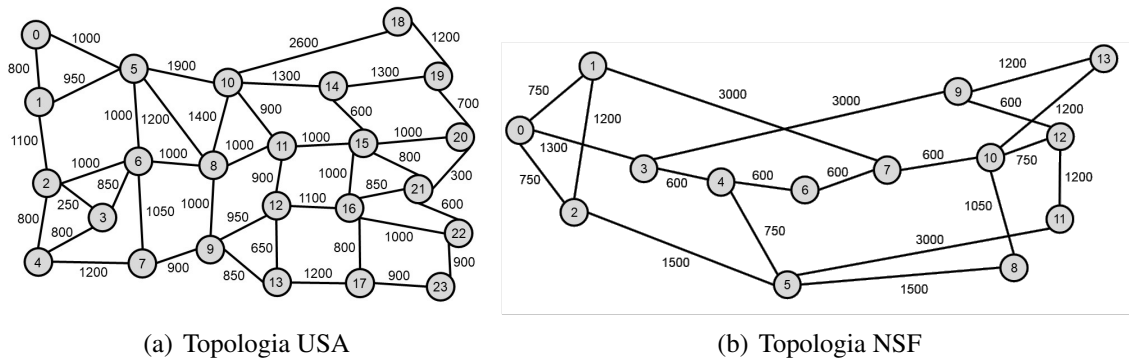


Figura 1. Topologias de Rede Utilizadas

mos a eficiência energética (Mbits/J), quantificando a quantidade de dados transportados por unidade de energia consumida. O consumo energético segue o modelo do FlexGridSim [Moura and Drummond 2018], contabilizando: Computadores Ópticos (OXC's, do inglês *Optical Cross-Connects*), com potência de base de 150 W + 85 W/porta; amplificadores EDFAs, proporcionais ao número de núcleos por enlace; e transponders, cuja potência varia de  $\approx 47$  W (BPSK) a  $\approx 125$  W (64QAM) conforme a modulação.

### 5. Resultados e Análise de Desempenho

A Figura 2 apresenta a BBR para os algoritmos avaliados. Em 500 Erlangs, o RARP atinge BBR de  $\approx 8\%$  (USA) e  $\approx 11\%$  (NSF), representando reduções de  $\approx 37\%$  em relação ao SLA-DP ( $\approx 13\%$  e  $\approx 18\%$ ),  $\approx 69\%$  em relação ao PERFECTA ( $\approx 27\%$  e  $\approx 31\%$ ) e  $\approx 70\%$  em relação ao SBPP ( $\approx 22\%$  e  $\approx 35\%$ ). A superioridade decorre da sinergia entre três mecanismos: (i) modulação adaptativa, que reduz o consumo de FSUs por conexão; (ii) proteção compartilhada via  $p$ -cycles FIPP, que amortiza o *overhead* de proteção entre múltiplos fluxos em vez de reservar capacidade dedicada; e (iii) *protection-as-primary*, que reutiliza capacidade ociosa de proteção para CoS 3, aumentando a vazão efetiva sem reserva adicional. Em contraste, PERFECTA e SBPP aplicam proteção homogênea sem diferenciação, saturando o espectro mais rapidamente.

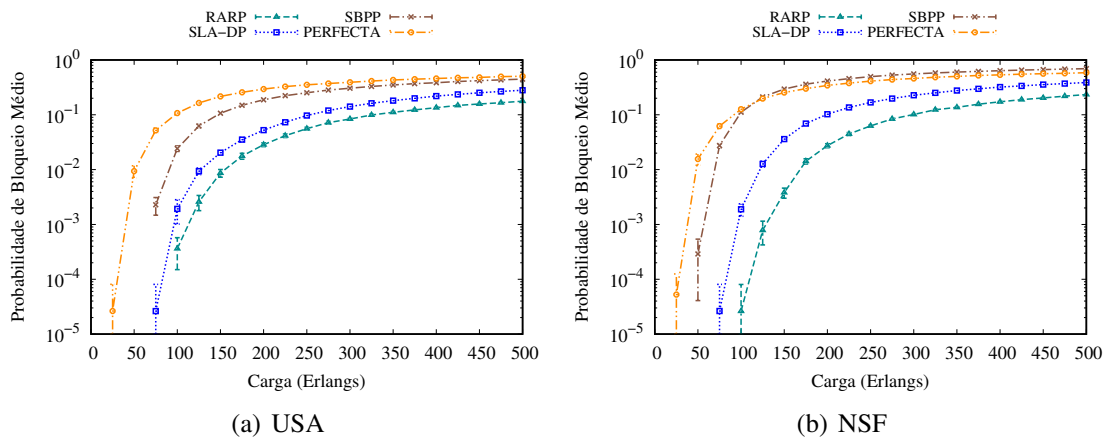
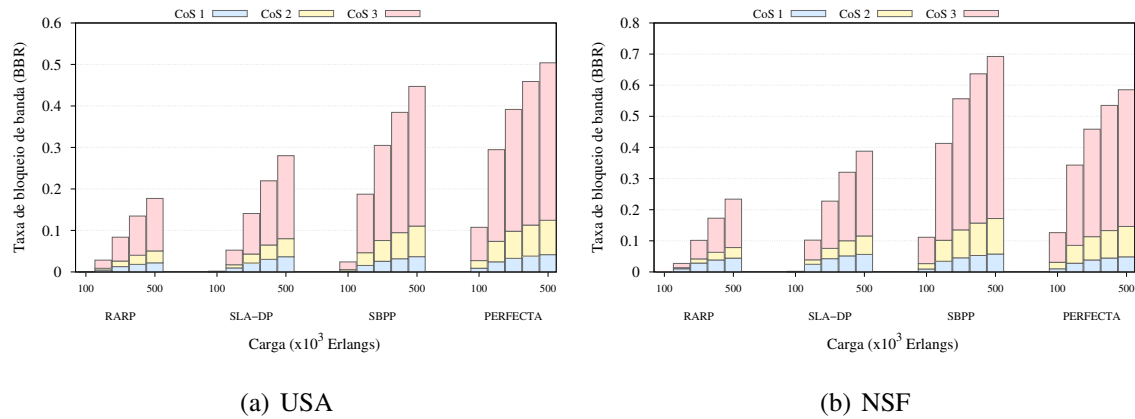


Figura 2. Taxa de bloqueio de banda (BBR)

A Figura 3 evidencia a diferenciação de serviço: o RARP mantém bloqueio de

2,2% (CoS 1), 2,9% (CoS 2) e 12,6% (CoS 3) na USA em 500 Erlangs, transferindo a degradação para a classe de melhor esforço. Essa diferenciação é viabilizada pela cascata de proteção (Algoritmo 3): CoS 1 recebe proteção via  $p$ -cycles ou preempção; CoS 2 busca BP compartilhado em regime *best-effort* e, quando necessário, pode ser aceita sem BP; e CoS 3, embora sem BP dedicado, beneficia-se do *protection-as-primary*. As abordagens de referência, por não diferenciarem classes, distribuem o bloqueio de forma homogênea, penalizando igualmente tráfego crítico e *best-effort*.



**Figura 3. Taxa de bloqueio de banda (BBR) por classe de serviço**

A Figura 4 mostra que o RARP apresenta caminhos primários com mais saltos do que os algoritmos de referência, em especial o PERFECTA. O principal fator é a preferência por caminhos transzonais em CoS 1 (Seção 3): o RARP seleciona intencionalmente rotas em que os nós-extremo pertencem ao  $p$ -cycle mas pelo menos um nó intermediário está *fora* dele, garantindo três caminhos disjuntos e proteção contra duas falhas simultâneas. Esse desvio pelo exterior do ciclo é, por construção, multi-hop. Para CoS 2 e CoS 3, contribui adicionalmente o menor bloqueio do RARP: ao aceitar fluxos que os demais algoritmos rejeitam, o RARP recorre com mais frequência às rotas alternativas do conjunto  $k$ -shortest paths, que possuem mais saltos. A média menor dos algoritmos de referência reflete, portanto, a combinação de ausência de preferência transzonal e bloqueio seletivo das demandas de maior salto.

A Figura 5 mostra que os caminhos de proteção do RARP são mais longos do que os primários. Esse aumento é inerente à proteção compartilhada:  $p$ -cycles percorrem mais nós para formar estruturas em anel, mas protegem múltiplos fluxos simultaneamente, amortizando o *overhead* por fluxo. Analogamente, backups compartilhados devem garantir disjunção de enlaces, exigindo rotas alternativas mais longas. A capacidade efetiva consumida por essas rotas é mínima, dado o compartilhamento, justificando o ganho líquido em BBR. O SLA-DP apresenta backups mais curtos por utilizar SBPP sem  $p$ -cycles; o PERFECTA, que também emprega  $p$ -cycles porém sem diferenciação por CoS, exhibe backups ainda mais longos que o RARP.

Por fim, a Figura 6 apresenta a eficiência energética dos algoritmos avaliados. Na topologia NSF, o RARP atinge  $\approx 212$  Mbits/J em 500 Erlangs, superando SBPP ( $\approx 168$ ), PERFECTA ( $\approx 169$ ) e SLA-DP ( $\approx 146$  Mbits/J). Na topologia USA, o SBPP alcança  $\approx 159$  Mbits/J ante  $\approx 149$  do RARP, embora com BBR de  $\approx 35\%$  frente a  $\approx 8\%$  do

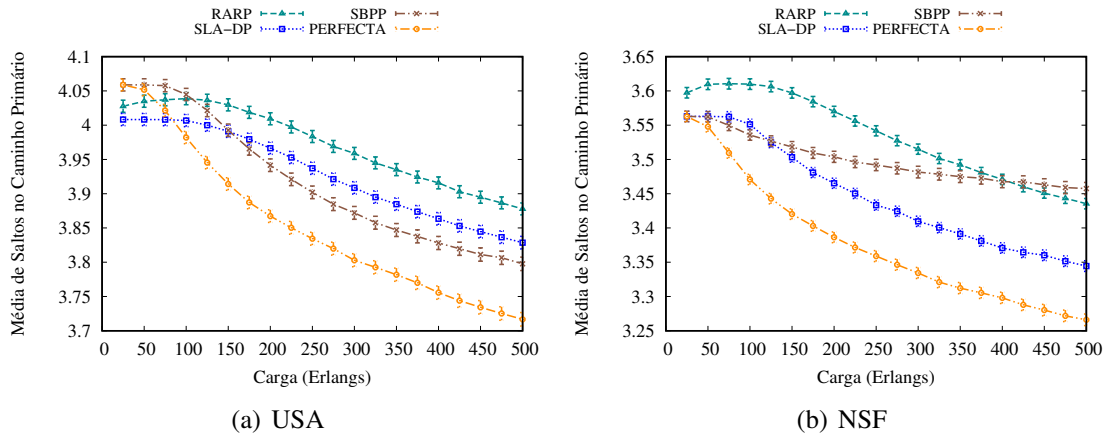


Figura 4. Número de saltos do Caminho Primário

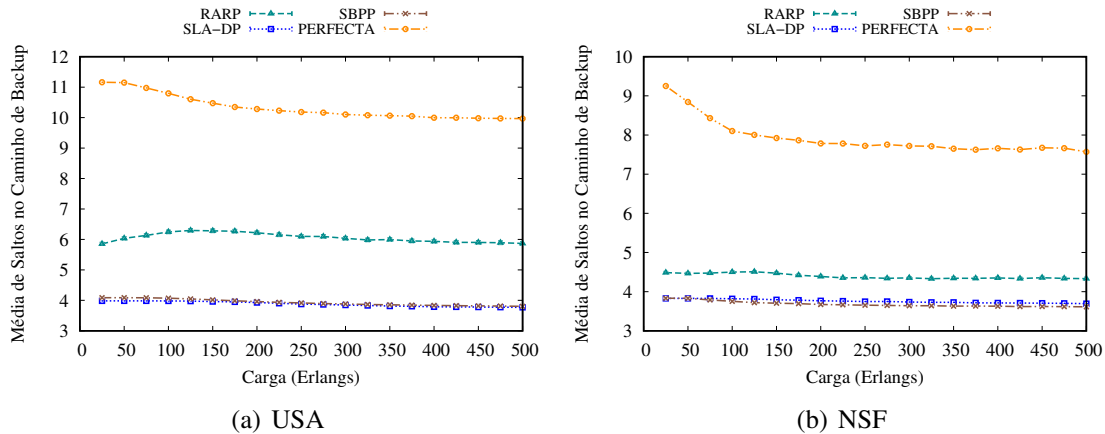


Figura 5. Número de saltos do Caminho de Proteção

RARP: conexões aceitas pelo SBPP percorrem poucos saltos (caminhos mais curtos), consumindo menos energia por fluxo, mas ao custo de bloquear proporcionalmente mais tráfego. O RARP e o PERFECTA aceitam mais tráfego sobre rotas potencialmente mais longas, elevando o consumo total; na USA, onde os caminhos são mais extensos, essa diferença favorece o SBPP na razão dados/energia isolada. Em ambas as topologias, o RARP supera o SLA-DP ( $\approx 103$  e  $\approx 146$  Mbits/J): ao reduzir o bloqueio e reutilizar capacidade de proteção ociosa, o RARP eleva a vazão efetiva sobre uma infraestrutura cujo consumo inclui componentes semi-fixos (OXCs, EDFAs).

## 6. Conclusão

Este trabalho apresentou o RARP, uma estratégia unificada para SDM-EONs que harmoniza requisitos conflitantes de resiliência e eficiência espectral. Ao integrar RMCSA sensível à distância, proteção via  $p$ -cycles FIPP e mecanismos de compartilhamento intensivo (*protection-as-primary* e preempção), o RARP superou a limitação das abordagens tradicionais, que penalizam a capacidade da rede de garantir proteção. Os resultados em topologias reais confirmam que a proposta reduz a taxa de bloqueio global em até  $\approx 41\%$  em relação ao SLA-DP e até  $\approx 70\%$  em relação ao SBPP, além de assegurar

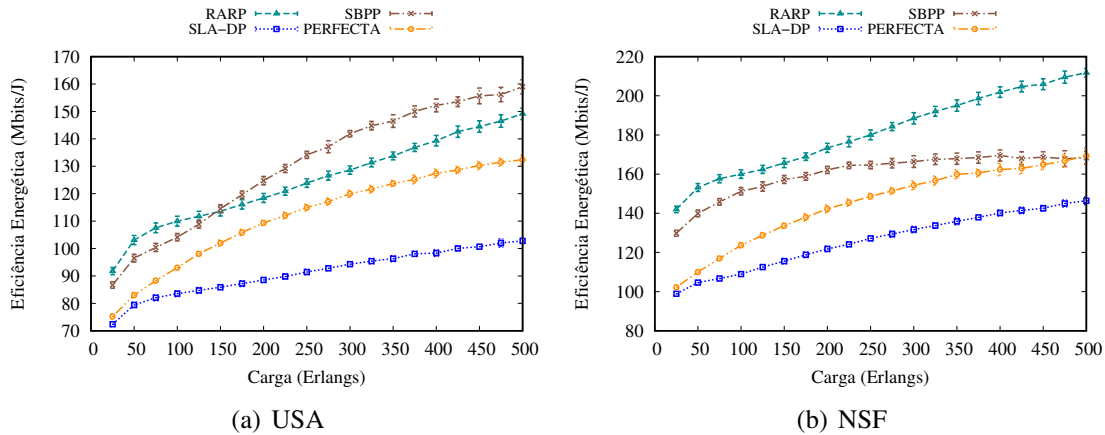


Figura 6. Eficiência Energética

garantias diferenciadas para o tráfego crítico, transferindo a degradação majoritariamente para o serviço de melhor esforço. Conclui-se que a reutilização da capacidade ociosa de proteção traduz-se em ganhos diretos de eficiência energética, consolidando o RARP como uma solução viável para redes ópticas de próxima geração com diferenciação de serviços.

Como trabalhos futuros, pretende-se: (i) realizar estudos de ablação para quantificar a contribuição individual de cada mecanismo (*protection-as-primary*, preempção, FIPP *p*-cycles); (ii) avaliar cenários com injeção explícita de falhas (simples e múltiplas) com parâmetros MTBF/MTTR e métricas de restauração por CoS; e (iii) incorporar restrições de crosstalk internúcleo no modelo de alocação espectral.

## Referências

- Asiri, A. and Wang, B. (2024). Deep reinforcement learning for QoT-aware routing, modulation, and spectrum assignment in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*.
- Calderón, F. I., Lozada, A., Bórquez-Paredes, D., Olivares, R., Davalos, E. J., Saavedra, G., Jara, N., and Leiva, A. (2020). Ber-adaptive rmlsa algorithm for wide-area flexible optical networks. *IEEE Access*, 8:128018–128031.
- Cavalcanti, M. M., Teixeira, G. W., Dinarte, H. A., Almeida Jr, R. C., Boutaba, R., and Chaves, D. A. (2024). Enhancing the efficiency of resilient multipath-routed elastic optical networks: A novel approach for coexisting protected and unprotected services with idle slot reuse. *Sensors*, 24(12):3965.
- Hai, D. T. (2020). On the spectrum-efficiency of QoS-aware protection in elastic optical networks. *Optik*, 202:163563.
- Hosseini, S., De Miguel, I., Merayo, N., De Dios, Ó. G., Lorenzo, R. M., and Barroso, R. J. D. (2024). Enabling service level agreement-differentiated protection in C+L multiband optical networks. *IEEE Open Journal of the Communications Society*.
- Layec, P., Dupas, A., Bisson, A., and Bigo, S. (2018). QoS-aware protection in flexgrid optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 10(1):A43–A50.

- Lopes, R. S., Rosário, D., Cerqueira, E., and Oliveira, H. (2022). Roteamento e proteção de recursos em SDM-EON com ciência da prioridade de tráfego. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, pages 185–192. SBC.
- Mandloi, A. et al. (2024). Routing and dynamic core allocation with fragmentation optimization in EON-SDM. *Optical Fiber Technology*, 83:103658.
- Moura, P. M. and Drummond, A. (2018). FlexGridSim: Flexible grid optical network simulator.
- Munasinghe, K., Dharmaweera, N., de Alwis, C., Wijewardhana, U., and Parthiban, R. (2024). Impairment-aware resource allocation scheme for elastic optical networks with different service priorities. *IET Communications*, 18(3):197–213.
- Oliveira, H. M. and Da Fonseca, N. L. (2018). Protection, routing, modulation, core, and spectrum allocation in SDM elastic optical networks. *IEEE Communications Letters*, 22(9):1806–1809.
- Pinto-Ríos, J., Feris, B. D., Vásquez, C., Saavedra, G., Bórquez-Paredes, D., Jara, N., Olivares, R., Amjad, S., Leiva, A., and Mas-Machuca, C. (2024). Benchmarking framework for resource allocation algorithms in multicore fiber elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 16(11):G11–G27.
- Sarma, A. K., Deka, S. K., and Sarma, N. (2025). Survivable elastic optical network: A survey of failure scenarios and solutions. *Optical Switching and Networking*, page 100823.
- Tang, F., Shen, G., and Rouskas, G. N. (2021). Crosstalk-aware shared backup path protection in multi-core fiber elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 39(10):3025–3036.
- Zhao, C., Li, X., Qi, S., Zhao, Z., Qiao, K., Li, D., Liu, Y., Xin, J., Zhang, L., and Huang, S. (2025). A survey on reliability evaluation of optical networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.
- Zheng, H. et al. (2023). Robust design against network failures of shared backup path protected SDM-EONs. *Journal of Lightwave Technology*, 41(4):1062–1074.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq (proc. #305489/2023-2 ) e com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil, processo Fapesp #2025/03079-4.