

Algoritmos de Roteamento para Reserva de Recursos em Redes Ópticas Elásticas.

Edson Rodrigues¹, Denis Rosário¹, Eduardo Cerqueira¹, Helder Oliveira¹

¹Universidade Federal do Pará (UFPA)
Rua Augusto Corrêa 01, 66075-110 – Belém – PA – Brasil

edson.rodrigues@itec.ufpa.br, {denis, cerqueira, heldermay}@ufpa.br

Abstract. *The core state of the network alerts to the need for changes to deliver users the performance they expect from high-speed networks. As a solution for the expansion of the network, the implementation of Spatial Division Multiplexing Elastic Optical Networks is discussed, which introduces a new problem for the management of resources in this network. This article summarizes the contributions of the scientific initiation work, where four routing and resource allocation algorithms for Next Generation Internet were proposed. The algorithms work in the allocation of network resources to transport a greater amount of data than in current optical networks.*

Resumo. *O estado núcleo da rede alerta sobre a necessidade de mudanças para que seja entregue aos usuários o desempenho que se espera de redes de alta velocidade. Como solução para a expansão da rede é discutida a implantação das Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial, que introduz um novo problema para a gestão de recursos nessa rede. Neste artigo, resumem-se as contribuições do trabalho de iniciação científica, onde foram propostos quatro algoritmos de roteamento e alocação de recursos para Internet de Nova Geração. Os algoritmos atuam na alocação de recursos da rede para transporte de maior quantidade de dados que nas redes ópticas atuais.*

1. Introdução

Houve nos últimos anos um aumento na quantidade de dados que trafegam na Internet devido ao crescimento de serviços e usuários conectados. No entanto, é previsto que em breve a qualidade dos serviços seja impactada dada a capacidade do núcleo da rede atual, que não será capaz de suprir as demandas. Neste contexto, surgem as Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial (*Space Division Multiplexing Elastic Optical Networks – SDM-EONs*) [Oliveira and da Fonseca 2019].

A expansão da capacidade da rede pela utilização de fibras multinúcleo insere complexidade no roteamento, pois devem ser respeitadas as restrições de continuidade, que deve manter o mesmo conjunto de *slots* alocados durante todo o percurso, e a restrição de contiguidade, onde os *slots* devem ser alocados em sequência dentro de um enlace [Brasileiro et al. 2019]. Modulações são utilizadas para potencializar a transmissão, no entanto, a atenuação do sinal pela distância e interferências externas tornam complexa a escolha da modulação, dando origem ao problema de Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro e Núcleo (*Routing, Modulation Spectrum, and Core Assignment – RMSCA*).

Outro problema discutido é a fragmentação, decorrente das sucessivas alocações e remoções de conexões, criando pequenos espaços entre as transmissões que não são

suficientes para alocar próximas requisições. Para evitar a subutilização de *slots*, a estratégia de alocação multicaminho é adotada, dividindo a conexão em dois caminhos com demanda distribuída entre eles, permitindo alocar em espaços menores. Para essas conexões, existe o problema do atraso diferencial, que é a diferença no tempo de chegada entre os caminhos da transmissão. Para que o multicaminho seja praticado, a diferença de tempo de chegada entre os caminhos deve estar dentro do limite aceitável.

Este artigo resume os resultados do trabalho de iniciação científica (TIC) desenvolvido pelos autores. O trabalho investiga o problema de RMSCA com diferentes mecanismos de roteamento e gerenciamento do espectro. Os resultados alcançados demonstram que as propostas possuem melhores resultados que algoritmos propostos na literatura. Foram propostos e avaliados quatro algoritmos para o roteamento e alocação de recursos em SDM-EONs, a saber: *i*) Novo algoritmo RMSCA chamado TOURISM (Routing Modulation Spectrum and Core Mapping Scheme in SDM-EON), que utiliza o mapeamento do espectro para encontrar o melhor caminho para suprir a demanda, aumentando a taxa de requisições aceitas. *ii*) Novo algoritmo RMSCA chamado PANORAMIC (Hybrid Routing, Modulation, Spectrum and Core Allocation based on the Mapping Scheme in SDM-EONs), que emprega o multicaminho para aumentar o número de conexões estabelecidas na rede e reduzir a taxa de fragmentação pela utilização de recursos antes ociosos. *iii*) Novo algoritmo RMSCA chamado REGARD (Roteamento e Alocação de Núcleo e Espectro com Ciência de Fragmentação e Crosstalk em SDM-EON), que utiliza ciência de *crosstalk* e fragmentação para alocar o melhor conjunto de recursos, mantendo *crosstalk* e fragmentação em níveis adequados. *iv*) Novo algoritmo RMSCA chamado RUPERT (Routing Modulation Spectrum and Core Fragmentation Aware), que emprega o mapeamento de espectro e analisa o estado dos enlaces antes de selecionar o caminho óptico. Fazem parte das considerações do algoritmo o *crosstalk* e a fragmentação para seleção do caminho menos impactante na rede.

As contribuições do trabalho avançam o estado da arte de SDM-EONs e em roteamento de redes ópticas. A relevância dessas contribuições é, portanto, possibilitar a evolução da tecnologia de SDM-EONs para o aumento da capacidade de transmissão da Internet e dotar a rede de robustez, permitindo novas aplicações com grandes demandas.

2. Trabalhos Relacionados

O surgimento das SDM-EON motivou inúmeros trabalhos para solucionarem o problema RSCA, no entanto, somente recentemente passaram a considerar modulação adaptativa e poucos desses trabalhos combinam outras estratégias para melhorar alocação de recursos.

Os autores [Moura and Da Fonseca 2018] propuseram quatro algoritmos RMSCA baseados em uma abordagem de processamento de imagem. Foram utilizados dois algoritmos de processamento de imagens para reduzir a complexidade computacional, e que foram combinados a políticas de melhor ajuste para reduzir o desperdício de espectro. As modulações foram aplicadas com base na distância da transmissão e *crosstalk*. No artigo não são empregadas técnicas de fragmentação e nem roteamento multicaminho.

Os autores [Yin et al. 2019] introduziram um algoritmo para sobrevivência em SDM-EONs com ciência de *crosstalk* e multicaminho. Foi utilizada a abordagem de super-canais, que economiza custos pela redução dos *slots* necessários. Para encontrar as rotas foi utilizado o algoritmo de Bhandari. Em seguida o *crosstalk* é verificado e, caso o nível não seja aceitável, a conexão é negada. Os autores não consideraram atraso diferencial, métricas de fragmentação e modulação adaptativa.

Os autores [Yousefi et al. 2020] introduziram duas métricas: tempo de retenção e coeficiente da métrica variante. Baseado nessas métricas, eles propuseram três algoritmos RSCA para resolver o problema da fragmentação e reduzir o bloqueio de banda. Os algoritmos encontram áreas retangulares no espectro possíveis para alocação por meio do algoritmo k menores caminhos, considerando a menor fragmentação. Modulação e multicaminho não foram utilizados nos algoritmos.

Os autores [Ujjwal et al. 2021] propuseram um esquema de desfragmentação ótimo que divide as conexões para diminuir a fragmentação e aumentar o número de transmissões na rede. O caminho é encontrado por meio do algoritmo k menores caminhos e a política de alocação *FirstFit* (FF). Para conexões que não são estabelecidas nesse modelo, é utilizado o esquema de desfragmentação. A multiplexação por divisão espacial não é considerada e somente uma modulação é utilizada para as transmissões.

Os trabalhos presentes na literatura abordam o roteamento em SDM-EONs, adotando ciência de *crosstalk* e fragmentação, modulação adaptativa e roteamento multicaminho, no entanto, poucos trabalhos agrupam essas estratégias em um algoritmo.

3. Algoritmos Desenvolvidos

Esta seção apresenta quatro algoritmos de roteamento e alocação de recursos em SDM-EON chamados TOURISM, PANORAMIC, REGARD e RUPERT. Os algoritmos lidam com o problema RMSCA, com ênfase no aumento de conexões estabelecidas na rede, com considerações para os problemas de fragmentação e o *crosstalk* entre núcleos.

3.1. Modelo de Rede

Foi adotado um modelo de rede óptica com utilização de multiplexadores ópticos reconfiguráveis flexíveis add/drop capaz de alternar entre comprimentos de onda e granularidade com transceptores de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (*MIMO*). Também foi considerada a utilização de Transponders Multi-Fluxos (*MFTs*) para dividir em diversos sub transceptores para facilitar a alocação.

A topologia de rede é composta por fibras bidirecionais com sete núcleos dispostos de forma hexagonal. Cada núcleo contém 320 *slots* de frequência com capacidade de 12,5 Gbps cada. Foram utilizados valores reais em quilômetros para o comprimento dos enlaces. Foram mantidas as restrições de continuidade e contiguidade, não sendo permitida a troca de *slots* e núcleos durante todo o percurso. A modulação aplicada é associada à distância de transmissão. Além disso, o *slot* Filtro de Banda de Guarda (*FGB*) é sempre alocado para separar os conjuntos de *slots* de transmissões distintas.

3.2. Mapeamento

Os algoritmos TOURISM, PANORAMIC e RUPERT adotam o mecanismo de mapeamento de espectro, onde um conjunto de *slots* é verificado e representado na matriz binária de mapeamento como um único *slot* que representa o estado do conjunto, ou seja, se é suficiente para alocar a demanda ou não. Caso o conjunto de *slots* seja suficiente, o resultado do *slot* correspondente na matriz de mapeamento é verdadeiro; caso o conjunto não seja suficiente para a demanda, o *slot* na matriz de mapeamento é falso. Ao final, a matriz de mapeamento é retornada como resultado do algoritmo de mapeamento.

O mapeamento está representado na Figura 1. O conjunto de *slots* circulados pela linha vermelha é representado na matriz de mapeamento como disponível, visto que o

conjunto todo pode alocar a requisição. Enquanto que o conjunto marcado de azul não tem todos os *slots* disponíveis, como sinalizado na matriz auxiliar. O conjunto de *slots* marcados em verde está em uso, resultando na matriz de mapeamento como indisponível.

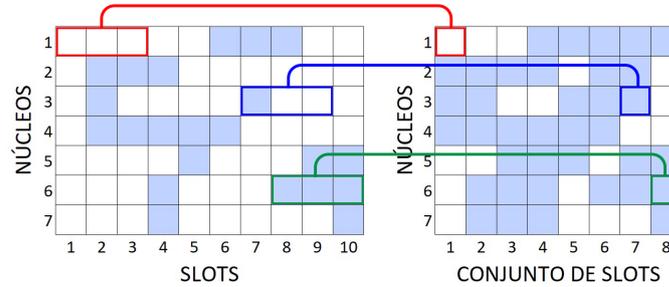


Figura 1. Espectro do enlace da Matriz de Mapeamento.

3.3. Algoritmo TOURISM

O TOURISM [Rodrigues et al. 2020b] é um algoritmo RMSCA que utiliza o mapeamento para encontrar as rotas com recursos mais adequados para o estabelecimento de conexões na rede, para reduzir as requisições bloqueadas e tornar o uso de recursos mais eficiente.

O algoritmo TOURISM recebe o tráfego da rede como entrada e retorna o caminho óptico para a requisição. Primeiro, o número de *slots* é calculado baseado na modulação considerada. Em seguida, o algoritmo de mapeamento gera matrizes binárias que armazenam grafos para cada um dos *slots*. Nos grafos resultantes, a rota adequada para a transmissão é selecionada. Caso o caminho seja encontrado, a requisição é então aceita na rede, caso contrário, o processo é feito novamente para outra modulação. Se todas as modulações foram testadas e o caminho não foi encontrado, a requisição é bloqueada.

3.4. Algoritmo PANORAMIC

O PANORAMIC [Rodrigues et al. 2020a] é um algoritmo RMSCA que visa aumentar o número de conexões estabelecidas e melhorar o uso do espectro. São adotados o mapeamento e multicaminho para as requisições não alocadas em caminho único.

O conjunto de requisições é a entrada para o algoritmo e então o roteamento é iniciado. Primeiramente, a modulação é selecionada e o número de *slots* é calculado. Após, o mapeamento é executado. O espectro é mapeado em matrizes binárias e armazenado em grafos para cada *slot*. O caminho é buscado nos grafos para que a conexão seja estabelecida. Caso um caminho seja encontrado, a requisição é aceita, senão, processo semelhante é tomado para roteamento em multicaminho, onde o delay diferencial é considerado. Ao final, se o caminho não foi encontrado de forma alguma, a requisição é bloqueada.

3.5. Algoritmo REGARD

O REGARD [Rodrigues et al. 2021a] é um algoritmo RMSCA para SDM-EONs. O algoritmo define rotas de maneira *offline* e calcula o *crosstalk* e fragmentação para definir o melhor conjunto de recursos a serem alocados.

O conjunto de requisições é entrada para o algoritmo. Os caminhos entre dois nós são calculados previamente pelo algoritmo K menores caminhos, ordenados pela

distância. Quando uma requisição chega, o conjunto de caminhos ponto a ponto é verificado. A modulação é selecionada de acordo com a distância total e o número de *slots* é calculado. Fragmentação e *crosstalk* são verificados e a região que causa menor impacto em outras transmissões é selecionada. O processo é repetido por todos os caminhos encontrados. Caso o caminho seja encontrado, a requisição é aceita, senão, é bloqueada.

3.6. Algoritmo RUPERT

O RUPERT [Rodrigues et al. 2021b] é um algoritmo RMSCA para SDM-EONs sob diferentes cargas, cenários e topologias. O algoritmo alia o mapeamento à utilização de estimativas de *crosstalk* e fragmentação para definir o melhor caminho para a transmissão.

O algoritmo executa o mapeamento para cada modulação e, em seguida, o número de *slots* é calculado. O mapeamento armazena as matrizes binárias em grafos que serão utilizados para a busca de rotas. Além de verificar os recursos da rede, o cálculo de fragmentação e *crosstalk* são essenciais na escolha do caminho para a requisição, sendo selecionado o núcleo que menos afeta outras transmissões. Esse processo se repete para todas as modulações. Caso o algoritmo não encontre caminho ou o nível de *crosstalk* seja ultrapassado, a requisição é bloqueada.

4. Avaliação

Nesta seção, são apresentados os principais resultados para os algoritmos propostos e esses são comparados a outros trabalhos da literatura que performam proposta semelhante com parâmetros e cenários comparáveis.

4.1. Parâmetros de Simulação

Para análise de desempenho dos algoritmos foram empregadas simulações na ferramenta Flexgridsim [Moura and Drummond]. Requisições seguiram o processo de Poisson e foram distribuídas uniformemente entre os nós da rede, com 10 replicações para cada cenário com carga variando a cada 100 Erlangs. Foram geradas 100.000 requisições para cada simulação, com intervalo de confiança de 95%. Foram empregadas sete tipos de requisições com 25/50/125/200/500/750/1000 Gbps. A fibra utilizada é composta de sete núcleos arranjados de forma hexagonal, com 320 *slots* de frequência. As topologias usadas foram USA e NSF (Figura 2). O número representa a distância em quilômetros.

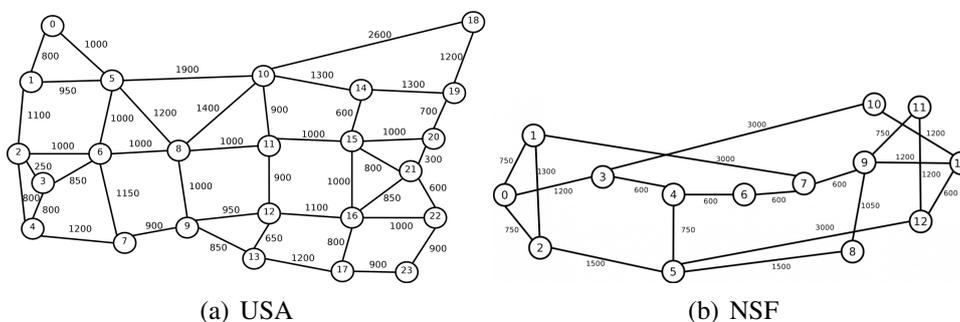


Figura 2. Topologias USA e NSF.

Devido as restrições de espaço, apenas a métrica BBR é apresentada. No entanto, diversas métricas foram utilizadas na avaliação, isto é, Taxa de Bloqueio de Banda (BBR),

Crosstalk por Slot (CpS), Eficiência Energética (EE), Taxa de Fragmentação (FR) e Porcentagem de Formatos de Modulação (MFP). O *BBR* é calculado pela soma de banda bloqueada (α), dividido pela soma de banda das requisições (β) pelo mesmo período. O *BBR* é definido pela equação (1).

$$BBR = \frac{\sum \alpha}{\sum \beta} \quad (1)$$

4.2. Resultados da Simulação

Nesta seção mostram-se os resultados dos algoritmos para a taxa de bloqueio de largura de banda, principal métrica de desempenho da rede. Apresentamos e discutimos os resultados dos algoritmos TOURISM, PANORAMIC, REGARD e RUPERT para as topologias NSF e USA. Os três últimos algoritmos são comparados por possuírem parâmetros de simulação parecidos, enquanto TOURISM é comparado a outros algoritmos da literatura.

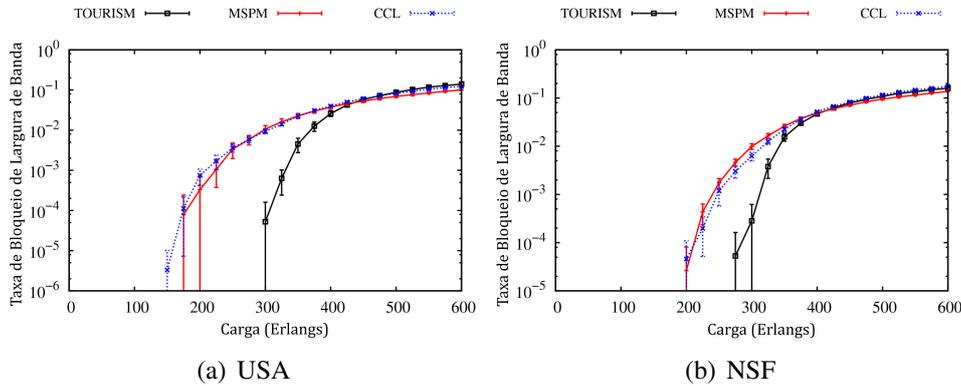


Figura 3. Taxa de bloqueio de largura de banda para as topologias USA e NSF.

Os resultados de TOURISM foram comparados aos resultados dos algoritmos CCL [Moura and Da Fonseca 2018] e MSPM [Wan et al. 2012]. O algoritmo CCL emprega um algoritmo de processamento de imagem para identificar o espectro disponível à demanda. Por outro lado, o algoritmo MSPM usa o algoritmo de Dijkstra para calcular a rota e seleciona a modulação, espectro e núcleo. Nos algoritmos MSPM, o roteamento é tratado de forma independente e o problema MSCA considera a distância total.

A Figura 3 mostra os resultados para a Taxa de Bloqueio de Largura de Banda. Para topologia USA, os algoritmos MSPM e CCL bloqueiam requisições sob carga de 150 Erlangs, enquanto TOURISM bloqueia sob a carga de 300 Erlangs. Para topologia NSF, MSPM e CCL bloqueiam requisições a partir de 200 Erlangs e TOURISM bloqueia a partir 275 Erlangs. TOURISM apresenta resultados superiores para ambas as topologias. Os baixos valores de BBR de TOURISM demonstram o benefício de realizar o mapeamento ao escolher a rota, a modulação, o espectro e o núcleo juntos nos algoritmos RMCSLA.

A Figura 4 exibe os resultados da Taxa de Bloqueio de Largura de Banda para os algoritmos PANORAMIC, REGARD e RUPERT. Para topologia USA, PANORAMIC bloqueia requisições a partir de 600 Erlangs, enquanto REGARD e RUPERT bloqueiam a partir de 200 erlangs. Para a topologia NSF, PANORAMIC bloqueia requisições em 550 Erlangs, REGARD bloqueia em 200 erlangs e RUPERT bloqueia em 250 erlangs.

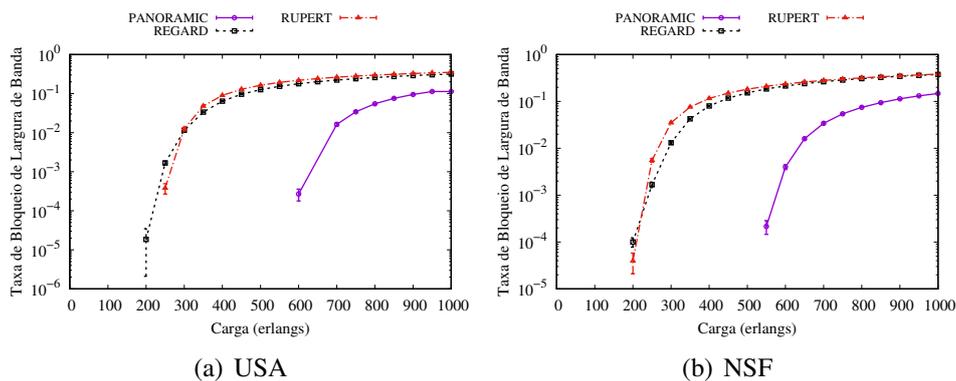


Figura 4. Taxa de bloqueio de largura de banda para as topologias USA e NSF.

PANORAMIC demonstra menor taxa de bloqueio de banda devido a estratégia de multicaminho, combinada ao mapeamento e à aplicação de modulação. PANORAMIC não adota ciência de *crossstalk* ou fragmentação, diferente dos algoritmos REGARD e RUPERT. REGARD define rotas de modo offline, que permite a alocação de recursos de forma mais rápida, calculando o impacto da transmissão em *crossstalk* e fragmentação. O algoritmo RUPERT utiliza o mapeamento para verificar recursos disponíveis, propiciando melhor utilização de espectro, considerando todos os caminhos entre dois nós.

5. Resultados do Trabalho

A Tabela 1 lista os artigos produzidos durante o trabalho de iniciação científica realizado na Universidade Federal do Pará. Salienta-se que todos os artigos foram publicados em plataformas de extrato superior e têm o aluno de IC posicionado como primeiro autor.

Tabela 1. Trabalhos publicados como resultados do trabalho de IC

Referencia	Periódico	Qualis	Situação
[Rodrigues et al. 2020a]	SENSORS 2020	A1	Publicado
Referencia	Conferência	Qualis	Situação
[Rodrigues et al. 2020b]	ISCC 2020	A2	Publicado
[Rodrigues et al. 2021a]	SBRC 2021	B2	Publicado
[Rodrigues et al. 2021b]	IEEE Latincom 2021	B2	Publicado

6. Conclusão

Neste artigo, foram apresentadas as contribuições do TIC realizado na Universidade Federal do Pará. Um amplo estudo sobre Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial foi realizado. Os algoritmos desenvolvidos foram avaliados em diferentes cenários e possibilitam o incremento do desempenho e capacidade do núcleo da Internet de nova geração. Os algoritmos aumentam a aceitação de requisições para o estabelecimento de conexões e levam em consideração o *crossstalk*, o roteamento multicaminho e a fragmentação na rede. Os resultados obtidos são originais e fundamentam um tópico pouco explorado na literatura. Espera-se que as contribuições possam propiciar uma Internet que transporte volume de dados muito maiores que os atuais.

Agradecimentos

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

Referências

- Brasileiro, I., Costa, L., e Drummond, A. (2019). A survey on crosstalk and routing, modulation selection, core and spectrum allocation in elastic optical networks.
- Moura, P. M. e Da Fonseca, N. L. S. (2018). Routing, core, modulation level, and spectrum assignment based on image processing algorithms. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 10(12):947–958.
- Moura, P. M. e Drummond, A. C. FlexGridSim: Flexible Grid Optical Network Simulator. <http://www.lrc.ic.unicamp.br/FlexGridSim/>. Último acesso: 07/05/2021.
- Oliveira, H. M. e da Fonseca, N. L. (2019). Routing, spectrum and core assignment algorithms for protection of space division multiplexing elastic optical networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 128:78–89.
- Rodrigues, E., Cerqueira, Eduardo adn Rosário, D., e Oliveira, H. (2020a). Hybrid routing, modulation, spectrum and core allocation based on mapping scheme. *Sensors*, 20(21):6393.
- Rodrigues, E., Cerqueira, E., Rosário, D., e Oliveira, H. (2020b). Routing, modulation, spectrum and core allocation based on mapping scheme. In *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 1–6.
- Rodrigues, E., Figueiredo, G., Santi, J., e Oliveira, H. (2021a). 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, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Rodrigues, E., Oliveira, H. M. N. D. S., e Da Fonseca, N. L. S. (2021b). Cross-talk and fragmentation-aware algorithm for space-division multiplexing elastic optical networks. In *2021 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATIN-COM)*, pages 1–6.
- Ujjwal, Thangaraj, J., e Rajnish kumar (2021). Multi-path provisioning in elastic optical network with dynamic on-request optimal defragmentation strategy. *Optical Switching and Networking*, 41:100607.
- Wan, X., Hua, N., e Zheng, X. (2012). Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(8):603–613.
- Yin, S., Zhang, Z., Chen, Y., Ma, R., e Huang, S. (2019). A survivable xt-aware multi-path strategy for sdm-eons. In *2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, pages 1–3.
- Yousefi, F., Ghaffarpour Rahbar, A., e Ghadesi, A. (2020). Fragmentation and time aware algorithms in spectrum and spatial assignment for space division multiplexed elastic optical networks (sdm-eon). *Computer Networks*, 174:107232.