Um Novo Algoritmo RSA Ciente de Imperfeições de Camada Física para Redes Ópticas Elásticas

Alexandre Fontinele[1], Iallen Santos[2], Juarez Nolêto Neto[1], Divanilson R. Campelo[3] e André Soares[1]

[1] Departamento de Computação
Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Teresina – PI – Brasil

[2]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)
São Raimundo Nonato – PI – Brasil

[3]Centro de Informática (CIn)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Recife – PE – Brasil

andre.soares@ufpi.edu.br

Abstract. *This paper proposes a new routing and spectrum assignment algorithm that considers the impact of physical layer effects for elastic optical networks. The goal of the algorithm is to reduce the blocking probability caused by the degradation of the transmission quality from new establishments of circuits. Our proposal is compared to two other Impairment-Aware Routing and Spectrum Assignment (IA-RSA) algorithms: Modified Dijkstra Path Computation (MD-PC) e K-Shortest Path Computation (KS-PC). Simulation results show that the proposed algorithm outperforms the MD-PC and KS-PC algorithms in terms of circuit blocking probability and bandwidth blocking probability for the EON and NSFNet topologies. In general, the proposed algorithm achieves a minimum gain of 78.10% and 55.75% when compared with the KS-PC and MD-PC algorithms, respectively. In terms of bandwidth blocking probability, the proposed algorithm presents a minimum gain of 71.96% and 41.89% in relation to the KS-PC and MD-PC algorithms, respectively.*

Resumo. *Este artigo propõe um novo algoritmo de roteamento e alocação de espectro ciente dos efeitos de camada física para redes ópticas elásticas. O objetivo do algoritmo é reduzir a probabilidade de bloqueio causada pela degradação da qualidade de transmissão proveniente de novos estabelecimentos de circuitos. A nossa proposta é comparada com outros dois algoritmos Impairment-Aware Routing and Spectrum Assignment (IA-RSA): Modified Dijkstra Path Computation (MD-PC) e K-Shortest Path Computation (KS-PC). Resultados de simulação mostram que o algoritmo proposto apresenta um desempenho superior ao dos algoritmos MD-PC e KS-PC em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos e probabilidade de bloqueio de banda para as topologias EON e NSFNet. Em geral, em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos o algoritmo proposto apresenta um ganho mínimo de 78,10% e 55,75% quando comparado aos algoritmos KS-PC e MD-PC, respectivamente.*

Em termos de probabilidade de bloqueio de banda, o algoritmo proposto apresenta um ganho mínimo de 71,96% e 41,89% em relação aos algoritmos KS-PC e MD-PC, respectivamente.

1. Introdução

As soluções de transporte de dados baseadas em rede óptica têm se mostrado promissoras para o futuro das comunicações ópticas de alta velocidade [Chatterjee et al. 2015]. Nas últimas décadas, as soluções de redes ópticas de transporte implantadas e estudadas na literatura eram fortemente baseadas na tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [Nath et al. 2014].

Em uma rede óptica WDM, o espectro é divido em comprimentos de onda de tamanho fixo [Rahbar 2012, Chatterjee et al. 2015]. A utilização de comprimentos de onda de tamanho fixo provoca a subutilização dos recursos da rede, pois cada requisição de circuito pode requerer diferentes larguras de banda.

Devido à essa deficiência, o uso da tecnologia OFDM (*Ortogonal Frequency Division Multiplexing*) foi proposto recentemente. Uma rede óptica OFDM tem o potencial de alocar espectro para os circuitos ópticos de acordo com os requisitos de largura de banda. Com a tecnologia OFDM o espectro óptico é dividido em slots de frequência (12,5 GHz) e para cada circuito pode ser alocado uma quantidade diferente de slots [Chatterjee et al. 2015]. A utilização do espectro óptico em uma rede óptica OFDM é mais eficiente quando comparada a de uma rede óptica WDM. Essa flexibilidade de alocação de largura de banda das redes ópticas OFDM deu origem a uma nova geração de redes ópticas de transporte, chamada de redes ópticas elásticas.

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. Para o estabelecimento de um circuito óptico em uma rede óptica elástica é necessário resolver o problema de roteamento e alocação de espectro (RSA – *Routing and Spectrum Assignment*) [Chatterjee et al. 2015]. O problema RSA consiste em definir uma rota para um par de nós origem e destino. Em seguida, a solução RSA deve escolher uma faixa de espectro livre (conjunto de slots de frequência contíguos) na rota definida para estabelecer o circuito óptico.

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 [Rahbar 2012]. Nesse contexto, algoritmos RSA que levam em consideração as imperfeições de camada física (IA-RSA – *Impairment-Aware RSA*) tornam-se mais apropriados para encontrar uma solução para o problema de roteamento e alocação de espectro.

Este artigo apresenta um novo algoritmo de roteamento e alocação de espectro ciente de imperfeições da camada física em redes ópticas elásticas. O algoritmo proposto busca estabelecer novos circuitos reduzindo o impacto na qualidade de transmissão (QoT – *Quality of Transmission*) dos outros circuitos já ativos na rede. É também apresentado um estudo de avaliação de desempenho comparando o algoritmo proposto com outros

dois algoritmos IS-RSA da literatura. Os resultados mostram um desempenho superior do algoritmo proposto em relação aos outros algoritmos em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos e probabilidade de bloqueio de banda.

As demais seções deste artigo estão organizadas da seguinte forma. A Seção 2 apresenta as redes ópticas elásticas e o problema de roteamento e alocação de espectro. A Seção 3 discute os trabalhos relacionados e apresenta as contribuições deste artigo. O modelo de camada física utilizado para computar a qualidade da transmissão é descrito na Seção 4. O algoritmo proposto é apresentado na Seção 5. A Seção 6 apresenta um estudo de avaliação de desempenho considerando as métricas de probabilidade de bloqueio de circuitos e probabilidade de bloqueio de banda. Por fim, as conclusões do trabalho são destacadas na Seção 7.

2. Redes Ópticas Elásticas

A tecnologia OFDM divide o espectro em pequenos intervalos de frequência, chamado de slots de frequência. Um *transponder* OFDM gera um sinal óptico utilizando apenas a quantidade de slots suficientes, com o apropriado nível de modulação, para satisfazer os requerimentos da requisição. Cada circuito é separado dos demais por um intervalo de frequência, denominado de banda de guarda, de forma a evitar interferências entras as transmissões simultâneas. Essas redes são chamadas de redes ópticas elásticas OFDM [Chatterjee et al. 2015].

A Figura 1 mostra a arquitetura típica da rede óptica elástica, que consiste principalmente de BVT (*Bandwidth Variable Transponder*) e BV-WXC (*Bandwidth Variable Cross-connect*). BVTs são utilizados para adaptar a largura de banda através do ajuste da taxa de bits da transmissão ou formato de modulação. BVTs dão suporte a tranmissões de alta velocidade usando formatos de modulação mais eficientes, como, por exemplo, a utilização do formato de modulação 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) para circuitos ópticos de curta distância. Para circuitos ópticos de longa distância são utilizados formatos de modulação mais robustos, porém menos eficientes em termos de alocação de espectro, tais como os formatos de modulação QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*) ou BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*). Portanto, BVTs são capazes de negociar eficiência espectral para um alcance da transmissão.

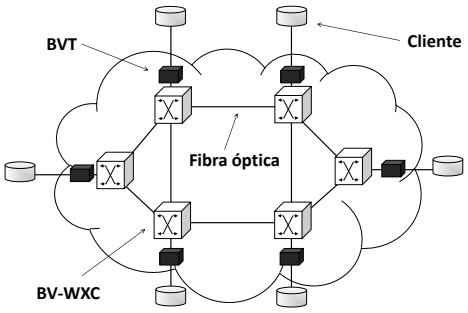


Figura 1. Arquitetura da rede óptica elástica (Adaptada de [Chatterjee et al. 2015]).

Em uma rede óptica, para que os seus clientes se comuniquem uns com os outros, é necessário que sejam estabelecidos circuitos ópticos. Em geral, as requisições de circuitos

podem ser caracterizadas por dois tipos de tráfego [Rahbar 2012]: estático ou dinâmico. No tráfego estático, as requisições são conhecidas previamente e o problema consiste em organizá-las de tal maneira que se minimize a quantidade total dos recursos (slosts de frequência e/ou fibras) a serem implantados na rede. No tráfego dinâmico, considerado neste artigo, as requisições chegam aleatoriamente e são desativadas após um período de tempo.

Depois do processo de admissão de uma requisição, o circuito óptico é estabelecido a partir de um BVT no nó de origem. Este circuito atravessa de forma transparente os BV-WXC nos nós intermediários, e termina em um BVT no nó de destino. Um BV-SSS (*Bandwidth Variable Spectrum Selective Switches*) pode ser utilizado para implementar um BV-WXC [Chatterjee et al. 2015]. Normalmente, um BV-SSS realiza multiplexação/demultiplexação de espectro e funções de comutação óptica. O BV-WXC configura a sua janela de comutação de forma flexível de acordo com a largura espectral do sinal óptico de entrada.

O algoritmo RSA é usado para encontrar uma rota apropriada para um par origem e destino e alocar um conjunto adequado de slots de frequência para o circuito óptico requisitado [Chatterjee et al. 2015]. Estes slots de frequência devem ser alocados adjacentes uns aos outros para atender a restrição de contiguidade de espectro. Além disso, a continuidade desses slots de frequência em cada enlace da rota deverá ser garantida, de forma semelhante à restrição de continuidade de comprimento de onda. Se a requisição solicita t unidades de espectro, então t slots de frequência contíguos devem ser alocados a ela (devido à restrição de contiguidade de espectro). Os mesmos t slots contíguos devem ser alocados em cada enlace ao longo da rota da demanda (devido à restrição de continuidade do espectro).

A dinâmica de alocação de recursos espectrais para as requisições de circuitos e sua liberação após o término das transmissões pode provocar a fragmentação do espectro, problema que influencia diretamente na eficiência das redes ópticas elásticas OFDM. A fragmentação, neste caso, refere-se à existência de pequenos blocos isolados, formados por um ou mais slots contíguos de espectro, que podem não ser suficientes para acomodar futuras requisições de circuitos. Para superar o problema de fragmentação do espectro, diferentes abordagens [Chatterjee et al. 2015] têm sido propostas.

3. Trabalhos Relacionados

A maioria dos trabalhos existentes em redes ópticas elásticas utiliza um limiar de alcance de transmissão [Jinno et al. 2010, Christodoulopoulos et al. 2011, Wan et al. 2012, Zhou et al. 2012, Zhu et al. 2013, Gong et al. 2013, Izquierdo-Zaragoza et al. 2014, Chatterjee et al. 2015] relacionado a cada formato de modulação. Também é utilizada uma banda de guarda para evitar a interferência entre circuitos adjacentes. Entretanto, esses métodos podem superestimar ou subestimar os impactos das imperfeições de camada física nas conexões [Zhao et al. 2015].

O conceito de algoritmos RSA cientes de imperfeições de camada física (IA-RSA – *Impairment Aware Routing and Spectrum Assignment algorithms*) é importante devido aos efeitos prejudiciais da coexistência de vários circuitos ópticos com diferentes formatos de modulações e taxas de bits [Beyranvand and Salehi 2013]. Também é importante escolher o formato de modulação adequado para um circuito através de algoritmos

RSA cientes de qualidade transmissão (QoT-Aware RSA) [Beyranvand and Salehi 2013, Chatterjee et al. 2015].

Em [Yang and Kuipers 2012] é apresentado um algoritmo de RSA ciente da QoT para redes ópticas elásticas translúcidas. O trabalho não aborda os efeitos de camada física que prejudicam a QoT, apenas considera que o alcance da transmissão do sinal está relacionado com o formato de modulação utilizado. Assim, o sinal dever ser regenerado quando o circuito percorrer uma distância maior que o alcance de transmissão permitido pelo formato de modulação selecionado. É utilizado o algoritmo de menor caminho de Dijkstra com restrições extras para computar os caminhos viáveis. As restrições buscam caminhos com a disponibilidade de slots livres em comum, distância máxima de transmissão e uso de regeneradores disponíveis.

Os autores em [Zhao et al. 2015] estudam o problema RSA para o estabelecimento de circuitos off-line em redes ópticas elásticas OFDM. Ainda em [Zhao et al. 2015], os autores propõem uma nova formulação de programação linear inteira e duas heurísticas de RSA cientes de efeitos de camada física, chamadas GL (*Group List*) e CL (*Connection List*). As duas heurísticas ordenam de forma decrescente os circuitos pelos seus requerimentos de taxa de bits. Na GL, os circuitos são agrupados, e depois é aplicada a programação linear inteira sobre cada grupo de circuitos para estabelecer as requisições. A CL considera os circuitos um por vez e combina o uso do algoritmo de menor caminho de Dijkstra para estabelecer os circuitos. Ambas as heurísticas utilizam uma margem de relação sinal ruído (SNR, *Signal to Noise Ratio*) para proteger os circuitos de interferências de uns nos outros. No momento que as heurísticas são aplicadas, essa margem vai sendo adaptada para permitir o estabelecimento de mais circuitos. É utilizado um modelo analítico, proposto em [Johannisson and Agrell 2014], para calcular os efeitos de camada física para cada circuitos.

Os autores em [Beyranvand and Salehi 2013] propõem um esquema de RSA ciente da qualidade de transmissão (QoT) para redes ópticas elásticas. O esquema emprega três etapas: i) cálculo dos rotas viáveis, ii) seleção de uma rota e iii) alocação de espectro. O artigo apresenta um modelo analítico para calcular o SNR de uma dada rota. Baseado no esquema proposto são apresentados dois algortimos IA-RSA: *Modified Dijkstra Path Computation* (MD-PC) e *K-Shortest Path Computation* (KS-PC).

O algoritmo MD-PC é uma versão modificada do algoritmo de menor caminho de Dijkstra. O MD-PC computa todos as rotas possíveis entre um dado par origem e destino, e determina o formato de modulação adequado para cada rota. No momento que um nó é visitado, o algoritmo só marca para serem visitados os vizinhos deste nó em que os enlaces possuem espectro livre contínuo que dão suporte à taxa de bits requisitada.

No algoritmo KS-PC, o algoritmo de k-menores caminhos de Yen é utilizado para obter as k rotas candidatas. Para cada rota do conjunto de rotas candidatas é determinado um formato de modulação adequado. Se não for possível encontrar um formato de modulação para uma dada rota, esta rota é retirada do conjunto de rotas candidatas. A próxima etapa é determinar a rota mais qualificada, referenciada como rota dominante, em termos das métricas de QoT e eficiência espectral.

Algoritmos RSA cientes de QoT devem garantir a qualidade do sinal de um circuito em estabelecimento sem interromper os circuitos já presentes na rede. Essa

preocupação com a QoT dos circuitos já ativos na rede ainda é pouco estudada em redes ópticas elásticas [Chatterjee et al. 2015, Zhao et al. 2015]. A principal contribuição deste artigo é a proposta de um novo algoritmo de roteamento e alocação de espectro ciente de efeitos de camada física em redes ópticas elásticas sob tráfego dinâmico. O principal diferencial do algoritmo proposto em relação às outras propostas presentes na literatura são as estratégias utilizadas para as escolhas do formato de modulação e da rota para cada circuito óptico em estabelecimento. Essas estratégias buscam estabelecer circuitos mais resistentes às degradações dos efeitos de camada física e que reduzam o impacto na QoT dos outros circuitos já ativos na rede.

4. Modelo da Camada Física

Em uma rede óptica elástica OFDM, os dados são transmitidos por n slots de frequência modulados para se criar um circuito óptico. O alcance de transmissão do nível de modulação utilizado é determinado pela SNR correspondente a uma taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*) aceitável, por exemplo 10^{-3} [Beyranvand and Salehi 2013].

A Figura 2 apresenta a arquitetura assumida para uma rota com um salto (*span*). Da esquerda para a direita temos: laser transmissor no BVT do nó de origem (A), BV-WXC (onde há um *splitter* e um BV-SSS) do nó de origem (B), fibra óptica (C), amplificador óptico (D), n spans (E), BV-WXC (onde há um *splitter* e um BV-SSS) do nó de destino (F) e receptor no BVT do nó de destino (G).

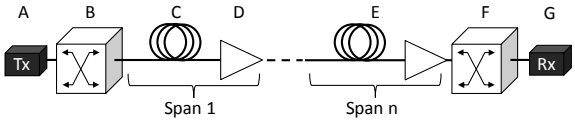


Figura 2. Arquitetura assumida para uma rota com um salto.

Na região linear do OFDM óptico, o alcance de transmissão é limitado pelo ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), enquanto na região não linear ele é limitado pelas não linearidades da fibra tais como *Four-Wave Mixing* (mistura de quatro ondas), *Cross-Phase Modulation* (modulação cruzada de fase) e *Self-Phase-Modulation* (auto-modulação de fase) [Beyranvand and Salehi 2013].

Para calcular a SNR de um circuito, foi adotado o modelo de camada física apresentado em [Johannisson and Agrell 2014, Zhao et al. 2015]. O cálculo da SNR para um circuito i usando uma rota r_i é expresso por:

$$SNR_i = \frac{I}{I_{ASE} + I_{NLI}}. \tag{1}$$

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 Δ_f é a largura de banda do circuito. A PSD do ruído ASE é dada por:

$$I_{ASE} = \sum_{l \in r_i} N_l I^0_{ASE}, \tag{2}$$

em que N_l é o número de spans do enlace l e $I^0_{ASE} = (G_{AMP} - 1)Fhv$. 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, v 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:

$$I_{NLI} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{NLI}^l, \tag{3}$$

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]:

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

em que, j é outro circuito usando o enlace l, Bi e Bj são, respectivemente, 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, γ é o coeficiente não linear da fibra, β_2 é o parâmetro de dispersão da fibra e α é a atenuação de potência causada pela fibra.

5. Algoritmo Proposto

Um novo circuito óptico é estabelecido se, e somente se, todas as seguintes exigências forem atendidas: i) Há disponibilidade de espectro óptico na rota escolhida; ii) A QoT é aceitável para o circuito que está sendo estabelecido e iii) A QoT para todos os demais circuitos já ativos na rede é mantida aceitável, considerando que o novo circuito óptico seja atendido. Seguindo esta modelagem, pode-se decompor a probabilidade de bloqueio geral da rede em três componentes: i) Bloqueio pela indisponibilidade de espectro livre que dê suporte à largura de banda requisitada pelo novo circuito óptico – esse tipo de bloqueio pode ocorrer pela fragmentação do espectro ou pela Ausência de Espectro Livre (AEL) na rota selecionada; ii) QoT inadequada para o Novo circuito óptico (QoTN) e iii) QoT inadequada para os Outros circuitos ópticas já ativos na rede (QoTO).

O algoritmo de IA-RSA proposto neste artigo é chamado de k menores caminhos com redução de QoTO (KSP-RQoTO – *K-Shortest Path with Reduction of QoTO*). O algoritmo computa os k menores caminhos para cada par origem e destino da rede em uma fase off-line. No momento que a rede está em operação, o algoritmo proposto busca alocar uma das k rotas alternativas de forma a minimizar o bloqueio do tipo QoTO. O fluxograma ilustrado na Figura 3 apresenta os passos seguidos pelo algoritmo proposto na fase de operação da rede.

O primeiro passo do algoritmo KSP-RQoTO é selecionar um formato de modulação para cada rota candidata. Para cada formato de modulação é verificado se é possível alocar espectro e se a QoT está aceitável. Em caso afirmativo é computado o $\Delta\text{SNR}_{MOD\&REQ}$ para o circuito em estabelecimento. O ΔSNR é a diferença entre o SNR atual do circuito em estabelecimento e o limiar de SNR do formato de modulação. O limiar de SNR representa o valor mínimo de SNR tolerado pelo receptor. O ΔSNR representa a margem residual de SNR do circuito óptico. Quanto menor o ΔSNR de um circuito óptico, mais frágil este circuito óptico está as degradações de camada física. O valor do $\Delta\text{SNR}_{MOD\&REQ}$ é atribuído como avaliação para o formato de modulação em analise.

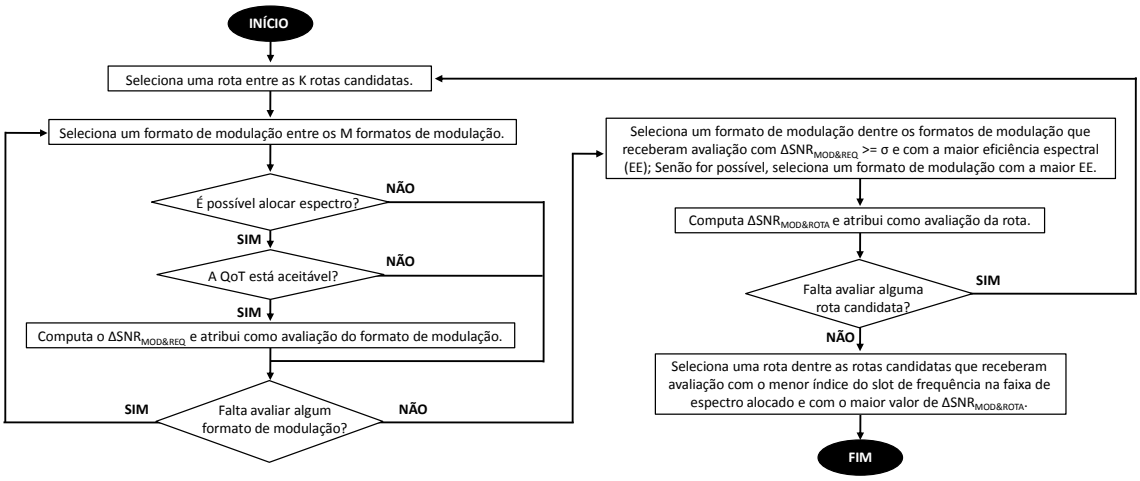


Figura 3. Fluxograma do algoritmo KSP-RQoTO.

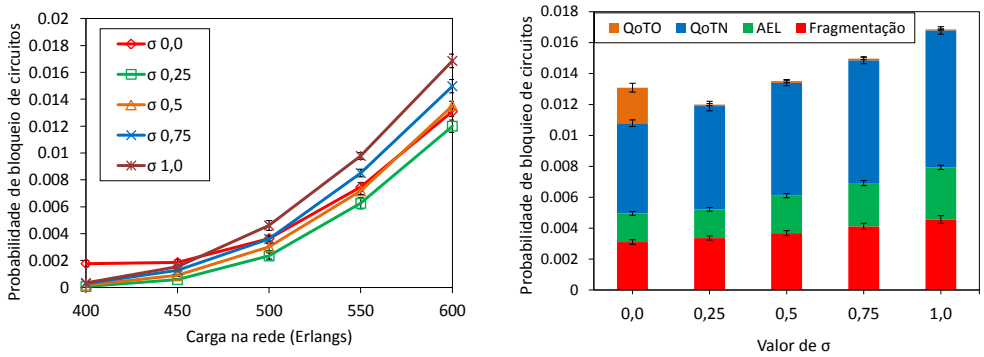
Dentre os formatos de modulação que recebem avaliação, é selecionado o formato de modulação com alto nível que possua o $\Delta\text{SNR}_{MOD\&REQ} \geq \sigma$. σ corresponde a um valor mínimo exigido pelo algoritmo para o ΔSNR de um circuito em estabelecimento adotando um dado formato de modulação. A escolha do valor ideal de σ é apresentada a seguir. Caso nenhum formato de modulação atinja o valor de σ, o algoritmo escolhe aquele formato de modulação que apresentar o maior nível. Formatos de modulação com altos níveis possuem uma maior eficiência espectral que formatos de modulação com baixos níveis. Por outro lado, o alcance de transmissão de formatos de modulação com altos níveis são inferiores ao alcance de transmissão de formatos de modulação com baixos níveis [Chatterjee et al. 2015].

O segundo passo do algoritmo KSP-RQoTO é selecionar uma rota entre as rotas candidatas. Para o processo de escolha da rota é computado o valor de $\Delta\text{SNR}_{MOD\&ROTA}$. Primeiro é calculado o ΔSNR para todos os circuitos ópticos ativos que possuem rotas com enlaces em comum com a rota candidata em avaliação. Para isso o plano de controle da rede mantém para cada circuito óptico ativo a sua rota e o seu SNR calculado no nó destino. O menor ΔSNR entre os ΔSNR calculados para os circuitos ópticos ativos é atribuído como valor para $\Delta\text{SNR}_{MOD\&ROTA}$. O valor de $\Delta\text{SNR}_{MOD\&ROTA}$ é atribuído como avaliação da rota candidata analisada no momento. Rotas candidatas em que nenhum formato de modulação recebeu avaliação são removidas do conjunto de rotas candidatas. A rota escolhida para o estabelecimento do novo circuito óptico será aquela que apresentar o menor índice do slot de frequência na faixa de espectro alocado e maior valor de $\Delta\text{SNR}_{MOD\&ROTA}$ para o circuito em estabelecimento.

Ao escolher a rota em que o índice do slot de frequência na faixa de espectro alocado seja o menor, o algoritmo está tentando acomodar os circuitos mais próximos do início do espectro óptico. Essa estratégia tenta reduzir a fragmentação do espectro [Wang and Mukherjee 2014]. Ao escolher a rota como maior valor de $\Delta\text{SNR}_{MOD\&ROTA}$ neste passo, o algoritmo proposto evita degradar os circuitos ópticos ativos mais frágeis, isto é, os circuitos ativos com o menor ΔSNR. Quanto mais circuitos ópticos frágeis na rede, maior a probabilidade de que as novas requisições sofram bloqueio do tipo QoTO.

A escolha do valor ideal de σ deve ser feita durante a fase de planejamento da rede

ou durante uma alteração da configuração da rede. Para exemplificar a escolha do valor ideal de σ é apresentado um estudo. A Figura 4 apresenta as curvas de probabilidade de bloqueio de circuitos em função da carga na topologia EON (Figura 5) considerando diferentes valores para σ e também apresenta as componentes da probabilidade de bloqueio em função do σ para uma carga de 600 Erlangs. Nesta seção o algoritmo KSP-RQoTO foi aplicado junto do algoritmo de alocação de espectro *First-Fit* [Chatterjee et al. 2015]. Neste cenário (Figura 4(a)), para a carga de 600 Erlangs (carga mais alta estudada) o valor escolhido para o σ é 0,25. Com este valor para o σ a probabilidade de bloqueio apresentou o melhor desempenho. O valor ideal para o σ tem como objetivo estabelecer circuitos mais resistentes as degradações causadas pelo estabelecimento de novos circuitos e deve ser escolhido de maneira a reduzir a probabilidade de bloqueio geral.



(a) Probabilidade de bloqueio geral.

(b) Componentes da probabilidade de bloqueio.

Figura 4. (a) Curvas de probabilidade de bloqueio em função da carga na topologia EON utilizando diferentes valores para σ. (b) Composição da probabilidade de bloqueio geral de acordo com o valor de σ na topologia EON sob uma carga de 600 erlangs.

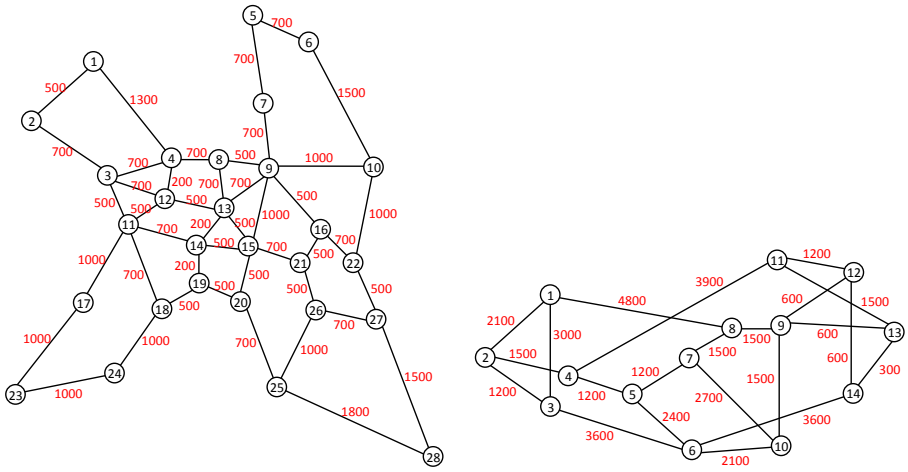
Para definir o valor ideal para o σ, o algoritmo KSP-RQoTO simula o comportamento da rede considerando diferentes valores para σ em ordem crescente. A Figura 4(b) ilustra a busca do valor ideal para o σ sob uma carga de 600 Erlangs. No primeiro momento ($0,0 \leq \sigma < 0,5$), com o aumento do valor de σ a probabilidade de bloqueio vai diminuindo. Os circuitos que estão sendo estabelecidos evitam rotas que causam bloqueio do tipo QoTO. Entretanto, para um dado valor de σ, o comportamento é invertido ($\sigma \geq 0,5$), como é ilustrado na Figura 4(b). Ocorre um aumento na probabilidade de bloqueio. Isso porque estão sendo selecionados formatos de modulação com baixos níveis. Formatos de modulação com baixos níveis tendem a necessitar de mais slots de frequência para estabelecer circuitos. Assim, o algoritmo proposto busca o valor ideal de σ até a inversão no comportamento da curva da probabilidade de bloqueio.

6. Avaliação de Desempenho

O algoritmo proposto, KSP-RQoTO, foi comparado com os algoritmos KS-PC e MD-PC sob os aspectos de probabilidade de bloqueio de circuito e probabilidade de bloqueio de banda. Foram utilizadas quatro rotas condidatas para os algoritmos de k menores caminhos. O algoritmo *First-Fit* foi utilizado para a alocação de espectro

[Chatterjee et al. 2015]. Para avaliar os impactos dos efeitos de camada física nos circuitos ópticos, o modelo de camada física apresentado na Seção 4 foi implementado no SNetS (*SLICE Network Simulator*). O SNetS é uma ferramenta de simulação desenvolvida para permitir a avaliação de desempenho de redes ópticas elásticas OFDM [Santos 2015]. Informações sobre a validação podem ser encontradas em [Santos 2015].

Foram geradas 100000 requisições de circuitos em cada simulação. A geração de requisições é um processo de Poisson com taxa média de λ e o tempo médio de retenção dos circuitos é distribuído exponencialmente com média $1/\mu$. A carga de tráfego é distruída uniformemente entre todos os pares de nós origem e destino. A carga em Erlangs pode ser definida por $\rho = \lambda/\mu$. Para cada simulação foram realizadas 10 replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória. Todos os resultados possuem nível de confiança de 95%. As topologias consideradas nas simulações são EON e NSFNet, Figura 5. O valor apresentado em cada enlace da topologia indica a distância do enlace em km.



(a) EON, 28 nós. (b) NSFNet, 14 nós.

Figura 5. Topologias usadas no estudo de avaliação de desempenho. O número em cada enlace corresponde a distância em km.

Os requisitos de taxas de bits para cada circuito requisitado variam uniformemente entre 10 Gbps, 40 Gbps, 80 Gbps, 100 Gbps, 160 Gbps, 200 Gbps e 400 Gbps. Os formatos de modulação considerados neste estudo foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM, seus respectivos limiares de SNR são 6 dB, 9 dB, 12 dB, 15 dB, 18 dB e 21 dB [Beyranvand and Salehi 2013]. Os respectivos níveis dos formatos de modulação são 2, 3, 4, 5, 6 e 7. Para se calcular a largura de banda de uma requisição i para uma dada taxa de bits B_n, com nível de modulação L_m e sobrecarga de FEC (*Forward Error Correction*) F, é utilizada a Equação 5 [Gao et al. 2014]:

$$B_i = \frac{1.1 B_n (1 + F)}{2 \log_2 L_m}. \tag{5}$$

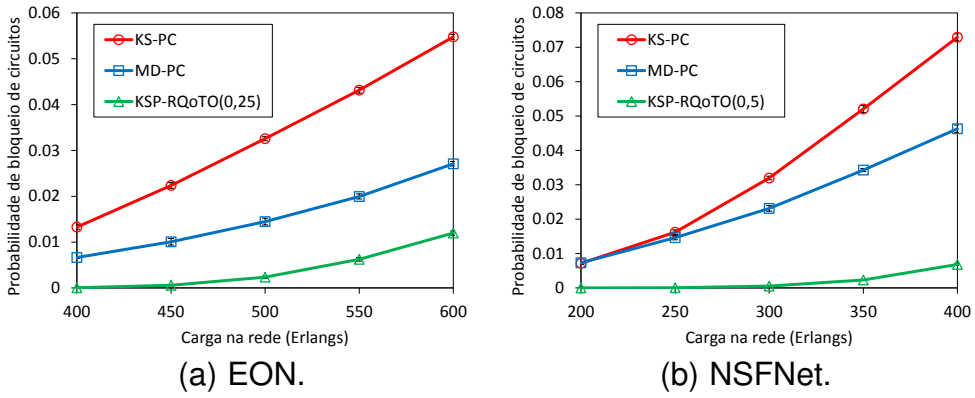
Em seguida, encontra-se um número inteiro de slots de frequência que cubra a largura de banda requisitada acrescentada da banda de guarda. Neste estudo, foi considerada uma FEC de 7%, que corresponde a um limiar de BER de $3,8 \times 10^{-3}$ [Gao et al. 2014].

Todos os enlaces da rede são bidirecionais e possuem largura de banda do espectro dividida em 400 slots de frequência. Um slot de frequência possui largura de banda de 12,5 GHz e a banda de guarda possui largura de banda de 6,25 GHz [Gao et al. 2014]. Os ganhos dos amplificadores são ajustados para compensar as perdas dos dispositivos e da fibra. Outros parâmetros utilizados nas simulações estão listados na Tabela 1 [Beyranvand and Salehi 2013, Zhao et al. 2015].

Tabela 1. Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.

Descrição	Valor
Densidade espectral de potência do sinal	-17 dBm/GHz
Atenuaçao da fibra (α)	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra (β_2)	16 ps^2/km
Coeficiente não linear da fibra (γ)	1,3 (Wkm)$^{-1}$
Tamanho de um span (L_s)	100 km
Figura de ruído do amplificador (NF)	6 dB
Potência de saturação do amplificador (P_{SAT})	16 dBm

A Figura 6 apresenta as probabilidades de bloqueio de circuitos obtidas com os algoritmos KSP-RQoTO, KS-PC e MD-PC em função da carga na rede para as topologias EON e NSFNet. O valor entre parênteses na legenda do algoritmo KSP-RQoTO, ilustrada na Figura 6, corresponde ao valor ideal para o σ. Observando a Figura 6, nota-se que, sob os valores de carga analisados, o algoritmo KSP-RQoTO apresentou melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos do que os algoritmos KS-PC e MD-PC para as duas topologias consideradas.



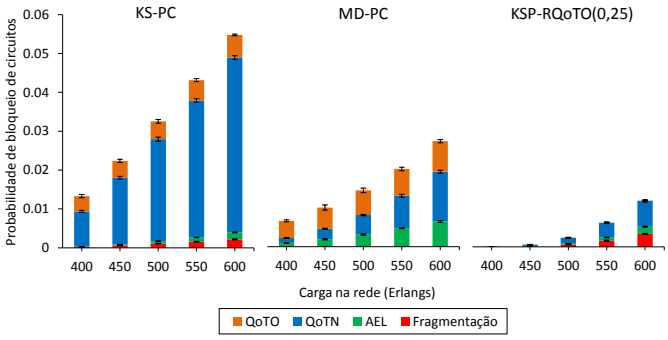
(a) EON. (b) NSFNet.

Figura 6. Probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO paras as topologias (a) EON e (b) NSFNet.

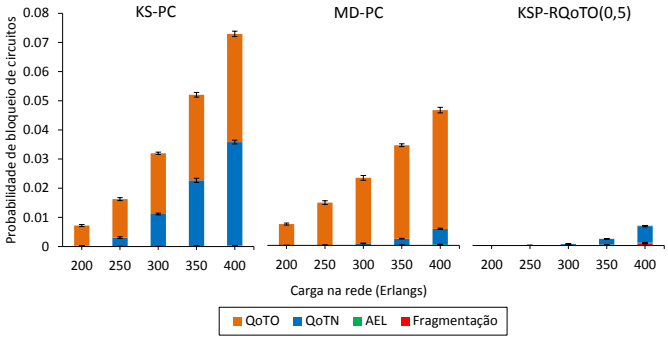
A Figura 6(a) ilustra o desempenho sob uma carga de 600 Erlangs na topologia EON. Pode-se observar que os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO obtiveram 5,48%, 2,71% e 1,20% de probabilidade de bloqueio de circuito, respectivamente. Para esses valores de probabilidades de bloqueio de circuito, o ganho do KSP-RQoTO em relação aos algoritmos KS-PC e MD-PC foi de aproximadamente 78,10% e 55,75%, respectivamente. A Figura Figura 6(b) ilustra o desempenho sob uma carga de 400 Erlangs na topologia NSFNet. Pode-se observar que os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO alcançaram 7,30%, 4,63% e 0,69% de probabilidade de bloqueio de circuito,

respectivamente. O ganho do algoritmo KSP-RQoTO em relação aos algoritmos KS-PC e MD-PC foi de aproximadamente 90,59% e 85,18%, respectivamente.

A Figura 7 exibe as componentes da probabilidade de bloqueio de circuitos obtidas com os algoritmos KSP-RQoTO, KS-PC e MD-PC em função da carga na rede para as topologias EON e NSFNet. O valor entre parênteses na legenda do algoritmo KSP-RQoTO na Figura 7 corresponde ao valor ideal para o σ



(a) EON.



(b) NSFNet.

Figura 7. Componentes das probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO para as topologias (a) EON e (b) NSFNet.

Analisando as componentes da probabilidade de bloqueio quando os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO são aplicados na topologia EON, ilustradas na Figura 7(a), percebe-se que a componente QoTN é a principal responsável pelos bloqueios dos circuitos. Nota-se pela Figura 7(a) que a estratégia do algoritmo KSP-RQoTO em evitar rotas que impactam em circuitos mais frágeis reduz a componente QoTO da probabilidade de bloqueio. Observa-se na Figura 7(b) que as componentes QoTN e QoTO foram as principais responsáveis pelos bloqueios de circuitos quando os algoritmos KS-PC e MD-PC foram aplicados na topologia NSFNet. Nota-se ainda pela Figura 7(b), que o algoritmo KSP-RQoTO reduziu a componente QoTO da probabilidade de bloqueio, assim como ocorreu na topologia EON.

A métrica de probabilidade de bloqueio de circuitos não faz distinção entre o bloqueio de circuitos com requisitos de largura de banda diferentes. Para isso é utilizada a métrica probabilidade de bloqueio de banda. A probabilidade de bloqueio de banda consiste na razão da quantidade de banda bloqueada (somatório da largura de banda vezes o tempo de duração de cada circuito bloqueado) pela quantidade de banda requisitada

(somatório da largura de banda vezes o tempo de duração de cada circuito requisitado).

Devido ao limite de páginas os gráficos de probabilidade de bloqueio de banda não foram inseridos no artigo apenas a análise dos resultados. Para a topologia EON, sob o ponto de carga de 600 Erlangs, os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO alcançaram probabilidade de bloqueio de banda de 10,55%, 5,09% e 2,96%, respectivamente. O ganho do algoritmo KSP-RQoTO em relação aos algoritmos KS-PC e MD-PC foi de aproximadamente 71,96% e 41,89%, respectivamente. Para a topologia NSFNet, sob o ponto de carga de 400 Erlangs, os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO alcançaram probabilidades de bloqueio de banda de 11,72%, 5,76% e 1,73%, respectivamente. O ganho do algoritmo KSP-RQoTO em relação aos algoritmos KS-PC e MD-PC foi de aproximadamente 85,22% e 69,94%, respectivamente. Os resultados obtidos mostram que o algoritmo KSP-RQoTO apresentou o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de banda em relação aos algoritmos KS-PC e MD-PC quanto aplicados às topologias EON e NSFNet.

7. Conclusões

Este artigo propôs o algoritmo KSP-RQoTO que realiza roteamento e alocação de espectro considerando imperfeições de camada física em redes ópticas elásticas. O objetivo do algoritmo KSP-RQotO é estabelecer circuitos que causem o menor impacto na QoT dos outros circuitos já ativos na rede. O algoritmo KSP-RQotO apresentou em desempenho superior ao dos algoritmos KS-PC e MD-PC em termos de probabilidade de bloqueio de circuito e probabilidade de bloqueio de banda nos cenários estudados.

Em termos de probabilidade de bloqueio de circuito, para a topologia EON, o algoritmo KSP-RQotO obteve um ganho de pelo menos 78,10% e 55,75% em relação aos algoritmos KS-PC e MD-PC, respectivamente. Na topologia NSFNet, o algoritmo KSP-RQoTO obteve ganho mínimo de 90,59% e 85,18% em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos em realação aos algoritmos KS-PC e MD-PC, respectivamente.

Em termos de probabilidade de bloqueio de banda, para a topologia EON, o algoritmo KSP-RQoTO obteve um ganho de pelo menos 71,96% e 41,89% em relação aos algoritmos KS-PC e MD-PC, respectivamente. Já na topologia NSFNet, em termos de probabilidade de bloqueio de banda, o algoritmo KSP-RQoTO obteve ganho mínimo de 85,22% e 69,94% em relação aos algoritmos KS-PC e MD-PC, respectivamente.

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.

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.

Gao, G., Zhang, J., Wang, L., Gu, W., and Ji, Y. (2014). Influence of physical layer configuration on performance of elastic optical ofdm networks. *IEEE Communications Letters*, 18(4):672–675.

Gong, L., Zhou, X., Liu, X., Zhao, W., Lu, W., and Zhu, Z. (2013). Efficient resource allocation for all-optical multicasting over spectrum-sliced elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 5(8):836–847.

Izquierdo-Zaragoza, J.-L., Pavon-Marino, P., and Bueno-Delgado, M.-V. (2014). Distance-adaptive online rsa algorithms for heterogeneous flex-grid networks. In *2014 International Conference on Optical Network Design and Modeling*, pages 204–209.

Jinno, M., Kozicki, B., Takara, H., Watanabe, A., Sone, Y., Tanaka, T., and Hirano, A. (2010). Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications]. *IEEE Communications Magazine*, 48(8):138–145.

Johannisson, P. and Agrell, E. (2014). Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, 32(23):4544–4552.

Nath, I., Chatterjee, M., and Bhattacharya, U. (2014). A survey on regenerator placement problem in translucent optical network. In *2014 International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA)*, pages 408–413.

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.

Santos, I. (2015). *Alocação de Recursos para o Estabelecimento de Circuitos em Redes Ópticas WDM e OFDM*. Universidade Federal do Piauí, Teresina.

Wan, X., Hua, N., and Zheng, X. (2012). Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4(8):603–613.

Wang, R. and Mukherjee, B. (2014). Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks. *Optical Switching and Networking*, 11, Part A:83 – 91.

Yang, S. and Kuipers, F. (2012). Impairment-aware routing in translucent spectrum-sliced elastic optical path networks. In *2012 17th European Conference on Networks and Optical Communications (NOC)*, pages 1–6.

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.

Zhou, X., Lu, W., Gong, L., and Zhu, Z. (2012). Dynamic rmsa in elastic optical networks with an adaptive genetic algorithm. In *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 2912–2917.

Zhu, Z., Lu, W., Zhang, L., and Ansari, N. (2013). Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-/multi-path routing. *Journal of Lightwave Technology*, 31(1):15–22.