

# Provisão de Banda de Guarda Adaptativa em Redes Ópticas Elásticas

Neclyeux Sousa Monteiro<sup>1</sup>, André Castelo Branco Soares<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Computação – Universidade Federal do Piauí (UFPI)  
Teresina – PI – Brasil

neclyeuxsousa@gmail.com

**Abstract.** *The guard band is a frequency interval that separates the active circuits that share the same links in order to reduce interference between them. In this way, the size of the frequency interval used as the guard band can be used in an adaptive way, searching for a balance between quality of transmission and spectral efficiency. The main objective is to study the problem of guard band allocation and to propose new solutions aiming at a better performance of elastic optical networks. In the first scenario, the proposed GUARDIAN algorithm achieved a gain between 99.15% and 99.97% over the other algorithms. In the second scenario, the proposed GBOM algorithm presented a gain between 20.00% and 88.55% over the others.*

**Resumo.** *A banda de guarda é um intervalo de frequência que separa os circuitos ativos que compartilham os mesmos enlaces com objetivo de reduzir a interferência entre eles. Dessa forma, o tamanho do intervalo de frequência utilizado como banda de guarda pode ser utilizado de forma adaptativa, buscando assim um equilíbrio entre qualidade de transmissão e eficiência espectral. O principal objetivo é estudar o problema de alocação de banda de guarda e propor novas soluções visando um melhor desempenho das redes ópticas elásticas. No primeiro cenário o algoritmo proposto GUARDIAN obteve um ganho entre 99,15% e 99,97% em relação aos demais algoritmos. No segundo cenário o algoritmo proposto GBOM apresentou um ganho entre 20,00% e 88,55% em relação aos outros.*

## 1. Introdução

### 1.1. Motivação

Em redes ópticas elásticas, um ou mais slots livres e impedidos de serem utilizados são deixados entre os circuitos ativos com o objetivo de reduzir a interferência entre estes circuitos. Os slots utilizados para esta finalidade são chamados de Banda de Guarda (BG) [Chatterjee et al. 2015].

A seleção de quantos slots serão utilizados na banda de guarda afeta diretamente a utilização dos recursos espectrais. Quanto maior a banda de guarda menor será a interferência entre os circuitos e conseqüentemente melhor será a qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) destes circuitos e aumenta também a probabilidade de bloqueio por ausência de recursos espectrais da rede. Por outro lado, quanto menor a banda de guarda maior será a interferência entre os circuitos e conseqüentemente pior será a QoT destes circuitos e também ocorre a redução da probabilidade de bloqueio por ausência de recursos espectrais da rede [Cao Chen et al. 2017].

## 1.2. Propostas e Objetivos

Selecionar de forma eficiente a banda de guarda é um desafio, visto que esta tarefa pode afetar diretamente a qualidade de transmissão dos circuitos, e conseqüentemente, o desempenho geral da rede. No âmbito deste trabalho de mestrado, o problema da alocação da banda de guarda foi estudado e foram desenvolvidas 5 (cinco) soluções diferentes, visando selecionar de forma adaptativa a quantidade de slots a serem usados como banda de guarda.

Os algoritmos desenvolvidos são chamados de *Guard Band according to Use of the Network* (GBUN), *Fuzzy System to Adaptive Guard Band* (UTOPIAN), *Guard Band by OSNR Margin* (GBOM), *Guard Band by Multi Layer Perceptron* (GUARDIAN) e *Adaptive Guard Band by Convolutional Neural Network* (ADVANCE).

Com este algoritmos, espera-se melhorar a qualidade de transmissão dos circuitos ópticos, estabelecendo assim mais circuitos e conseqüentemente melhorando a utilização dos recursos espectrais da rede. É apresentado um estudo de avaliação de desempenho comparando todos os algoritmos desenvolvidos para seleção de banda de guarda adaptativa, bem como a proposta adaptativa encontrada na literatura apresentada em [Takeshita et al. 2016]. A avaliação é feita observando as métricas probabilidade de bloqueio de banda e eficiência energética, bem como as componentes que mais impactaram nesse bloqueio.

## 1.3. Contribuições Científicas

Desde o início deste mestrado, 4 (quatro) trabalhos foram produzidos e publicados, sendo 2 (dois) deles em uma conferência nacional, 1 (um) em uma conferência internacional e 1 (um) em um periódico internacional. Os trabalhos desenvolvidos estão listados abaixo :

- **Monteiro, N.**, Soares, A., Fontinele, A., Santos, I., Campelo, D., & Oliveira, A. (2019). Novo Algoritmo para Provisão de Banda de Guarda Adaptativa em Redes Ópticas Elásticas. In Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, (pp. 307-320). Porto Alegre: SBC. <https://doi.org/doi:10.5753/sbrc.2019.7368>
- **Monteiro, N.**, Junior, W., Fontinele, A., Campelo, D., Paiva, A., Rabêlo, R., & Soares, A. (2020). Alocação de Banda de Guarda Adaptativa Utilizando Redes Neurais Multi Layer Perceptron em Redes Ópticas Elásticas. In Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, (pp. 770-783). Porto Alegre: SBC.
- W. L. Rodrigues, **N. Sousa Monteiro**, F. A. Silva Borges, R. de Andrade Lira Rabelo and A. C. Branco Soares, An Adaptive Guard Band Selection based on Convolutional Neural Network, 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Toronto, ON, 2020, pp. 2814-2821, <https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9283197>.
- **Monteiro, N.S.**, Fontinele, A.C., Campelo, D.R. et al. Provision of adaptive guard band in elastic optical networks. Journal of Internet Services and Applications 11, 5 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13174-020-00126-3>

## 2. Redes Ópticas Elásticas

### 2.1. Conceitos de Redes Ópticas

A rede óptica elástica permite a divisão do espectro óptico em uma granularidade fina, também denominada slot de frequência, melhorando significativamente a eficiência espectral com alocação flexível de largura de banda. Dessa forma, cada circuito pode usar um número diferente de slots, dependendo da demanda de largura de banda [Chatterjee et al. 2015]. Nas redes ópticas elásticas os circuitos ópticos são constituídos por um ou mais slots de frequência.

As imperfeições de camada física causam degradações no sinal óptico. Essas degradações podem ser divididas em duas categorias: i) efeitos lineares; e ii) efeitos não lineares [Rahbar 2012]. Neste trabalho de mestrado foi adotado o modelo de camada física apresentado em [Johannisson and Agrell 2014, Yan et al. 2015] para mensurar os impactos dos ruídos na relação sinal-ruído óptica (OSNR).

Nesta dissertação de mestrado, a OSNR é usada como critério de QoT. Caso o valor da OSNR alcançada pelo circuito não esteja acima ou igual a um limiar de OSNR preestabelecido, o estabelecimento do circuito pode ser bloqueado por ausência de QoT. Um bloqueio por ausência de QoT pode acontecer de duas formas: i) QoT inadequada para o novo circuito (QoTN) ou ii) QoT inadequada para um ou mais circuitos já ativos na rede (QoTO) [Fontinele et al. 2017].

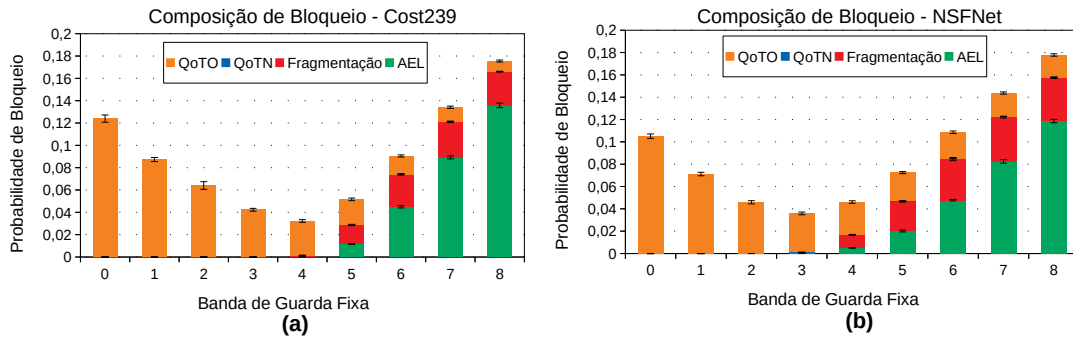
## 3. Problema da Seleção da Banda de Guarda

Para um uso eficiente das redes ópticas elásticas é necessário solucionar o problema de roteamento, seleção de formato de modulação e alocação de espectro (RMLSA – *Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*). A primeira etapa do problema consiste em selecionar uma rota entre os nós origem e destino de uma requisição. Após a escolha da rota, o próximo passo é a escolha do formato de modulação. O formato de modulação escolhido em conjunto com a taxa de transmissão requisitada determina a quantidade de slots necessários para atender a requisição. Por fim, é preciso escolher uma faixa do espectro adequada para alocar o circuito óptico. Para um circuito ser estabelecido, é preciso atender as restrições de continuidade e contiguidade.

Em redes ópticas elásticas utiliza-se a banda de guarda com o intuito de minimizar a interferência entre circuitos ativos e adjacentes. Quando o algoritmo RMLSA está realizando a busca pela faixa de slots livres que respeita as restrições de continuidade e contiguidade ele também leva em consideração a quantidade de slots definida como banda de guarda. A banda de guarda é levada em consideração durante o cálculo da quantidade de slots totais necessários para estabelecer o circuito.

Deve-se ter cautela com a quantidade de slots usados como banda de guarda. A Figura 1 apresenta o comportamento da probabilidade de bloqueio de banda em função do valor fixo selecionado como banda de guarda. Foram realizadas 9 (nove) simulações, variando o valor da banda de guarda fixa de 0 a 8 slots nas topologias Cost239 e NSFNet (*National Science Foundation Network*).

Observa-se pela Figura 1 que à medida que a banda de guarda é aumentada a componente QoTO da probabilidade de bloqueio diminui em ambas topologias. Bloqueios de



**Figura 1. Composição do bloqueio de banda em função da banda de guarda fixa para as topologias (a) Cost239 e (b) NSFNet.**

requisições de circuito por QoTO estão diretamente relacionados a interferências entre os circuitos. Por outro lado, as componentes Fragmentação, Ausência de Espectro Livre (AEL) e QoTN, que não estão relacionadas a interferências entre circuitos, tendem a aumentar devido a falta de recursos espectrais.

### 3.1. Trabalhos Relacionados

Poucos trabalhos [Chen et al. 2013, Takeshita et al. 2016, Cao Chen et al. 2017] encontrados na literatura investigam o problema de ajustar a banda de guarda para realizar um equilíbrio entre bloqueios por falta de recursos espectrais e bloqueios devido a qualidade de transmissão.

Em [Chen et al. 2013] é realizado um estudo de probabilidade de bloqueio com roteamento *singlepath* e *multipath*. Os autores ainda investigam como diferentes tamanhos de banda de guarda podem afetar o desempenho do algoritmo de roteamento. No entanto, não é utilizada uma forma de mensurar a QoT dos circuitos e nem a interferência entre eles, uma banda de guarda maior leva a uma probabilidade de bloqueio maior.

Em [Takeshita et al. 2016] os autores propõem um algoritmo de atribuição de banda de guarda chamado de *Adaptive Guard Band Assignment (AGBA)*. O algoritmo AGBA utiliza dois valores para a banda de guarda (1 e 2 slots) e esses valores são atribuídos de acordo com a quantidade de enlaces da rota que o circuito utilizará.

Em [Cao Chen et al. 2017] os autores realizam um estudo para identificar o tamanho de banda de guarda ideal a ser fixado com o objetivo de reduzir os impactos causados por efeitos não lineares. Os autores apresentam um estudo semelhante ao apresentado na Figura 1.

As propostas encontradas na literatura não exploram técnicas computacionais mais eficientes ou que possuem uma capacidade maior de otimização como as de aprendizagem de máquina. Além disso, a proposta adaptativa de [Takeshita et al. 2016] escolhe a banda de guarda baseada em apenas um parâmetro.

Este trabalho propõe então a utilização de novas técnicas para atribuir dinamicamente a banda de guarda, com uma capacidade maior de otimização, objetivando assim um melhor uso dos recursos espectrais da rede. Tais propostas serão desenvolvidas em um cenário que leva em consideração os efeitos causados pela camada física. Outro aspecto importante é levar em consideração informações do estado da rede e da requisição ao se

escolher o valor a ser utilizado como banda de guarda.

## 4. Algoritmos Propostos para Seleção Dinâmica da Banda de Guarda

### 4.1. *Guard Band according to Use of the Network* - GBUN

O algoritmo chamado de *Guard Band according to Use of the Network* (GBUN) é aplicado logo após a chegada de uma requisição de circuito. Depois da definição da banda de guarda realizada pelo GBUN, baseada no nível de utilização atual da rede, o plano de controle executa o algoritmo RMLSA selecionado pelo operador da rede. Em seguida, é verificado se é possível realizar o estabelecimento do novo circuito requisitado. Se não for possível o estabelecimento do novo circuito é identificado e contabilizado o bloqueio por uma das componentes de bloqueio já mencionadas (Fragmentação, AEL, QoTN ou QoTO). Caso seja possível o estabelecimento do novo circuito, a banda de guarda e os recursos definidos anteriormente pelo algoritmo RMLSA são alocados na rede. O algoritmo GBUN busca selecionar um valor de banda de guarda menor quando a rede se encontra mais utilizada e um valor de banda de guarda maior quando a rede se encontra pouco utilizada.

### 4.2. *Guard Band by OSNR Margin* - GBOM

O algoritmo chamado de *Guard Band by OSNR Margin* (GBOM) possui como entrada o circuito, um formato de modulação, um conjunto de possíveis bandas de guarda e uma margem de OSNR desejada ( $\sigma$ ). O algoritmo GBOM verifica as possíveis bandas de guarda em ordem crescente, sendo o valor mínimo igual a 1 slot e o valor máximo igual a 8 slots. Para cada banda de guarda selecionada, o GBOM aplica o algoritmo de atribuição do espectro selecionado considerando a informação do circuito e o formato de modulação. Se for possível atribuir espectro, o algoritmo calcula a QoT do circuito. Se a QoT for aceitável, o  $\Delta OSNR$  é calculado. O  $\Delta OSNR$  é calculado através da subtração entre  $OSNR_{circuito}$  e o  $OSNR_{limiar}$ , onde  $OSNR_{limiar}$  é o limiar de OSNR do formato de modulação. A banda de guarda que atingir o valor de  $\Delta OSNR$  maior ou igual a margem de OSNR desejada ( $\sigma$ ) é a banda de guarda escolhida para ser utilizada para o estabelecimento do novo circuito.

### 4.3. *Guard Band by Multi Layer Perceptron* - GUARDIAN

Neste algoritmo foram utilizadas as redes neurais de camadas múltiplas ou *Multi Layer Perceptrons* (MLPs). Uma rede MLP tem a capacidade de aprender por meio de treinamento. O algoritmo é chamado de *GUARd band by multi lAyer perceptrON* (GUARDIAN). Primeiramente é necessário criar uma base de dados para realizar o treinamento da rede neural. Cada registro da base de dados é composto por características da rede e da requisição no momento em que o circuito foi estabelecido durante uma simulação feita previamente para realizar a extração de dados.

As características extraídas para montar a base de dados do treinamento são as seguintes: a) total de slots usados pelo enlace mais utilizado da rota escolhida, b) utilização desse enlace, c) número de circuitos ativos no enlace, d) número de enlaces da rota, e) total de slots livres na rota, f) utilização geral da rede, g) modulação escolhida e h) OSNR do circuito. Estes parâmetros por sua vez são as variáveis de entrada que são passadas para a rede MLP. É armazenado também na base de dados o valor da banda de guarda escolhida, que por sua vez é a variável de saída da rede MLP.

Após a chegada de uma requisição, é feita a escolha da rota e da modulação pelo algoritmo RMLSA. Durante essa etapa, é aplicado o algoritmo GUARDIAN, em conjunto com o algoritmo de seleção do formato de modulação. Um conjunto de dados com as características extraídas, listadas anteriormente, são passadas como entrada para a rede MLP treinada. A rede MLP então realiza a predição do valor de banda de guarda a partir dos novos dados de entrada e do treinamento realizado anteriormente.

#### **4.4. Fuzzy System to Adaptive Guard Band - UTOPIAN**

O algoritmo proposto nesta Seção é chamado de UTOPIAN (fUZZY sysTem tO adaPtive guArD baNd). A proposta consiste em utilizar um sistema *fuzzy* para selecionar a banda de guarda. O UTOPIAN usa duas variáveis de entrada: utilização do enlace mais utilizado da rota e a eficiência espectral baseada na modulação escolhida.

A primeira etapa do sistema fuzzy é o processo de fuzzificação. Nessa etapa é obtido o grau de pertinência de cada entrada em relação ao seu conjunto fuzzy. Após a obtenção das entradas fuzzificadas, é a vez de aplicá-las na base de regras para obter um valor pertinente a cada regra. Por fim, para obter a saída numérica a última etapa necessária é o processo de defuzzificação. Após o processo de defuzzificação, a saída do sistema fuzzy é o número de slots que vão ser usados pelo circuito como banda de guarda.

#### **4.5. Adaptive Guard Band by Convolutional Neural Network - ADVANCE**

O algoritmo proposto nesta Seção é chamado de ADaptiVe guArD baNd by Convolutional neural nEtwork (ADVANCE) e utiliza a técnica chamada de redes neurais convolucionais. As características extraídas são as seguintes: a) total de slots usados pelo enlace mais utilizado da rota escolhida, b) número de circuitos ativos nesse enlace, c) número de enlaces da rota e d) modulação escolhida. Estas por sua vez são as variáveis de entrada que são passadas para o ADVANCE. É armazenado também na base de dados o valor da banda de guarda escolhida, que por sua vez é a variável de saída do ADVANCE.

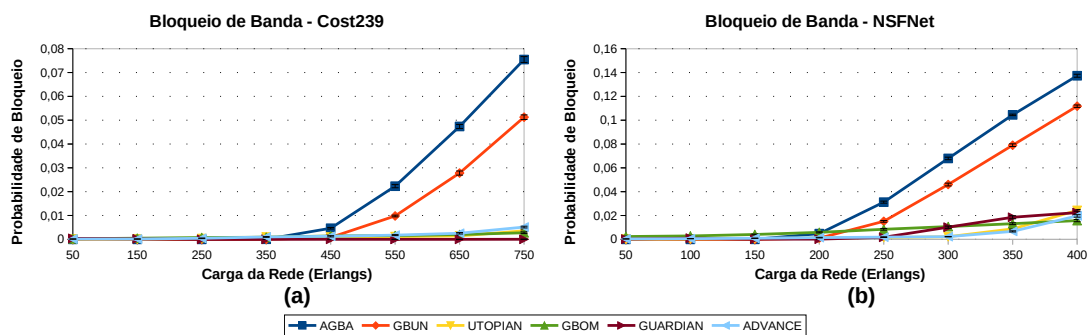
Um conjunto de dados com as características extraídas, é passado como entrada para a rede neural profunda treinada. A rede neural profunda proposta então realiza a predição do valor da banda de guarda a partir dessas novas características de entrada. Como saída, obtém-se o número de slots a serem usados como banda de guarda.

### **5. Avaliação de desempenho**

As simulações foram realizadas usando o simulador SNetS (*SLICE Network Simulator*) [Fontinele et al. 2017] e foram consideradas as topologias Cost239 e NSFNet. Todos os enlaces da rede são bidirecionais e possuem largura de banda do espectro dividida em 320 slots de frequência. Um slot de frequência possui largura de banda de 12,5 GHz.

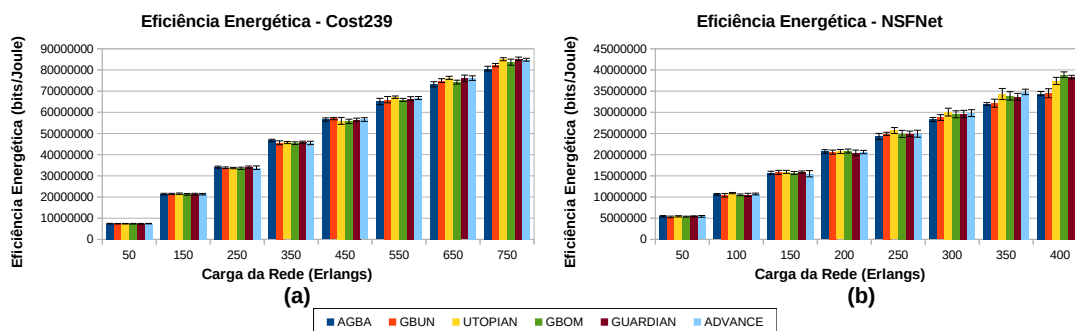
Para avaliar o desempenho dos algoritmos propostos nesta dissertação de mestrado, foram consideradas as métricas probabilidade de bloqueio de banda e eficiência energética. A Figura 2 apresenta a probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos AGBA, GBUN, UTOPIAN, GBOM, GUARDIAN E ADVANCE para as topologias Cost239 e NSFNet.

Ao analisar a Figura 2, podemos perceber que em ambas as topologias, os algoritmos AGBA e GBUN obtiverem um pior desempenho, atingindo probabilidades de



**Figura 2. Probabilidade de bloqueio de banda para as topologias (a) Cost239 e (b) NSFNet.**

bloqueios altas em comparação com as outras propostas nos últimos pontos de carga. Na topologia Cost239, o algoritmo GUARDIAN obteve uma menor probabilidade de bloqueio de banda quando comparado com os outros algoritmos, em todos os pontos de carga, chegando no último ponto (750 Erlangs) com um bloqueio de 0,0023%, bem próximo a zero. Na topologia NSFNet, o algoritmo GBOM obteve um comportamento mais linear, por isso, apesar de não ter um melhor desempenho nos pontos de 300 e 350 Erlangs, no último ponto (400 Erlangs) ele se destaca, apresentando uma menor probabilidade de bloqueio, chegando a 1,57%. A Figura 3 apresenta a eficiência energética obtida pelos algoritmos AGBA, GBUN, UTOPIAN, GBOM, GUARDIAN e ADVANCE em função da carga da rede para as topologias Cost239 e NSFNet, respectivamente.



**Figura 3. Eficiência energética para as topologias (a) Cost239 e (b) NSFNet.**

Analisando a Figura 3, no geral, os algoritmos avaliados não apresentam diferença significativa em ambas as topologias. Na topologia Cost239, o algoritmo GUARDIAN apresentou uma melhor eficiência energética de aproximadamente 5,79%, 3,61%, 0,25%, 1,94% e 0,53% em relação aos algoritmos AGBA, GBUN, UTOPIAN, GBOM e ADVANCE, respectivamente. De forma análoga, na topologia NSFNet, o algoritmo GBOM obteve uma eficiência energética melhor de aproximadamente 13,00%, 12,67%, 3,94%, 1,46% e 0,80% em relação aos algoritmos AGBA, GBUN, UTOPIAN, GUARDIAN e ADVANCE, respectivamente.

## 6. Conclusões

Nesta dissertação de mestrado foram propostos 5 (cinco) algoritmos para selecionar de forma adaptativa a quantidade de slots que vão ser usados como banda de guarda. Os

algoritmos desenvolvidos são chamados de GBUN, UTOPIAN, GBOM, GUARDIAN e ADVANCE.

Tais algoritmos utilizam desde heurísticas simples até técnicas de otimização mais complexas como aprendizagem profunda. Um estudo comparativo entre os algoritmos foi realizado observando as métricas de probabilidade de bloqueio de banda e eficiência energética.

Em relação a probabilidade de bloqueio de banda, o algoritmo GUARDIAN apresentou uma menor probabilidade de bloqueio, obtendo um ganho entre 99,15% e 99,97% em relação aos demais algoritmos na topologia Cost239. Por outro lado, na topologia NSFNet, o algoritmo GBOM apresentou uma menor probabilidade de bloqueio, com um ganho entre 20,00% e 88,55% em relação aos outros algoritmos.

No que se refere a eficiência energética, no geral, os algoritmos não apresentam diferença significativa, em ambas as topologias estudadas. Na topologia Cost239 o GUARDIAN obteve uma eficiência energética melhor que os demais, entre 0,25% e 5,79%. Na topologia NSFNet, o GBOM obteve uma eficiência superior entre 0,80% e 13,00%.

## Referências

- Cao Chen, Min Ju, Shilin Xiao, Fen Zhou, and Xueling Yang (2017). Minimizing total blocking by setting optimal guard band in nonlinear elastic optical networks. In *2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pages 1–4.
- 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, X., Zhong, Y., and Jukan, A. (2013). Multipath routing in elastic optical networks with distance-adaptive modulation formats. In *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 3915–3920.
- Fontinele, A., Santos, I., Neto, J. N., Campelo, D. R., and Soares, A. (2017). An efficient ia-rmlsa algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, 118:1–14.
- Johannisson, P. and Agrell, E. (2014). Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, 32(23):4544–4552.
- Rahbar, A. G. (2012). Review of dynamic impairment-aware routing and wavelength assignment techniques in all-optical wavelength-routed networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 14(4):1065–1089.
- Takeshita, H., Noguchi, H., Abe, J., Fujisawa, S., and Tajima, A. (2016). Adaptive guard-band assignment with adaptive spectral profile equalizer to improve spectral usage of impairment-aware elastic optical network. In *ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication*, pages 1–3.
- Yan, L., Agrell, E., Wymeersch, H., Johannisson, P., Di Taranto, R., and Brandt-Pearce, M. (2015). Link-level resource allocation for flexible-grid nonlinear fiber-optic communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(12):1250–1253.