

Roteamento e Proteção de Recursos em SDM-EON com Ciência da Prioridade de Tráfego

Rafael S. Lopes¹, Denis Rosário¹, Eduardo Cerqueira¹, Helder Oliveira¹

¹Universidade Federal do Pará (UFPA) - Belém, PA, Brasil

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

Abstract. *The growing popularity of applications and devices connected to the Internet has shown that current backbone technologies will not support the expected demand for the coming decades. In this context, the scientific community has widely accepted elastic optical networks with spatial division multiplexing (SDM-EON) as a possible solution. However, one of the main challenges of this type of connection is to ensure network resilience, but with low overhead, given its enormous traffic capacity. This paper presents four routing and resource allocation algorithms for SDM-EON, with traffic priority awareness, which provide resilience with greater spectral efficiency to the network.*

Resumo. *A crescente popularização de aplicações e dispositivos conectados à Internet evidenciou que as tecnologias atuais de backbone não suportarão a demanda prevista para as próximas décadas. Nesse contexto, as redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial (SDM-EON) tem tomado grande aceitação pela comunidade científica como possível solução. No entanto, um dos principais desafios deste tipo de conexão está em garantir resiliência à rede, mas com baixa sobrecarga, dada a sua enorme capacidade de tráfego. Este artigo apresenta quatro algoritmos de roteamento e alocação de recursos para SDM-EON, com ciência da prioridade de tráfego, que proporcionam resiliência com maior eficiência espectral à rede.*

1. Introdução

Com o advento de novas tecnologias de rede que possuem requisitos heterogêneos, a atual configuração do *backbone* da Internet tem se mostrado pouco escalável para provisionar recursos em um futuro próximo. Nesse sentido, pesquisas recentes demonstram a eficácia da utilização de Redes Ópticas Elásticas (EON) em conjunto com a Multiplexação por Divisão Espacial (SDM) para aumentar a capacidade de transferência de dados do *backbone*, tornando possível a alocação de espectro em múltiplos núcleos [Rodrigues et al. 2021]. A ampliação das soluções existentes para o problema de Roteamento, Modulação, Alocação de Espectro e Núcleo (RMSCA) exige a alocação ideal do espectro em SDM-EON. Em tais soluções, deve-se obedecer as restrições de continuidade e contiguidade [Lopes et al. 2021a]. A restrição de continuidade impõe a necessidade de a banda do espectro ser a mesma em todos os enlaces da rota escolhida, evitando a conversão do sinal opto-elétrico nos nós da rede. A restrição de contiguidade, por outro lado, impõe que os slots de frequência alocados sejam contíguos. Além disso, a possibilidade de empregar diferentes níveis de modulação permite altas taxas de transmissão de dados.

Acerca da heterogeneidade do tráfego que passa por essas redes, pode-se observar nas diferentes aplicações seus diversos requisitos por Qualidade de Serviço (QoS),

seja por largura de banda, confiabilidade, latência ou resiliência [Halabi 2020]. No entanto, ainda que esta diversidade de requisitos seja conhecida, a diferenciação do tráfego no provisionamento de recursos ainda é pouco explorada, o que leva à ineficiência e injustiça na alocação de recursos. Mesmo com os avanços tecnológicos que têm beneficiado as redes ópticas nos últimos anos, é importante notar que essas redes ainda são sujeitas a falhas, sejam elas causadas por desastres naturais ou ataques criminosos [Rak et al. 2021]. Em redes ópticas, as falhas mais comuns são as de corte de fibra, correspondendo a 11.000 FIT¹ a cada 10 km de fibra [Lee et al. 2022]. Neste contexto, é primordial o desenvolvimento de mecanismos de resiliência que mantenham a estabilidade da rede em eventos críticos.

Soluções para o problema RMSCA que incluem o provisionamento de resiliência, são de suma importância para o SDM-EON, pela quantidade massiva de dados que podem ser perdidos em caso de falhas de caminho óptico, devido às altas taxas de transmissão nessas redes. Portanto, há a necessidade de desenvolver novos mecanismos que reduzam a sobrecarga da rede e garantam uma recuperação eficiente contra falhas. Dessa forma, este artigo apresenta os resultados da pesquisa feita pelos autores, durante o período de iniciação científica. De maneira geral, a pesquisa aborda o problema de roteamento e alocação de recursos, de maneira eficiente, quando considerado o cenário de resiliência em uma SDM-EON de tráfego heterogêneo. Os resultados obtidos, até o presente momento, demonstram a vantagem da utilização dos algoritmos propostos frente a demais abordagens da literatura.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 traz uma visão geral do estado da arte de SDM-EONs, com ênfase nos problemas de roteamento, alocação de recursos e resiliência. A Seção 3 descreve os algoritmos propostos. Na Seção 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões acerca do trabalho desenvolvido.

2. Trabalhos Relacionados

Poucos estudos sobre SDM-EON trataram de alocação diferenciada de recursos para resiliência de rede. Além disso, não foram encontrados trabalhos que consideram mecanismos de proteção para fornecer diferentes níveis de Qualidade de Proteção (QoP) em SDM-EON através do uso de preempção ou um mecanismo de liberação de recursos para oferecer a requisições de maior prioridade.

Hai, em [Hai 2020], introduziu o conceito de proteção com reconhecimento de QoS, possibilitando separar os fluxos em tráfego de melhor esforço e tráfego *premium*. Essa estratégia dá garantias apenas ao tráfego *premium*, permitindo a rápida recuperação desse tipo de conexão. No entanto, os autores não consideram SDM-EON e não usam uma política de proteção preemptiva para beneficiar os caminhos ópticos com alta prioridade. Vyas, em [Vyas 2021], propuseram quatro heurísticas de provisionamento de recursos em EON, empregando uma combinação de alocação de recursos e divisão de largura de banda. Ele mostra as vantagens de usar a divisão de largura de banda em comparação com a preempção. No entanto, a rede SDM não foi considerada.

Zhu *et al.*, em [Zhu et al. 2021], introduziram um algoritmo de roteamento, modulação e alocação de núcleo e espectro (RMSCA) com tráfego flutuante em SDM-

¹ 1 FIT = 1 falha em 10⁹h

EONs. Os autores investigam a eficiência da alocação de recursos minimizando o impacto do crosstalk na probabilidade de bloqueio. No entanto, o algoritmo proposto não considera QoP, ignorando diferentes prioridades para requisições. Tang *et al.*, em [Tang et al. 2021], consideraram SDM-EONs com proteção de caminho de *backup* compartilhado uma das técnicas mais eficientes para proteger o tráfego de rede. Especificamente, eles abordam o problema de roteamento, núcleo e atribuição de espectro (CARCSA) ciente de crosstalk para minimizar conjuntamente os recursos de espectro de rede usados e o crosstalk total entre núcleos. Eles formulam o problema como um modelo de programação linear inteira (ILP) sujeito a limites estritos de *crosstalk* entre núcleos para cada caminho de luz provisionado. Eles também propõem um algoritmo heurístico baseado em grafos auxiliares (AG) para provisionamento de caminhos de luz.

Com base na análise dos trabalhos relacionados é possível concluir que nenhuma das abordagens é capaz de lidar com o problema de proteção em SDM-EON mantendo baixa sobrecarga da rede. Desta forma, fica claro que o roteamento e alocação de recursos com proteção preemptiva, ciente da prioridade de tráfego, ainda é um problema em aberto.

3. Algoritmos Desenvolvidos

Nesta seção são apresentados os quatro algoritmos de roteamento e alocação de recursos para SDM-EON, desenvolvidos durante o período de iniciação científica. Os algoritmos abordam a proteção em SDM-EON, levando em conta o aumento da eficiência espectral e a diminuição da taxa de bloqueio de banda, em contraste com outras abordagens de proteção da literatura. Os algoritmos apresentados nesta seção serão:

- O QoP-NOODLES (*Diferenciação de QoP para Roteamento, Proteção, Alocação De Núcleo e ESpectro*);
- O ESPECTRO (*RotEamento e Alocação de Recursos com Mecanismo de Proteção Ciente da PRioridade de Tráfego*);
- O INCREASER-QoP (*RoutING Modulation SpeCtRum and CorE Allocation USing DiffERentiation by QoP*);
- O TRAINEE (*RoTeamento e Alocação de Recursos com Proteção Preemptiva, Ciente da Prioridade de Tráfego*);

3.1. Algoritmo QoP-NOODLES

O algoritmo QoP-NOODLES [Lopes et al. 2020], apresentado nesta subseção, é um algoritmo de roteamento e alocação de espectro e núcleo (RSCA) que tem como objetivo elevar a taxa de aceitação e confiabilidade de fluxos com alto nível de relevância. Seu diferencial está na divisão do tráfego em diferentes graus de QoP, elevando a eficiência na utilização de recursos ópticos. A melhor utilização de recursos é resultado da economia quanto à reserva de caminhos extras para *backup*, frente à política de proteção tradicional, que se fundamenta na tentativa de proteção de todos os fluxos, acentuando a curva de escassez dos recursos da rede.

O algoritmo QoP-NOODLES recebe como entrada uma requisição de rede e retorna o estado desta requisição. Ele opera com o reconhecimento de três classes de serviço: (1) alta, (2) média e (3) baixa prioridade. O QoP-NOODLES inicia sua operação com a busca por um caminho primário para a requisição. Caso o algoritmo encontre um caminho primário, ele o aloca e verifica a necessidade de proteção, dada a classe de serviço da requisição. Se a requisição for de Classe de Serviço (CoS) 1 ou 2, o algoritmo

busca por um caminho de proteção dedicada, disjunto ao primário, caso contrário, o algoritmo estabelece a conexão apenas com o caminho primário. Enquanto as requisições de CoS 1 exigem um caminho de proteção para serem estabelecidas (sendo bloqueadas, caso contrário), as requisições de CoS 2 fazem o melhor esforço para encontrarem um caminho de proteção, mas podem ser estabelecidas se não o encontrarem.

A busca por caminho ópticos funciona da seguinte forma. O algoritmo busca por um caminho com slots livres o suficiente para atenderem à demanda da requisição. Caso encontre um caminho disponível, o aloca. Caso contrário, o algoritmo faz uma tentativa de liberação de espectro, que é baseada na verificação das classes de serviço do fluxos que ocupam o caminho óptico candidato, verificando se essas são menores que a CoS da requisição sob roteamento, e se há slots o suficiente para atender à demanda dessa requisição. Se o algoritmo encontrar uma faixa de espectro que atenda aos requisitos de liberação, os fluxos ocupantes desta faixa são interrompidos e o espectro é liberado para nova alocação.

3.2. Algoritmo ESPECTRO

O ESPECTRO [Lopes et al. 2021b] é um algoritmo de RMSCA formulado para atender à demanda de proteção em SDM-EON, em cenários de tráfego heterogêneo, elevando o nível de resiliência da rede em conjunto com maior eficiência espectral. O ESPECTRO é capaz de aprovisionar recursos durante falhas ou sobrecargas na rede, possibilitando a liberação de faixas de espectro ocupadas por conexões de menor relevância, para oferecer a requisições de maior relevância. Além disso, ESPECTRO considera a divisão do tráfego para oferecer resiliência à rede de forma justa, conforme os requisitos de cada conexão, economizando recursos ópticos e aumentando a eficiência energética da rede.

O algoritmo ESPECTRO recebe como entrada uma requisição e tem como saída o estado dessa requisição. Ele divide o tráfego em três diferentes níveis de QoP (Alta, Média e Baixa), para cada uma das CoSs consideradas. O algoritmo inicia sua busca por um caminho óptico utilizando o algoritmo K-Shortest Path (KSP) [Yen 1971], que seleciona um número máximo de K (número inteiro) rotas entre os nós de origem e destino da conexão. Para cada uma das K rotas encontradas, o algoritmo escolhe o melhor nível de modulação, de acordo com a distância da rota, e busca η slots livres em cada núcleo da rota, de acordo com o número de bits por símbolo (característica da modulação escolhida). Caso o algoritmo verifique todas as K rotas e não encontre espectro livre o suficiente para estabelecer a requisição sob roteamento, ele então recorre ao seu mecanismo de liberação de espectro.

Seu mecanismo de liberação de espectro é baseado na busca por faixas de espectro que tenham sido alocadas por requisições de prioridade menor e atendam à demanda requisitada. Caso o algoritmo encontre uma faixa de espectro que atenda à demanda da requisição, possua somente slots livres ou slots ocupados por fluxos de menor prioridade, e atenda aos requisitos de continuidade e contiguidade, os fluxos ocupantes desta faixa são interrompidos e o espectro é liberado para nova alocação.

3.3. Algoritmo INCREASER-QoP

O algoritmo INCREASER-QoP [Lopes et al. 2021a] é um algoritmo de RMSCA para priorização de tráfego em SDM-EON, que considera QoP para otimizar a alocação de recursos de proteção e manter baixa sobrecarga na rede. O algoritmo pode fornecer os recursos necessários para diferentes requisições. Ele utiliza uma combinação das estratégias

de Proteção de Caminho Dedicado (DPP) e Proteção de Caminho de Backup Compartilhado (SBPP) para alocação de recursos. Além disso, com a adoção de um mecanismo de preempção, que permite a retirada de recursos dos fluxos de baixa prioridade para fornecê-los aos fluxos de alta prioridade, o algoritmo INCREASER-QoP pode se beneficiar das vantagens dos mecanismos de proteção e restauração, garantindo a recuperação das conexões e aumentando a eficiência espectral da rede.

Ao receber uma requisição como entrada, o algoritmo INCREASER-QoP realiza a busca pelos caminhos ópticos primário e de proteção, se necessário. Seu roteamento considera três classes de serviço, com diferentes graus de QoP, onde a CoS 1 possui requisito por proteção de caminho dedicado, a CoS 2 exige proteção de caminho compartilhado e a CoS 3 não exige proteção. Para ambos os caminhos ópticos, o INCREASER-QoP utiliza o algoritmo KSP para encontrar as menores rotas entre a origem e destino da conexão, seleciona o melhor nível de modulação e busca por espectro livre. No entanto, no caso do caminho de proteção, o algoritmo primeiro verifica a existência de caminhos ópticos que atendam aos requisitos de preempção, ou seja, caminhos já estabelecidos entre a origem e o destino da conexão, que atendam à demanda por largura de banda, e que tenham sido alocados por requisições de menor prioridade. Caso exista um caminho para possível preempção, o INCREASER-QoP o mapeia para alocação, possibilitando que em caso de falhas no caminho primário da requisição de maior prioridade, o caminho mapeado seja liberado, possibilitando a proteção dessa requisição.

3.4. Algoritmo TRAINEE

O algoritmo TRAINEE foi implementado com o objetivo de aumentar a eficiência no provisionamento de recursos em SDM-EON, de forma que a probabilidade de bloqueio de banda seja reduzida. Isso acontece pois o algoritmo TRAINEE conta com uma política de alocação de recursos justa e ciente da prioridade de tráfego. O algoritmo TRAINEE divide o tráfego da rede em dois graus de prioridade, garantindo a proteção de caminho apenas para a parte do tráfego que possui maior prioridade, o que possibilita a maior economia em relação à alocação de caminhos de proteção. A utilização de um mecanismo de proteção para a resiliência da rede oferece menor tempo de recuperação de conexões, em caso de instabilidade na rede.

O TRAINEE recebe como entrada uma requisição e retorna o estado dessa requisição. A busca por caminhos ópticos (primário e de proteção) considera K menores rotas, onde, para cada rota é feita a seleção do melhor nível de modulação e a busca por espectro livre. Para os caminhos de proteção, considerados para requisições de prioridade alta, o algoritmo prioriza a busca por caminhos ópticos já estabelecidos, onde seja possível a utilização da técnica de preempção. Caso não haja caminho óptico disponível para preempção, o algoritmo então busca por um novo caminho óptico livre. As requisições de prioridade alta só são estabelecidas se possuírem proteção, enquanto as de prioridade baixa não possuem tal exigência.

4. Avaliação de Desempenho

Para avaliar o desempenho dos algoritmos, foi utilizado o simulador de eventos discretos FlexgridSim [Moura and Drummond 2018], onde foram desenvolvidos módulos que permitem simulações com diferentes classes de serviço. Para as simulações foram utilizadas duas topologias baseadas em cenários reais. A primeira topologia é a USA com 24 nós e

43 enlaces, e a segunda topologia é a NSF com 14 nós e 25 enlaces. A geração de tráfego foi realizada através do processo de Poisson, considerando que a CoS 1 corresponde a 8,3% do tráfego, a CoS 2 corresponde a 16,7%, e a CoS 3 corresponde a 75%, para os algoritmos que consideram 3 classes de serviço. Para o algoritmo TRINEE, que considera apenas duas CoS, a razão é de 25% de requisições de CoS 1, e 75%. A razão de tráfego protegido e não protegido atende à tendência da literatura, que estima que apenas 25% do tráfego, em média, possui requisito por resiliência [Layec et al. 2018, Hai 2020].

A rede considerada nas simulações dos algoritmos é constituída por enlaces bidirecionais de fibra óptica, que possuem sete núcleos adjacentes, dispostos no formato hexagonal. Em cada núcleo há um espectro 4 THz, subdividido em 320 slots de 12,5 GHz. Os comprimentos dos enlaces variam de acordo com seus comprimentos nas topologias reais (em km). Os níveis de modulação utilizados nos algoritmos RMSCA foram: o 64QAM, 32QAM, 16QAM, 8QAM, QPSK E BPSK, que são empregados em rotas com os comprimentos máximos de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 km, e com larguras de banda de 75, 62,5, 50, 37,5, 25 e 12,5 Gb/s, respectivamente. Além disso, a arquitetura considerada conta com multiplexadores *add/drop* em cada nó da rede, responsáveis pela adição, bloqueio, remoção e redirecionamento de sinais ópticos, sensíveis à taxa de transmissão requisitada. Outra característica considerada é a transparência da rede óptica, que exclui a necessidade de conversões opto-elétricas em cada nó da rede. Esta característica exige que os caminhos ópticos estabelecidos respeitem as restrições de continuidade e contiguidade espectro e núcleo, durante a alocação de recursos.

Devido à limitação no número de páginas deste artigo, apresentaremos apenas os resultados para a métrica de Probabilidade de Bloqueio de Banda (BBR) por CoS. Apesar disso, outras métricas foram utilizadas para avaliar os algoritmos, bem como Eficiência Energética, Probabilidade de Remoção de Fluxos ou Caminhos Ópticos e Número Médio de Saltos por Caminho Óptico. O BBR por CoS é definido como sendo a razão entre a banda bloqueada para cada CoS e a banda total solicitada durante a simulação.

Na Figura 1 são apresentados os resultados de BBR por CoS para as topologias USA (Figura 1(a)) e NSF (Figura 1(b)). Nota-se que o algoritmo QoP-NOODLES é o que lida melhor com a aceitação de requisições de prioridade alta. Isso ocorre pois ele é o que possui uma abordagem de liberação de espectro mais invasiva, liberando o espectro de um caminho óptico antes mesmo de procurar por espectro livre nas demais das K rotas encontradas. Apesar disso, o algoritmo QoP-NOODLES é o que tem maior BBR dentre os algoritmos apresentados. O algoritmo ESPECTRO, por outro lado, é o que entrega menor probabilidade de bloqueio de banda para requisições de alta prioridade, além de apresentar os menores valores de BBR. O BBR do algoritmo ESPECTRO é menor pois ele considera a modulação adaptativa à distância, durante o roteamento do fluxo, além de que o ESPECTRO busca por caminhos ópticos livres em todas as K rotas encontradas, antes de tentar liberar os recursos. Os algoritmos INCREASER-QoP e TRINEE obtiveram resultados próximos do algoritmo ESPECTRO, no entanto, iniciaram seus bloqueios em cargas maiores e possuem maiores BBRs para requisições de prioridade alta. Isso ocorre pois tanto o algoritmo INCREASER-QoP quanto o algoritmo TRINEE utilizam mecanismos de preempção para possibilitar a liberação de espectro óptico, agindo diretamente sobre caminhos ópticos já estabelecidos, e não mais desconectando várias requisições de uma única vez (abordagem reativa e menos invasiva). Ainda assim, ao se comparar os algoritmos propostos com outras abordagens da literatura, o ganho em performance é

significativo (atingindo até 60% menos BBR).

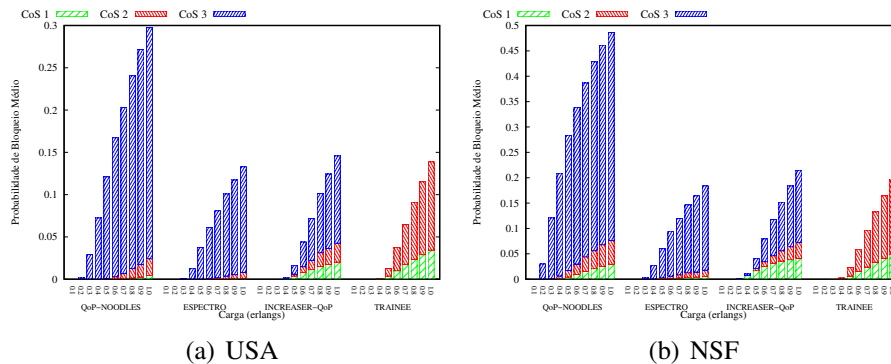


Figura 1. Probabilidade de bloqueio das diferentes CoS

5. Resultados do Trabalho

A Tabela 1 resume o resultado do trabalho de iniciação científica, até o presente momento. Durante esse período, três artigos de conferência foram publicados e um foi submetido. Vale ressaltar que o aluno de iniciação científica é o primeiro autor em todos os artigos.

Tabela 1. Trabalhos publicados como resultados do trabalho de IC

Referencia	Conferência	Qualis	Situação
[Lopes et al. 2020]	WPERFORMANCE 2020	B3	Publicado
[Lopes et al. 2021b]	SBRC 2021	B2	Publicado
[Lopes et al. 2021a]	IEEE Latincom 2021	B2	Publicado
	SBRC 2022	B2	Submetido

6. Conclusões

Neste artigo, foram apresentados quatro algoritmos que utilizam diferentes classes de serviço para fornecer recursos às requisições da rede, reduzindo o consumo de espectro para proteção. Dos algoritmos propostos, um é de RSCA e três são de RMSCA. Tais algoritmos implementam mecanismos de liberação de espectro óptico para aprimorar a alocação de recursos em redes com tráfego heterogêneo. Os algoritmos foram avaliados para diferentes topologias e cargas e comparados entre si. Salientamos que todos os algoritmos foram comparados com outros algoritmos que empregam características parecidas, para proteção e roteamento em artigos previamente publicados. Na avaliação de desempenho, foi possível notar que o propósito dos algoritmos desenvolvidos foi atingido, com redução significativa na probabilidade de bloqueio de banda, frente a outras abordagens da literatura (vide os artigos resultantes), ainda que ofereçam garantia de proteção para o tráfego de alta prioridade.

7. Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo processo nº 2020/05054-5 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências

- Hai, D. T. (2020). On the spectrum-efficiency of QoS-aware protection in elastic optical networks. *Optik*, 202:163563.
- Halabi, W. (2020). Supporting service differentiation in multi-domain multilayer optical networks. *International Journal of Computer (IJC)*, 36(1):1–17.
- 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.
- Lee, H.-S., Yang, C.-L., and Chou, C.-H. (2022). Protection scheme for a wavelength-division-multiplexed passive optical network based on reconfigurable optical amplifiers. *Applied Sciences*, 12(1):365.
- Lopes, R., Rosário, D., Cerqueira, E., and Oliveira, H. (2020). Mecanismo de proteção em sdm-eon ciente da prioridade de tráfego. In *Anais do XIX Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*, pages 13–24. SBC.
- Lopes, R. S., Oliveira, H. M. D. S., and Da Fonseca, N. L. (2021a). Differentiated resource allocation in resilient sdm-eon. In *2021 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pages 1–6. IEEE.
- Lopes, R. S., Rosário, D., Cerqueira, E., Villas, L., and Oliveira, H. (2021b). Roteamento e alocação de recursos com mecanismo de resiliência ciente da prioridade de tráfego. In *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 560–573. SBC.
- Moura, P. M. and Drummond, A. (2018). Flexgridsim: Flexible grid optical network simulator.
- Rak, J., Girão-Silva, R., Gomes, T., Ellinas, G., Kantarci, B., and Tornatore, M. (2021). Disaster resilience of optical networks: State of the art, challenges, and opportunities. *Optical Switching and Networking*, 42:100619.
- Rodrigues, E., Figueiredo, G. B., de Santi, J., and Oliveira, H. (2021). Roteamento e alocação de núcleo e espectro com ciência de fragmentação e crosstalk em sdm-eon. In *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 546–559. SBC.
- 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.
- Vyas, U. (2021). Deterministic lightpath scheduling and routing in elastic optical networks.
- Yen, J. Y. (1971). Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, 17(11):712–716.
- Zhu, R., Samuel, A., Wang, P., Li, S., Oun, B. K., Li, L., Lv, P., Xu, M., and Yu, S. (2021). Protected resource allocation in space division multiplexing-elastic optical networks with fluctuating traffic. *Journal of Network and Computer Applications*, 174:102887.