

# Adaptação de Heurísticas para Redes Ópticas Elásticas Considerando os Efeitos da Camada Física

Pedro J. F. C. Souza, Alex F. Santos, Karcus D. R. Assis, Raul C. Almeida Jr e Matheus R. Sena

**Resumo**—Em Redes Ópticas Elásticas, o problema de roteamento e alocação de espectro (RSA – Routing and Spectrum Allocation) é comumente solucionado através do uso de técnicas de otimização ou heurísticas, com o intuito de minimizar o uso de recursos da rede ou maximizar a capacidade para atendimento de futuras requisições. Os efeitos da camada física no problema RSA começaram a ser explorados recentemente, dado o surgimento de eficientes modelagens analíticas. Para redes transparentes e de longo alcance, é essencial incluir qualidade de transmissão no processo de otimização. Neste artigo, serão analisadas duas heurísticas tradicionais para o roteamento em Redes Ópticas Elásticas, e proposta uma modificação nessas heurísticas com o intuito de reduzir o número de canais bloqueados quando as imperfeições da camada física são levadas em consideração. Simulações foram realizadas para três topologias e os resultados mostram vantagens em quantidade de canais bloqueados quando a nova proposta é introduzida nas heurísticas.

**Palavras-Chave**—Redes Ópticas Elásticas; Roteamento e Alocação de Rota e Espectro; Não linearidade; Modelo IGN.

**Abstract**—In Elastic Optical Networks (EON), the problem of routing and spectrum Allocation (RSA) has been solved along the years through the use of optimization techniques or heuristics, with the aim of minimizing the use of network resources or maximizing the capacity for future requests. The effects of the physical layer in the RSA problem are of fundamental importance given that there is a distance limitation with the required bit rate and modulation format used to transmit the signal. On considering the linear and non-linear noise effects, it is possible to include quality of transmission (QoT) in the optimization process. In this paper, we will examine some traditional heuristics for the RSA problem in Elastic Optical networks with the effects of the physical layer, and subsequently, propose a modification of these heuristics, in order to increase the throughput of the channels mitigating blockages in the physical layer. Simulations were performed for various topologies, and the results suggest advantages in terms of number of blocked channels of the new proposal in relation to traditional heuristics.

**Keywords**—Elastic Optical Networks; Routing, Modulation and Spectrum Allocation; Non Linear Effect; IGN Model.

## I. INTRODUÇÃO

Em redes ópticas elásticas (EONs), o espectro óptico é dividido em fatias espectrais denominadas de slots, e às conexões são designadas uma quantidade inteira de slots contíguos, determinada pela taxa de bit requisitada e o formato de modulação capaz de atender os requisitos de qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) [1], [2]. A busca pela rota, fatia de espectro e formato de modulação,

é investigada pelo problema conhecido como Roteamento e Atribuição de Espectro e Formato de Modulação (RMSA – Routing, Modulation-Level and Spectrum Assignment). Sob condição de tráfego estático, pressupõe-se que o conjunto de requisições é dado de antemão e o problema resume-se normalmente a reduzir os recursos da rede (quantidade de slots) para atender toda o tráfego requisitados, ou atender o máximo dele para uma dada quantidade de recursos [3]. A propagação do sinal ao longo de vários segmentos de fibra e elementos de amplificação resulta em acúmulo de ruído que pode impossibilitar que o problema de RMSA encontre uma rota e conjunto de slots com QoT suficiente. Portanto, mitigar este impacto é essencial ao planejamento das EONs.

Em [4], foi proposta uma estratégia de ordenamento dos caminhos ópticos de cada canal de forma decrescente em comprimento. Para as primeiras rotas, eram escolhidos os formatos BPSK e, quão menor a rota, um formato de modulação com maior eficiência espectral era usado até chegar nas menores rotas com formatos de modulação até 16QAM. O algoritmo proposto, denominado de LSoHF-PSU-FFSA, foi aplicado na Rede NSFNet (14 nós) e obteve melhores resultados de probabilidade de bloqueio para pouca carga (<700 erlangs), quando comparado com o SP-FFSA ou KSP-BLSA.

A otimização da largura de banda e formato de modulação foi abordada por [5] e [6] onde, através de uma formulação ILP (*Integer Linear Programming*), foi possível resolver o RMSA. Os resultados demonstraram que a vantagem de larguras de banda elásticas é maior para tráfegos com pouca carga, onde a largura de banda utilizada é reduzida em mais de 60% quando comparado com os de largura de faixa fixa. O uso de formatos de modulação adaptativo reduz a largura de banda utilizada em cerca de 25% para todas as cargas de rede.

Este trabalho se propõe a desenvolver uma heurística para o RMSA que se baseia num modelo de qualidade de transmissão, onde o parâmetro SNR irá definir o formato de modulação que gere a maior eficiência espectral e, conseqüentemente, a menor probabilidade de bloqueio de requisições. Adicionalmente, será analisada qual a melhor potência de entrada global dos canais da rede para maximizar SNR e conseqüentemente o *throughput* da rede.

## II. CONSIDERAÇÃO DOS EFEITOS DA CAMADA FÍSICA

Sinais ópticos são degradados através do acúmulo de ruídos estocásticos decorrentes de imperfeições na transmissão, o que causa distorções no sinal [7]. Essas imperfeições podem gerar varios tipos de interferências. Para este trabalho, as interferências a serem considerados serão do processo de

emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*), o SCI (*Self-Channel Interference*) e o XCI (*Cross-Channel Interference*) [8]. A formulação matemática assumida para ambos baseou-se no modelo IGN (*Incoherent Gaussian Noise*) [9], que considera tanto o ruído ASE quanto os não lineares SCI e XCI (NLI).

Para entender o modelo, suponha que a conexão  $i$  seja alocada na rota  $R_i$  com frequência central  $f_{ch,i}$  e largura de banda  $B_{ch,i}$ . A SNR dessa conexão pode ser derivada do seguinte conjunto de equações:

$$SNR_i = \frac{G_{ch,i}}{G_{ASE} + G_{NLI}} \quad (1)$$

$$G_{ch,i} = \frac{P_{ch,i}}{R_{s,i}} = \frac{P_{ch,i}}{B_{ch,i}} \quad (2)$$

$$G_{ASE} = \sum_{l \in r_i} N_l (10^{(NF+A_l)/10}) h\nu \quad (3)$$

$$G_{NLI} = \sum_{l \in r_i} \frac{16}{27} N_l \gamma^2 L_{eff}^2 \sum_n^{N_{ch,l}} G_{ch,n}^2 G_{ch,i} (2 - \delta_{n,i}) X_{n,i} \quad (4)$$

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-2\alpha L}}{2\alpha} \quad (5)$$

Se  $n \neq i$ ,  $X$  é a contribuição do XCI, logo:

$$X_{n,i} = \frac{\operatorname{asinh} \left( \pi^2 (2\alpha)^{-1} \beta_2 \left[ f_{ch,n} - f_{ch,i} + \frac{B_{ch,n}}{2} \right] B_{ch,i} \right)}{4\pi (2\alpha)^{-1} \beta_2} - \frac{\operatorname{asinh} \left( \pi^2 (2\alpha)^{-1} \beta_2 \left[ f_{ch,i} - f_{ch,n} + \frac{B_{ch,n}}{2} \right] B_{ch,i} \right)}{4\pi (2\alpha)^{-1} \beta_2} \quad (6)$$

Se  $n = i$ ,  $X$  é a contribuição do SCI, logo:

$$X_{n,i} = \frac{\operatorname{asinh} \left( \pi^2 (2\alpha)^{-1} \beta_2 B_{ch,i}^2 \right)}{\pi (2\alpha)^{-1} \beta_2} \quad (7)$$

$N_l$  é o número de spans no link  $l$ ,  $R_{s,i}$  é a taxa de símbolo da conexão  $i$ ,  $\beta_2$  é a constante de dispersão na fibra,  $\alpha$  é o coeficiente de atenuação na fibra,  $G_{ch,i}$  é a PSD do canal  $i$ ,  $\gamma$  é o coeficiente de não linearidade da fibra,  $L_{eff}$  é o comprimento efetivo do span,  $L$  é o comprimento do span,  $\delta_{n,i}$  é a função delta de Dirac,  $NF$  é a figura de ruído do amplificador em dB,  $A_l$  é a perda em dB após o sinal passar por um span,  $\nu$  é a frequência da portadora óptica, que no nosso caso é 193.41 THz, e  $h$  é a constante de Planck. Para essa modelagem, foi considerado que as propriedades da fibra de todos os spans são iguais e que os ganhos compensam as perdas nas fibras.

Outro parâmetro que é preciso introduzir é o  $SNR_{req}$ , que é a SNR requerida para estabelecer uma conexão que, ao passar por uma HDFEC (*Hard Decision Forward Error Correction*), produzirá um valor de BER (*Bit Error Rate*) que deve satisfazer o estabelecido pelo SLA (*Service Level Agreement*). Isso significa que haverá bloqueio sempre que canais tiverem SNR menor do que o requerido para o seu formato de modulação. A Tabela I mostra os SNR Requeridos por formato de modulação calculados para uma constelação ideal usando o ruído gaussiano branco aditivo (AWGN – *Additive white Gaussian noise*) para

atingir um valor de pré FEC-BER igual a 0.004. Esse valor é comumente usado na literatura, pois, após passar por um *hard decision decoder*, o nível de BER fica próximo de  $10^{-15}$  [10]. Além disso a tabela indica a largura de banda do canal ( $B_{ch}$ ) e o número de slots para uma requisição com  $R = 300$  Gbits/s, calculado através da relação em [11]  $B_{ch} = \frac{R}{2 \log_2 M}$  para um caso de uncoded data e fator *roll off* = 0.

TABELA I: SNR mínima por formato de modulação para um pré FEC-BER de 0.004 e banda para uma taxa de 300 Gbits/s

Formato de Modulação	$SNR_{req}$ (dB)	Banda (GHz)	Número de slots
QPSK	8.47	75	6
8QAM	12.45	50	4
16QAM	15.13	37,5	3
32QAM	18.12	30	2.4
64QAM	21.06	25	2

### III. HEURÍSTICAS PARA PLANEJAMENTO DE EONS

Esta seção apresenta uma breve explicação dos algoritmos BSR (*Best among the Shortest Routes*) [12] e BLSA (*Balanced Load Spectrum Allocation*) [13] e as adaptações para estes algoritmos propostas neste artigo quando os efeitos da camada física são considerados.

#### A. Heurísticas Tradicionais

1) *BSR (Best among the Shortest Routes)*: O BSR tem como objetivo encontrar as rotas mais adequadas (em termos de maximizar ou reduzir alguma métrica desejada) dentro de um conjunto de rotas possíveis na rede. Como cada par (origem, destino) pode ter mais de uma rota de menor caminho (chamadas neste trabalho de Rotas Candidatas – *RC*), existe normalmente um número muito grande de soluções distintas,  $M$ , para o planejamento das rotas fixas em uma determinada topologia de rede. Cada iteração  $i$  do BSR encontra uma das soluções de roteamento  $S_i$  do universo de  $M$  soluções possíveis. Isso é feito da seguinte forma: 1) Atribui custo 1 para todos os enlaces e roda o algoritmo de roteamento para encontrar a solução de roteamento inicial ( $S_0$ ) para todos os pares origem-destino; 2) Estima-se os valores de utilização de cada enlace da rede somando-se o número de slots requisitados em cada rota que passa pelo enlace. 3) Atribui-se um novo custo  $c(l)_{i+1} = \alpha \cdot c(l)_i + (1 - \alpha) \cdot u(l)$  para cada enlace; onde  $c$  é o custo do enlace  $l$ ,  $u$  é a sua utilização e  $\alpha$  é uma contante próxima de 1. 4) Roda o algoritmo de roteamento para encontrar uma nova solução de roteamento; 5) Caso o número máximo de iterações não tenha sido atingido, volta para 2), caso contrário, termina o processo. A solução de roteamento mais adequada ao término do processo é a escolhida.

2) *BLSA (Balanced Load Spectrum Allocation)*: O BLSA [13] determina o roteamento através do balanceamento de carga no interior da rede, com o intuito de reduzir o número máximo de slots alocados em uma fibra. Este algoritmo é constituído por três passos:

**Passo 1:** Gerar os caminhos. Para isto é utilizado o algoritmo  $k$ -menores caminhos, cujo  $k \geq 1$ ;

**Passo 2:** Seleção de caminhos. Neste passo, é escolhido o caminho físico para cada caminho óptico, com o objetivo de balancear a carga entre todas as fibras da rede. Este balanceamento é realizado utilizando a Equação 12 de [13].

**Passo 3:** Alocação de slots. Para alocar todos os caminhos ópticos e respectivos slots é utilizado o algoritmo MRSA (*Maximum Reuse Spectrum Allocation*), descrito em [13].

### B. Heurística Proposta

Note que, tanto o BSR quanto o BLSA usa como entrada o número de slots requisitado por cada rota (i.e., par origem-destino). Contudo, para o problema RMSA, em que a quantidade de slots requisitada dependerá da taxa de bit da requisição e do formato de modulação requerido para prover a QoT desejada, o algoritmo como originalmente proposto não pode ser empregado.

A proposta de modificação para as heurísticas mencionadas anteriormente está na consideração de um cenário flexível de alocação de diferentes larguras de banda em decorrência da escolha do formato de modulação adequado para superar o acúmulo de ruído ASE, SCI e XCI em cada conexão. É importante salientar que, para uma determinada conexão, o impacto dos ruídos ASE e SCI, conforme descrito na Seção II, depende diretamente da potência do sinal, mas a XCI depende também da potência de todos os canais ativos que interferem (i.e. compartilham enlaces) com a conexão. A quantidade de slots, portanto, passa a ser dependente do formato de modulação empregado para a conexão, que dependerá da rota e posição espectral das demais conexões da rede. Assim, o problema se torna bem mais complexo do que o apresentado nas heurísticas mencionadas anteriormente.

O pseudocódigo da heurística proposta está descrita no Algoritmo 1. Note que, inicialmente todos os custos dos enlaces têm valor igual a 1 e, a partir da primeira requisição, esses custos começam a ser atualizados. Além disso, para a escolha de slots a serem alocados, é considerado apenas os ruídos ASE e SCI, pois não se pode garantir a alocação de canais vizinhos para poder calcular a XCI. Assim, sabendo-se as rotas, pode-se encontrar o número de slots a serem alocados para cada taxa de bits requisitada, buscando a melhor eficiência espectral e tentando evitar bloqueio na camada física.

Ao fim tendo definido todos os caminhos ópticos e suas alocações de espectros, é calculada a SNR considerando ASE, SCI, XCI e a potência de entrada do canal. Os resultados irão mostrar a quantidade de canais que não foram bloqueados na camada física devido escolha acertada do formato de modulação no algoritmo para uma certa potência.

## IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Para verificar a eficiência das heurísticas adaptadas, foram realizadas simulações em cenários e topologias distintas, como a rede Abilene (11 nós), NSFNet (14 nós) e Espanhola (17 nós). Para a matriz de tráfego, foi considerado um tráfego uniforme, ou seja, todos os pares origem-destino requerem a mesma taxa de bit. O valor de taxa utilizado foi de 300 Gbit/s.

### Algorithm 1 Algoritmo Proposto

```

1: Define-se a Potência  $P$  entre 7 e -5 dBm ;
2:  $M \leftarrow$  Menor formato de modulação disponível (Nesse Artigo foi 4 = QPSK);
3: for cada par origem-destino do
4:    $m \leftarrow$  Maior formato de modulação disponível (Nesse Artigo foi 64 = 64QAM);
5:   Roda Dijkstra ;
6:   while  $m > M$  do
7:     Calcula SNR decorrente de ASE e SCI para Rota com uma Potência  $P$  ;
8:     if  $SNR > SNR_{req}$  then
9:       Aloca a requisição com o f.m.  $m$  usando First Fit;
10:    else
11:       $m \leftarrow m/2$  ;
12:    end if
13:  end while
14:  if  $m = M$  then
15:    Bloqueia a Requisição;
16:  end if
17:  Atualizar Custo de Enlaces, com equação da heurística tradicional;
18: end for
19: Executar Análise de Bloqueio na Rede considerando ASE, SCI e XCI para cada requisição  $y$  e toda Potência  $P$  ;

```

É importante ressaltar que, para o formato de modulação 32QAM, que ocuparia apenas 2,4 slots, considerou-se na camada de rede uma ocupação de 3 slots. No entanto, no cálculo da não linearidade, foi utilizada a banda real do canal, que é de 30GHz ou 2,4 slots. Nesse artigo, os parâmetros de simulação utilizados estão listados na tabela a seguir:

TABELA II: Parâmetros Utilizados no simulador

Parâmetros	Valores
Comprimento Span	100Km
Coefficiente de Atenuação	0.0507Km <sup>-1</sup>
Chromatic Dispersion Coefficient	-21.3ps <sup>2</sup> Km <sup>-1</sup>
Coefficiente não linear	1.3W <sup>-1</sup> Km <sup>-1</sup>
Frequencia da Portadora	193.41THz
Taxa de Símbolo	300Gbits.s <sup>-1</sup>
Spectral Roll Off	0
Banda de Referência	12.5GHz
Numero de Spans por link	4
Figura de Ruído	4.64dB
Número de Polarizações	2
Número de Iterações na Simulação	6000

Outro parâmetro relevante é a escolha da potência de entrada dos canais. Como demonstrado no artigo [14], quando são analisados os efeitos de emissão espontânea dos amplificadores e não lineares da fibra, para toda curva de SNR, pode-se encontrar um ponto ótimo para a potência dos canais. A potência certa será capaz de balancear os efeitos do (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*), cujo impacto é reduzido com o aumento da potência dos canais, com os efeitos do (XPM – *Cross-Phase Modulation* e SPM – *Self-Phase Modulation*), cujo impacto aumenta com o aumento da potência dos canais.

Usando esse conceito, para cada rede, foi feita a média da

SNR de todos os canais da rede quando se varia a potência de entrada de -5 a 7 dBm. Os resultados de SNR médio em função da potência de entrada dos canais usando o BSR modificado para as três redes analisadas neste artigo estão mostrados na Figura 1. A curva encontrada foi similar à descrita no artigo [14], e possibilitou escolher a melhor potência de entrada do canal, considerando que todos os canais têm a mesma potência de entrada. Os resultados mostram que a potência ótima para prover a SNR média mais elevada é de 2 dBm para as três topologias, e foi essa a usada nas análises realizadas neste artigo. O mesmo foi visualizado para o BLSA adaptada.

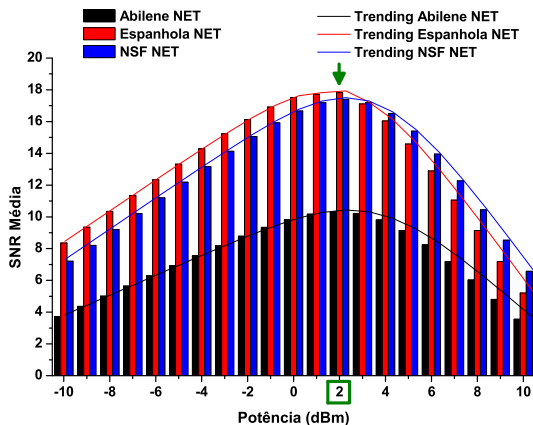


Fig. 1: Média de SNR versus Potência dos Canais para as três redes analisadas neste artigo

A primeira análise feita foi para entender qual das heurísticas atinge a menor quantidade de bloqueio quando leva-se em conta a camada física. A comparação foi feita entre os bloqueios na camada física usando o BSR e BLSA em duas situações. Na primeira situação, foi utilizada a heurística tradicional, onde era escolhido o número de slots entre 6, 4, 3, 2.4 e 2 aleatoriamente, pois a mesma não entende a influência do formato de modulação. Já na segunda situação, as heurísticas foram modificadas para levarem em consideração os efeitos ASE e SCI e a partir daí escolher o formato de modulação, e, conseqüentemente, o número de slots alocados. Essa comparação foi feita calculando quantos porcentos uma heurística teria a menos de bloqueio com relação a outra para uma mesma situação.

O resultado compilado na Figura 2, para as redes Abilene e NSF como exemplo, ilustram que o BSR possui vantagem com relação a ter menor número de canais bloqueados em ambas situações.

Além disso, ao focar na comparação das duas heurísticas adaptadas, relacionando canais bloqueados e potência de entrada, fica evidente na Figura 3, que o BSR é mais vantajoso, já que provê menos canais bloqueados que o BLSA em todo o intervalo de potência de entrada nas 3 redes testadas.

Isso pode ser explicado pelo fato da heurística BLSA escolher um dos  $k = 3$  caminhos, que não é necessariamente o menor. Por isso, a possibilidade de canais usarem mais saltos da rede na política BLSA é maior do que em relação à BSR. Assim, pode-se concluir que uma maior quantidade de ruído ASE e SCI é gerada no BLSA, o que pode fazer com que canais

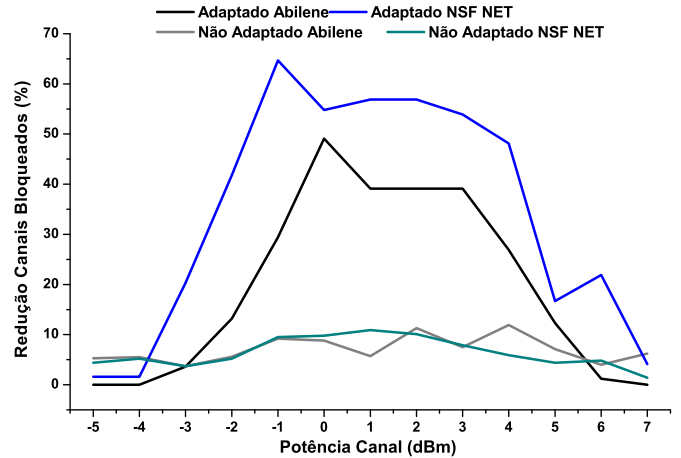


Fig. 2: Redução de Canais bloqueados em (%) da Heurística BSR comparada com a BLSA

necessitem de um formato de modulação de menor eficiência espectral. Além disso, mesmo nos casos de ambas as políticas utilizarem o mesmo formato de modulação, haverá uma maior possibilidade dos canais estarem mais próximos do limiar de SNR quando se emprega a política BLSA, visto que, quanto mais saltos a rota possui, maior o valor esperado de XCI. Por fim, note que rotas mais longas são mais prováveis de ter mais canais interferentes, o que é um fator adicional para causar bloqueio.

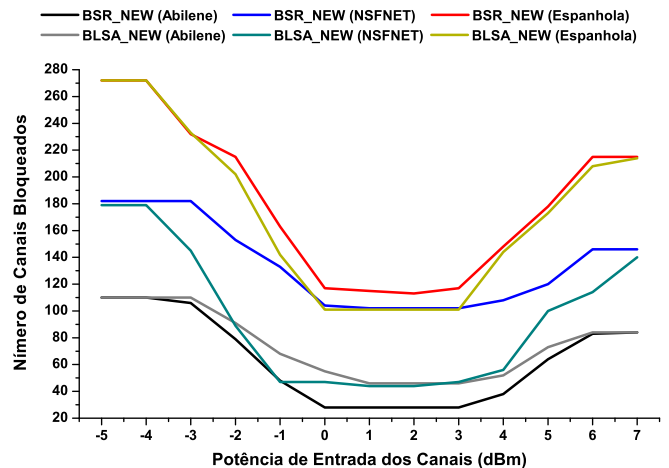


Fig. 3: Análise BSR e BLSA com adaptação para 3 topologias distintas

A segunda análise estudada neste artigo é sobre o quão melhor a adaptação nas heurísticas é, e o que, de maneira prática, leva a redução de bloqueio.

Para obter os resultados a seguir, a heurística tradicional e a adaptada tiveram a prerrogativa de usar a mesma quantidade de slots, contudo a primeira aloca os slots com somente o conhecimento da camada de rede e a segunda com o conhecimento da camada de rede e física.

Assim, em todas as redes, sob a condição de potência ótima, a Figura 4 mostra que foram obtidos resultados melhores com a heurística adaptada quando comparado com a sem

adaptação, chegando a atingir uma redução de 45% no número de requisições bloqueadas no caso da heurística BSR adaptada na NFSNet.

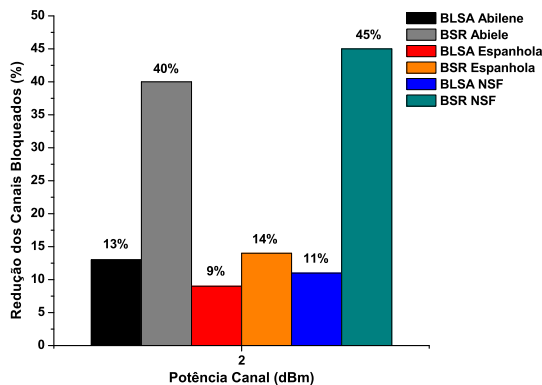


Fig. 4: Redução de canais bloqueados em (%) comparando-se a heurística adaptada com a tradicional

Essa redução é explicada devido à heurística modificada ter um grau de consciência sobre QoT, evitando formatos de modulação que não permitirão a transmissão da informação analisando o limiar SNR requerido. Já nas heurísticas tradicionais, por não distinguir os formatos de modulação, permitem a alocação em rotas com SNR mais comprometido, o que gera mais facilmente o bloqueio.

Outro fenômeno visualizado nas Figuras 3 e 4 foi que, em redes menores como a Abilene (11 nós) e a NSFNet (14 nós), a heurística adaptada obteve melhores performances que em redes maiores, como a Espanhola (17 nós). Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que quanto maior a rede, mais canais interferentes vão se ter e, conseqüentemente, maior é a contribuição do XCI, o que faz a heurística errar mais, pois a mesma só considera SCI e ASE na escolha do formato de modulação.

Por fim, foi observado que a mudança proposta impactou bastante nos canais bloqueados que tinham modulação 8 QAM e 16 QAM na tradicional. Ao se utilizar a heurística adaptada, todos esses canais passam a ser permitidos pelo nível de SNR requerido. A Figura 5 ilustra essa melhora, mostrando, por topologia, a quantidade de canais bloqueados separados por formato de modulação, para a heurística BSR tradicional e adaptada.

## V. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi apresentada uma adaptação para alocação de banda no espectro para dar suporte ao planejamento de redes ópticas considerando os efeitos na camada física. Ao usar uma metodologia de escolher a melhor potência de entrada dos canais e o melhor formato de modulação, foi mostrado, através de três redes distintas, que existe uma melhora no *throughput* da rede, visto que menos canais são bloqueados. Além disso, foi constatado que, ao se considerar os efeitos da camada física ASE, SCI e XCI a heurística BSR apresenta melhores resultados que a BLSA. Por fim, percebe-se que a estratégia adaptada serve para estabelecer canais com uma SNR para satisfazer o mínimo requerido pela qualidade de transmissão,

o que evita o bloqueio de diversos canais, principalmente os com formato de modulação 8QAM e 16QAM.

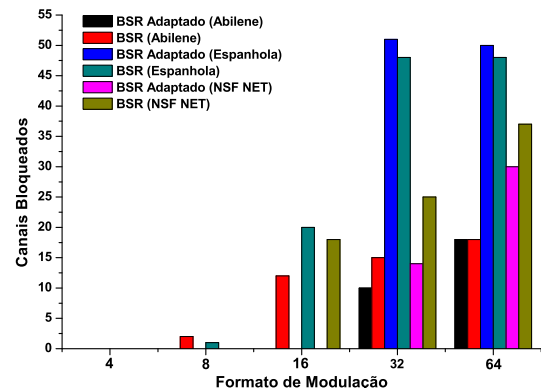


Fig. 5: Número de requisições bloqueadas por formato de modulação nas 3 topologias.

## REFERÊNCIAS

- [1] X. Chen, Y. Zhong e A. Jukan. "Multipath routing in elastic optical networks with distance-adaptive modulation formats". International Conference on Communications (ICC), p. 3915-3920, 2013.
- [2] M. Jinno, et. al. "Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications]". IEEE Communications Magazine, v. 48, n. 8, 2010.
- [3] M. Aibin and K. Walkowiak. "Adaptive modulation and regenerator-aware dynamic routing algorithm in elastic optical networks". IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 5138-5143, 2015.
- [4] L. Zhang, W. Lu, X. Zhou e Z. Zhu. "Dynamic RMSA in spectrum-sliced elastic optical networks for high-throughput service provisioning". IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), p. 380-384, 2013.
- [5] K. Christodoulopoulos, P. C. Kokkinos, K. Manousakis e E. A. Varvarigos. "Impairment aware RWA in optical networks: over-provisioning or cross optimization?". Journal of Networks, v. 5, n. 11, p. 1271-1278, 2010.
- [6] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos e E. A. Varvarigos. "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks". Journal of Lightwave Technology, v. 29, n. 9, p. 1354-1366, 2011.
- [7] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", 3rd ed., P. L. Kelly, I. P. Kaminow e G. P. Agrawal, Eds. Harcourt Place, 32 Jamestown Road, London NW1 7BY, UK: Academic Press, 2001.
- [8] K. Song e M. Premaratne. "Effects of SPM, XPM, and four-wave-mixing in Lband EDFAs on fiber-optic signal transmission". IEEE Photonics Technology Letters, v. 12, n. 12, p. 1630-1632, 2000.
- [9] P. Poggiolini, G. Bosco, A. Carena, V. Curri, Y. Jiang e F. Forghieri. "The GN-model of fiber non-linear propagation and its applications". Journal of lightwave technology, v. 32, n. 4, p. 694-721, 2014.
- [10] D. J. Ives, P. Bayvel e S. J. Savory. "Physical layer transmitter and routing optimization to maximize the traffic throughput of a nonlinear optical mesh network". IEEE International Conference on Optical Network Design and Modeling, p. 168-173, 2014.
- [11] R. J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini e B. Goebel. "Capacity limits of optical fiber networks". Journal of Lightwave Technology", v. 28, n. 4, p. 662-701, 2010.
- [12] G. M. Durães, A. Soares, J. R. Amazonas e W. Giozza. "The choice of the best among the shortest routes in transparent optical networks". Computer Networks, v. 54, n. 14, p. 2400-2409, 2010.
- [13] Y. Wang, X. Cao e Y. Pan. "A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks". IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), p. 1503-1511, 2011.
- [14] R. Dar, M. Feder, A. Mecozzi e M. Shtaif. "Inter-channel nonlinear interference noise in WDM systems: Modeling and mitigation". Journal of Lightwave Technology, v. 33, n. 5, p. 1044-1053, 2015.