

# Novo Algoritmo para Provisão de Banda de Guarda Adaptativa em Redes Ópticas Elásticas

Neclyeux Monteiro<sup>1</sup>, Alexandre Fontinele<sup>2</sup>, Iallen Santos<sup>2,3</sup>,  
Antonio Costa<sup>1</sup>, Divanilson R. Campelo<sup>2</sup> e André Soares<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Centro de Informática (CIn) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)  
Recife – PE – Brasil

<sup>3</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)  
São Raimundo Nonato – PI – Brasil

neclyeuxsousa@gmail.com

**Abstract.** *Elastic optical networks comprise a network infrastructure capable of withstanding the high demand of high-speed data traffic networks. One of the problems that must be solved to ensure the proper functioning of the network is called Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment (RMLSA). This work aims to propose a new approach to this problem through the use of an algorithm for the provision of guard band adaptive, based on the level of network utilization, called GBUN. The performance of the proposed algorithm is compared with algorithms that use fixed guard band values and the adaptive proposed AGBA. The results show that proposed algorithm presents a better performance in terms of bandwidth blocking probability for the scenarios studied.*

**Resumo.** *As redes ópticas elásticas compõem uma infraestrutura de rede capaz de suportar a grande demanda de tráfego de dados das redes de alta velocidade. Um dos problemas que devem ser solucionados para garantir o bom funcionamento da rede é o chamado Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment (RMLSA). Este trabalho tem como objetivo propor uma nova abordagem para esse problema por meio do uso de um algoritmo para provisão de banda de guarda adaptativa, baseado no nível de utilização da rede, chamado de GBUN. O desempenho do algoritmo proposto é comparado com algoritmos que usam valores de banda de guarda fixa e a proposta adaptativa AGBA. Os resultados mostram que o algoritmo proposto apresenta um melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda para os cenários estudados.*

## 1. Introdução

Os serviços emergentes (tais como realidade virtual/realidade aumentada, rede móvel 5G, serviços de vídeo de alta definição, serviços de computação em nuvem, etc.) têm estimulado o desenvolvimento e transformação das tecnologias de comunicação óptica [Wu et al. 2017, Zhu et al. 2017]. As redes ópticas elásticas, com base na tecnologia de multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), têm atraído o interesse de pesquisas nos últimos anos. Pois podem

melhorar significativamente a eficiência espectral da camada óptica com alocação flexível de largura de banda [Chatterjee et al. 2015]. Essa arquitetura de rede óptica permite a divisão do espectro óptico em pequenos intervalos de frequência chamados de slots. Assim, cada circuito pode alocar uma quantidade diferente de slots dependendo da sua demanda de largura de banda.

Otimizar a utilização dos recursos e, conseqüentemente, melhorar o desempenho da rede, é uma tarefa que envolve a resolução de uma série de problemas. No contexto das redes ópticas elásticas, um dos principais desafios para o estabelecimento de um circuito óptico é o problema de roteamento, seleção de formato de modulação e alocação de espectro (RMLSA – *Routing, Modulation Level, and Spectrum Assignment*) [Christodouloupoulos et al. 2011]. O problema RMLSA consiste em i) definir uma rota para um par de nós origem e destino; ii) selecionar um formato de modulação adequado para essa rota e iii) escolher uma faixa de espectro livre (conjunto de slots contíguos e contínuos) na rota definida.

Outro desafio no planejamento e operação de redes ópticas elásticas é reduzir os impactos das imperfeições de camada física na qualidade do sinal óptico. Nas redes ópticas elásticas transparentes, objeto de investigação deste trabalho, os dados são transmitidos da fonte para o destino como um sinal óptico. Toda a operação de roteamento é realizada no domínio óptico sem qualquer conversão para o domínio eletrônico. O sinal óptico sofre degradação à medida que se propaga da origem para o destino devido às imperfeições da camada física. O acúmulo das degradações no sinal óptico ao longo de uma rota pode tornar a taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*) intolerável no receptor, inviabilizando a comunicação [Beyranvand and Salehi 2013].

Em redes ópticas elásticas usa-se um ou mais slots livres entre os slots utilizados para o estabelecimento dos circuitos ópticos com a finalidade de reduzir as interferências entre os circuitos. Esses slots livres entre os circuitos são chamados de banda de guarda (GB – *Guard Band*) [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 melhor será a qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) e aumenta também a probabilidade de bloqueio por ausências de recursos espectrais da rede. Por outro lado, quanto menor a banda de guarda pior será a QoT e também ocorre a redução da probabilidade de bloqueio pela ausência de recursos espectrais da rede [Chen et al. 2017].

Este artigo apresenta uma nova proposta que consiste em selecionar a quantidade de slots usados na banda de guarda baseada no estado atual da rede. O algoritmo proposto, chamado de *Guard Band according to Use of the Network* (GBUN), leva em consideração o estado de utilização de espectro da rede para determinar a banda de guarda que deverá ser utilizada para o estabelecimento de um determinado circuito. É apresentado um estudo de avaliação de desempenho comparando a seleção de banda de guarda adaptativa com valores fixos para a banda de guarda usados pela literatura e a proposta adaptativa apresentada em [Takeshita et al. 2016]. Os resultados mostram que selecionar a banda de guarda de forma adaptativa é mais eficiente para a redução da probabilidade de bloqueio geral da rede.

As demais seções deste artigo estão organizadas da seguinte forma. Na seção

2 é apresentada a arquitetura da rede óptica elástica e é descrito o modelo de camada física adotado neste trabalho. A Seção 3 apresenta o problema RMLSA e o problema da configuração da banda de guarda e discute os trabalhos relacionados. O algoritmo proposto é apresentado na Seção 4. A Seção 5 apresenta um estudo de avaliação de desempenho da proposta. Por fim, as conclusões do trabalho são destacadas na Seção 6.

## 2. Arquitetura da Rede Óptica Elástica e Modelo de Camada Física

A incorporação da tecnologia OFDM nas redes ópticas permitiu o surgimento de um novo tipo de rede óptica de transporte chamada de rede óptica elástica, proposta em [Jinno et al. 2009]. A tecnologia OFDM permite a divisão do espectro óptico em uma granularidade fina, também denominada de slots de frequência. Em uma rede óptica, para que os clientes (nós) se comuniquem uns com os outros, é necessário que sejam estabelecidos circuitos ópticos. Nas redes ópticas elásticas os circuitos ópticos são constituídos por um ou mais slots de frequência. A quantidade de slots de frequência depende da largura de banda requerida para cada circuito óptico. A Figura 1 apresenta um exemplo de divisão do espectro óptico em slots de frequência.

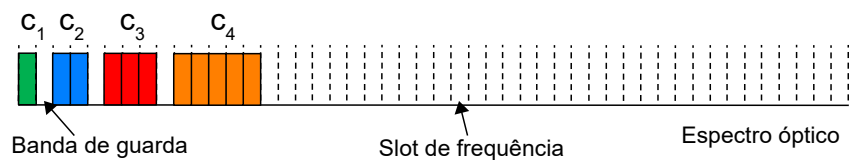
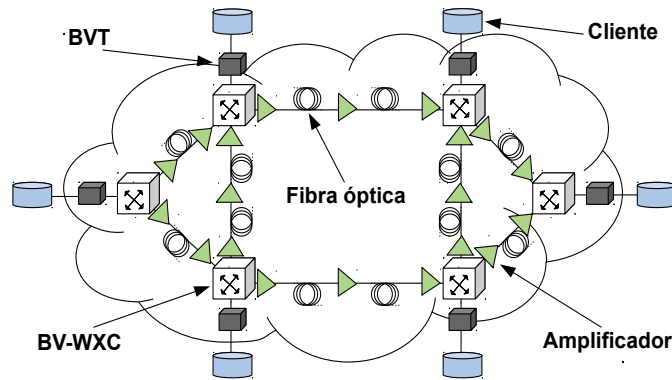


Figura 1. Exemplo de divisão do espectro óptico em slots de frequência.

Na Figura 1, os slots brancos representam slots livres e os slots coloridos representam slots ocupados por circuitos. Os slots livres entre os slots ocupados por circuitos representam a banda de guarda. A banda de guarda é usada para reduzir a interferência entre circuitos adjacentes [Zhao et al. 2015]. Ilustra-se ainda na Figura 1, a alocação de quatro circuitos com larguras de banda distintas. A alocação dos slots de frequência é ajustado para atender a largura de banda requisitada. Por exemplo, o circuito  $c_1$  aloca apenas um slot de frequência, enquanto o circuito  $c_4$  aloca cinco slots de frequência.

Para garantir a flexibilidade na utilização do espectro óptico as redes ópticas elásticas utilizam duas tecnologias: Transponder com largura de banda variável (BVT – *Bandwidth Variable Transponders*) e comutador óptico com largura de banda variável (BV-WXC – *Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connects*). Os BVTs são responsáveis por garantir a flexibilidade na utilização dos recursos espectrais na transmissão e recepção de dados nos nós de origem e destino. Os BVTs são utilizados para ajustar a largura de banda conforme a taxa de bits de transmissão ou formato de modulação adotado. Os BV-WXCs permitem a comutação óptica de circuitos que utilizam circuitos com largura de espectro ajustada dinamicamente [Chatterjee et al. 2015]. A Figura 2 ilustra a disposição dos BVTs, BV-WXCs, amplificadores e fibras ópticas em uma rede óptica elástica.

Como pode ser observado na Figura 2, os BVTs se localizam nos nós de borda da rede elástica, permitindo a transmissão e recepção dos dados dos clientes. Depois do processo de admissão de uma requisição, o circuito óptico é estabelecido a partir de um



**Figura 2. Arquitetura da rede óptica elástica.**

BVT no nó de origem. Este circuito atravessa de forma transparente os BV-WXC nos nós intermediários (sinais transientes), e termina em um BVT no nó de destino.

Durante a transmissão do sinal óptico, quanto maior a distância percorrida na fibra, maior será a atenuação da potência de sinal. Isso ocorre de tal forma que gera uma necessidade em amplificar o sinal óptico para que este restabeleça sua potência e assim possa ser detectado no destino. Os amplificadores também são utilizados para compensar perdas do sinal óptico inseridas pelos BV-WXCs. Usualmente, a amplificação óptica é realizada pelo equipamento amplificador (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*). No momento da amplificação, os EDFAs introduzem o ruído da emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) [Saradhi and Subramaniam 2009].

Além disso, ainda ocorrem ruídos gerados pelos efeitos não lineares (NLIs – *Non-linear Impairments*) quando o sinal se propaga pelas fibras. Dentre os efeitos não lineares estão [Saradhi and Subramaniam 2009]: Auto-Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*), Modulação de Fase Cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*) e Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*) [Saradhi and Subramaniam 2009].

Neste trabalho foi adotado o modelo de camada física apresentado em [Johannisson and Agrell 2014, Yan et al. 2015] para mensurar os impactos dos ruídos ASE e NLIs na relação sinal-ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*). O cálculo da SNR para um circuito  $i$  usando uma rota  $r_i$  é expresso por:

$$SNR_i = \frac{I}{I_{ASE} + I_{NLI}}. \quad (1)$$

A variável  $I$  é a densidade espectral da potência do sinal (PSD – *Power Spectral Density*),  $I = P_{TX}/\Delta_f$ , em que  $P_{TX}$  é potência de sinal e  $\Delta_f$  é a largura de banda do circuito. A PSD do ruído ASE é dada por:

$$I_{ASE} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{ASE}^0, \quad (2)$$

em que  $N_l$  é o número de spans do enlace  $l$  e  $I_{ASE}^0 = (G_{AMP} - 1)Fh\nu$ . A variável  $F$  é o fator de emissão espontânea, que corresponde à metade da figura de ruído (NF – *Noise Figure*) do amplificador [Beyranvand and Salehi 2013],  $h$  é a constante de Planck,  $\nu$  é a

frequência da luz e  $G_{AMP}$  é o ganho do amplificador óptico. A PSD do ruído dos efeitos não lineares (NLI – *Nonlinear Impairments*) é dada por:

$$I_{NLI} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{NLI}^l, \quad (3)$$

em que  $I_{NLI}^l$ , a PSD do ruído NLI em um único span do enlace  $l$ , é expressa pela Equação 4 [Zhao et al. 2015]:

$$I_{NLI}^l = \frac{3\gamma^2 I^3}{2\pi\alpha|\beta_2|} \left( \epsilon + \sum_j \ln \left[ \frac{\left(\Delta_{f_{ij}} + \frac{B_j}{2}\right)}{\left(\Delta_{f_{ij}} - \frac{B_j}{2}\right)} \right] \right), \quad (4)$$

$$\epsilon = \operatorname{arcsinh} \left( \frac{\pi^2 |\beta_2| B_i^2}{2\alpha} \right), \quad (5)$$

em que,  $j$  é outro circuito usando o enlace  $l$ ,  $B_i$  e  $B_j$  são, respectivamente, as larguras de bandas para os circuitos  $i$  e  $j$ ,  $\Delta_{f_{ij}}$  é o espaçamento da frequência central entre os circuitos  $i$  e  $j$ ,  $\gamma$  é o coeficiente não linear da fibra,  $\beta_2$  é o parâmetro de dispersão da fibra e  $\alpha$  é a atenuação de potência causada pela fibra.

Para este trabalho, a SNR é usada como critério de QoT. Caso o valor da SNR alcançada pelo circuito não esteja acima ou igual a um limiar de SNR 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). O QoTN é o bloqueio sofrido caso um novo circuito não atinja os níveis adequados de QoT. Mesmo que um novo circuito atinja tal requisito, ele ainda poderá sofrer bloqueio caso o estabelecimento do novo circuito impacte na QoT dos circuitos já estabelecidos, ocasionando assim o QoTO [Fontinele et al. 2017].

### 3. Problema RMLSA e o Problema da Seleção da Banda de Guarda

Para um uso eficiente das redes ópticas elásticas é necessário solucionar o problema RMLSA. A primeira etapa do problema consiste em selecionar uma rota entre os nós origem e destino de uma requisição. A Figura 3, apresenta uma pequena topologia e mostra três possíveis alternativas de rota para uma requisição com origem no nó 1 e destino no nó 4.

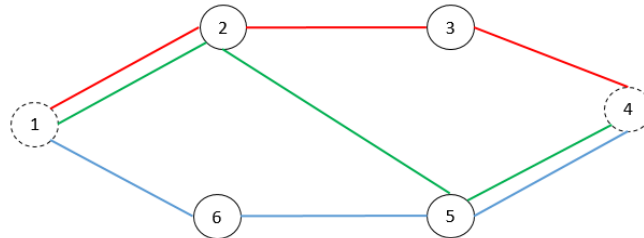


Figura 3. Problema de roteamento entre os nós 1 e 4.

Observa-se na Figura 3 que para uma requisição, com origem no nó 1 e destino no nó 4, tem-se 3 opções de escolha de rota. As opções de escolha de rota são: 1-2-3-4; 1-2-5-4 e 1-6-5-4.

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. A Figura 4 apresenta alguns exemplos de formatos de modulação usados pelas redes ópticas. Observa-se que a quantidade de símbolos e o respectivo alcance óptico de cada formato. A quantidade de bits por símbolo para um formato de modulação é dada por  $\log_2 M$ , em que  $M$  corresponde a quantidade de símbolos do formato de modulação.

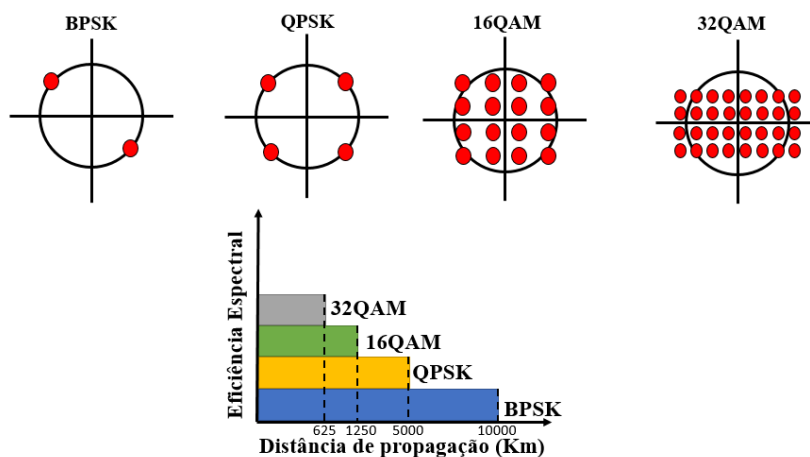


Figura 4. Exemplo de modulações usadas pelas redes ópticas elásticas.

Modulações que possuem uma eficiência espectral maior (Por exemplo, 32QAM) estão mais propensas a sofrer ruídos provenientes da camada física, por isso o seu alcance é menor. Portanto, a escolha do formato de modulação esta diretamente relacionada ao tamanho da rota escolhida. Para rotas maiores, modulações que são menos complexas são preferíveis pois alcançam uma distância maior (Por exemplo, BPSK)[Costa and Drummond 2017].

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. A Figura 5 demonstra as restrições associadas a alocação espectral.

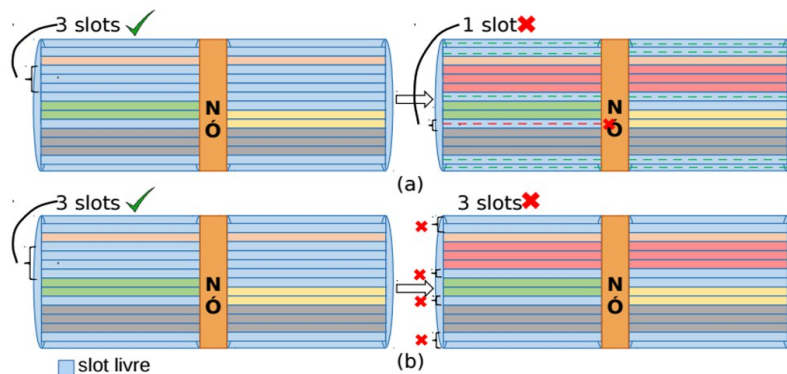


Figura 5. Restrições de continuidade (a) e contiguidade (b).

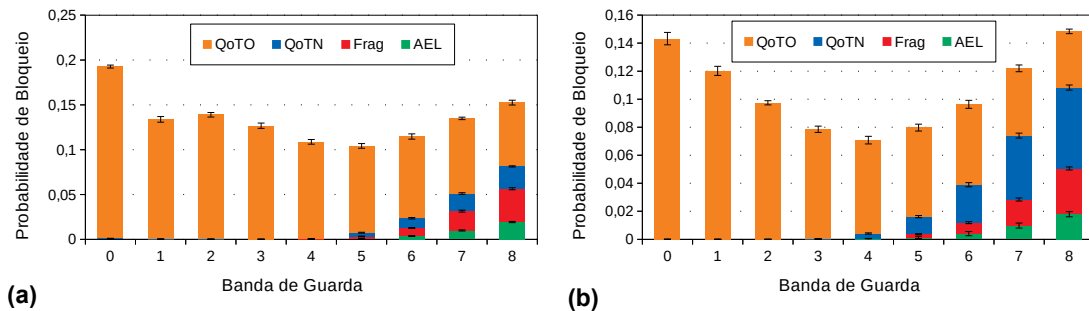
A restrição de continuidade, obriga que o sinal óptico permaneça no mesmo intervalo espectral em todos os enlaces da rota, ou seja, a mesma faixa de slots deve estar

livre em todos os enlaces para atender a requisição. Na Figura 5 (a) é possível atender uma requisição que necessita de 3 slots pois a mesma faixa de espectro está livre nos dois enlaces da rota. Por outro lado, uma requisição de 1 slot pode ser bloqueada por não conter a mesma faixa livre nos dois enlaces da rota.

Na restrição de contiguidade, em requisições que necessitam de 2 ou mais slots, os mesmos precisam ser alocados de forma adjacente. Na Figura 5 (b) temos uma requisição que necessita de 3 slots que pode ser atendida e outra que não pode ser atendida por não conter 3 slots livres e adjacentes.

À medida que os circuitos vão sendo alocados e desalocados, o espectro vai ficando fragmentado, o que aumenta a probabilidade das restrições de continuidade e contiguidade não serem respeitadas. O que conseqüentemente acarretaria em um maior número de bloqueios de requisições. O bloqueio por fragmentação (Frag) ocorre quando a rede possui slots suficientes para atender a requisição mas os mesmos não respeitam as restrições de continuidade e contiguidade. Quando a rede não possui slots suficientes para atender a requisição ocorre bloqueio por Ausência de Espectro Livre (AEL).

Como já foi mencionado, em redes ópticas elásticas utiliza-se a banda de guarda com o intuito de minimizar a interferência entre circuitos adjacentes. Quando o algoritmo RMLSA está realizando a busca pela faixa de slots livres que respeita as restrições de continuidade e contiguidade ele também deve buscar respeitar a banda de guarda entre os circuitos. Deve-se tomar cuidado com a quantidade de slots usados para a banda de guarda. A Figura 6 apresenta o comportamento da probabilidade de bloqueio de banda em função do valor selecionado para a banda de guarda. Os cenários utilizados no estudo apresentado na Figura 6 são detalhados na Seção 5.



**Figura 6. Probabilidade de bloqueio de banda em função da banda de guarda para as topologias (a) Cost239 e (b) NSFNet.**

Observa-se pela Figura 6 que à medida que a banda de guarda é aumentada a componente QoTO da probabilidade de bloqueio diminui em ambas topologias. Bloqueios de requisições de circuito por QoTO estão diretamente relacionados a interferências entre os circuitos. Por outro lado, as componentes Fragmentação, AEL e QoTN, que não estão relacionadas a interferências entre circuitos, tendem a aumentar devido a falta de recursos espectrais. A banda de guarda com 5 slots apresentou o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda para a topologia Cost239, considerando a carga de 400 Erlangs (Figura 6(a)). Já na topologia NSFNet, considerando a carga de 200 Erlangs, a banda de guarda com 4 slots apresentou o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda (Figura 6(b)).

Um circuito óptico com banda de guarda insuficiente pode ser impedido de alcançar o seu destino devido aos ruídos causados pela camada física. Por outro lado, uma atribuição desnecessária da banda de guarda pode causar uma ineficiência espectral. Portanto, a otimização e atribuição da banda de guarda é importante no planejamento das redes ópticas elásticas.

Poucos trabalhos [Chen et al. 2013, Takeshita et al. 2016, Chen et al. 2017] investigam o problema de ajustar a banda de guarda para realizar um *trade-off* entre bloqueio por falta de recursos espectrais e bloqueios por QoT.

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. Como em [Chen et al. 2013] 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. Isso ocorre porque todos os bloqueios são gerados pela falta de recursos espectrais.

Em [Takeshita et al. 2016] os autores propõem um algoritmo de atribuição de banda de guarda chamado de *Adaptive Guard Band Assignment* (AGBA). O objetivo do algoritmo AGBA é evitar a atribuição exagerada de banda de guarda para os circuitos ópticos e assim alcançar um uso mais eficiente do espectro óptico. 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 saltos da rota que o circuito utilizará. Se a rota selecionada para um dado circuito possuir 4 ou menos saltos, a banda de guarda será igual a 1 slot. Caso a rota selecionada possua mais do que 4 saltos, a banda de guarda será igual a 2 slots.

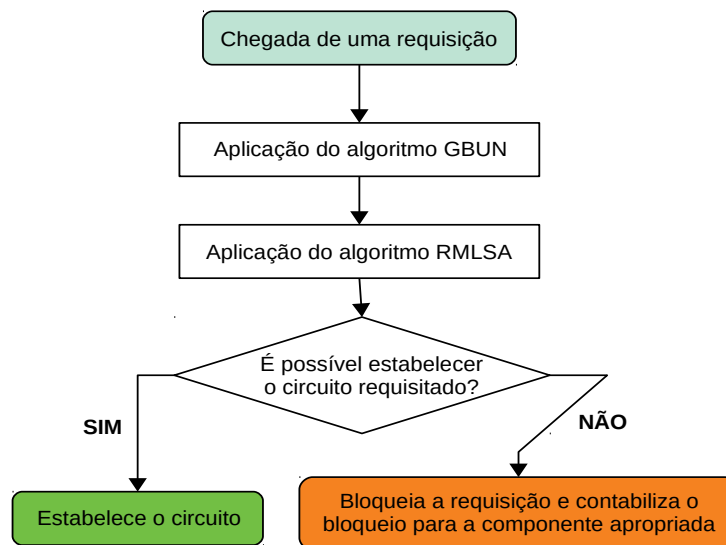
Em [Chen et al. 2017] os autores realizam um estudo para identificar o tamanho de banda de guarda ideal a fim de reduzir os impactos causados por efeitos não lineares. Os autores apresentam um estudo semelhante ao apresentado na Figura 6. À medida que a banda de guarda aumenta, o bloqueio por QoT diminui rapidamente. Contudo, o bloqueio por falta de recursos disponíveis aumenta. Para o cenário avaliado em [Chen et al. 2017], o bloqueio total da rede é minimizado com uma banda de guarda de 7 GHz ou 8 GHz.

#### 4. Algoritmo Proposto

O algoritmo de seleção da banda de guarda proposto neste trabalho é baseado no nível de utilização de espectro da rede no momento do atendimento de uma requisição de circuito. O algoritmo é chamado de *Guard Band according to Use of the Network* (GBUN). A Figura 7 mostra o fluxograma de aplicação do algoritmo GBUN pelo plano de controle para estabelecer um circuito.

Observa-se pela Figura 7 que o plano de controle aplica o algoritmo GBUN logo após a chegada de uma requisição de circuito. Depois da definição da banda de guarda realizada pelo algoritmo GBUN, o plano de controle aplica o algoritmo RMLSA selecionado pelo operador da rede. Em seguida, o plano de controle verifica 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, o plano de controle alocará os recursos definidos pelo algoritmo RMLSA.





**Figura 7. Fluxograma de aplicação do algoritmo GBUN.**

Foram conduzidos experimentos com vários valores para a banda de guarda. Com o menor valor igual a 0 (zero) slots e o maior valor igual a 8 slots. Observou-se pelos resultados dos experimentos que a banda de guarda com 8 slots gera uma probabilidade de bloqueio maior em comparação a probabilidade de bloqueio gerada por outras bandas de guarda (4 slots, por exemplo) para cargas médias (200 ou 250 Erlangs, por exemplo) e cargas altas (350 ou 400 Erlangs, por exemplo). Esse comportamento pode ser observado na Figura 6. Mas quando a banda de guarda com 8 slots é utilizada em cargas baixas (50 ou 100 Erlangs, por exemplo) a probabilidade de bloqueio tende a ser menor do que a probabilidade de bloqueio gerada pela banda de guarda com 1 slot.

Devido a esse comportamento, 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. A utilização espectral de um enlace da rede é calculada da seguinte forma:

$$Utilização\ Espectral = \frac{Número\ de\ slots\ usados}{Total\ de\ slots\ do\ enlace} \quad (6)$$

Assim, a utilização do espectro da rede é definida pela soma da utilização espectral de todos os seus enlaces dividido pela quantidade de enlaces da topologia. A Figura 8 apresenta os valores de utilização do espectro em função da carga da rede para as topologias Cost239 e NSFNet (Figura 9), considerando a banda de guarda igual a 8 slots.

Observando o ponto de carga de 400 Erlangs na Figura 8, as utilizações máximas alcançadas nas topologias Cost239 e NSFNet foram de 39% e 54%, respectivamente. Esses valores de utilização máxima foram ajustados e divididos por 7 para encontrar o intervalo e incremento para possíveis 8 valores de banda de guarda. A banda de guarda com valor igual a 0 (zero) slots apresentou o pior desempenho em termos de probabilidade de bloqueio e não é considerada pelo algoritmo GBUN. A Tabela 1 apresenta a seleção da banda de guarda em função da utilização do espectro para as topologias Cost239 e NSFNet.

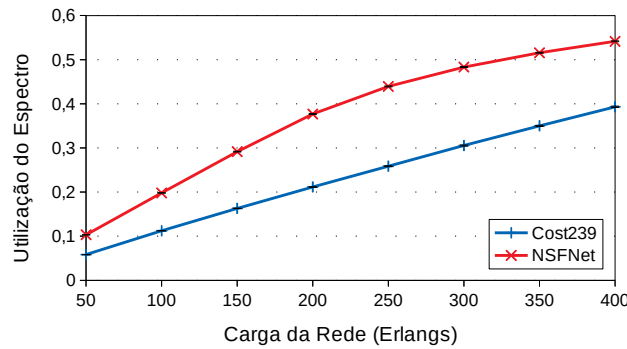


Figura 8. Utilização do espectro nas topologias Cost239 e NSFNet.

Tabela 1. Seleção da banda de guarda em função dos valores de utilização do espectro (UtiEsp) da rede para as topologias Cost239 e NSFNet.

	Cost239	NSFNet
<b>BG = 1</b>	UtiEsp $\geq$ 0,35	UtiEsp $\geq$ 0,49
<b>BG = 2</b>	0,35 > UtiEsp $\geq$ 0,30	0,49 > UtiEsp $\geq$ 0,42
<b>BG = 3</b>	0,30 > UtiEsp $\geq$ 0,25	0,42 > UtiEsp $\geq$ 0,35
<b>BG = 4</b>	0,25 > UtiEsp $\geq$ 0,20	0,35 > UtiEsp $\geq$ 0,28
<b>BG = 5</b>	0,20 > UtiEsp $\geq$ 0,15	0,28 > UtiEsp $\geq$ 0,21
<b>BG = 6</b>	0,15 > UtiEsp $\geq$ 0,10	0,21 > UtiEsp $\geq$ 0,14
<b>BG = 7</b>	0,10 > UtiEsp $\geq$ 0,05	0,14 > UtiEsp $\geq$ 0,07
<b>BG = 8</b>	UtiEsp < 0,05	UtiEsp < 0,07

O primeiro passo do algoritmo GBUN, quando ele está em execução, é mensurar a utilização do espectro da rede. De posse dessa informação o algoritmo GBUN seleciona a banda de guarda adequada seguindo a Tabela 1. Por exemplo, se no momento da chegada de uma determinada requisição de circuito a utilização do espectro medida pelo algoritmo GBUN na topologia Cost239 for igual a 0,19, a banda de guarda selecionada será igual a 5 slots.

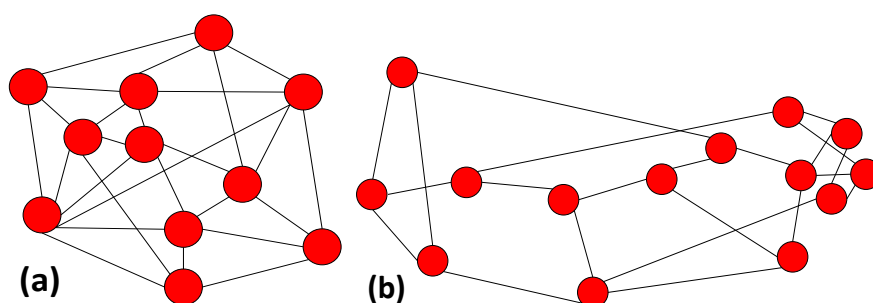
O algoritmo RMLSA adotado neste trabalho foi o *Complete Sharing* [Wang and Mukherjee 2014]. O algoritmo *Complete Sharing* é um algoritmo RMLSA integrado que foi proposto para lidar com a fragmentação do espectro. Ele utiliza roteamento com  $k$  rotas candidatas e seleciona a rota que possibilita alocar a faixa de slots mais próxima do início do espectro. O *Complete Sharing* utiliza o *First Fit* para a alocação de espectro. É utilizado o algoritmo de seleção do formato de modulação pela QoT [Fontinele et al. 2017].

## 5. Avaliação de Desempenho

O algoritmo proposto (GBUN) foi comparado com o algoritmo AGBA e com três valores fixos para banda de guarda (BG = 0, BG = 1 e BG = 2 slots). BG = 0 corresponde a tentativa de utilizar o máximo possível do espectro óptico. BG = 1 e BG = 2 são valores de banda de guarda comumente utilizados na literatura. O algoritmo *Complete Sharing* foi empregado para resolver o problema RMLSA com  $k$  igual a 3. Como forma de avaliação, foi considerada a métrica probabilidade de bloqueio de banda e também foram analisadas

as componentes da probabilidade de bloqueio de banda. As componentes avaliadas foram: Fragmentação, QoTN (QoT inaceitável para um novo circuito), QoTO (QoT inaceitável para os circuitos já ativos na rede) e AEL (ausência de espectro livre).

As simulações foram realizadas usando o simulador SNetS (*SLICE Network Simulator*) [Fontinele et al. 2017]. Em cada simulação foram geradas 100.000 requisições de circuitos ópticos com sete níveis de granularidade: 10, 40, 80, 100, 160, 200 e 400 Gbps, com as proporções 7:6:5:4:3:2:1, respectivamente. A geração de requisições segue a distribuição de Poisson com a carga de tráfego distribuída uniformemente entre todos os pares de nós origem e destino. Para cada simulação foram realizadas dez replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados possuem nível de confiança de 95%. Foram consideradas as topologias NSFNet (*National Science Foundation Network*) e Cost239, apresentadas na Figura 9, para as simulações de dois cenários diferentes [Zhao et al. 2018].



**Figura 9. Topologias utilizadas: (a) Cost239 e (b) NSFNet**

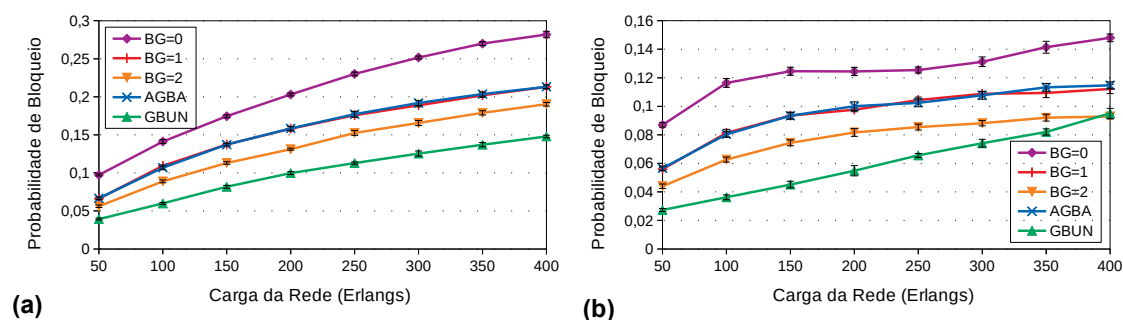
Os formatos de modulação considerados neste estudo foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM e os seus respectivos limiares de SNR são 5,5 dB, 8,5 dB, 12,5 dB, 15,1 dB, 18,1 dB e 21,1 dB [Ives et al. 2014]. Todos os enlaces da rede são bidirecionais e possuem largura de banda do espectro dividida em 320 slots de frequência. Um slot de frequência possui largura de banda de 12,5 GHz. Os ganhos dos amplificadores são ajustados para compensar as perdas dos dispositivos e das fibras. Outros parâmetros utilizados nas simulações estão listados na Tabela 2.

**Tabela 2. Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.**

Descrição	Valor
PSD do sinal por slot	-20 dBm/GHz
Atenuação da fibra ( $\alpha$ )	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra ( $D$ )	16 ps/(nm·km)
Coefficiente não linear da fibra ( $\gamma$ )	1,3 (Wkm) <sup>-1</sup>
Tamanho de um span ( $L_s$ )	100 km
Figura de ruído do amplificador ( $NF$ )	6 dB

A Figura 10 apresenta a probabilidade de bloqueio de banda obtida pelos algoritmos GBUN, AGBA e para os valores fixos de banda de guarda em função da carga da rede para as topologias Cost239 e NSFNet.

O algoritmo GBUN alcançou o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda para todos os pontos de carga na topologia Cost239. Considerando



**Figura 10. Probabilidade de bloqueio de banda para as topologias (a) Cost239 e (b) NSFNet.**

a carga de 400 Erlangs na topologia Cost239, o algoritmo GBUN apresentou desempenho superior de aproximadamente 47,54%, 30,63%, 22,26% e 30,63% em relação a BG = 0, BG = 1, BG = 2 e AGBA, respectivamente.

Na topologia NSFNet, o algoritmo GBUN alcançou o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda para a maioria dos pontos de carga. Considerando a carga de 400 Erlangs na topologia NSFNet, o algoritmo GBUN apresentou desempenho superior de aproximadamente 35,79%, 15,24% e 17,16% em relação a BG = 0, BG = 1 e o AGBA, respectivamente. Contudo, em relação a BG = 2, o algoritmo GBUN apresentou um desempenho inferior de 2,29% na média. De certa forma, esse comportamento é esperado, uma vez que o GBUN está programado para usar uma menor banda de guarda sobre cargas maiores. Logo, existe uma tendência do GBUN obter resultados de bloqueio próximos aos usados por bandas de guarda fixas menores, como 1 ou 2 slots. Além do mais, não existe uma diferença significativa, visto que os intervalos de confiança ficam sobrepostos.

As Tabelas 3 e 4 exibem as componentes da probabilidade de bloqueio de banda obtidas com os algoritmos GBUN, AGBA e para os valores fixos de banda de guarda na carga de 400 Erlangs para as topologias Cost239 e NSFNet, respectivamente.

**Tabela 3. Componentes da probabilidade de bloqueio de banda para a topologia Cost239 na carga de 400 Erlangs.**

	<b>Fragmentação</b>	<b>QoTN</b>	<b>QoTO</b>	<b>AEL</b>
<b>BG = 0</b>	2,360%	4,570%	<b>93,070%</b>	0,000%
<b>BG = 1</b>	2,710%	6,157%	<b>91,133%</b>	0,000%
<b>BG = 2</b>	2,231%	6,553%	<b>91,216%</b>	0,000%
<b>AGBA</b>	2,682%	6,164%	<b>91,152%</b>	0,000%
<b>GBUN</b>	2,170%	7,760%	<b>90,071%</b>	0,000%

Observa-se pelas Tabelas 3 e 4 que a componente que mais impactou no bloqueio geral para todos os algoritmos em ambas topologias foi a QoTO. A utilização do algoritmo *Complete Sharing* contribui para a redução dos bloqueios gerados pelas componentes Fragmentação, AEL e QoTN.

Vale ressaltar que o melhor desempenho do algoritmo proposto está associado as tentativas de usar bandas de guarda maiores, reduzindo assim a interferência entre os

**Tabela 4. Componentes da probabilidade de bloqueio de banda para a topologia NSFNet na carga de 400 Erlangs.**

	<b>Fragmentação</b>	<b>QoTN</b>	<b>QoTO</b>	<b>AEL</b>
<b>BG = 0</b>	0,000%	0,000%	100%	0,000%
<b>BG = 1</b>	0,000%	0,000%	100%	0,000%
<b>BG = 2</b>	0,009%	1,002%	98,978%	0,011%
<b>AGBA</b>	0,000%	0,000%	100%	0,000%
<b>GBUN</b>	0,040%	11,634%	88,255%	0,071%

circuítos. Esta escolha é baseada no nível de utilização da rede, que sugere se existe mais ou menos slots disponíveis para aumentar o tamanho da banda de guarda.

## 6. Conclusão

Este artigo propõe o algoritmo GBUN que realiza a seleção da banda de guarda baseada no estado de utilização do espectro em redes ópticas elásticas. A escolha da banda de guarda é realizada no momento que o plano de controle recebe um pedido de requisição de estabelecimento de circuito. O objetivo do algoritmo GBUN é possibilitar um melhor desempenho aos algoritmos RMLSA através da utilização de uma banda de guarda que se ajuste ao estado atual da rede e assim reduzir a probabilidade de bloqueio geral.

Foi realizado um estudo de avaliação de desempenho comparando o algoritmo GBUN com valores fixos de banda de guarda comumente utilizados na literatura e com a proposta adaptativa AGBA. O estudo de avaliação de desempenho foi conduzido nas topologias Cost239 e NSFNet. Os resultados do estudo de avaliação de desempenho mostraram que o algoritmo GBUN alcançou as melhores probabilidades de bloqueio de banda em comparação ao algoritmo AGBA e a utilização de banda de guarda fixa em ambas topologias.

Como trabalhos futuros pretendemos avaliar o desempenho da proposta com outros algoritmos RMLSA. Verificaremos também o quanto uma seleção da banda de guarda adaptativa melhora o desempenho de algoritmos RMLSA cientes de camada física.

## Referências

- Beyranvand, H. and Salehi, J. (2013). A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(18):3043–3054.
- 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, C., Ju, M., Xiao, S., Zhou, F., and Yang, X. (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.
- 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.

- Christodoulopoulos, K., Tomkos, I., and Varvarigos, E. (2011). Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 29(9):1354–1366.
- Costa, L. R. and Drummond, A. C. (2017). New distance-adaptive modulation scheme for elastic optical networks. *IEEE Communications Letters*, 21(2):282–285.
- 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(Supplement C):1 – 14.
- 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., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y., and Matsuoka, S. (2009). Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*, 47(11):66–73.
- Johannisson, P. and Agrell, E. (2014). Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, 32(23):4544–4552.
- Saradhi, C. V. and Subramaniam, S. (2009). Physical layer impairment aware routing (PLIAR) in WDM optical networks: Issues and challenges. *Commun. Surveys Tuts.*, 11(4):109–130.
- 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.
- Wang, R. and Mukherjee, B. (2014). Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks. *Optical Switching and Networking*, 11, Part A:83 – 91.
- Wu, J., Ning, Z., and Guo, L. (2017). Energy-efficient survivable grooming in software-defined elastic optical networks. *IEEE Access*, 5:6454–6463.
- 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.
- Zhao, J., Wymeersch, H., and Agrell, E. (2015). Nonlinear impairment aware resource allocation in elastic optical networks. In *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pages 1–3.
- Zhao, Y., Hu, L., Zhu, R., Yu, X., Wang, X., and Zhang, J. (2018). Crosstalk-aware spectrum defragmentation based on spectrum compactness in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multi-core fiber. *IEEE Access*, PP:1–1.
- Zhu, P., Li, J., Wu, D., Chen, Y., Tian, Y., Wu, Z., Ge, D., Chen, X., Chen, Z., and He, Y. (2017). Software-defined elastic optical network node supporting spectrum defragmentation. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 9(1):A63–A70.