

Roteamento e Alocação de Recursos com Mecanismo de Resiliência Ciente da Prioridade de Tráfego

Rafael S. Lopes¹, Denis Rosário¹, Eduardo Cerqueira¹,
Leandro Villas² and Helder Oliveira¹

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

²Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) - Campinas, SP, Brasil

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

leandro@ic.unicamp.br, heldermay@ufpa.br

Abstract. *The introduction of new technologies and applications connected to the Internet, in recent years, has demonstrated the physical incapacity of current optical backbone networks in the provisioning of resources in a near future. One of the main proposals to deal with this problem today is optical networks with spatial multiplexing. However, observing the massive amount of data these networks can transport, there is a need to develop efficient resilience mechanisms. This paper proposes a routing algorithm with a protection mechanism for elastic optical networks space-division multiplexing, aware of the traffic priority. The obtained results demonstrate the proposed algorithm's high-efficiency establishing and resilience of high priority connections compared to similar algorithms in the literature.*

Resumo. *A introdução de novas tecnologias e aplicações conectadas à Internet tem demonstrado a incapacidade física das redes ópticas atuais no provisionamento de recursos em um futuro próximo. Neste sentido, as redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial tem se mostrado uma solução promissora para lidar com este problema de capacidade. No entanto, considerando a enorme quantidade de dados que essas redes podem transportar, a garantia de resiliência dessas redes ainda é um problema em aberto. Este artigo propõe um algoritmo de roteamento com mecanismo de proteção para redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial, ciente da prioridade de tráfego. Os resultados obtidos demonstram a alta eficiência do algoritmo proposto no estabelecimento e resiliência de conexões de alta prioridade em comparação com algoritmos semelhantes na literatura.*

1. Introdução

O surgimento e popularização de aplicações de rede com grandes demandas por largura de banda e outros requisitos, tais como Inteligência Artificial, streaming de vídeos em alta definição, jogos, Internet das Coisas (IoT), e outros, tem feito com que o tráfego passante no núcleo da Internet aumentasse de forma exponencial nos últimos anos [Roos et al. 2020]. Ademais, durante o período de isolamento social consequente da pandemia de COVID-19, percebeu-se grande crescimento no tráfego da Internet, advindo principalmente de aplicações sensíveis à latência, como aplicações de teleconferência e jogos online, que cresceram em 300% e 400% respectivamente [Labovitz 2020]. Diante

de tal perspectiva, observa-se a necessidade de uma infraestrutura que sustente o crescimento esperado do tráfego, oferecendo suporte a aplicações com diferentes requisitos de Qualidade de Serviço (QoS).

Conforme o número de aplicações de rede cresce, percebe-se grande heterogeneidade do tráfego com diferentes requisitos por QoS, sejam estes: largura de banda, resiliência, latência, e confiabilidade [Halabi 2020]. Entretanto, a diferenciação no provisionamento de recursos para tráfego ainda é pouco explorada, fazendo com que a reserva de recursos seja feita, muitas vezes, de forma injusta. Pode-se citar como exemplo os serviços de Jogos em Nuvem (*Cloud Gaming*), que possuem altos requisitos quanto à largura de banda e baixa latência da rede, assim como aplicações de telemedicina. No entanto, quando analisados em relação aos requisitos de confiabilidade e proteção (Qualidade de Proteção - QoP), percebe-se maior relevância nas aplicações de telemedicina, que exigem a garantia de que a conexão seja estabelecida e recuperada, em caso de falhas de rede, no menor tempo possível. Portanto, é aceitável que os esforços para o estabelecimento e sobrevivência dessas conexões não sejam iguais, visto que as consequências que bloqueios de banda ou falhas na rota de conexão podem causar para ambos os casos citados são extremamente discrepantes. Neste sentido, é essencial considerar os requisitos-chave da aplicação individualmente, em vez de uma solução única.

Estudos recentes demonstram que a abordagem atual das redes ópticas compostas principalmente por Fibras de Único-Núcleo (SCF) está próxima de atingir seu limite de provisionamento de recursos, como demonstrado pelo limite não-linear de Shannon e capacidade de canal [Banaszek et al. 2020]. Seu esgotamento se deve ao aumento da demanda por largura de banda, que se manteve constante nos últimos anos. Dado esse contexto, as Redes Ópticas Elásticas com Multiplexação por Divisão Espacial (SDM-EON) têm ganhado grande aceitação no meio científico, demonstrando sucesso no cenário de tráfego previsto para os próximos anos. A SDM-EON consiste na combinação do conceito de redes flexíveis, proposto pela EON, com a utilização de Fibras de Múltiplos-Núcleos (MCF) ou de Fibras de Múltiplos-Modos (MMF), aumentando a capacidade da rede conforme o número de núcleos ou modos aumenta [Oliveira and Fonseca 2019]. A SDM-EON exige novas soluções de roteamento e alocação de recursos, visto que a complexidade computacional de encaminhamento cresce conforme aumenta o número de núcleos/modos na fibra. Em SDM-EON, esse problema, em conjunto com a adaptatividade da modulação, passa então a ser chamado de Roteamento, Modulação, Alocação de Espectro e Núcleo (RMSCA), que ainda é um problema em aberto [Oliveira and Fonseca 2019].

Em SDM-EON a ocorrência de falhas pode levar a consequências desastrosas, devido à grande quantidade de dados que podem trafegar simultaneamente por essas redes [Yin et al. 2021]. Nesse sentido, mecanismos de proteção são necessários para manter a estabilidade da rede. Estes mecanismos se fundamentam na pré-configuração da rede, durante o roteamento da requisição, buscando e alocando rotas alternativas que serão utilizadas em caso de falhas no caminho primário da requisição [Christodoulou and Ellinas 2021]. As vantagens da utilização de mecanismos de proteção são o tempo mínimo para se reestabelecer as conexões, já que nenhum novo cálculo é necessário no momento da falha, e a garantia de que a conexão será reestabelecida com sucesso [Hai 2020, Oliveira and Fonseca 2019]. Quando considerada a existência de tráfego com altos requisitos por confiabilidade em uma rede heterogênea, a opção mais adequada seria a implementação de mecanismos de proteção, considerando as

vantagens que estes mecanismos entregam. Ainda assim, muitos dos trabalhos na literatura desconsideram a ocorrência de falhas na rede e a implementação de mecanismos que mitiguem esse problema, o que ainda é um problema em aberto [Brasileiro et al. 2019].

Neste sentido, este artigo apresenta o algoritmo RotEamento e Alocação de Recursos com Mecanismo de Proteção Ciente da Prioridade de Tráfego (ESPECTRO), que oferece o roteamento, alocação de recursos e proteção para SDM-EON. ESPECTRO assume a heterogeneidade do tráfego, trabalhando com diferentes classes de serviço que variam em requisito por QoP, para otimizar a alocação de recursos. 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. Os resultados das simulações demonstram a vantagem na utilização do algoritmo ESPECTRO, que apresenta redução significativa nas probabilidades de bloqueio de requisições com alta prioridade e maior eficiência energética nas topologias simuladas. O restante deste artigo é organizado da seguinte forma: a Seção 2 resume o estado da arte sobre o estudo. A Seção 3 descreve o algoritmo ESPECTRO. A Seção 4 apresenta os parâmetros de simulação e os resultados. Por fim, a Seção 5 apresenta as considerações finais deste trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

Apesar de muitos estudos terem sido conduzidos em SDM-EON, poucos estudos lidam com o aumento da alocação de recursos enquanto mantém a resiliência da rede.

Zhu *et al.* [Zhu et al. 2021] propuseram um algoritmo RMSCA com tráfego fluante em SDM-EONs. Os autores investigaram a eficiência da alocação de recursos minimizando o impacto da diafonia e a probabilidade de bloqueio na rede. Contudo o algoritmo proposto não leva em consideração a QoP, ignorando a relação de prioridades entre requisições. Os autores em [Oliveira and Fonseca 2019] introduziram três algoritmos RSCA para proteção de caminho contra falha única em redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial. Os três algoritmos empregam uma estratégia de roteamento e alocação de espectro com base na representação multi-gráfica de um espectro. No entanto, os algoritmos propostos não consideram as diferentes prioridades nas requisições da rede, e não consideram diferentes formatos de modulação.

Santos *et al.* [Santos et al. 2018] apresentam um modelo de tratamento de sobrecarga em redes ópticas elásticas, usando degradação de serviço por QoS proporcional. Para isso, são considerados parâmetros de diferenciação de qualidade atribuídos pelos operadores da rede. Essa técnica oferece taxas de bloqueio mais baixas durante eventos de congestionamento da rede. Porém, o algoritmo proposto não leva em conta a proteção dos fluxos, que são descartados em caso de falhas, além de não operar em SDM-EON. A proteção em SDM-EON foi considerada em [Tan et al. 2016]. Os autores introduziram uma estratégia de provisionamento com ciência de diafonia através de métodos de proteção de caminho dedicado. O algoritmo proposto foi dividido em computação de rota e alocação de núcleo e espectro. Um algoritmo K-Shortest-Path (*KSP*) foi empregado para encontrar caminhos primários e de backup emparelhados. Apesar de os autores tratarem proteção, eles não consideram *QoP*, ignorando a relação de prioridades entre requisições, além de não considerar a modulação adaptativa.

Um algoritmo eficiente para provisionamento de acordo de nível de serviço (SLA) com QoS aprimorada para EON foi proposto em [Agrawal et al. 2017]. Nele, os autores consideram uma rede óptica que opera com serviços de diferentes requisitos, e propõe uma nova solução de roteamento e alocação de recursos que visa aumentar a eficiência da rede. Para isso são levados em consideração vários aspectos das conexões, dentre eles a proteção e a demanda por largura de banda. Porém, o trabalho não leva em consideração a aplicação em SDM-EON. Um algoritmo de roteamento e proteção em redes ópticas elásticas com multiplexação espacial, utilizando p-cycle FIPP, interferência mínima e roteamento multicaminho foi proposto em [Oliveira and da Fonseca 2020]. Apesar de considerar a utilização de SDM-EON e proteção os autores não levam em consideração a divisão do tráfego em diferentes classes de serviço.

Tabela 1. Resumo dos trabalhos relacionados

Trabalho	SDM	Modulação	Proteção	Diferenciação do Tráfego
[Zhu et al. 2021]	✓	✓	✓	
[Oliveira and Fonseca 2019]	✓		✓	
[Santos et al. 2018]		✓		✓
[Tan et al. 2016]	✓		✓	
[Agrawal et al. 2017]			✓	✓
[Oliveira and da Fonseca 2020]	✓		✓	
ESPECTRO	✓	✓	✓	✓

A Tabela 1 resume as principais características dos trabalhos citados e da proposta deste artigo. Nela as colunas indicam a utilização de SDM no roteamento, o uso de diferentes formatos de modulação, aprovisionamento de proteção ao tráfego e a diferenciação de tráfego, para cada trabalho.

3. Algoritmo ESPECTRO

Esta seção apresenta o algoritmo ESPECTRO, que considera a diferenciação de serviços para o provisionamento de recursos e resiliência, usando também o conceito de modulação adaptativa à distância, que aumenta ainda mais a eficiência espectral.

O tráfego foi classificado em três classes de serviço (CoS) com diferentes níveis de QoP. O objetivo dessa abordagem é aumentar a probabilidade de aceitação de requisições com maior relevância, além de oferecer recuperação rápida dessas conexões em caso de instabilidade da rede. Além disso, diferentes níveis de QoP visam diminuir o consumo de recursos voltados à resiliência da rede, já que o número de caminhos de proteção estabelecidos passa a ser menor. A Tabela 2 apresenta as características das diferentes classes de serviço consideradas.

Tabela 2. Características das Classes de Serviço

CoS	Liberação de Espectro	QoP	Proteção	Percentual
1	✓	Alta	Exigida	8,3%
2	✓	Média	Melhor Esforço	16,7%
3		Baixa	Não Exigida	75%

Conforme a Tabela 2, as requisições de classe 1 estão em menor quantidade na rede, correspondendo a $\frac{1}{12}$ do tráfego e possuindo alto grau de exigência por resiliência. Durante o roteamento dessas requisições, o algoritmo ESPECTRO seleciona tanto um caminho primário, por onde a conexão será transportada, quanto um caminho secundário, por onde a conexão será transportada em caso de falhas. Caso o caminho secundário não seja encontrado, então a requisição é bloqueada. Por outro lado, as requisições de classe 2 representam $\frac{1}{6}$ do total de requisições feitas na rede, possuindo grau médio de exigência por resiliência. Para as requisições de classe 2, o algoritmo ESPECTRO busca por ambos os caminhos primário e secundário, assim como para as requisições de classe 1, no entanto, estabelece a conexão ainda que não seja encontrado nenhum caminho secundário. Por último, para a classe 3, que corresponde a $\frac{3}{4}$ do tráfego, somente o caminho primário é selecionado pelo algoritmo ESPECTRO. Os valores percentuais correspondem à tendência atual de tráfego, segundo a literatura, que estima que apenas 25% do tráfego, em média, possui requisito por resiliência [Hai 2020, Layec et al. 2018].

Para a representação do algoritmo, a seguinte notação matemática foi utilizada:

- $G(N, E)$: o grafo da rede, onde N é o conjunto de nós e E é o conjunto de enlaces na rede;
- $\tilde{G}(\tilde{N}, \tilde{E})$: um grafo auxiliar da rede, formado pelo conjunto de nós \tilde{N} , e o conjunto de enlaces \tilde{E} ;
- s : o nó de origem da requisição; d é o nó de destino da requisição;
- d : o nó de destino da requisição;
- $q(r)$: a classe de serviço da requisição/fluxo r ;
- b : a demanda por largura de banda mais a banda de guarda;
- $r(s, d, q, b)$: a requisição que vai do nó s para o nó d com CoS q e demanda b ;
- $L(\lambda, c_{\lambda,i}, \omega(\eta), \mu)_{s,d}$: um caminho óptico entre os nós s e d , formado pelo conjunto de nós λ , o núcleo $c_{\lambda,i}$, o conjunto de *slots* livres alocados $\omega(\eta)$, onde η é o número de *slots* pertencentes ao conjunto ω , e o nível de modulação μ ;
- $\Lambda_{s,d}$: um conjunto de rotas entre os nós s e d . Cada rota pertencente a este conjunto é denominada $\lambda_{s,d,i}$;
- C_λ : o conjunto de núcleos existentes no caminho λ . Cada núcleo pertencente a este conjunto é denominado $c_{\lambda,i}$;
- $\Omega(c_{\lambda,i,j})$: o conjunto de *slots* contidos no núcleo $c_{\lambda,i,j}$;
- $\tilde{\omega}(\eta)$: um conjunto auxiliar de *slots*, e $\tilde{\omega}(\eta)$ é um conjunto de *slots* liberados. Para ambos os conjuntos, η é o número de *slots* pertencentes;
- $a(\mu)$: o número de bits transmitidos por símbolo, para a modulação μ ;
- $\eta(b, \mu)$: igual ao número de *slots* necessários para alcançar a largura de banda b , usando a modulação μ ;
- $\alpha(r)$: o caminho óptico primário da requisição/fluxo r ;
- $\beta(r)$: o caminho óptico de proteção da requisição/fluxo r ;
- $\Psi(\tilde{\omega})$: o conjunto de fluxos que ocupa uma porção específica do espectro ($\tilde{\omega}$), cada fluxo é denominado ψ_i .

3.1. Detalhes do ESPECTRO

O algoritmo ESPECTRO foi formulado para aprimorar o provisionamento de recursos ópticos em SDM-EON, reduzindo a probabilidade de bloqueio da rede através de uma política de alocação justa e ciente da prioridade de tráfego. A melhor utilização de recursos pelo algoritmo ESPECTRO se deve à maior economia em relação às reservas de caminhos de proteção. O algoritmo ESPECTRO adota uma política de reserva de recursos ciente dos vários graus de prioridade das requisições, garantindo proteção dedicada a apenas uma parte do tráfego. Para a melhor apresentação do algoritmo ESPECTRO (Algoritmo 1), este foi dividido em dois módulos adicionais, sendo eles: (i) as operações para

a seleção de caminhos ópticos, denominado SCO (Algoritmo 2); (ii) o fluxo de operações para a liberação de caminhos ópticos ocupados, denominado LR (Algoritmo 3);.

No Algoritmo 1, a primeira linha mostra a chamada ao algoritmo SCO, atribuindo seu retorno à $\alpha(r)$, que representa o caminho primário da requisição. Então, na Linha 2 há uma condição que avalia o conteúdo de $\alpha(r)$ e, se este for nulo, significando que não foram encontrados caminhos ópticos possíveis para o estabelecimento do caminho primário, a requisição r é bloqueada (Linha 3). Caso contrário (Linha 4), se houver um caminho óptico em $\alpha(r)$, então o algoritmo prossegue para tratar a necessidade por um caminho secundário, baseado na classe de serviço da requisição. Se a requisição sob roteamento possuir $q = 3$ (Linha 5) e, portanto, pertencer à classe de serviço de menor prioridade, o algoritmo estabelece sua conexão sem procurar por um caminho de proteção (Linha 6). Caso contrário, se a requisição não possuir $q = 3$ (Linha 7), o algoritmo então atribui a um grafo auxiliar $\tilde{G}(\tilde{N}, \tilde{E})$ as informações pertencentes ao grafo original da rede, mas removendo todos os recursos utilizados no caminho primário $\alpha(r)$, na Linha 8. Esta remoção das informações referentes ao caminho primário garante que uma única falha na rede não afete ambos os caminhos primário e de proteção.

Na Linha 9 do algoritmo ESPECTRO, a chamada ao Algoritmo 2 é feita novamente, mas dessa vez considerando o grafo $\tilde{G}(\tilde{N}, \tilde{E})$ para procurar por um caminho de backup, com seu retorno atribuído à $\beta(r)$. Seguindo para a Linha 10, caso $\beta(r)$, nessa segunda chamada, seja nulo, então são avaliadas duas condições, levando em consideração a classe de serviço da requisição. No primeiro caso (Linha 11), se $q(r) = 2$, significando que a requisição possui prioridade média, então o Algoritmo ESPECTRO estabelece a conexão sem proteção, somente com o caminho primário $\alpha(r)$, na Linha 12. No segundo caso (Linha 13), se $q(r) = 1$, sendo r uma requisição de prioridade alta, então o algoritmo bloqueia esta requisição, na Linha 14, baseado na sua exigência por um caminho de proteção. Por fim, caso $\beta(r)$ não seja nulo (Linha 16), então a conexão é estabelecida tanto com o caminho primário $\alpha(r)$, quanto com o caminho secundário $\beta(r)$ (Linha 17).

Algoritmo 1: ESPECTRO

```

Entrada:  $r(s, d, q, b), G(N, E)$ 
Saída: Estado da Requisição
1  $\alpha(r) \leftarrow SCO(G(N, E), r(s, d, q, b));$  >Caminho primário
2 Se  $\alpha(r) = \emptyset$  Então
3   | Bloqueia  $r$ ;
4 Senão
5   | Se  $q(r) = 3$  Então >Prioridade baixa
6   |   | Estabelece conexão apenas com  $\alpha(r)$ ; >Sem proteção
7   | Senão
8   |   |  $\tilde{G}(\tilde{N}, \tilde{E}) \leftarrow G(N, E) - \alpha(r)$ ; >Remove rota usada pelo caminho primário
9   |   |  $\beta(r) \leftarrow SCO(\tilde{G}(\tilde{N}, \tilde{E}), r(s, d, q, b));$  >Caminho secundário
10  |   | Se  $\beta(r) = \emptyset$  Então
11  |   |   | Se  $q(r) = 2$  Então >Prioridade média
12  |   |   |   | Estabelece conexão apenas com  $\alpha(r)$ ; >Sem proteção
13  |   |   |   | Senão se  $q(r) = 1$  Então
14  |   |   |   |   | Bloqueia  $r$ ;
15  |   |   |   | Fim Se
16  |   |   | Senão se  $\beta(r) \neq \emptyset$  Então >Prioridade média e alta
17  |   |   |   | Estabelece conexão com  $\alpha(r)$  e  $\beta(r)$ ; >Com proteção
18  |   |   | Fim Se
19  |   | Fim Se
20 Fim Se

```

No Algoritmo 2, que apresenta a lógica de escolha dos caminhos ópticos, a primeira linha faz a chamada ao Algoritmo KSP [Yen 1971], o qual faz a busca por K rotas

entre os nós s e d , o retorno do KSP é atribuído à variável Λ . Na Linha 2 é verificado o conteúdo de Λ , se este não for nulo, então para cada rota encontrada (Linha 3), o algoritmo seleciona o melhor nível de modulação, baseando-se no comprimento da rota λ_i (Linha 4), atribuindo-o à variável μ . Em seguida, para cada núcleo $c_{\lambda_i,j}$ pertencente ao conjunto de núcleos (contínuos em todos os enlaces) C_{λ_i} (Linha 5), se existem η slots contíguos, contínuos e livres (Linha 6), então estes são atribuídos à ω (Linha 7). O valor de η é dado pela Equação 1, que soma a razão entre a largura de banda requisitada (b) e a quantidade de bits por símbolo (a), transmitido com o uso da modulação μ , à quantidade de slots para banda de guarda (um slot). O valor considerado para η , é sempre o número inteiro imediatamente maior ao resultado da Equação 1. Por fim, na Linha 8 é feito o retorno do caminho óptico L para o algoritmo ESPECTRO.

Ainda no Algoritmo 2, se após a execução do laço da Linha 3 nenhum retorno tiver sido feito ao Algoritmo 1, significando que não foram encontrados η slots livres que atendam às restrições de contiguidade e continuidade, então um segundo laço (Linha 12), análogo ao primeiro, é executado. Nesse segundo laço, o objetivo é tentar encontrar algum caminho possível de ser liberado, para ser alocado pela requisição sob roteamento. Portanto, para cada rota λ_i (Linha 12) é selecionado o melhor nível de modulação (Linha 13). Em seguida, na Linha 14, para cada núcleo espacial é feita uma chamada ao Algoritmo 3 (Linha 15), que procura por slots com possibilidade de liberação. O retorno do Algoritmo LR é atribuído à variável $\hat{\omega}$. Caso $\hat{\omega}$ não possua conteúdo nulo (Linha 16), então é retornado ao Algoritmo 1 um caminho óptico com o conjunto de slots liberados (Linha 17). No entanto, se o conteúdo de $\hat{\omega}$ for nulo (Linha 18), ou se o Algoritmo KSP não encontrar nenhuma rota possível entre os nós s e d (Linha 23), então o SCO retornará um valor nulo, respectivamente nas linhas 19 e 24.

Algoritmo 2: SCO

```

Entrada:  $\tilde{G}(\tilde{N}, \tilde{E}), r(s, d, q, b)$ 
Saída:  $L(\lambda, c, \omega, \mu)_{s,d}$ 
1  $\Lambda \leftarrow KSP(s, d);$ 
2 Se  $\Lambda \neq \emptyset$  Então
3   Para cada  $\lambda_i \in \Lambda$  Faça
4      $\mu \leftarrow$  o melhor nível de modulação;
5     Para cada  $c_{\lambda_i,j} \in C_{\lambda_i}$  Faça
6       Se encontrou  $\eta(b, \mu)$  slots livres Então  $\triangleright$  Contíguos e contínuos
7          $\omega \leftarrow$  conjunto de slots encontrado;
8         Retorna  $L(\lambda_i, c_{\lambda_i,j}, \omega, \mu)_{s,d};$ 
9       Fim Se
10    Fim para cada
11  Fim para cada
12  Para cada  $\lambda_i \in \Lambda$  Faça
13     $\mu \leftarrow$  o melhor nível de modulação;
14    Para cada  $c_{\lambda_i,j} \in C_{\lambda_i}$  Faça
15       $\hat{\omega} \leftarrow LR(\lambda, c_{\lambda_i,j}, \eta(b, \mu), q(r)); \triangleright$  Liberação de recursos
16      Se  $\hat{\omega} \neq \emptyset$  Então
17        Retorna  $L(\lambda_i, c_{\lambda_i,j}, \hat{\omega}, \mu)_{s,d};$ 
18      Senão  $\triangleright$  Nenhuma faixa de espectro liberada
19        Retorna  $\emptyset;$ 
20      Fim Se
21    Fim para cada
22  Fim para cada
23 Senão  $\triangleright$  Não encontrou rotas
24   Retorna  $\emptyset;$ 
25 Fim Se

```

$$\eta(b, \mu) = \frac{b}{a(\mu)} + 1 \quad (1)$$

No algoritmo 3, para cada subconjunto de η slots, contido no conjunto total de slots pertencentes ao núcleo $\Omega(c_{\lambda_i,j})$ (Linha 1), o algoritmo analisa a classe de serviço de cada fluxo ψ_i que o ocupa (Linha 2). Se todos os fluxos ativos ψ_i , ocupantes desta porção de slots, possuírem $q(\psi_i)$ maior que $q(r)$, significando que r possui maior prioridade, então para cada um desses fluxos (Linha 3), é analisado o tipo do caminho óptico que ocupa esta porção de slots. Caso o caminho óptico de ψ_i , que contém slots de $\tilde{\omega}$, seja o secundário (Linha 4), então esse é liberado (Linha 5) sem interromper o fluxo ψ_i , que continua ativo através do seu caminho primário. Caso contrário, se o caminho óptico de ψ_i que contém slots de $\tilde{\omega}$ for o primário (Linha 6), então ψ_i é interrompido, liberando então ambos os caminhos primário e secundário, caso possua (Linha 7). Sendo assim, $\tilde{\omega}$ passa a ser um caminho liberado $\hat{\omega}$ (Linha 10), que é retornado para o Algoritmo SCO. Por fim, caso o Algoritmo LR percorra todo o conjunto de slots contido no núcleo $c_{\lambda_i,j}$ e ainda assim não encontre nenhum caminho com possibilidade de liberação, este retornará um valor nulo ao Algoritmo 2.

Algoritmo 3: LR

Entrada: $\lambda, c_{\lambda_i,j}, \eta(b, \mu), q(r)$
Saída: $\hat{\omega}$

```

1 Para cada  $\tilde{\omega}(\eta) \in \Omega(c_{\lambda_i,j})$  Faça
2   Se  $\forall \psi_i \in \Psi(\tilde{\omega}), q(\psi_i) > q(r)$  Então ▷ encontrou  $\tilde{\omega}$ 
3     Para cada  $\psi_i \in \Psi(\tilde{\omega})$  Faça
4       Se  $\beta(\psi_i) \subset \tilde{\omega}$  Então
5         Libera apenas  $\beta(\psi_i)$ ; ▷  $\psi_i$  permanece ativo, mas sem proteção.
6       Senão se  $\alpha(\psi_i) \subset \tilde{\omega}$  Então
7         Interrompe  $\psi_i$  e libera  $\tilde{\omega}$ ;
8       Fim Se
9     Fim para cada
10     $\hat{\omega} \leftarrow \tilde{\omega}$ ;
11    Retorna  $\hat{\omega}$ ;
12  Fim Se
13 Fim para cada
14 Retorna  $\emptyset$ ;
```

4. Avaliação de Desempenho

Esta seção descreve a metodologia de avaliação, incluindo os parâmetros de simulação e métricas utilizadas para avaliar a performance do algoritmo ESPECTRO, comparando-o com diferentes algoritmos de RSCA e RMSCA, extraídos da literatura.

4.1. Visão Geral da Rede

Na simulação foi considerada uma rede que possui enlaces de fibra óptica bidirecionais, com sete núcleos dispostos de forma hexagonal. Cada núcleo possui um total de 320 slots de frequência de 12.5 GHz. Os comprimentos dos enlaces variam de acordo com os comprimentos reais (em km) em cada topologia escolhida. A utilização de diversas modulações visa aumentar a taxa de transferência de dados com menor quantidade de slots alocados. Porém, é importante ressaltar que transferências de muitos bits por símbolo influenciam na qualidade do sinal transmitido devido à atenuação por ele sofrida durante seu transporte, o que, por sua vez, faz com que a capacidade de decodificação dos receptores ópticos diminua. Neste artigo, os formatos de modulação 64QAM, 32QAM, 16QAM, 8QAM, QPSK e BPSK são empregados para extensões de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 km, respectivamente com capacidades de slot de 75, 62,5, 50, 37,5, 25 e 12,5 Gb/s.

Além das fibras com múltiplos núcleos foram considerados multiplexadores *add/drop* nos nós da rede. Tais dispositivos permitem a adição, bloqueio, remoção e redirecionamento de sinais ópticos de forma flexível, sensível à taxa de transmissão solicitada por cada requisição. Além disso, a rede é totalmente transparente e, portanto, respeita às restrições de continuidade e contiguidade de espectro e núcleo durante a alocação de recursos. Enquanto a restrição de continuidade se atém à necessidade de que a faixa de espectro alocada deve ser a mesma em todos os enlaces da rede, com o objetivo de evitar as conversões opto-elétricas do sinal, a restrição de contiguidade refere-se à necessidade de que os *slots* alocados para cada requisição sejam contíguos, evitando a fragmentação do espectro.

4.2. Descrição do Cenário e Metodologia

Para a avaliação do algoritmo ESPECTRO foi utilizado o simulador FlexGridSim [Moura and Drummond 2018], com algumas modificações em seu código fonte, possibilitando simulações com tráfego de QoS diferenciado. Durante as simulações foram utilizadas duas topologias baseadas em cenários reais, são elas: USA (Figura 1(a)), com 24 nós e 43 enlaces, e a NSF (Figura 1(b)), com 14 nós e 25 enlaces. Foram realizadas 20 simulações, variando entre as cargas de 50 e 1000 *erlangs*¹, com variação de 50 *erlangs* entre cada simulação. Para cada uma das simulações foi executado um total de 100.000 requisições, com requisitos por largura de banda variando em 25/50/125/200/500/750/1000 Gbps. A geração do tráfego foi feita utilizando o processo de Poisson, com distribuição ponderada do tráfego (Tabela 2), considerando possibilidade de proteção para apenas 25% do tráfego.

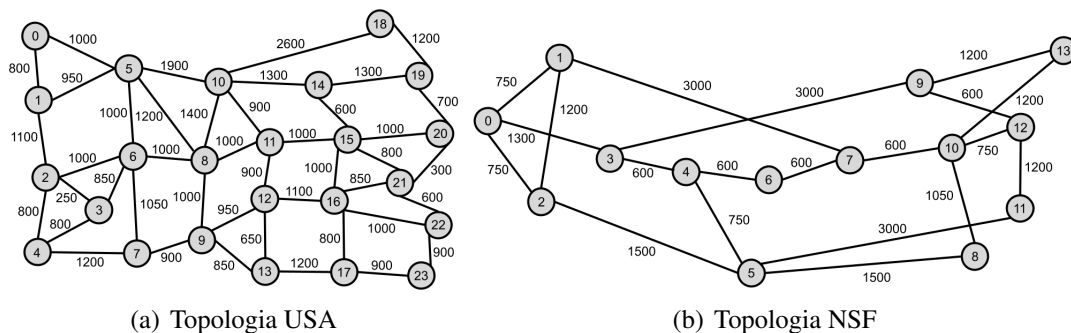


Figura 1. Topologias

As métricas utilizadas para a avaliação de desempenho são: probabilidade de bloqueio, que é a razão entre a largura de banda bloqueada durante a simulação e o total de largura de banda solicitada; a probabilidade de bloqueio para cada CoS, que equivale à razão entre a quantidade de largura de banda bloqueada para requisições de uma CoS i , e a largura de banda total solicitada durante a simulação; a razão de remoção de fluxos por CoS, que equivale à relação entre o número de fluxos de CoS i removidos pelo mecanismo de liberação de recursos, e o número total de fluxos aceitos; a eficiência energética dos algoritmos, que é a razão entre a quantidade de dados transportados pela rede (em Mbits) e o consumo energético da rede (em Joules).

Nas Figuras apresentadas nesta subseção, as curvas rotuladas com “ESPECTRO” mostram o desempenho do algoritmo ESPECTRO, proposto neste artigo. As curvas com

¹Erlang = taxa média de chegada \times duração média dos fluxos

o rótulo “MDP-QoS” apresentam os resultados obtidos com a utilização do algoritmo MDP-QoS, proposto em [Santos et al. 2018]. As curvas rotuladas com “CaP-DPP” apresentam os resultados referentes à utilização do algoritmo proposto em [Tan et al. 2016], chamado CaP-DPP. As curvas rotuladas com SADQ mostram o desempenho do algoritmo SADQ, proposto em [Agrawal et al. 2017]. Devido à falta de algoritmos que considerem a diferenciação de serviços e operem em SDM, este trabalho considerou três algoritmos com características semelhantes, onde dois destes (MDP-QoS e SADQ) operam originalmente em EON. As adaptações necessárias foram feitas para que estes pudessem operar em SDM-EON. O algoritmo MDP-QoS, como o ESPECTRO, reconhece diferentes classes do tráfego, utiliza modulação adaptativa e tenta minimizar o impacto de sobrecargas na rede. O CaP-DPP considera a proteção de caminho dedicado, em SDM-EON, assim como o ESPECTRO. O SADQ considera a diferenciação de serviço para oferecer proteção ao tráfego da rede, semelhante ao ESPECTRO. Por fim, observa-se que a apresentação da carga nas figuras desta subseção está em uma escala 1:1000.

4.3. Resultados

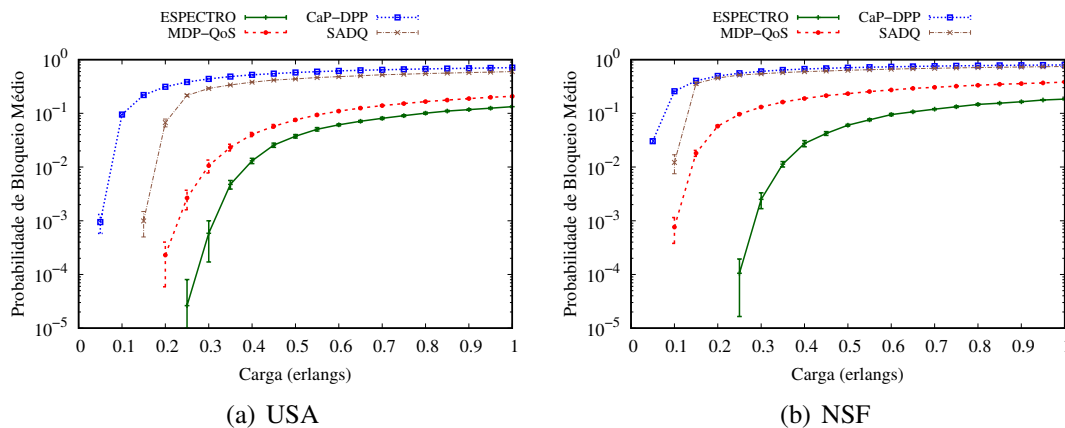


Figura 2. Probabilidade de bloqueio

A Figura 2 mostra as probabilidades de bloqueio para as topologias USA e NSF. Para a topologia USA (Figura 2(a)), os algoritmos com as piores performances são o CaP-DPP e o SADQ, que iniciam os bloqueios sobre as cargas de 50 e 150 erlangs, respectivamente. Com o aumento da carga da rede, as probabilidades de bloqueio do CaP-DPP e SADQ convergem para valores próximos, bloqueando mais que a metade das requisições. Por outro lado, os algoritmos que apresentaram os melhores resultados foram o MDP-QoS, que inicia os bloqueios de banda em 200 erlangs, e o ESPECTRO, que inicia os bloqueios sobre 250 erlangs. Conforme a carga da rede aumenta, o algoritmo MDP-QoS apresenta valores de probabilidade de bloqueio próximos aos do ESPECTRO. Isso ocorre pois o MDP-QoS possui uma ferramenta de degradação de serviço, que adapta as requisições aceitas à largura de banda disponível no momento da alocação. Ainda assim, vale mencionar que o algoritmo MDP-QoS não possui um mecanismo de proteção, diferente dos demais, havendo grande economia de espectro durante sua utilização. Em comparação com os resultados do Algoritmo MDP-QoS, os resultados do ESPECTRO apresentam redução próxima a uma ordem de grandeza, atingindo até duas ordens de grandeza sobre a carga de 250 erlangs. Durante todo o intervalo de carga as menores probabilidades de bloqueio são as do Algoritmo ESPECTRO, que sob a carga mais alta bloqueia próximo a 14% das requisições.

Para a topologia NSF (Figura 2(b)), os algoritmos CaP-DPP e SADQ iniciam os bloqueios sobre as cargas de 50 e 100 erlangs, respectivamente. Sobre cargas maiores que 100 erlangs o Algoritmo SADQ tem probabilidade de bloqueio próxima à do Algoritmo CaP-DPP. Isso é resultado da baixa conectividade de nós da topologia NSF, já que ambos os algoritmos possuem mecanismos de proteção, o que consome maior quantidade de recursos. Os algoritmos MDP-QoS e ESPECTRO iniciam os bloqueios sobre as cargas de 100 e 250 erlangs, respectivamente. Quando comparado com o MDP-QoS, que tem a segunda melhor performance nessa métrica, o Algoritmo ESPECTRO apresenta redução de menos de uma ordem de grandeza, mas atingindo redução de até três ordens de grandeza sobre 250 erlangs. Embora o MDP-QoS tenha menor consumo de recursos por requisição aceita, devido à ausência de um mecanismo de proteção, o mecanismo de liberação de recursos implementado no ESPECTRO permite que seus resultados sejam melhores que os do MDP-QoS. Em comparação com o CaP-DPP e o SADQ, que possuem mecanismo de proteção, o ESPECTRO produz melhores resultados, pois não exige um caminho de proteção para todas as requisições, resultando em uma economia significativa de recursos.

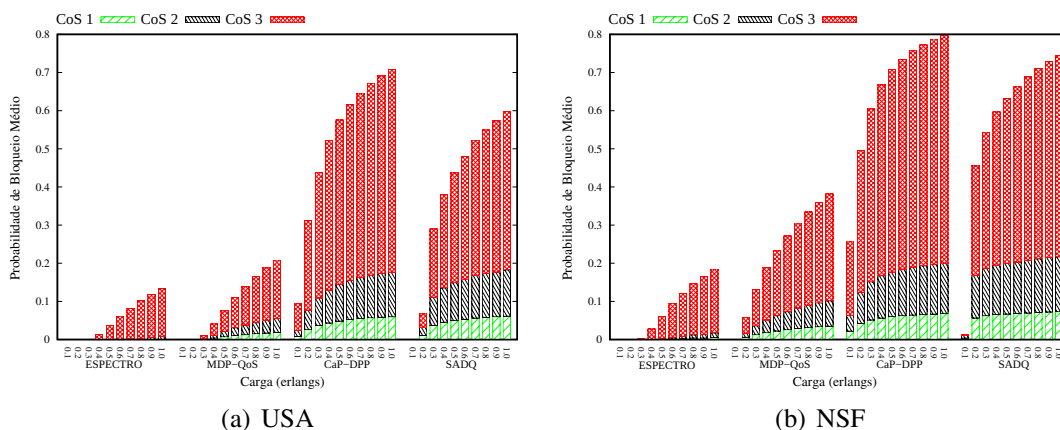


Figura 3. Probabilidade de bloqueio das diferentes CoS

A Figura 3 mostra os resultados de probabilidade de bloqueio para cada CoS. Para a melhor visualização dos resultados, são apresentados apenas os valores no intervalo de 100 a 1000 erlangs, com passo 100. Tanto para topologia USA (Figura 3(a)) quanto para a topologia NSF (Figura 3(b)), o ESPECTRO apresenta os melhores resultados de probabilidade de bloqueio em todas as CoSs. Além disso, é notória a capacidade do algoritmo ESPECTRO em manter requisições com maior prioridade e ainda reduzir o bloqueio total da rede. A melhor alocação e distribuição de proteção do ESPECTRO é evidenciada a partir dos bloqueios apresentados, uma vez que para ambas as topologias o bloqueio das requisições de CoS 1 e CoS 2 mantêm-se baixo mesmo para cargas altas.

Na Figura 4 é mostrada a probabilidade de remoção de fluxos por CoS, para as topologias USA e NSF. Como o Algoritmo ESPECTRO não aceita a liberação de espectro ocupado por fluxos de CoS 1, esta classe de serviço não é apresentada nos gráficos. O intervalo de cargas apresentado é o mesmo da Figura 3. Observa-se que para a topologia USA (Figura 4(a)), as remoções se iniciam sobre 300 erlangs, para os fluxos de ambas as CoS 2 e CoS 3. Conforme a carga da rede aumenta, a probabilidade de remoção de fluxos de ambas as classes de serviço também aumenta, com as probabilidades de remoção de fluxos de CoS 3 se mantendo maiores que as de CoS 2. Ainda assim, sobre a maior carga simulada o resultado total de probabilidade de remoção fica próximo aos 11%.

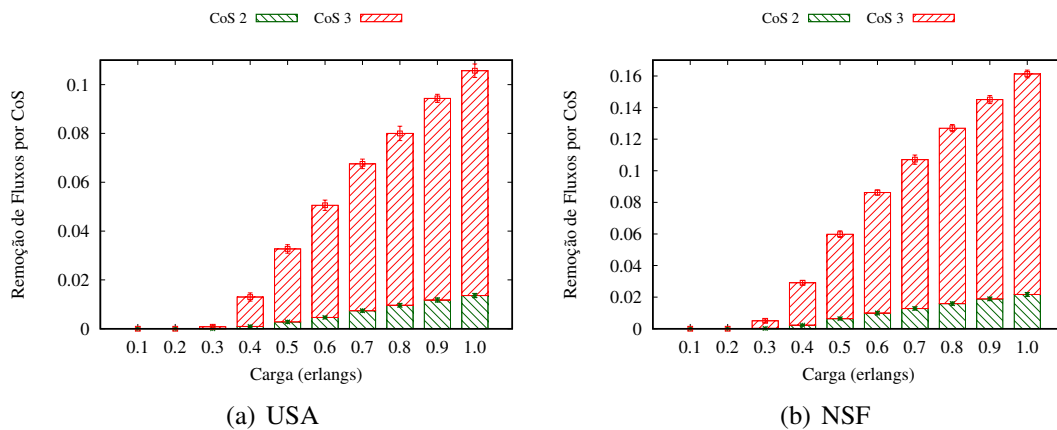


Figura 4. Relação de remoção de fluxos por CoS para o ESPECTRO

Para a topologia NSF (Figura 4(b)), as remoções de fluxos se iniciam sobre a carga de 300 erlangs para ambas as classes de serviço, mas com valores quase nulos para a CoS 2. Conforme a carga aumenta, observa-se que as probabilidades de remoção de fluxos de CoS 3 se mantém sempre maiores que as de fluxos de CoS 2. Mesmo assim, o valor máximo atingido nessa métrica é próximo aos 16%, sobre a carga de 1000 erlangs. A explicação para o aumento na probabilidade de remoção de fluxos conforme a carga aumenta, é a maior taxa de ocupação do espectro por fluxos de baixa prioridade, que correspondem à maior parcela do tráfego.

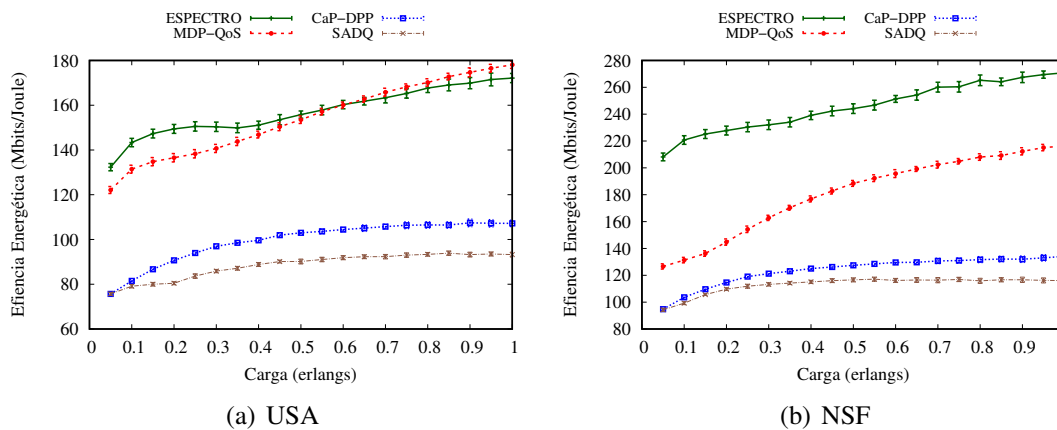


Figura 5. Eficiência Energética

Em relação à eficiência energética dos algoritmos avaliados, as Figuras 5(a) e 5(b) mostram os valores obtidos nas simulações. Na Figura 5(a), que mostra os resultados da topologia USA, pode-se notar um crescimento significativo na eficiência energética do ESPECTRO, comparado com os demais algoritmos que possuem mecanismo de proteção. A eficiência energética do ESPECTRO chega a ser maior em até 79 Mbits/Joule e 65 Mbits/Joule em relação à SADQ e CaP-DPP, respectivamente. Este aumento ocorre porque o Algoritmo ESPECTRO limita a alocação de recursos de backup apenas para as requisições de prioridade média e alta, o que corresponde a aproximadamente 25% do tráfego, fazendo com que a maior parte dos recursos alocados sejam utilizados para a transferência de dados, o que não ocorre nos demais algoritmos (SADQ e CaP-DPP). Quando comparado como Algoritmo MDP-QoS, que não possui

mecanismo de proteção, o Algoritmo ESPECTRO apresenta melhores resultados no intervalo de 50 a 600 erlangs, atingindo aumento de até 13 Mbits/Joule sobre 200 erlangs, mas perde em performance no intervalo seguinte (650 a 1000 erlangs), com diferença de até 6 Mbits/Joule para a eficiência energética do MDP-QoS, sobre a carga de 1000 erlangs. A explicação para este fenômeno é a tendência do ESPECTRO de alocar caminhos de proteção com maior número de saltos, conforme a carga da rede aumenta, o que significa maior número de nós alocados, mas sem transporte de dados.

Na topologia NSF (Figura 5(b)), a ordem dos resultados de eficiência energética é similar à obtida na topologia USA, exceto pelo fato de o Algoritmo ESPECTRO apresentar os melhores resultados durante todo o intervalo de cargas. Pode-se notar que a baixa conectividade de nós da topologia NSF favorece o Algoritmo ESPECTRO em comparação com os outros que oferecem proteção. Comparado com o Algoritmo SADQ, o ESPECTRO apresenta um aumento de até 155 Mbits/Joule sobre a carga de 1000 erlangs. Em comparação com o Algoritmo CaP-DPP, ESPECTRO é capaz de aumentar a eficiência energética da rede em até 137 Mbits/Joule sobre a carga de 1000 erlangs. É importante ressaltar que embora possua mecanismo de proteção, o ESPECTRO entrega valores de eficiência energética maiores que os do MDP-QoS, que não possui mecanismo de proteção, atingindo uma vantagem de até 89 Mbits/Joule sobre a carga de 100 erlangs. Os maiores valores de eficiência energética na topologia NSF, comparados com os resultados da topologia USA, são explicados pelo menor número de nós que a NSF possui, o que reduz a probabilidade de que caminhos ópticos com altos números de salto sejam estabelecidos conforme a carga da rede aumenta.

5. Conclusões

Neste artigo, é analisada a implementação de redes ópticas elásticas com multiplexação por divisão espacial considerando a heterogeneidade de tráfego e os níveis de necessidade de resiliência. O artigo apresenta o ESPECTRO, um novo algoritmo de roteamento, nível de modulação, alocação de núcleo e espectro com mecanismo de proteção e reconhecimento de prioridade de tráfego. Para validar a proposta, foram feitas simulações para entender o comportamento da rede quanto ao estabelecimento de requisições com diferentes classes de serviço sob diferentes cargas. Observou-se que o algoritmo proposto obteve melhores desempenhos em termos de taxa de aceitação de solicitações e qualidade de proteção, principalmente para requisições de maior prioridade, em comparação com outros algoritmos da literatura.

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

- Agrawal, A., Vyas, U., Bhatia, V., and Prakash, S. (2017). Sla-aware differentiated QoS in elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, 36:41–50.
- Banaszek, K., Kunz, L., Jachura, M., and Jarzyna, M. (2020). Quantum limits in optical communications. *Journal of Lightwave Technology*, 38(10):2741–2754.
- Brasileiro, Í., Costa, L., and Drummond, A. (2019). A survey on crosstalk and routing, modulation selection, core and spectrum allocation in elastic optical networks. *arXiv preprint arXiv:1907.08538*.

- Christodoulou, C. and Ellinas, G. (2021). Resilient architecture for optical access networks. *Photonic Network Communications*, 41(1):1–16.
- 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.
- Labovitz, C. (2020). Early effects of covid-19 lockdowns on service provider networks: the networks soldier on! Accessed: 2020-07-11.
- 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.
- Moura, P. M. and Drummond, A. (2018). Flexgridsim: Flexible grid optical network simulator.
- Oliveira, H. and da Fonseca, N. (2020). Uma estratégia de proteção eficiente em eonsdm utilizando p-cycle FIPP. In *Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 155–168. SBC.
- Oliveira, H. M. and 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.
- Roos, J. M., Mela, C. F., and Shachar, R. (2020). The effect of links and excerpts on internet news consumption. *Journal of Marketing Research*, 57(3):395–421.
- Santos, A. S., Horota, A. K., Zhong, Z., De Santi, J., Figueiredo, G. B., Tornatore, M., and Mukherjee, B. (2018). An online strategy for service degradation with proportional qos in elastic optical networks. In *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6. IEEE.
- Tan, Y., Zhu, R., Yang, H., Zhao, Y., Zhang, J., Liu, Z., Qu, Q., and Zhou, Z. (2016). Crosstalk-aware provisioning strategy with dedicated path protection for elastic multi-core fiber networks. In *2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, pages 1–3. IEEE.
- Yen, J. Y. (1971). Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, 17(11):712–716.
- Yin, S., Guo, S., Meng, X., Ma, R., Guo, B., and Huang, S. (2021). Xt-considered multiple backup paths and resources shared protection scheme based on ring covers. *Optics Express*, 29(5):6737–6755.
- 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.