

MMRDS-XT: Roteamento Fixo para Mitigação de Crosstalk em SDM-EONs Multi-Núcleos

Uriel P. Mori¹, Jordana B. França¹, Jurandir C. Lacerda Jr.²,
Alexandre C. Fontinele¹, Iallen G. S. Santos³, André C. B. Soares¹

¹ Departamento de Computação – Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Teresina, PI – Brasil

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)
Corrente, PI – Brasil

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)
Piripiri, PI – Brasil

{urielmori, andre.soares}@ufpi.edu.br, jurandir.cavalcante@ifpi.edu.br

Abstract. *The increase in traffic in spatial division multiplexed elastic optical networks (SDM-EONs) leads to challenges like crosstalk and load balancing, which affect transmission quality and resource efficiency. This work presents MMRDS-XT, an evolution of the MMRDS algorithm for fixed routing in multi-core networks, aiming to minimize crosstalk through efficient traffic balancing and optimization of the relationship between route distance and load, using the Div parameter. The comparative evaluation in two real topologies showed a reduction in the blocking probability of up to 87% compared to Dijkstra and 39% compared to MMRDS, highlighting the effectiveness of MMRDS-XT in mitigating crosstalk and optimizing resource allocation.*

Resumo. *O aumento do tráfego em redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (SDM-EONs) traz desafios como o crosstalk e o balanceamento de carga, que afetam a qualidade da transmissão e a eficiência no uso dos recursos. Este trabalho apresenta o MMRDS-XT, uma evolução do algoritmo MMRDS para roteamento fixo em redes multi-núcleos, visando minimizar o crosstalk por meio de um balanceamento eficiente de tráfego e otimização da relação entre distância das rotas e carga, utilizando o parâmetro Div. A avaliação comparativa em duas topologias reais mostrou uma redução na probabilidade de bloqueio de até 87% em relação ao Dijkstra e 39% em relação ao MMRDS, destacando a eficácia do MMRDS-XT na mitigação do crosstalk e na otimização da alocação de recursos.*

1. Introdução

O aumento do tráfego de dados na Internet, impulsionado pela demanda por serviços de alta capacidade como o *streaming*, jogos *online* e Computação em Nuvem, tem desafiado a capacidade de atendimento das redes ópticas tradicionais. Nesse contexto, as Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Networks* - EONs) surgem como uma solução eficiente para atender à esta crescente demanda de tráfego, graças à sua capacidade de alocar dinamicamente recursos espectrais de acordo com as demandas de cada cliente, oferecendo

maior flexibilidade e escalabilidade [Jinno et al. 2009]. Uma variação das EONs podem utilizar a tecnologia de multiplexação por divisão espacial. Tal variação é conhecida como *Space-Division Multiplexed Elastic Optical Networks* (SDM-EONs) e permite o uso de fibras multi-núcleos, o que aumenta a capacidade de atendimento da rede.

Entretanto, para que as redes SDM-EONs possam atender de maneira eficiente às crescentes exigências de banda, é necessário solucionar o problema de roteamento, modulação e alocação de núcleo e espectro (*Routing, Modulation, Spectrum, and Core Allocation* - RMSCA) [Brasileiro et al. 2020]. Entre os subproblemas mais críticos do problema RMSCA está o de roteamento, que define as rotas que os dados seguirão na rede. Diversos algoritmos têm sido desenvolvidos para encontrar caminhos otimizados, sendo o algoritmo de Dijkstra [Dijkstra 1959] amplamente utilizado devido à sua simplicidade e eficácia na identificação do caminho de menor custo em grafos ponderados.

Apesar da simplicidade e do baixo custo computacional do algoritmo de Dijkstra, em cenários de redes ópticas, onde fatores como *crosstalk* inter-núcleos (XT), fragmentação espectral e qualidade de transmissão impactam significativamente o desempenho, abordagens mais avançadas podem trazer benefícios adicionais [Hayashi et al. 2011]. Nesse contexto, o algoritmo *Melhor Entre as Menores Rotas com Decisão por Similaridade* (MMRDS) se destaca por considerar casos em que há múltiplas rotas de menor custo, selecionando-as com base na similaridade [Santos et al. 2013]. No entanto, o MMRDS original foi projetado para redes de grade fixa que usam o modelo de multiplexação *Wavelength Division Multiplexing* (WDM), onde o critério primário era minimizar a quantidade de saltos, tratando rotas com o mesmo número de saltos como equivalentes. As SDM-EONs apresentam novos desafios em comparação às redes WDM de grade fixa, como a heterogeneidade da largura de banda de cada circuito óptico, a necessidade da escolha de um núcleo durante a alocação de recursos e a degradação do sinal óptico causada pelo *crosstalk*.

Neste contexto, este artigo propõe um novo algoritmo de roteamento fixo inspirado no MMRDS e adaptado para o cenário de SDM-EONs multi-núcleos, denominado MMRDS-XT. Assim como no MMRDS, o algoritmo proposto considera a escolha de rotas fixas para cada par (origem, destino) levando em consideração a similaridade entre estas rotas, entretanto, o algoritmo faz um *tradeoff* entre balanceamento de rotas e a distância destas rotas em km. Isto se faz necessário uma vez que o *crosstalk* em redes SDM é impactado tanto pela sobreposição de circuitos quanto pela distância das rotas.

Este trabalho destaca o impacto do roteamento fixo no *crosstalk* em redes SDM-EON, um fator crítico para a eficiência e confiabilidade dessas redes. A alocação inadequada de rotas pode comprometer a utilização do espectro, aumentar a taxa de bloqueio e dificultar a gestão eficiente dos recursos da rede. Nesse cenário, é proposto um novo algoritmo de roteamento fixo *crosstalk avoid*, o MMRDS-XT, que busca otimizar a distribuição do tráfego entre os núcleos, reduzindo os efeitos da interferência inter-núcleo. Este algoritmo é comparado com o Dijkstra e o MMRDS em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos, as causas desses bloqueios e a utilização do espectro nos enlaces da rede, fornecendo *insights* relevantes para estratégias de gerência e operação de redes ópticas.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta os

trabalhos relacionados ao tema deste artigo. A Seção 3 descreve a modelagem de camada física adotada neste estudo. A Seção 4 define o problema da escolha da melhor entre as menores rotas. A Seção 5 descreve o algoritmo proposto. A Seção 6 apresenta a análise de desempenho da proposta. Por fim, a Seção 7 apresenta as considerações finais do artigo.

2. Trabalhos Relacionados

O crescente aumento no tráfego de dados em redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial tem impulsionado o desenvolvimento de algoritmos capazes de otimizar a alocação de recursos e mitigar os impactos de fenômenos físicos, como o *crosstalk*. Diversos trabalhos têm investigado estratégias para abordar esses desafios, seja através de melhorias no roteamento, na escolha de núcleos ou na alocação espectral [Lobato et al. 2019, Takeda et al. 2022].

Em [Santos et al. 2013] é proposto o algoritmo MMRDS para redes ópticas WDM. Sua abordagem baseia-se na identificação de múltiplas rotas candidatas de menor custo entre pares de nós origem-destino (O, D) e na seleção da melhor rota com base em critérios de balanceamento de tráfego. O MMRDS busca reduzir a concentração de tráfego em enlaces específicos, distribuindo as rotas de forma mais uniforme, o que, no contexto das redes WDM, resultava em menores probabilidades de bloqueio. Apesar de ter sido originalmente concebido para redes baseadas em comprimento de onda, estudos recentes indicam que o MMRDS também pode influenciar positivamente o desempenho de redes SDM-EON. No entanto, em SDM-EON, o impacto do MMRDS no *crosstalk* é mais relevante do que seu efeito no balanceamento de tráfego, uma vez que a escolha de rotas influencia diretamente a sobreposição espectral e as distâncias dos circuitos, ambos fatores críticos na modelagem do *crosstalk*.

Já em [Lacerda-Jr et al. 2020] foi apresentado o ABNE (Algoritmo de Balanceamento Inter-Núcleos para Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial), onde é abordado o problema do *crosstalk* inter-núcleos. O algoritmo utiliza uma estratégia de balanceamento para reduzir a interferência entre núcleos adjacentes, distribuindo os circuitos de forma eficiente entre os núcleos disponíveis. Sua proposta combina critérios de alocação de núcleo e espectro, priorizando a escolha de núcleos menos sujeitos à interferência e *slots* de frequência que minimizem a sobreposição espectral. Os resultados apresentados demonstram que o ABNE reduz significativamente a probabilidade de bloqueio de banda e de circuito em redes SDM-EON, especialmente em cenários com alta densidade de tráfego.

Por sua vez, em [Araujo et al. 2021] o ADEIN (Algoritmo de Distanciamento Espectral Inter-Núcleos) é apresentado e expande as estratégias de mitigação de *crosstalk* ao introduzir um modelo de alocação que organiza o espectro em regiões prioritárias e utiliza um mecanismo de pontuação para favorecer a escolha de núcleos que minimizem a interferência. O algoritmo divide o espectro óptico em grupos específicos, evitando a alocação de *slots* iguais em núcleos adjacentes e promovendo o distanciamento espectral entre circuitos.

Os trabalhos mencionados evidenciam os esforços contínuos para mitigar os desafios do *crosstalk* nas redes SDM-EON, cada um contribuindo com abordagens específicas para melhorar a eficiência e a qualidade da alocação de recursos. O MMRDS destaca-se pela sua proposta de balanceamento no roteamento, o ABNE pela distribuição equilibrada

de circuitos entre os núcleos e o ADEIN por sua estratégia avançada de distanciamento espectral. Juntos, esses trabalhos fornecem a base para análises comparativas e para o desenvolvimento de novas soluções que integrem o melhor de suas abordagens, visando aprimorar a resiliência e a eficiência das redes SDM-EON.

3. Limitações da camada física da rede

Devido às limitações da camada física da rede (*Physical Layer Impairments* - PLIs), a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* - QoT) de um circuito óptico se degrada enquanto o sinal se propaga ao longo da fibra e dos equipamentos que compõem a rede. Neste trabalho são considerados três PLIs: *i*) o ruído de emissão espontânea amplificada (*Amplified Spontaneous Emission* - ASE); *ii*) os efeitos não-lineares; e *iii*) o *crosstalk* inter-núcleo.

O ruído ASE e os efeitos não-lineares são classificados como interferências intra-núcleo, pois ocorrem dentro de um mesmo núcleo dentro da fibra [Hayashi et al. 2011]. Além das limitações de origem intra-núcleo, existem limitações de camada física que ocorrem entre dois ou mais núcleos, que são conhecidas como efeitos inter-núcleos. O efeito inter-núcleo mais estudado na literatura é o *crosstalk* inter-núcleos (interferência entre núcleos) [Hayashi et al. 2011].

Uma forma de mensurar o impacto destes efeitos é através da relação sinal-ruído óptico (*Optical Signal to Noise Ratio* – OSNR). A OSNR estabelece uma relação entre a densidade espectral de potência do sinal (*Power Spectral Density* - PSD) do circuito e a PSD do ruído ASE e das interferências não-lineares que o afeta. Neste artigo, o modelo apresentado em [Habibi and Beyranvand 2019] é adotado para mensurar a OSNR dos circuitos e o modelo apresentado em [Lobato et al. 2019] é adotado para calcular o *crosstalk* (XT).

Quando o plano de controle recebe uma requisição para o estabelecimento de um novo circuito, calcula-se um circuito candidato composto por uma rota, formato de modulação, núcleo e o conjunto de *slots* a serem usados. Caso não existam recursos livres para atender a este circuito candidato, a requisição é bloqueada. Existindo disponibilidade de recursos, o plano de controle avalia os níveis de OSNR (que engloba o ruído ASE e os efeitos não-lineares) e de XT para o circuito candidato. Caso a OSNR do circuito candidato não esteja adequada, ocorrerá um bloqueio por ausência de QoT no novo circuito (QoTN). Caso contrário, será analisado o impacto da possível alocação deste circuito candidato nos circuitos já ativos na rede. Se tal impacto afetar algum dos circuitos já estabelecidos de tal forma que a sua OSNR fique abaixo do limiar estabelecido, o circuito candidato sofrerá um bloqueio por ausência de QoT para os outros circuitos (QoTO). Além da verificação de OSNR, observa-se também o XT para o circuito candidato. Caso o valor de XT não seja aceitável, o circuito candidato é bloqueado por XT inadequado (XTN). Por fim, será analisado o impacto do XT oriundo da possível alocação deste circuito candidato nos circuitos já ativos na rede. Se tal impacto afetar algum dos circuitos já estabelecidos de tal forma que a seu XT fique acima do limiar estabelecido, o circuito candidato sofrerá um bloqueio por ausência de XT para os outros circuitos (XTO).

4. Roteamento Fixo

O roteamento fixo é um conceito amplamente utilizado em redes ópticas para a definição prévia das rotas de comunicação entre pares de nós. Essa abordagem apresenta baixo custo computacional, uma vez que as rotas são determinadas durante a fase de planejamento da rede e não sofrem alterações dinâmicas conforme o tráfego varia. No entanto, a escolha das rotas influencia diretamente a distribuição de carga na rede, podendo afetar fatores como balanceamento do tráfego, utilização dos enlaces e ocorrência de interferências, como o *crosstalk*.

O problema 3MC (Melhor Combinação entre as M Combinações de Menores Caminhos) foi originalmente proposto para redes WDM com um único núcleo. Neste contexto não eram considerados os impactos de camada física na rede, portanto, os autores em [Durães et al. 2010] consideravam apenas o número de saltos como custo para cada rota, desconsiderando o comprimento de cada enlace. Esse problema surge em cenários onde há múltiplas rotas com o mesmo menor número de saltos entre um par (origem, destino), exigindo critérios adicionais para a escolha da melhor rota. A seleção adequada entre essas rotas pode impactar diretamente o desempenho da rede, reduzindo congestionamentos e melhorando a distribuição de tráfego.

No contexto das redes SDM-EON, embora o problema 3MC não tenha sido originalmente desenvolvido para esse tipo de rede, desafios semelhantes ocorrem devido à necessidade de balanceamento entre núcleos e à minimização da sobreposição espectral. A alocação ineficiente de rotas pode resultar em fragmentação espectral e aumento do *crosstalk* inter-núcleos, comprometendo a qualidade da transmissão óptica e aumentando a probabilidade de bloqueio de circuitos.

Duas abordagens importantes para resolver o problema 3MC são o algoritmo de Dijkstra e o MMRDS. O algoritmo de Dijkstra, amplamente utilizado por sua simplicidade e baixo custo computacional, determina o caminho de menor custo entre pares origem-destino com base em uma métrica, como distância ou custo de enlace. No entanto, essa abordagem pode levar à concentração de tráfego em determinados enlaces, resultando em congestionamentos e aumentando os efeitos negativos do *crosstalk*.

Por outro lado, o MMRDS amplia a abordagem tradicional ao considerar cenários em que múltiplas rotas possuem o mesmo número de saltos. Ele introduz um critério de similaridade para selecionar a melhor rota entre as opções disponíveis, reduzindo a sobreposição espectral e distribuindo o tráfego de forma mais equilibrada. No entanto, em redes SDM-EON, a equivalência entre rotas em termos de distância é rara, o que limita a aplicabilidade direta do MMRDS original. Esse desafio levou ao desenvolvimento do MMRDS-XT, que introduz um mecanismo de discretização baseado na distância dos enlaces, permitindo um controle mais refinado sobre a seleção das rotas e melhorando o balanceamento entre eficiência espectral e interferência óptica.

5. Algoritmo Proposto

O algoritmo MMRDS foi originalmente projetado para redes WDM, onde o principal critério de otimização era a minimização do número de saltos. Nesse contexto, todas as rotas com a mesma quantidade de saltos eram consideradas equivalentes, permitindo que a decisão final sobre a melhor rota fosse baseada em critérios de similaridade. Embora

essa abordagem tenha se mostrado eficiente para balanceamento de carga, a transposição direta para redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial introduz novas limitações. Em redes SDM-EON, a distância física dos enlaces desempenha um papel fundamental na qualidade de transmissão dos circuitos, pois influencia diretamente a atenuação do sinal e o impacto do *crosstalk* inter-núcleos.

Diante dessas limitações, este trabalho propõe uma evolução do MMRDS, denominada MMRDS-XT, que incorpora um mecanismo de discretização baseado na distância dos enlaces. Em vez de considerar apenas a quantidade de saltos, o MMRDS-XT utiliza um parâmetro ajustável, chamado *DIV*, para segmentar as rotas candidatas em grupos com distâncias similares. Esse parâmetro define a granularidade da discretização ao dividir o comprimento do enlace pelo valor de *DIV*, criando intervalos que determinam quais rotas são consideradas equivalentes para a seleção final. Quanto maior o valor de *DIV*, mais o MMRDS-XT se aproxima do comportamento do MMRDS original, priorizando o balanceamento da rede. Por outro lado, valores menores de *DIV* fazem com que o algoritmo se aproxime do comportamento do algoritmo de Dijkstra, reduzindo o conjunto de rotas candidatas e favorecendo caminhos mais curtos. O MMRDS-XT é descrito passo a passo no Algoritmo 1.

Algorithm 1: MMRDS-XT(Topologia, *DIV*)

```

1 Entrada Topologia da rede, parâmetro de discretização DIV
2 Saída Conjunto de rotas selecionadas para cada par(o,d)
3 GA_dist  $\leftarrow$  CriarGrafoAuxiliar(Topologia, DIV);
4 RotasCandidatas  $\leftarrow$  {};
5 Para cada par(o,d) faça
6   | RotasCandidatas[o,d]  $\leftarrow$  Dijkstra(GA_dist, o, d);
7 Similaridade  $\leftarrow$  {};
8 Para cada par(o,d) faça
9   | Similaridade[o,d]  $\leftarrow$  CalcularSimilaridade(RotasCandidatas[o,d]);
10 ParesOrdenados  $\leftarrow$  OrdenarPares(Similaridade, decrescente);
11 GA_bal  $\leftarrow$  CriarGrafoAuxiliar(Topologia, 0);
12 RotasSelecionadas  $\leftarrow$  {};
13 Para cada par(o,d) em ParesOrdenados faça
14   | MelhorRota  $\leftarrow$  NULL;
15   | CustoMinimo  $\leftarrow$   $\infty$ ;
16   Para cada rota r em RotasCandidatas[o,d] faça
17     | CustoAtual  $\leftarrow$  CalcularCusto(r, GA_bal);
18     Se CustoAtual < CustoMinimo Então
19       | CustoMinimo  $\leftarrow$  CustoAtual;
20       | MelhorRota  $\leftarrow$  r;
21   RotasSelecionadas[o,d]  $\leftarrow$  MelhorRota;
22   Para cada enlace e em MelhorRota faça
23     | IncrementarCusto(GA_bal, e);
24 Retorna RotasSelecionadas;

```

A similaridade entre duas rotas é definida pela proporção de nós em comum em relação ao tamanho da menor rota. Formalmente, para duas rotas A e B, a similaridade é calculada como $\frac{|A \cap B|}{\min(|A|, |B|)}$, onde $|X|$ representa o número de nós na rota X, e $A \cap B$ representa o conjunto de nós comuns às rotas A e B. Observa-se a aplicação disto na linha 8 do Algoritmo 1.

A principal vantagem do MMRDS-XT em relação ao MMRDS original é sua capacidade de encontrar um equilíbrio entre o balanceamento da carga nos enlaces e a preservação de rotas com menor comprimento. Esse equilíbrio é particularmente relevante para minimizar os impactos do *crosstalk* e da fragmentação espectral na rede. Enquanto o MMRDS original pode selecionar rotas significativamente mais longas para evitar sobreposição espectral, o MMRDS-XT ajusta esse comportamento de acordo com o valor de *DIV*, permitindo um controle mais refinado sobre a escolha das rotas. Dessa forma, o MMRDS-XT visa reduzir a probabilidade de bloqueio da rede ao mesmo tempo que melhora a distribuição do tráfego e reduz a interferência entre circuitos ativos.

Neste contexto, a escolha de um valor adequado para o parâmetro *DIV* impacta diretamente o desempenho do MMRDS-XT. Quando $DIV = 1$, há poucas rotas candidatas para cada par, pois dificilmente existirão diferentes caminhos com o mesmo comprimento em quilômetros. Por outro lado, se o *DIV* for muito alto, o MMRDS-XT produzirá a mesma solução do MMRDS, o que pode levar à seleção de rotas mais longas e, consequentemente, a um aumento no *crosstalk*. O valor ideal para o *DIV* é definido na fase de planejamento da rede.

Algorithm 2: calcularDIVsElegiveis(Topologia)

```

1  Entrada Topologia de rede
2  Saída Lista de DIVs elegiveis
3  listaDIVsElegiveis  $\leftarrow \{\}$ ;
4  solucoesConsideradas  $\leftarrow \{\}$ ;
5  SR_MMRDS  $\leftarrow$  SolucaoRotaMMRDS(Topologia);
6  div  $\leftarrow 1$ ;
7  SR_MMRDSXT  $\leftarrow$  SolucaoRotaMMRDSXT(Topologia, div);
8  Adicionar div a listaDIVsElegiveis;
9  Adicionar SR_MMRDSXT a solucoesConsideradas;
10 while SR_MMRDSXT  $\neq$  SR_MMRDS do
11   | div  $\leftarrow$  div + 1;
12   | SR_MMRDSXT  $\leftarrow$  solucaoRotaMMRDSXT(Topologia, div);
13   | Se SR_MMRDSXT  $\notin$  solucoesConsideradas Então
14   |   | Adicionar div a listaDIVsElegiveis;
15   |   | Adicionar SR_MMRDSXT a solucoesConsideradas;
16 Retorna listaDIVsElegiveis;

```

Os experimentos prévios indicam a existência de um valor ótimo para *DIV*, que equilibra eficiência espectral e redução de interferências. Esse valor varia de acordo com a topologia da rede e o algoritmo de alocação de núcleo e espectro empregado. Esse ajuste fino torna o MMRDS-XT uma solução mais flexível e adaptável às especificidades da rede, viabilizando otimizações impossíveis nas abordagens tradicionais.

O Algoritmo 2 é utilizado para limitar o espaço de busca determinando quais valores são elegíveis para o *DIV*. Este algoritmo, considera o valor inicial 1 e adiciona na lista de valores elegíveis todos aqueles que geram soluções de rotas diferentes. O Algoritmo 2 encerra quando a solução de rota gerada pelo MMRDS-XT é igual a do MMRDS. A partir deste ponto não faz mais sentido continuar incrementando o *DIV* pois será sempre gerada a mesma solução. Depois de determinar os valores elegíveis, basta fazer uma busca exaustiva nesta lista para determinar o *DIV* que resulta em menor bloqueio de banda na rede.

Assim como os algoritmos de roteamento fixo Dijkstra e MMRDS, considerados neste estudo, o algoritmo proposto opera em duas fases: planejamento (offline) e operação (online). Na fase de planejamento, os três algoritmos geram uma tabela contendo os pares de nós de origem e destino, juntamente com a rota correspondente para cada par (o, d). Já na fase de operação da rede, quando uma requisição para o estabelecimento de um circuito é recebida, os algoritmos consultam suas tabelas e selecionam a rota previamente calculada para o par (o, d) correspondente.

6. Resultados Numéricos

Para geração dos resultados, foi utilizado o simulador *SLICE Network Simulator* (SNetS) [Lacerda-Jr et al. 2023]. Cada simulação processou 100.000 requisições de circuitos, com carga de tráfego distribuída uniformemente entre os pares de origem e destino. Os resultados, obtidos a partir de 5 replicações utilizando diferentes sementes para geração de variáveis aleatórias, possuem um nível de confiança de 95%. As requisições são geradas de acordo com um processo de Poisson com taxa média λ , e o tempo médio de retenção dos circuitos segue uma distribuição exponencial com média $1/\mu$. A distribuição da carga de tráfego é uniforme entre todos os pares de nós de origem e destino. Foram simuladas requisições de 100, 200, 300, 400 e 500 Gbps, com proporções de 5:4:3:2:1, respectivamente. A carga em Erlangs é definida por $\rho = \lambda/\mu$.

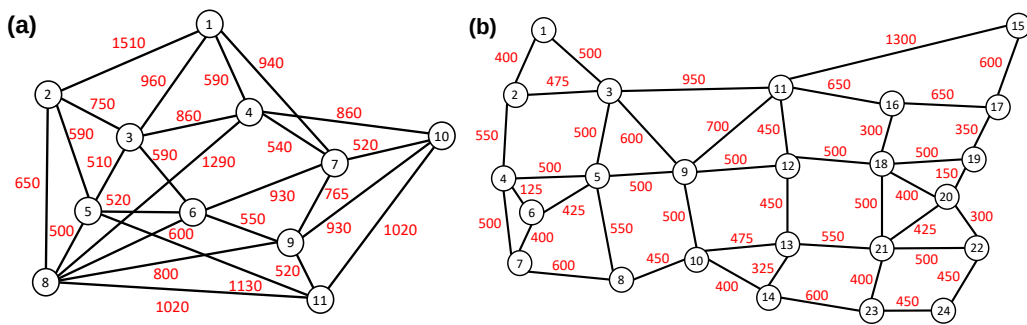


Figura 1. Topologias (a) Cost239 e (b) USA.

As simulações foram realizadas utilizando as topologias USA e COST239, conforme ilustrado na Figura 1. Os enlaces da rede são bidirecionais e formados por 7 núcleos, organizados em um núcleo central circundado por outros 6 núcleos. Cada núcleo possui um espectro óptico independente, dividido em 320 *slots* de 12,5 GHz, com uma banda de guarda de 1 *slot* para reduzir as interferências entre os circuitos adjacentes ativos no espectro. Essas topologias foram selecionadas por representarem cenários distintos de redes ópticas e por serem baseadas em infraestruturas reais, permitindo uma análise mais

fiel do comportamento dos algoritmos em aplicações práticas. A comparação entre essas configurações contribui para uma melhor compreensão do impacto das estratégias de roteamento na alocação espectral e no gerenciamento de recursos em diferentes contextos operacionais.

Foram utilizados cinco formatos de modulação: 4QAM, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM, com limiares de OSNR de 8,95 dB, 13,15 dB, 15,49 dB, 18,51 dB e 21,28 dB, respectivamente. Os limites de *crosstalk* associados a essas modulações são de -19,03 dB, -23,23 dB, -25,57 dB, -28,59 dB e -31,36 dB, também na ordem correspondente [Lacerda-Jr et al. 2023].

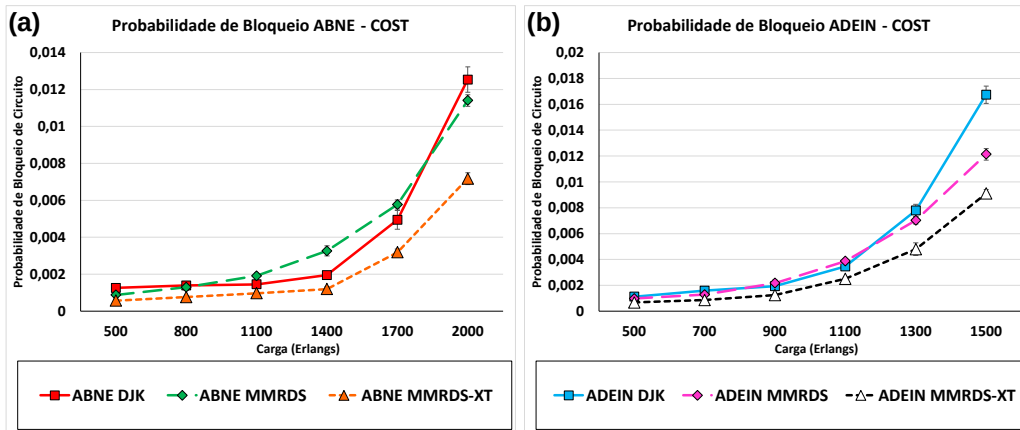


Figura 2. Probabilidade de Bloqueio na Topologia Cost239.

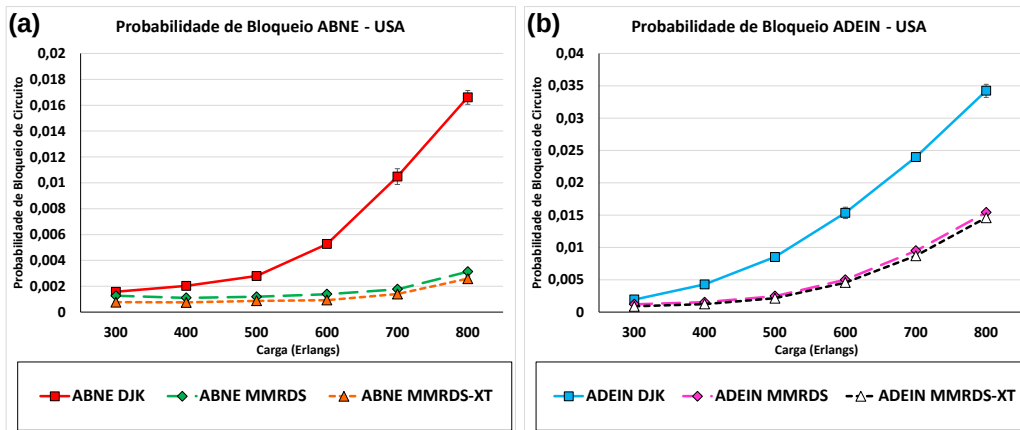


Figura 3. Probabilidade de Bloqueio na Topologia USA.

Os resultados das simulações demonstraram que, em todas as configurações analisadas, o MMRDS-XT apresentou a menor probabilidade de bloqueio de circuito (PBC) em comparação com os algoritmos Dijkstra e MMRDS. Essa tendência foi observada tanto na topologia COST (Figura 2) quanto na topologia USA (Figura 3), e em ambas as implementações dos algoritmos ABNE e ADEIN. Na topologia COST, o MMRDS começou a apresentar uma menor taxa de bloqueio que o Dijkstra quando a rede atingiu cerca de 0.9% de bloqueio no ABNE (Figura 2(a)) e 0.5% no ADEIN (Figura 2(b)). Já na topologia USA, desde os menores níveis de carga, o Dijkstra apresentou um bloqueio significativamente maior que as técnicas baseadas no MMRDS. No ABNE, quando o

Dijkstra alcança 1% de bloqueio, o MMRDS e o MMRDS-XT mantêm valores próximos a 0.2% (Figura 3(a)). No ADEIN, essa diferença também foi perceptível, com o Dijkstra chegando a 1% de bloqueio, enquanto o MMRDS e o MMRDS-XT apresentavam taxas próximas de 0.4% (Figura 3(b)). No entanto, ao contrário do que foi observado na topologia COST, na topologia USA os desempenhos do MMRDS e do MMRDS-XT foram bastante semelhantes.

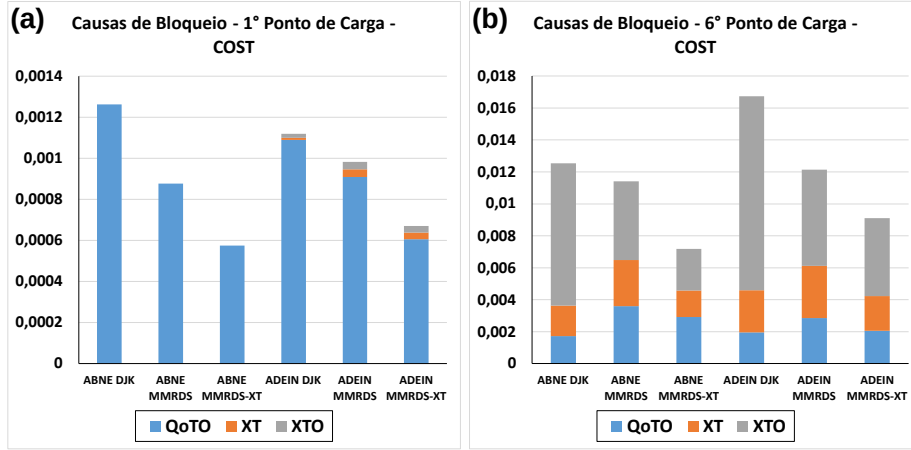


Figura 4. Causas de Bloqueio na Topologia Cost239.

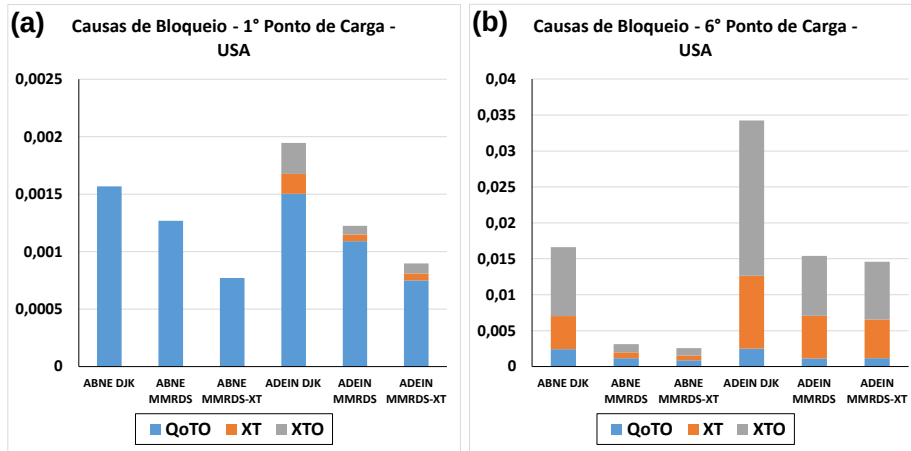


Figura 5. Causas de Bloqueio na Topologia USA.

Para analisarmos o ganho do algoritmo MMRDS-XT em relação aos outros algoritmos foi utilizada a fórmula $G = \frac{(R_{rot} - R_{Div})}{R_{rot}}$, onde R_{rot} representa a PBC no último ponto de carga dos algoritmos ABNE e ADEIN combinados com Dijkstra ou MMRDS, enquanto R_{Div} corresponde à PBC no último ponto de carga do algoritmo MMRDS-XT, considerando o valor de Div que apresentou a melhor performance média em relação ao MMRDS. Na topologia USA, o algoritmo MMRDS-XT obteve um ganho de 87% em relação ao uso do algoritmo de Dijkstra e um ganho superior a 2% em comparação com o MMRDS combinado com o algoritmo ABNE. Já com o algoritmo ADEIN, o MMRDS-XT apresentou um ganho de 57% sobre o algoritmo de Dijkstra e um aumento de 9% em relação ao MMRDS. Na topologia COST239, ao utilizar o algoritmo ABNE com Dijkstra, o MMRDS-XT alcançou um ganho de 48%, enquanto, em relação ao MMRDS, o

aumento foi de 39%. Com o algoritmo ADEIN, o MMRDS-XT obteve um ganho de 50% sobre o algoritmo de Dijkstra e um aumento superior a 30% em relação ao MMRDS.

A análise detalhada das causas de bloqueio revelou que, nos menores níveis de carga na topologia Cost239, o QoTO foi o principal fator dos bloqueios (Figura 4(a)). Entre as três abordagens, o MMRDS-XT apresentou a menor taxa de bloqueios por QoTO, enquanto o MMRDS manteve um valor intermediário e Dijkstra teve a maior taxa desse tipo de bloqueio. No entanto, à medida que a carga da rede aumentava, o *crosstalk* (XT) passou a ser o fator predominante no bloqueio da rede, especialmente o *crosstalk* alheio (XTO, Figura 4(b)). Nesse cenário, os algoritmos baseados no MMRDS e MMRDS-XT reduziram significativamente os bloqueios por XTO quando comparados ao Dijkstra. No ABNE, o MMRDS exibiu uma taxa de XT um pouco maior do que o Dijkstra, mas apresentou um bloqueio por XTO muito menor. O MMRDS-XT, por sua vez, teve um comportamento diferente, com uma taxa de XT próxima à do Dijkstra e inferior à do MMRDS no ABNE. No ADEIN, o MMRDS-XT superou as demais abordagens, reduzindo tanto o XT quanto o XTO.

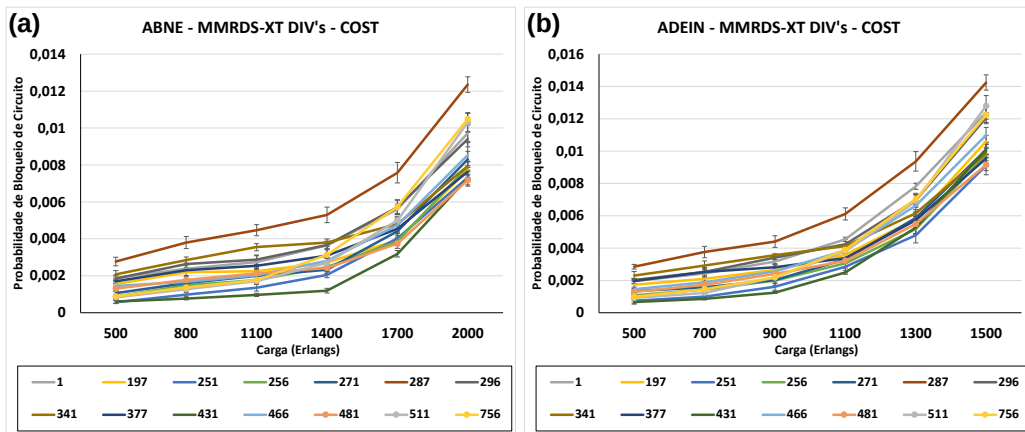


Figura 6. Probabilidade de Bloqueio de cada Div simulado na Topologia Cost239.

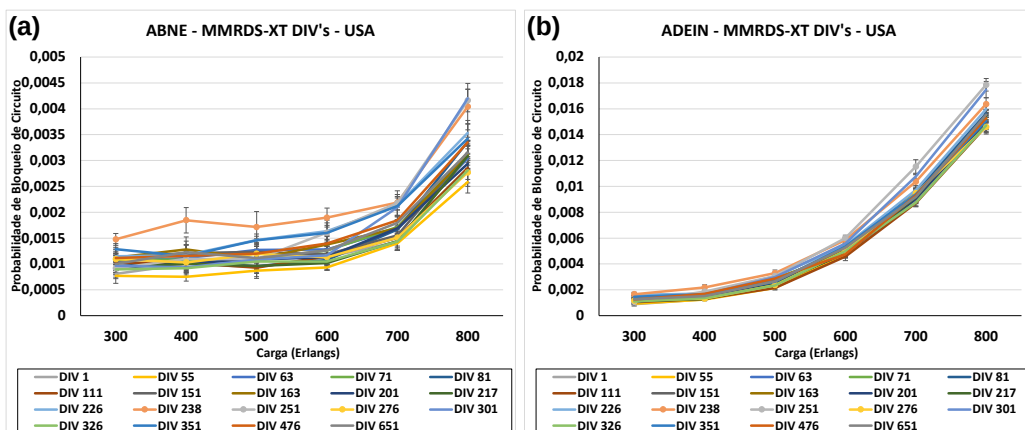


Figura 7. Probabilidade de Bloqueio de cada Div simulado na Topologia USA.

Na topologia USA, o comportamento dos bloqueios foi semelhante ao que ocorreu na COST. O QoTO sendo a principal causa de bloqueio e o MMRDS-XT apresentando as menores taxas de bloqueio tanto com ABNE quanto com o ADEIN. Foi detectado que

no primeiro nível de carga as taxas de XT e do XTO na rede foram maiores no algoritmo ADEIN nesta topologia, já no último nível de carga, o Dijkstra apresentou um bloqueio significativamente maior devido a XT e XTO tanto com o ABNE quanto com o ADEIN, além de manter taxas de QoTO mais elevadas do que as soluções baseadas no MMRDS (Figura 5(b)). Tanto o MMRDS quanto o MMRDS-XT tiveram desempenhos similares no ABNE e ADEIN, com taxas de bloqueio bem menores em relação ao Dijkstra.

A seleção dos valores de DIV analisados neste trabalho foi realizada por meio de um algoritmo que identifica automaticamente os pontos de transição nas soluções de roteamento geradas pelo MMRDS-XT. O algoritmo inicia com $DIV = 1$ e incrementa progressivamente esse valor, armazenando apenas aqueles que resultam em soluções de rota distintas, até que a solução obtida se torne equivalente à gerada pelo MMRDS original. Esse processo resultou na identificação de 168 valores distintos de DIV na topologia COST e 121 na USA. Para reduzir redundâncias, uma segunda etapa do algoritmo avaliou a similaridade das soluções geradas, aplicando uma tolerância de 10% na taxa de similaridade entre as rotas. Com isso, foram selecionados 14 valores de DIV para a topologia COST e 19 para a USA, que foram então analisados por meio de simulações para avaliar seu impacto na alocação espectral e na probabilidade de bloqueio.

A análise do impacto do parâmetro DIV mostrou que, em todas as configurações testadas, quando a rede apresentava um bloqueio superior a 1%, qualquer configuração do MMRDS-XT superava o Dijkstra. Esse comportamento foi observado nas duas topologias e com ambos os algoritmos RMSCA. Foi observado também que o desempenho dos valores de DIV foi consistente entre os diferentes algoritmos na mesma topologia. No cenário da topologia USA com o algoritmo ABNE, o DIV 55 foi o único valor que apresentou a melhor taxa de bloqueio em todos os pontos de carga analisados. Nos demais cenários, ocorreu uma variação no valor de DIV que possuía a melhor taxa de bloqueio em cada ponto de carga analisado.

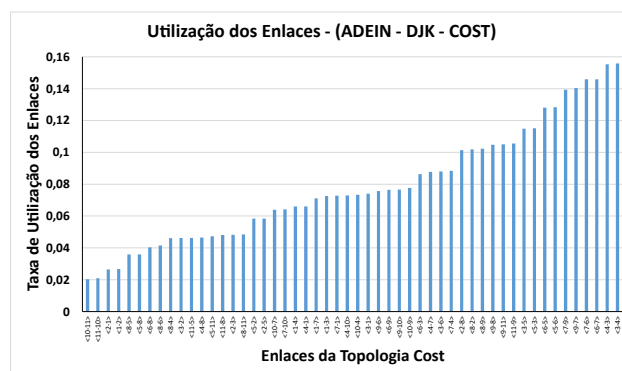


Figura 8. Utilização dos Enlaces na Topologia COST239 (ADEIN-DJK).

Outro aspecto relevante dos resultados foi o balanceamento da utilização dos enlaces das topologias (Figuras 8 e 9). O Dijkstra apresentou um comportamento em que alguns enlaces eram amplamente utilizados enquanto outros permaneciam subutilizados. Esse efeito foi suavizado pelo MMRDS, que promoveu um melhor balanceamento da carga, resultando em uma distribuição mais homogênea dos fluxos. Essa característica impactou diretamente as taxas de bloqueio, uma vez que, no Dijkstra, o congestionamento em alguns enlaces levava a bloqueios prematuros. No MMRDS e MMRDS-XT, a

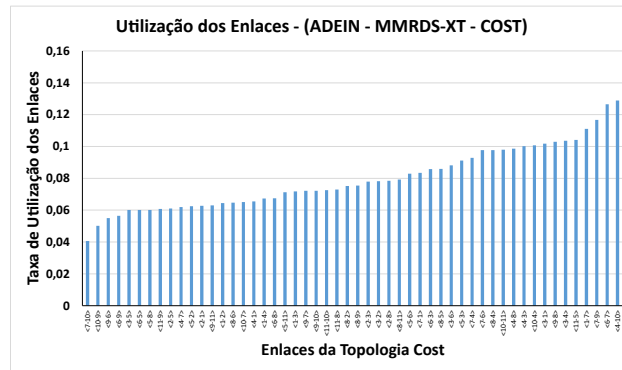


Figura 9. Utilização dos Enlaces na Topologia COST239 (ADEIN-MMRDS-XT).

melhor distribuição dos fluxos permitiu que os enlaces fossem utilizados de forma mais eficiente, reduzindo a probabilidade de bloqueio. No entanto, essa estratégia também teve um impacto nas causas dos bloqueios, uma vez que a redistribuição do tráfego levou a uma maior incidência de QoTo em alguns cenários. Em contrapartida, o MMRDS e o MMRDS-XT reduziram significativamente os bloqueios causados pelo XT e XTO, que foram um fator crítico nos níveis mais altos de carga na rede.

7. Conclusões

Este trabalho apresentou o MMRDS-XT, um novo algoritmo de roteamento fixo para SDM-EONs, baseado no MMRDS original, mas adaptado para minimizar os impactos do *crosstalk* e melhorar o balanceamento de tráfego. O MMRDS-XT introduz um novo parâmetro, *DIV*, que permite ajustar o trade-off entre a distância das rotas e o balanceamento de carga na rede.

Os experimentos conduzidos nas topologias USA e COST239 demonstraram que o MMRDS-XT reduziu significativamente a taxa de bloqueio em comparação com os algoritmos Dijkstra e MMRDS original, especialmente em cenários de alta carga. Os resultados indicaram que o MMRDS-XT diminuiu a probabilidade de bloqueio em até 87% em relação ao Dijkstra e 39% em relação ao MMRDS, destacando-se como uma alternativa promissora para otimizar a alocação de tráfego em SDM-EONs. Além disso, os achados reforçam que a escolha da rota fixa impacta diretamente a eficiência das SDM-EONs, e o MMRDS-XT se mostrou uma abordagem eficaz para mitigar o *crosstalk* e reduzir bloqueios, contribuindo para a evolução das redes ópticas elásticas multinúcleo.

Nos trabalhos futuros, pretende-se avaliar a escalabilidade do MMRDS-XT em redes com um maior número de núcleos e topologias mais complexas. Além disso, será investigada a adaptação do algoritmo para protocolos dinâmicos de roteamento fixo, considerando variações no tráfego ao longo do tempo. Outra possibilidade é a implementação de um ajuste dinâmico do parâmetro *DIV*, permitindo que a própria rede selecione automaticamente o valor ideal para otimizar o desempenho.

8. Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tec-

nológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

- Araujo, P., Lacerda-Jr, J., and Soares, A. (2021). Um novo algoritmo de balanceamento espectral entre grupos de núcleos para redes Ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. In *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Uberlândia, MG, Brasil.
- Brasileiro, I., Costa, L., and Drummond, A. (2020). A survey on challenges of spatial division multiplexing enabled elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, 38:100584.
- Dijkstra, E. (1959). *A note on two problems in connexion with graphs*, volume 1. Numerische Mathematik.
- Durães, G. M., Soares, A., Amazonas, J. R., and Giozza, W. (2010). The choice of the best among the shortest routes in transparent optical networks. *Computer Networks*, 54(14):2400–2409.
- Habibi, M. and Beyranvand, H. (2019). Impairment-aware anycast routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 11(5):179–189.
- Hayashi, T., Taru, T., Shimakawa, O., Sasaki, T., and Sasaoka, E. (2011). Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber. *Optics Express*, 19:16576–16592.
- Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y., and Matsuoka, S. (2009). Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, 47(11):66–73.
- Lacerda-Jr, J., Fontinele, A., Santos, I., Leão, E., Campelo, D., Monteiro, J. A., and Soares, A. (2020). Algoritmo de balanceamento inter-núcleos para redes Ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. In *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Lacerda-Jr, J. C., Cartaxo, A. V., and Soares, A. C. (2023). Novel dynamic impairment-aware algorithm for modulation, core, and spectrum assignment in SDM-EONs. *Optical Switching and Networking*, 51:100763.
- Lobato, F. R., Jacob, A., Rodrigues, J., Cartaxo, A. V., and Costa, J. (2019). Inter-core crosstalk aware greedy algorithm for spectrum and core assignment in space division multiplexed elastic optical networks. *Optical Switching and Networking*, 33:61–73.
- Santos, I. G. S., Duraes, G. M., Giozza, W. F., and Soares, A. C. B. (2013). Um novo algoritmo de roteamento para a escolha da melhor entre as menores rotas. In *Anais do XXXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Brasília, DF, Brasil.
- Takeda, K., Sato, T., Chatterjee, B. C., and Oki, E. (2022). Joint inter-core crosstalk- and intra-core impairment-aware lightpath provisioning model in space-division multiplexing elastic optical networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, pages 1–15.