

# Uma nova estratégia para redução de fragmentação em redes EON

Alex S. Santos<sup>1</sup>, Juliana de Santi<sup>2</sup>, Gustavo B. Figueiredo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Computação – Universidade Federal da Bahia (UFBA)  
Av. Adhemar de Barros, s/n, Ondina – 40170-115 – Salvador – BA – Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Informática – Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná (UTFPR)

santos.alex@ufba.br, jsanti@utfpr.edu.br, gustavo@dcc.ufba.br

**Abstract.** *Elastic optical networks have important characteristics that make them a strong candidate to replace current WDM networks. Due to their greater flexibility in accommodating different data transmission rates, Elastic Optical Networks are more suitable to support the growing and heterogeneous data traffic expected for the coming years. However, the greater flexibility in providing different data transfer rates creates a problem called spectrum fragmentation. In spectrum fragmentation, new requests cannot be met due to the absence of contiguous and continuous frequency slots that can accommodate it. To avoid this problem, new strategies aim to choose candidate routes more efficiently. In this work we propose an algorithm that aims to reduce spectrum fragmentation in Elastic Optical Networks by allocating new requests in paths that produce less fragmentation after the allocation. The results show that the proposed algorithm is able to reduce the network fragmentation, consequently, reduce the blocking probability by 26% in the COST239 topology and 28% in the PAN-EURO topology.*

**Resumo.** *As Redes ópticas elásticas apresentam importantes características que a tornam uma forte candidata a substituir as redes WDM atuais. Devido a sua maior flexibilidade em acomodar diferentes taxas de transmissão de dados, as Redes ópticas elásticas são mais adequadas para suportar o crescente e heterogêneo tráfego de dados previsto para os próximos anos. No entanto, a maior flexibilidade em prover diferentes taxas de transferência de dados, gera um problema denominado fragmentação do espectro. Na fragmentação de espectro, novas requisições não podem ser atendidas devido à ausência de slots de frequência contíguos e contínuos que possam acomodá-la. Para evitar este problema, novas estratégias visam escolher as rotas candidatas de forma mais eficiente. Neste trabalho propomos um algoritmo que visa reduzir a fragmentação do espectro em Redes ópticas elástica alocando novas requisições em caminhos que produzam menor fragmentação após a alocação. Os resultados mostram que o algoritmo proposto é capaz de reduzir a fragmentação na rede, como consequência, reduzir a probabilidade de bloqueio em 26% na topologia COST239 e 28% na topologia PAN-EURO.*

## 1. Introdução

Estudos recentes apontam que o tráfego de dados de Internet apresentará tendência de crescimento nos próximos anos. Tal aumento advém da popularização de novas tecnologias como 5G que poderão facilitar o surgimento de aplicações como realidade aumentada, carros autônomos e redes veiculares [Wang and Lang 2021]. A popularização destas aplicações demandará das redes de transporte a capacidade de suportar canais com diferentes taxas de dados que podem variar de dezenas a milhares de Gigabits por segundo [Alwis et al. 2021]. Desta forma, novas abordagens precisam ser empregadas nas redes de transporte para que tais futuras demandas possam ser atendidas [Ives et al. 2014, Chen et al. 2019].

O estado-da-prática das redes de transporte atuais implementa a tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (do inglês *Wavelength-Division Multiplexing* (WDM)), caracterizada por possuir canais de comunicação com largura de banda fixa, resultando em uma baixa granularidade [Comellas et al. 2019, Mahala and Thangaraj 2019], que em última instância pode provocar subutilização dos recursos espectrais oferecidos. Além disso, estes canais fixos de comunicação podem não ser suficientes para atender as crescentes demandas por largura de banda [Lu et al. 2021].

Com base neste cenário, estudos sugerem que a Rede Óptica Elástica (do inglês *Elastic Optical Network* (EON)) é uma forte candidata para atender as novas demandas de banda e garantir operação eficiente num cenário de alta heterogeneidade. Para oferecer melhor uso dos recursos espectrais, as redes EON utilizam canais de comunicação reduzidos, da ordem de 12,5 GHz, que podem ser combinados para oferecer largura de banda de forma flexível [Zhang et al. 2013, Gonzalez-Montoro et al. 2021]. Esta característica permite a EON acomodar de forma eficiente múltiplas taxas de dados, oferecer segmentação e agregação de recursos espectrais, bem como variação elástica de taxas de transmissão [Jinno et al. 2011].

Para que uma requisição de conexão seja atendida na rede EON, é necessária a existência de *slots* de frequências suficientes para acomodar esta requisição. Para determinar se é possível atendê-la, o operador de rede deve resolver o problema RMLSA (do inglês *Routing Modulation Level and Spectrum Assignment*) para obter a porção de espectro que será utilizada para acomodar a requisição em análise. A solução do RMLSA deve obedecer às restrições de continuidade e de contiguidade de espectro. A restrição de continuidade de espectro especifica que os *slots* utilizados para uma determina requisição devem ser os mesmos para todos os enlaces que a requisição utiliza. Já a restrição de contiguidade do espectro define que os *slots* utilizados por uma requisição devem ser adjacentes entre si.

Do ponto de vista operacional, a natureza dinâmica do tráfego de dados, a maior granularidade presente nas redes EON e as restrições do problema RMLSA, citadas anteriormente, fazem surgir um fenômeno denominado fragmentação do espectro [Chatterjee et al. 2017]. A fragmentação do espectro se caracteriza pela presença de *slots* de frequência livres, que não obedecem às restrições de contiguidade e/ou continuidade, desta forma impossibilitando que novas requisições sejam atendidas. Alguns trabalhos presentes na literatura lidam com o problema da fragmentação do espectro. Em [Wang et al. 2016, Yao et al. 2017] são propostas estratégias de desfragmentação de espectro as quais são caracterizadas por possuírem alto custo computacional e em deter-

minadas circunstâncias provocar a interrupção de serviço, o que pode afetar a qualidade de serviço. Em [Wang and Mukherjee 2012, Horota et al. 2014, Horota et al. 2016] são propostas abordagens que visam reduzir a fragmentação de espectro gerada escolhendo de forma mais eficiente as rotas para as requisições. Desta forma, são escolhidas rotas que reduzam a fragmentação de espectro da rede. A principal característica destes trabalhos é que eles tomam decisões baseados no cálculo de fragmentação atual da rede, sem avaliar como esta decisão impactará no cenário futuro.

Neste artigo é apresentada uma extensão do algoritmo proposto em [Horota et al. 2014], que ao contrário do trabalho original (que aloca a nova requisição no caminho menos fragmentado) propõe a alocação das requisições no caminho que leva a rede a um estado de fragmentação mínima após a alocação dos recursos. Os resultados mostram que a abordagem proposta foi capaz de reduzir a fragmentação de espectro e reduzir a probabilidade de bloqueio em 26% na topologia COST239 e 28% na topologia PAN-EURO.

O restante desse trabalho é organizado da seguinte forma: Na Seção 2 são apresentadas as principais características das redes EONs. Na Seção 2.1 são apresentados os principais conceitos da fragmentação de espectro. Na Seção 3 os trabalhos relacionados são apresentados. Na Seção 4 descrevemos o problema estudado. Na Seção 5 apresentamos o algoritmo proposto. Na Seção 6 os resultados obtidos são discutidos. Finalmente, na Seção 7 são apresentadas as conclusões.

## **2. Redes Ópticas Elásticas**

As redes WDM são caracterizadas por oferecer canais fixos de comunicação, tipicamente 50 GHz, para estabelecer uma conexão entre nós da rede. Estes canais de comunicação podem não atender as diferentes granularidades de banda exigida pelos diferentes serviços de comunicação resultando na utilização ineficiente do canal [Zhang et al. 2013, Vadrevu et al. 2014]. Um dos principais objetivos das Redes ópticas elásticas é oferecer larguras de banda mais próximas das solicitadas pelos clientes, evitando assim o desperdício dos recursos espectrais. Para que isso seja possível, são utilizados *slots* de frequência com largura espectral de 12.5 GHz, que combinados tem a capacidade de formar canais de comunicação com diferentes taxas de bits [Gerstel et al. 2012].

Outra grande vantagem da EON é a utilização da multiplexação por divisão de frequências ortogonais (do inglês *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM)). Esta técnica de modulação permite que múltiplas subportadoras sejam utilizadas para transportar um sinal. Além disso, a ortogonalidade destas múltiplas subportadoras permite que elas se sobreponham o que resulta em menor quantidade de recursos espectrais utilizados. Além disso, a OFDM permite a utilização de diferentes formatos de modulação. Cada formato de modulação possui eficiência espectral característica, fazendo com que cada um deles seja adequado para situações específicas. Desta forma, formatos de modulação que possuem maior eficiência espectral são melhores opções para criar caminhos de luz de distâncias menores, devido a sua maior susceptibilidade a interferências provenientes das imperfeições de camada física. Por outro lado, modulações com menor eficiência espectral tendem a ter maior resistência a tais interferências e são mais apropriadas a serem utilizadas em caminhos de luz mais distantes.

Para que um canal de comunicação entre dois pares de nós seja estabelecido em

uma rede EON é necessário resolver o problema de roteamento, formato de modulação e atribuição de espectro (do inglês *Routing, modulation level and spectrum assignment* (RMLSA)) [Chatterjee et al. 2015]. Por se tratar de um problema NP-Completo, propõe-se uma heurística que decompõe o problema em duas etapas para facilitar sua resolução.

Na primeira etapa é escolhida a rota para o estabelecimento da conexão. Tipicamente são utilizados algoritmos que calculam o menor caminho, ou os k-menores caminhos. Após a escolha da rota, a segunda etapa do problema lida com a atribuição do formato de modulação. Uma das formas de se escolher o formato de modulação adequado é utilizando seus alcances transparentes, ou seja, o máximo alcance permitido para um formato de modulação sem o uso de conversões OEO.

Cada formato de modulação possui um alcance transparente específico que deve ser respeitado. Além disso, modulações com maior eficiência espectral são mais suscetíveis as interferências provocadas pela camada física o que reduz o seu alcance transparente. A Tabela 1 ilustra os formatos de modulação utilizados neste trabalho e seus respectivos alcances transparentes.

**Tabela 1. Características dos formatos de modulação adotados.**

<b>Formato de modulação</b>	<b>Eficiência espectral (b/s/Hz)</b>	<b>Alcance transparente (km)</b>
BPSK	1	4000
QPSK	2	2000
8-QAM	3	1000
16-QAM	4	500

Após a escolha do formato de modulação é realizada a atribuição do espectro. Para que a atribuição do espectro seja realizada duas restrições precisam ser atendidas. A primeira restrição denominada restrição de contiguidade do espectro visa garantir que os *slots* de frequências utilizados por um canal de comunicação sejam adjacentes entre si. A segunda restrição denominada restrição de contiguidade do espectro visa garantir que os *slots* de mesma posição sejam utilizados em todos os enlaces percorridos pelo caminho de luz. Garantida ambas restrições, a próxima etapa visa realizar a atribuição de espectro nos *slots* encontrados. Diferentes políticas de alocação de espectros tem sido proposta na literatura [Dinarte et al. 2021, Afsharlar et al. 2021]. Uma delas é a *First-Fit* que realiza a alocação de espectro no conjunto de *slot* que possuir o menor índice.

## 2.1. Fragmentação do espectro

A fragmentação de espectro é um fenômeno inerente às EONs. Este fenômeno é produzido pela natureza dinâmica das larguras de banda oferecidas. Com a adoção de vários formatos de modulações, circuitos que possuem a mesma largura de banda podem ocupar quantidade de *slots* distinta. A fragmentação de espectro surge quando um circuito não pode ser provisionado mesmo que exista quantidade suficiente de *slots* disponíveis. Isto ocorre porque eles não respeitam as restrições de continuidade e/ou contiguidade de espectro (Seção 1). Desta forma, ao analisarmos a situação do enlace, verificamos que

existe a quantidade de *slots* livres, no entanto eles não podem ser utilizados para atender a nova requisição.

Algumas métricas foram desenvolvidas com o propósito de computar a fragmentação de espectro em EONs. Estas métricas têm a capacidade de oferecer informações importantes sobre como a fragmentação impacta o desempenho de uma rede EON. A mais comum é a fragmentação externa que para ser computada leva em consideração a quantidade de *slots* presentes no maior bloco livre e a quantidade total de *slots* livres em um enlace como descrito na Equação (1).

$$F_{ext} = 1 - \frac{Maior\_Bloco\_Livre}{Total\_Livre} \quad (1)$$

Desta forma, uma fragmentação de 0% indica que os *slots* de frequência estão bem agrupados e uma fragmentação de 100% indica a presença de diversos fragmentos de *slots*. É importante salientar que esta equação considera a existência de *slots* livres presente na rede. Caso contrário, assume-se que a fragmentação é de 0%. A fragmentação externa será adotada como métrica na avaliação de desempenho da nossa proposta.

### 3. Trabalhos relacionados

A fragmentação do espectro é um importante problema no cenário das redes EON e tem ganhado bastante atenção nos últimos anos. Utilizando uma abordagem de desfragmentação de espectro, os autores em [Yao et al. 2017] propuseram uma estratégia de desfragmentação que leva em consideração a diferenciação de serviço. Nesta proposta as requisições são classificadas em diferentes níveis de serviço e para que a migração ocorra leva-se em consideração a classe de serviço e os níveis de *Bit Error Ratio* (BER). Já em [Wang et al. 2016] os autores propuseram estratégia de desfragmentação que leva em consideração caminhos de proteção visando evitar a interrupção de serviço dos caminhos principais.

Os autores em [Horota et al. 2014] propuseram uma abordagem denominada Algoritmo de RSA com Minimização de Fragmentação (RSA-MF) que seleciona caminhos para a locação de novas requisições com base na fragmentação dos caminhos selecionados. O algoritmo RSA-MF possui uma etapa *offline* onde são computados todos os caminhos simples entre todos os possíveis nós *o-d* da rede. Na fase *online*, são selecionados os caminhos candidatos que possuem espectro disponível para atender a nova requisição e, por fim, é escolhido o caminho candidato que tiver menor grau de fragmentação.

Em [Horota et al. 2016] os autores propuseram o algoritmo denominado *RSA Algorithm with Most Fragmented Path First* (RSA-MFPF). O objetivo desta abordagem é escolher o caminho mais fragmentado para realizar a alocação das requisições visando reduzir a fragmentação geral da rede. A principal ideia por trás desta escolha é que a utilização dos caminhos mais fragmentados pode liberar caminhos menos fragmentados para as requisições futuras.

Em [Wang and Mukherjee 2012] foi proposto o algoritmo denominado *Complete Sharing* (CS) que também tem por objetivo reduzir a fragmentação de espectro da rede. Nesta proposta, são calculadas as *k*-rotas candidatas e dentre as *k*-rotas, são selecionadas as rotas que possuam espectro livre para atender à nova requisição. Por fim, é escolhida

dentre as rotas selecionadas a que possa atender a nova requisição com menor índice de faixa espectral.

Os autores em [Chen et al. 2017] propuseram uma abordagem denominada *The joint fairness-aware and fragmentation-reduction* (FAFR). O objetivo da abordagem é prover justiça entre requisições com diferente largura de banda em *slot*. Desta forma, os autores propõem reserva de espectro para as requisições de acordo com a quantidade de *slots* e a probabilidade de chegada das requisições. A faixa de espectro escolhida é aquela que minimize a soma da fragmentação.

Em [Bao et al. 2021] é proposto um esquema de alocação denominado *Service-driven fragmentation-aware* (SDFA) que visa melhorar a utilização de recurso. Para isso, os autores consideram a fragmentação dos caminhos utilizados e dos enlaces adjacentes. Além disso, os autores propõe uma métrica denominada *Service-driven fragmentation metric* (SDFM) que visa computar fragmentação nos caminhos utilizados e nos enlaces adjacentes.

Os autores em [Liu et al. 2019] propuseram uma abordagem denominada *Fragmentation-avoiding spectrum assignment algorithm based on time-spectrum partition* (FASA-TSP). Esta abordagem consiste na criação de um método de partição de espectro de tempo que divide o espectro disponível em  $n$  partições, então essas partições são divididas em  $M$  partições de espectro de tempos iguais. Também é proposto uma política denominada *Spectrum assignment policy based on time-spectrum partition* (SA-TSP) que visa evitar a colisão de espectro e reduzir a fragmentação de espectro.

A abordagem proposta neste trabalho visa alocar requisições nos caminhos que produzam menor fragmentação de espectro após a alocação de uma nova requisição. Além disso, nossa abordagem se diferencia das demais pelo tipo de roteamento utilizado (computamos todos os menores caminhos não maiores que o diâmetro do grafo) como detalhado na Seção 5. A Tabela 2 apresenta as principais características dos trabalhos relacionados e da nossa abordagem.

#### 4. Descrição do problema

Alguns dos trabalhos apresentados até aqui lidam com a fragmentação do espectro de forma proativa, ou seja, verificam a situação do enlace e só então tomam a decisão de qual rota utilizar para estabelecer a requisição. No entanto, a escolha baseada na situação atual do enlace pode não representar a melhor decisão se pensarmos na condição do enlace após o provisionamento do caminho de luz. Para exemplificar este problema, analisaremos o processo de alocação de uma requisição realizado pelo algoritmo RSA-MF [Horota et al. 2014] entre os pares de nós 1-4 na topologia de 4 nós e 5 arestas, apresentada na Figura 1.

Neste exemplo, consideraremos uma requisição que necessita de 2 *slots* de frequência para atender a sua taxa de transmissão em Gbps. Por questão de simplicidade, a busca pelos caminhos disponíveis não será representada e será admitido que as rotas candidatas a receber a requisição na topologia de exemplo são:  $r_1 = 1-2-3$  e  $r_2 = 1-4-3$ . Além disso, os *slots* de frequências adotados como banda de guarda também não são apresentados.

O algoritmo RSA-MF escolherá a rota que possuir a menor fragmentação de es-

**Tabela 2. Principais pontos cobertos pelos trabalhos relacionados.**

<b>Autores</b>	<b>Métricas avaliadas</b>	<b>Abordagem utilizada</b>	<b>Online</b>
[Wang and Mukherjee 2012]	Bloqueio, Bloqueio de banda, Fragmentação	Situação atual	Sim
[Horota et al. 2014]	Bloqueio, Fragmentação	Situação atual	Sim
[Horota et al. 2016]	Bloqueio, Fragmentação	Situação atual	Sim
[Wang et al. 2016]	Bloqueio, Reconfigurações de caminhos de proteção	Situação atual	Sim
[Yao et al. 2017]	Bloqueio, Utilização de recurso, Tempo de configuração, Número de migração	Situação atual	Sim
[Chen et al. 2017]	Bloqueio, Índice de justiça	Situação futura	Sim
[Bao et al. 2021]	Bloqueio, Utilização de recurso, Fragmentação média	Situação futura	Sim
[Liu et al. 2019]	Bloqueio, Taxa de utilização de espectro, Bloqueio de banda	Situação atual	Sim
Este trabalho	Bloqueio, Bloqueio banda, Fragmentação média	Situação futura	Sim

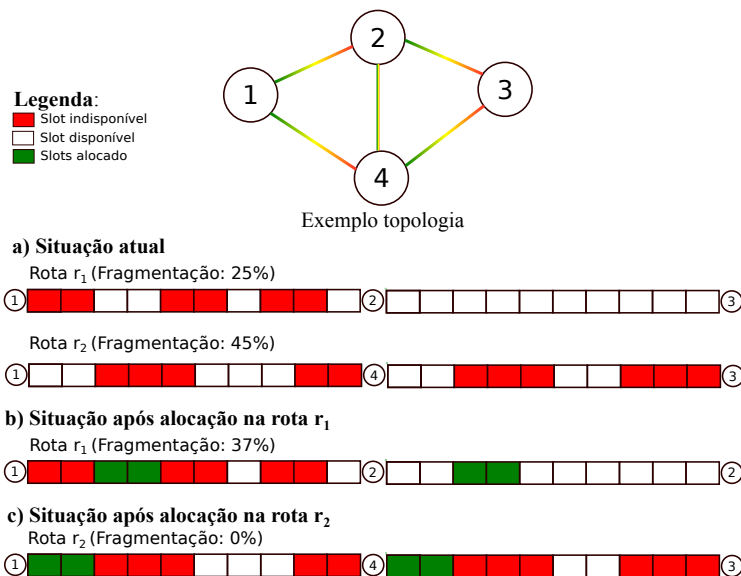
pectro para realizar a alocação da nova requisição. Neste caso, verificando a situação atual das rotas candidatas temos os seguintes valores de fragmentação: para a rota  $r_1$  a fragmentação média calculada é de 25%; já para a rota  $r_2$  a fragmentação média calculada é de 45%.

Diante destas informações, o algoritmo RSA-MF tomará a decisão de alocar a nova requisição na rota  $r_1$ , pois ao analisar a situação atual de enlace, esta rota apresenta a menor média de fragmentação. No entanto, a fragmentação do enlace  $r_1$  após a alocação da nova requisição é de 37%. Por outro lado, se a rota  $r_2$  fosse escolhida, a fragmentação nesta rota após a alocação seria de 0%. Desta forma, evidencia-se que nem sempre a escolha do caminho menos fragmentado será a melhor escolha. O algoritmo proposto neste trabalho visa, diferentemente do algoritmo RSA-MF, alocar a requisição no enlace que produza a menor fragmentação após alocação. Na mesma situação, em vez de escolhermos a rota  $r_1$  como feito pelo algoritmo RSA-MF, será escolhida a rota  $r_2$ , pois a escolha desta rota levará a rota  $r_2$  a um valor de fragmentação menor do que o valor calculado para a rota  $r_1$ .

## 5. Algoritmo proposto

O Algoritmo RSA com Minimização de Fragmentação Pós-Alocação (RSA-MF-PA) é descrito em Algoritmo 1. Ele é dividido em duas etapas. Na fase *Offline* são computados todos os menores caminhos entre cada par  $o-d$  da topologia de rede adotada (Linha 1). É importante salientar que todos os caminhos computados possuem tamanho máximo  $T$  determinado pelo diâmetro da topologia utilizada.

Na fase *Online* com a chegada de uma nova requisição  $r_i$ , são selecionados todos os menores caminhos computados na fase *Offline* entre os nós  $o_i$  e  $d_i$ . Então, para cada caminho selecionado, é definido o formato de modulação mais eficiente obedecendo ao alcance transparente determinado (Tabela 1) e computada a quantidade de *slots* ne-



**Figura 1. Exemplo situação do enlace após a alocação de uma nova requisição. a) Situação atual. b) Alocação considerando a fragmentação atual. c) Alocação considerando a fragmentação resultante.**

cessários para atender a nova requisição de acordo com a Equação (2). Se o caminho possuir *slots* de frequências disponíveis para atender a nova requisição então ele se torna um caminho candidato (Linha 7). Caso não seja encontrado *slots* disponíveis em nenhuma das rotas selecionadas, então a requisição  $r_i$  será bloqueada (Linha 12). Posteriormente, computa-se a fragmentação gerada com a alocação da nova requisição em cada uma das rotas candidatas (Linha 15). Por fim, escolhe-se a rota candidata que produza a menor fragmentação de espectro após a alocação (Linha 17).

### 5.1. Análise de complexidade

A seguir, apresentamos a complexidade do algoritmo proposto para cada fase de operação. Na fase *Offline* a complexidade computada é dada por  $O(|E| + |V| \log |V|)$ , onde  $E$  define o número de arestas e  $|V|$  o número de vértices. Na fase *Online* de operação a complexidade do algoritmo proposto é dada por  $O(OD^2 + |S||P|)$ , onde  $OD$  caracteriza um par origem destino,  $S$  define a quantidade de *slots* e  $P$  representa o tamanho do conjunto de caminhos possíveis.

## 6. Resultados numéricos

A avaliação de desempenho do algoritmo proposto foi realizada através de um simulador de evento discreto baseado em Python que utiliza a biblioteca Simpy. Foi adotado um intervalo de confiança de 95% através de 10 replicações independentes para cada ponto de carga plotado nos gráficos. Cada replicação fez uso de 100000 requisições geradas de forma randômicas, seguindo um processo de Poisson, com *holding-time* exponencialmente distribuído com média 2. Além disso, as demandas de largura de banda destas requisições foram divididas em 10 Gbps, 20 Gbps, 40 Gbps, 80 Gbps, 160 Gbps, 200 Gbps e 400 Gbps em igual proporção. A Equação (2) foi utilizada para estabelecer o número de *slots* de cada requisição



---

**Algoritmo 1:** Algoritmo RSA-MF-PA

---

**Offline:**  
1 Calcula todos os menores caminhos entre cada par  $o-d$

**Online:**  
2 Chegada de uma requisição  $r_i = (o_i, d_i, b_i, )$   
3 Selecciona os caminhos possíveis entre  $o_i-d_i$   
4 **para** cada caminho possível **faça**  
5 | Definir formato de modulação  
6 | Calcular  $n_{slot}$  de  $r_i$  (Eq. (2))  
7 | **se** existe  $n_{slot}$  no caminho seleccionado **então**  
8 | | Define caminho seleccionado como candidato  
9 | **fim**  
10 **fim**  
11 **se** não existe caminho candidato **então**  
12 | | Bloqueia requisição  $r_i$   
13 **senão**  
14 | **para** cada caminho candidato **faça**  
15 | | Computa fragmentação do espectro após a alocação  
16 | **fim**  
17 | Selecciona caminho candidato que produza a menor fragmentação  
18 **fim**

---

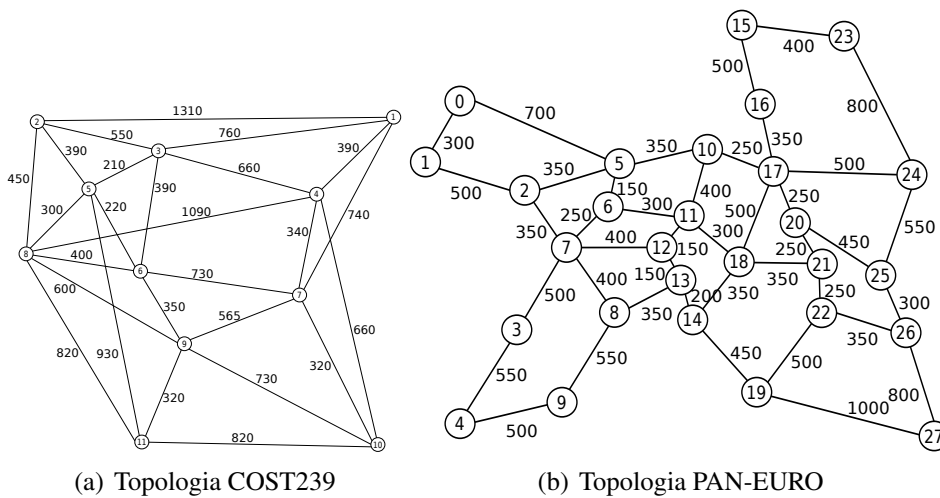
$$N_s = \lceil \frac{B}{M.C} \rceil + N_{GB}, \quad (2)$$

onde  $B$  representa a taxa de transmissão em Gbps,  $M$  representa a eficiência espectral da modulação adotada dada em bits/s/Hz,  $C$  representa a largura espectral de um *slot* de frequência e  $N_{GB}$  especifica o número de *slot* de frequências adotados para a banda de guarda [Anoh et al. 2017].

As topologias de rede COST239 e PAN-EURO foram adotadas nas simulações e são apresentadas na Figura 2 com as distâncias dos enlaces expressas em km.

Foi adotado para cada topologia 300 *slots* de frequência por enlace, cada um com largura espectral de 12,5 GHz. Além disso, 1 *slots* de frequência foi adotado como banda de guarda entre caminhos de luz. A política de alocação de espectro utilizada nas simulações foi a *First-Fit*. O conjunto de modulações utilizadas para estabelecer os caminhos de luz com seus respectivos alcances transparentes foram: BPSK (4000 km); QPSK (2000 km); 8-QAM (1000 km); e 16-QAM (500 km) [Lopes et al. 2021].

As seguintes métricas de desempenho foram adotadas para a comparação dos algoritmos: probabilidade de bloqueio (PB) (ou seja, a quantidade de requisições bloqueadas em relação ao número total de requisições solicitadas), probabilidade de bloqueio de banda (TBB) (ou seja, a quantidade de banda bloqueada em relação ao total de banda solicitada) e fragmentação média de espectro (FM) (ou seja, a fragmentação de cada enlace da topologia dividido pelo total de enlaces). Para capturar a variação da fragmentação média, foram realizadas amostras de fragmentação a cada 1000 requisições durante as



**Figura 2. Topologias de rede adotadas.**

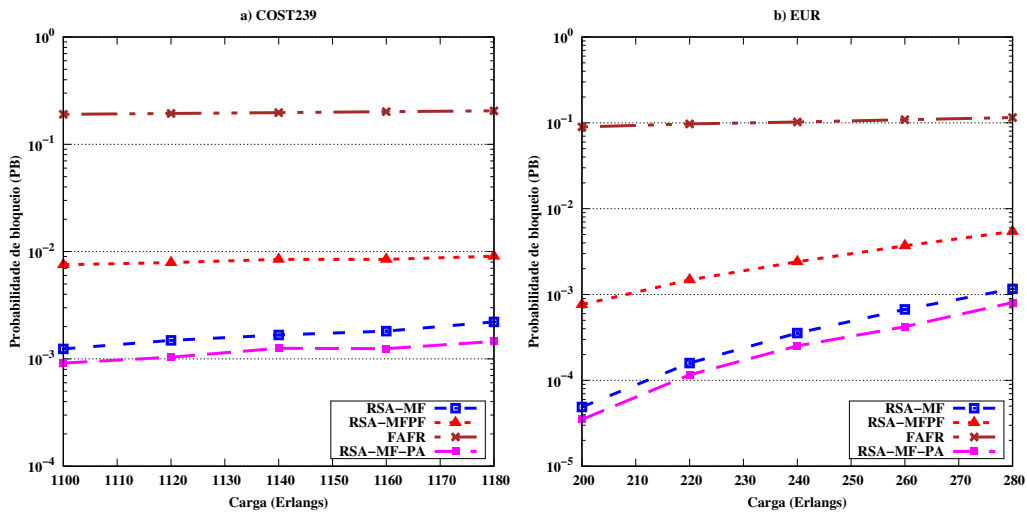
simulações. Foram adotados para a comparação de desempenho os algoritmos RSA-MF, RSA-MFPF e FAFR [Horota et al. 2014, Horota et al. 2016, Chen et al. 2017].

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para a métrica probabilidade de bloqueio em função da carga na rede. O algoritmo RSA-MF-PA apresentou o melhor resultado para a métrica probabilidade de bloqueio quando comparado com as demais abordagens. Quando comparado com o RSA-MF, o RSA-MF-PA apresentou uma redução de 26% na topologia COST239 e 28% na topologia PAN-EURO para o maior ponto de carga avaliado.

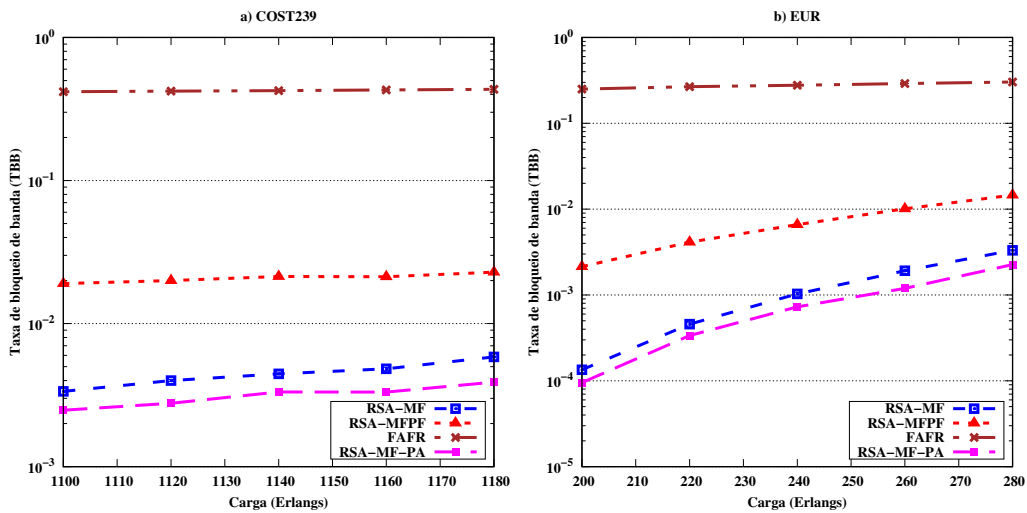
Dentre os algoritmos comparados o FAFR obteve o pior resultado. É importante salientar que este algoritmo leva em consideração a faixa de espectro que produza a menor fragmentação para realizar a alocação da nova requisição. A hipótese para o desempenho inferior se dá pelo particionamento do espectro para larguras de banda com diferente quantidade de *slots*, visando oferecer maior justiça banda. Este particionamento acaba introduzindo uma elevada taxa de bloqueio.

Os resultados obtidos para a métrica probabilidade de bloqueio de banda são apresentados na Figura 4. O algoritmo RSA-MF-PA apresentou novamente o melhor resultado quando comparado aos seus concorrentes. Além disso, os demais algoritmos apresentaram as mesmas posições de desempenho obtido na métrica probabilidade de bloqueio. A redução observada na métrica bloqueio de banda foi de 26% na topologia COST239 e na topologia PAN-EURO foi observada uma redução de 29%. Ambas reduções avaliadas no maior ponto de carga.

Para a métrica fragmentação de espectro (apresentada na Figura 5), o algoritmo RSA-MF-PA obteve o melhor desempenho na topologia PAN-EURO. Foi observada uma redução de 3% em relação ao algoritmo RSA-MFPF na carga de 280 Erlangs. Já na topologia COST239, o algoritmo que obteve o melhor desempenho foi o RSA-MFPF com uma redução de 2% para a carga de 1180 Erlangs. É importante salientar que a redução da fragmentação de espectro obtida pelo algoritmo RSA-MFPF na topologia COST239 é consideravelmente inferior a redução obtida pelo algoritmo proposto nas demais métricas.



**Figura 3. Probabilidade de bloqueio.**



**Figura 4. Probabilidade de bloqueio de banda.**

## 7. Conclusão

Este trabalho apresentou um algoritmo para reduzir a fragmentação de espectro em redes ópticas elásticas. O algoritmo proposto visa escolher rotas que produzam e menor fragmentação de espectro após a alocação da nova requisição. Para avaliar o algoritmo proposto utilizamos abordagens presentes na literatura como o RSA-MF, RSA-MFPF e o FAFR. Para a métrica probabilidade de bloqueio o algoritmo RSA-MF-PA promoveu uma redução de 26% na topologia COST239 e 28% na topologia PAN-EURO. Já para o bloqueio de banda a redução obtida foi de 26% na topologia COST239 e 29% na topologia PAN-EURO. Para a métrica fragmentação de espectro, o algoritmo proposto obteve um desempenho inferior ao do algoritmo RSA-MFPF na topologia COST239. Porém, na topologia PAN-EURO o RSA-MF-PA apresentou o melhor desempenho com uma redução de 3%. Os resultados obtidos apontam que a escolha da rota que produza a menor fragmentação após a alocação se mostrou eficaz na maioria das métricas avaliadas justificando assim a proposta apresentada. Como trabalhos futuros pretendemos utilizar

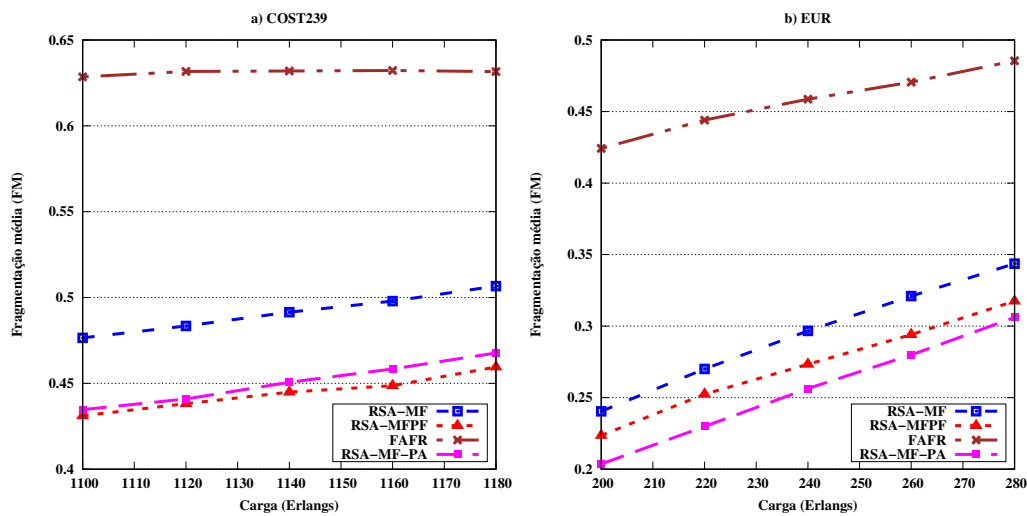


Figura 5. Fragmentação de espectro.

informações de *holding-time* das conexões para agrupá-las com o intuito de gerar menor fragmentação.

## Referências

- Afsharlar, P., Deylamsalehi, A., and Vokkarane, V. M. (2021). Delayed spectrum allocation in elastic optical networks with anycast traffic. *OSA Continuum*, 4(8):2118–2132.
- Alwis, C. D., Kalla, A., Pham, Q.-V., Kumar, P., Dev, K., Hwang, W.-J., and Liyanage, M. (2021). Survey on 6G frontiers: Trends, applications, requirements, technologies and future research. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2.
- Anoh, N. G., Babri, M., Kora, A. D., Faye, R. M., Aka, B., and Lishou, C. (2017). An efficient hybrid protection scheme with shared/dedicated backup paths on elastic optical networks. *Digital Communications and Networks*, 3(1):11–18.
- Bao, B., Yang, H., Yao, Q., Yu, A., Chatterjee, B. C., Oki, E., and Zhang, J. (2021). SDFR: A service-driven fragmentation-aware resource allocation in elastic optical networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*.
- Chatterjee, B. C., Ba, S., and Oki, E. (2017). Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1):183–210.
- Chatterjee, B. C., Sarma, N., and Oki, E. (2015). Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3):1776–1800.
- Chen, H., Yang, H., Luo, B., and Yan, L. (2017). A joint fairness-aware and fragmentation-reduction spectrum allocation scheme in elastic optical networks. In *2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC)*, pages 1–2.
- Chen, X., Li, B., Proietti, R., Lu, H., Zhu, Z., and Yoo, S. J. B. (2019). DeepRMSA: A deep reinforcement learning framework for routing, modulation and spectrum assignment in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 37(16):4155–4163.

- Comellas, J., Nourmohammadi, F., and Junyent, G. (2019). Impact of traffic delay tolerance on elastic optical networks performance. In *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4. IEEE.
- Dinarte, H. A., Correia, B. V., Chaves, D. A., and Almeida Jr, R. C. (2021). Routing and spectrum assignment: A metaheuristic for hybrid ordering selection in elastic optical networks. *Computer Networks*, 197:108287.
- Gerstel, O., Jinno, M., Lord, A., and Yoo, S. B. (2012). Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine*, 50(2):s12–s20.
- Gonzalez-Montoro, N., Finochietto, J. M., and Bianco, A. (2021). Resource-aware provisioning strategies in translucent elastic optical networks. *Computer Communications*, 180:134–145.
- Horota, A., Figueiredo, G. B., and Fonseca, N. L. d. (2014). Routing and spectrum assignment algorithm with fragmentation minimization in elastic optical networks. In *2014 Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems*, pages 436–442.
- Horota, A., Reis, L., Figueiredo, G., and Saldanha Fonseca, N. L. (2016). Routing and spectrum assignment algorithm with most fragmented path first in elastic optical networks. *IEEE Latin America Transactions*, 14(6).
- Ives, D. J., Bayvel, P., and Savory, S. J. (2014). Physical layer transmitter and routing optimization to maximize the traffic throughput of a nonlinear optical mesh network. In *2014 International Conference on Optical Network Design and Modeling*, pages 168–173.
- Jinno, M., Ohara, T., Sone, Y., Hirano, A., Ishida, O., and Tomizawa, M. (2011). Elastic and adaptive optical networks: possible adoption scenarios and future standardization aspects. *IEEE Communications Magazine*, 49(10):164–172.
- Liu, H., Hu, H., Chen, Y., and Du, L. (2019). Fragmentation-avoiding spectrum assignment algorithm based on time-spectrum partition for elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, 53:102020.
- Lopes, R. S., Rosário, D., Cerqueira, E., Villas, L., and Oliveira, H. (2021). 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.
- Lu, J., Fan, Q., Zhou, G., Lu, L., Yu, C., Lau, A. P. T., and Lu, C. (2021). Automated training dataset collection system design for machine learning application in optical networks: an example of quality of transmission estimation. *Journal of Optical Communications and Networking*, 13(11):289–300.
- Mahala, N. and Thangaraj, J. (2019). Spectrum assignment using prediction in elastic optical networks. In *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pages 1–4. IEEE.
- Vadrevu, C. S. K., Wang, R., Tornatore, M., Martel, C. U., and Mukherjee, B. (2014). Degraded service provisioning in mixed-line-rate WDM backbone networks using multi-path routing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 22(3):840–849.

- Wang, C., Shen, G., and Peng, L. (2016). Protection lightpath-based hitless spectrum defragmentation for distance adaptive elastic optical networks. *Opt. Express*, 24(5):4497–4511.
- Wang, J. and Lang, L. (2021). Research on 5G application in special scenarios. In *2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, pages 1616–1619.
- Wang, R. and Mukherjee, B. (2012). Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks. In *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 2907–2911.
- Yao, Q., Yang, H., Xiao, H., Chen, J., Jiang, Y., Huang, Z., Li, Z., Yan, H., Zhu, R., Zhao, Y., and Zhang, J. (2017). A spectrum defragmentation strategy for service differentiation consideration in elastic optical networks. *Optical Fiber Technology*, 38:17–23.
- Zhang, G., De Leenheer, M., Morea, A., and Mukherjee, B. (2013). A survey on OFDM-based elastic core optical networking. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(1):65–87.