

R-RQoT: Uma Nova Estratégia de Realocação de Circuito Ciente dos Efeitos de Camada Física para Redes Ópticas Elásticas

Selles Araújo¹, Ênio Barbosa¹, José Reis Júnior¹, André Soares¹

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

sellesgustavo@gmail.com, andre.soares@ufpi.edu.br

Abstract. *This work presents a circuit reallocation strategy aware of the physical layer effects. The main objective of the strategy is to reduce blockages related to transmission quality of the circuits. It is worth mentioning that the re-allocation of elastic optical circuits has already been the focus of other studies, but only aimed at the defragmentation of the network. The proposed strategy is applied to two physical layer-aware RMLSA algorithms: K-Shortest Path Computation (KS-PC) and K-Shortest Path with Reduction of QoTO (KSP-RQoTO). The performance of each of the algorithms is evaluated with and without the use of the proposed strategy. The results were obtained through computational simulations for NSFNet and EON network topologies. In terms of probability of blocking circuits, the KS-PC and KSP-RQoTO algorithms presented respectively reductions of up to 29.75% and 44.06% for the NSFNet topology. These reductions were obtained by reallocating only 12.01% of the active circuits for the KS-PC and 16.47% for the KSP-RQoTO. In the EON topology, there was an approximate gain of up to 49.42% for KS-PC and 31.91% for KSP-RQoTO. The percentage of reallocated circuits for the EON topology was up to 13.34% and 11.50% for the KS-PC and KSP-RQoTO algorithms, respectively.*

Resumo. *Este trabalho apresenta uma estratégia de realocação de circuito ciente dos efeitos de camada física. O principal objetivo da estratégia consiste na redução de bloqueios relacionados a qualidade de transmissão dos circuitos. Vale ressaltar que a realocação de circuitos ópticos elásticos já foi foco de outros estudos, mas visando apenas a desfragmentação da rede. A estratégia proposta é aplicada a dois algoritmos RMLSA cientes de camada física: K-Shortest Path Computation (KS-PC) e K-Shortest Path with Reduction of QoTO (KSP-RQoTO). O desempenho de cada um dos algoritmos é avaliado com e sem a utilização da estratégia proposta. Os resultados foram obtidos através de simulações computacionais para as topologias de rede NSFNet e EON. Em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos, os algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO apresentaram respectivamente reduções de até 29,75% e 44,06% para a topologia NSFNet. Estas reduções foram obtidas realocando apenas 12,01% dos circuitos ativos para o KS-PC e 16,47% para o KSP-RQoTO. Já para a topologia EON, ocorreu uma redução de até 49,42% para o KS-PC e 31,91% para o KSP-RQoTO. O percentual de circuitos realocados para a topologia EON foi de até 13,34% e 11,50% para os algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO, respectivamente.*

1. Introdução

O tráfego de dados na Internet aumenta a cada ano de forma considerável. Segundo a [Cisco 2016], até 2020, 52% da população mundial estará utilizando a Internet, cada habitante do planeta terá 3,4 dispositivos conectados e cerca de 82% do tráfego total será conteúdo de vídeo. Dessa forma, a tecnologia de transmissão óptica convencional é insuficiente para atender o grande volume de dados gerados.

As redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks* – EONs) [Tomkos et al. 2014, Chatterjee et al. 2015] surgiram como alternativa promissora para lidar com a grande demanda de tráfego, pois proporcionam flexibilidade no atendimento de requisições com diferentes taxas de *bits*. A flexibilidade nas EONs é devido a utilização da tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), que permite a divisão do espectro óptico em pequenos intervalos de frequência denominados *slots*. Os *slots* podem ser agrupados para formar maiores canais de comunicação de dados.

O estabelecimento de um circuito nas EONs exige a resolução do problema *Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment* (RMLSA) [Costa and Drummond 2016]. O problema RMLSA consiste em: i) definir uma rota para o par de nós origem-destino; ii) selecionar um nível de modulação com maior eficiência espectral respeitando a qualidade do sinal óptico exigida pela rede; iii) escolher um intervalo de espectro livre na rota definida. Além disso, o intervalo de espectro escolhido deve ser o mesmo em todos os enlaces da rota para que a restrição de continuidade do espectro seja atendida. E os *slots* que compõem o intervalo de espectro escolhido devem ser adjacentes entre si para que atenda à restrição de contiguidade do espectro.

A operação normal de funcionamento das EONs consiste na sucessiva aplicação de algoritmos RMLSA para atender requisições de circuitos. As requisições chegam aleatoriamente na rede e são desativadas após um período de tempo. Quando circuitos são encerrados e os recursos da rede são liberados, pequenos blocos livres de *slots* são gerados de forma distribuídas no espectro. Isto leva a um problema de fragmentação do espectro óptico e eventualmente impossibilita o estabelecimento de novos circuitos. Para mitigar este problema, surgem algoritmos de desfragmentação com o objetivo de realocar circuitos para gerar blocos de espectro contíguos [Horota et al. 2014]. A realocação de circuitos (*Circuit Reallocation* – CR) consiste em encontrar uma nova solução RMLSA para um circuito já ativo na rede, alterando sua rota ou apenas sua faixa de espectro. As restrições do meio óptico devem ser atendidas no processo de realocação do circuito.

No entanto, ao considerar as imperfeições da camada física (*Impairment Aware* – IA), os circuitos sofrem degradações no sinal óptico à medida que se propagam da origem ao destino. Dessa forma, a realocação de circuito óptico não está relacionada apenas com a desfragmentação do espectro mas também com a qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* – QoT) da conexão. Assim, algoritmos de desfragmentação não estão suscetíveis a tratarem as QoTs dos circuitos em um processo de realocação. Logo, este problema será denominado de realocação dos circuitos considerando os efeitos de camada física (*Impairment Aware Reallocation Circuit* – IA-CR).

Para mitigar o problema IA-CR, é necessário propor estratégias que permitem as

realocações dos circuitos ativos de forma a reduzir as interferências entre os circuitos já estabelecidos e destes em novas requisições de circuitos. Neste contexto, é proposta uma estratégia IA-CR, denominada de R-RQoT (*Reallocation - Reduction QoT*). A estratégia R-RQoT foi aplicada nos algoritmos IA-RMLSA *K-Shortest Path Computation* (KS-PC) e *K-Shortest Path with Reduction of QoTO* (KSP-RQoTO) [Fontinele et al. 2017]. Para avaliação de desempenho foram utilizadas as topologias reais NSFNet e EON. Os resultados obtidos com o uso da estratégia proposta apresentaram reduções respectivamente de até 49,42% e 44,06% para os algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos. Já em termos de probabilidade de bloqueio de banda apontou uma redução de cerca de 55,9% e 45,42% para os algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO, respectivamente.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o problema IA-CR. A Seção 3 discute os trabalhos relacionados. A estratégia R-RQoT é apresentada na Seção 4. Já na Seção 5, é apresentado um estudo de avaliação de desempenho da estratégia proposta. E por fim, na Seção 6 são apresentadas as conclusões.

2. Problema IA-CR

Para o estabelecimento de um novo circuito óptico é necessário que haja disponibilidade de recursos na rede. Além disso, a QoT do novo circuito deve ser aceitável e a QoT para todos os outros circuitos já ativos na rede deve ser também aceitável, caso o novo circuito seja estabelecido. A partir desta modelagem, a probabilidade de bloqueio geral da rede pode ser decomposta em quatro componentes: bloqueio por fragmentação do espectro, por Ausência de Espectro Livre (AEL), por QoT não aceitável do Novo circuito (QoTN) e QoT não aceitável para os Outros circuitos já ativos na rede (QoTO). O bloqueio por fragmentação ocorre quando não há continuidade e contiguidade de espectro para atender a nova requisição de circuito. E o bloqueio por AEL acontece por indisponibilidade de recursos na rede.

As componentes QoTN e QoTO surgem devido a consideração dos efeitos de camada física. Bloqueios por QoTN acontecem quando as interferências dos circuitos ativos são altas o suficiente para degradar a QoT do novo circuito tornando-a inaceitável. Já os bloqueios por QoTO ocorrem quando o estabelecimento de um novo circuito torna a QoT de circuitos já estabelecidos abaixo do limiar exigido pela rede. No entanto, rotas que apresentam mais recursos utilizados ou circuitos ativos, tendem a degradar mais a QoT de novas requisições de circuitos que rotas menos utilizadas.

Para reduzir bloqueios relacionados a QoT, é necessário a criação de estratégias que solucionem o problema denominado, neste artigo, de realocação de circuitos considerando as imperfeições de camada física (IA-CR).

O problema IA-CR pode ser dividido em três etapas:

1. quando realocar;
2. quais circuitos realocar;
3. como realocar.

A etapa 1 determina quando deve iniciar o processo de realocação de circuitos. Para isto, é necessário que uma condição seja atendida, denominada gatilho. O gatilho pode ser relacionado com o tráfego da rede, quantidade de circuitos estabelecidos ou finalizados, bloqueio por QoTN ou QoTO, etc.

Na etapa 2, é definido quais circuitos estabelecidos serão selecionados para o processo de realocação. Para este trabalho, os circuitos selecionados para realocação são aqueles que compartilham os enlaces da rota onde ocorreu bloqueio por QoTN.

Já a etapa 3, determina a nova solução RMLSA para cada circuito selecionado na etapa 2. Vale ressaltar que, pode acontecer da nova solução RMLSA não ser encontrada para alguns ou nenhum dos circuitos selecionados. Ainda na etapa 3, satisfazendo os critérios RMLSA, é necessário migrar o tráfego do circuito. As principais propostas utilizadas para a migração de tráfego é *reoptimization* [Patel et al. 2011], *make-before-break* [Takagi et al. 2011], *push-and-pull* [Cugini et al. 2013] e *hitless* [Wang et al. 2012]/*hop tuning* [Wang and Mukherjee 2013].

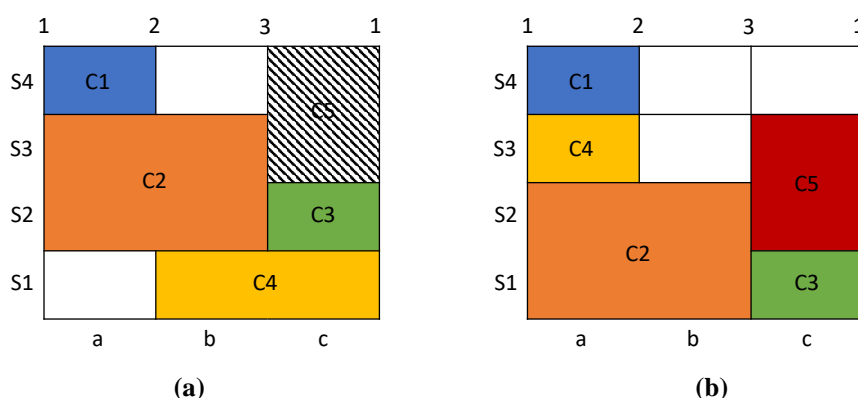


Figura 1. (a) Estado da rede antes do processo de realocação de circuitos. (b) Estado da rede após a realocação de circuitos.

Para uma melhor compreensão do problema IA-CR, um exemplo é apresentado na Figura 1. A Figura 1(a) representa o estado da rede antes do processo de realocação de circuitos enquanto a Figura 1(b) representa o estado da rede após alguns circuitos realocados. A topologia de rede é composta de 3 nós (1, 2 e 3) e 3 enlaces (a, b e c), possuindo 4 *slots* (S1, S2, S3 e S4) cada um. De acordo com a Figura 1(a), existem na rede quatro circuitos ativos (C1, C2, C3 e C4) representado por cores distintas e um circuito C5 bloqueado por apresentar valor de QoT abaixo do limiar aceitável no receptor óptico no destino.

Na Figura 1(a), o circuito C5 não apresenta QoT aceitável devido as interferências dos circuitos C3 e C4 serem altas o suficiente para que ocorra bloqueio por QoTN em C5. Já na Figura 1(b), o circuito C5 passa a apresentar QoT aceitável. Isto ocorre devido a realocação do circuito C4, com alteração de rota, contribuir para a redução na interferência da QoT da nova requisição de circuito C5.

3. Trabalhos Relacionados

Diversos trabalhos na literatura propõem estratégias de realocação de circuitos para desfragmentar o espectro nas EONs [Takagi et al. 2011, Wen et al. 2011, Cugini et al. 2012, Wang and Mukherjee 2013]. Porém, estes trabalhos não levam em conta as imperfeições da camada física para a realocação de circuitos. Portanto, não são apropriados para tratar o problema intitulado, neste artigo, de *Impairment Aware Reallocation Circuit* (IA-CR).

Neste contexto, surge a necessidade de criar soluções para lidar com o problema IA-CR. Assim, como não há trabalhos que abordem o problema IA-CR, os trabalhos mencionados nesta seção são relacionados ao problema de desfragmentação do espectro sem considerar os impactos dos efeitos de camada física.

Os autores em [Yin et al. 2012, Shakya and Cao 2013] apresentam o problema da desfragmentação a partir de um grafo auxiliar. Os nós do grafo são representados por possíveis soluções de espectro e as arestas representadas por dependências entre as soluções. Dessa forma, o objetivo é encontrar o máximo conjunto independente de nós do grafo para realocar conexões.

Em [Zhang et al. 2013], é proposto um algoritmo de desfragmentação que lida simultaneamente com os problemas de: quando desfragmentar, o que desfragmentar e como desfragmentar. O algoritmo proposto utiliza uma estratégia para selecionar os circuitos para a desfragmentação e realocam com base em algoritmos *Routing and Spectrum Assignment* (RSA). Para a migração do tráfego foi utilizada a técnica *best-effort* em conjunto com o método *move-to-vacancy* para minimizar as interrupções de tráfego.

Já em [Wang and Mukherjee 2013], é proposta a tecnologia de desfragmentação *Hitless Optical Path Shift* (HOPS). A tecnologia HOPS permite a migração do tráfego dos circuitos sem a interrupção dos serviços de rede. Os mesmos autores ainda propõem várias estratégias de desfragmentação baseadas em HOPS.

Em [Zhang et al. 2014], o problema de desfragmentação é dividido em quatro sub-problemas: como reconfigurar, como migrar o tráfego, quando reconfigurar e o que reconfigurar. Para solucionar o subproblema de como reconfigurar utiliza-se algoritmos RSA. Para solucionar o subproblema de como migrar o tráfego, é utilizado a técnica *best-effort* em conjunto com o método *move-to-vacancy* para reduzir interrupções do tráfego. Já para resolver o subproblema quando reconfigurar e o que reconfigurar, foi proposto uma seleção de tempo inteligente e métodos de seleção de conexões com base no desempenho de probabilidade de bloqueio de banda e a complexidade operacional da rede.

Os autores em [Fávero et al. 2015] propõe uma estratégia de desfragmentação que realoca apenas os circuitos que compartilham o enlace mais fragmentado da rede. A fragmentação do enlace é calculada a partir de uma medida de fragmentação adotada no artigo. O gatilho da estratégia está relacionado à iminência de um bloqueio de circuito.

Em [Zhang et al. 2016], é proposta uma operação de desfragmentação paralela baseada em Programação Linear Inteira (LPI), a qual objetiva a realocação dos circuitos simultaneamente. Para essa proposta, foi realizado um estudo apresentando os benefícios da desfragmentação paralela em relação a desfragmentação sequencial (circuitos são realocados um por um). O estudo realizado avaliou as operações de desfragmentação sob os aspectos de latência e interrupção de tráfego.

Já os autores em [Ba et al. 2017] apresentam uma estratégia de desfragmentação utilizando proteção dedicada de circuitos. Com o uso da proteção dedicada, a estratégia permite a redução da fragmentação do espectro realocando tanto circuitos primários quanto secundários sem a interrupção dos serviços de rede. A não interrupção é devido à nova abordagem, introduzida pelos mesmos autores, de permitir os circuitos primários trocarem funções com os secundários para serem realocados.

Neste contexto, os trabalhos na literatura sobre desfragmentação nas EONs não exploram um cenário considerando as imperfeições de camada física. Dessa forma, este trabalho introduz o problema IA-CR e para este problema é proposto uma solução, denominada de R-RQoT. A estratégia R-RQoT visa realocar circuitos para além de reduzir a fragmentação do espectro, reduzir também a interferência dos circuitos estabelecidos entre si e destes em novas requisições de circuitos.

4. Estratégia de Realocação de Circuitos

A estratégia de realocação de circuitos, denominada R-RQoT, foi proposta neste trabalho para solucionar o problema IA-CR. A estratégia R-RQoT tem como objetivo além de mitigar a fragmentação, reduzir o impacto dos efeitos de camada física dos circuitos já estabelecidos entre si e destes nas novas requisições de circuitos.

A estratégia R-RQoT é executada sempre quando ocorre um bloqueio por QoTN. Pois, entende-se que há a necessidade de realocar circuitos de algumas rotas para que novas requisições possam apresentar QoTs admissíveis. A realocação é realizada a partir da técnica *make-before-break*. Esta técnica tem como função alocar o circuito em sua nova solução RMLSA para depois desativá-lo de sua antiga solução RMLSA.

Algoritmo 1: Estratégia de realocação de circuitos R-RQoT

Entrada: Requisição bloqueada por QoTN

Saída: Rede com circuitos realocados

1 Etapa 1: Realocação de Circuitos

2 Armazenar no vetor C os circuitos ativos da rota R_b

3 Ordenar C segundo uma política de ordenação de circuitos

4 Selecionar o primeiro circuito (c_1) de C

5 Encontrar uma nova solução RMLSA para c_1

6 Se existir uma nova solução RMLSA, realocar c_1 com *make-before-break*

7 Remover c_1 de C

8 Repetir 4 enquanto existir circuitos em C

9 Etapa 2: Refinar a Realocação de Circuitos

10 Armazenar no vetor D os circuitos ativos da rota R_b

11 Ordenar D segundo uma política de ordenação de circuitos

12 Selecionar o primeiro circuito (d_1) de D

13 Encontrar uma nova faixa de espectro para d_1

14 Se existir uma nova faixa de espectro, reatribuir espectro para d_1 com *make-before-break*

15 Remover d_1 de D

16 Repetir 12 enquanto existir circuitos em C

A Figura 2 apresenta as etapas da estratégia R-RQoT. A estratégia é dividida em duas etapas: realocação dos circuitos e refinamento da realocação. A etapa de realocação de circuitos envolve definir novas soluções RMLSA para alguns circuitos que compartilham o enlace da rota onde ocorreu bloqueio por QoTN, aqui denominada de R_b . Já a etapa de refinamento da realocação, consiste em reatribuir espectro para os circuitos da rota R_b que não foram realocados. Essa reatribuição visa amenizar fragmentos de espectro ocasionado pela etapa 1, já que a ordem de realocação dos circuitos depende de uma

política de ordenação. A política de ordenação adotada para a estratégia R-RQoT (Etapa 1 e Etapa 2) foi a quantidade de enlaces (saltos) da rota dos circuitos em ordem decrescente.

A nova solução RMLSA, na estratégia proposta, consiste em buscar nova rota, formato de modulação e faixa de espectro, para um circuito selecionado para realocação. A escolha da rota utiliza k menores caminhos. Os k menores caminhos para um par de nós origem-destino são selecionados com base na distância da rota. Dentre as k rotas selecionadas para um circuito, é escolhida aquela com a menor quantidade de *slots* ocupados. Em seguida, a quantidade de *slots* utilizados da rota escolhida deve ser menor que a quantidade de *slots* da rota em que se encontra o circuito. Essa condição produz um balanceamento de carga na rede, reduzindo os efeitos de camada física para novas requisições de circuitos.

Para a nova rota é escolhido o formato de modulação com maior eficiência espectral e que apresenta QoT admissível para o circuito. Além disso, a modulação escolhida deve manter admissíveis as QoTs dos outros circuitos ativos da rede. Em seguida, é definido o intervalo de espectro a partir da política *first fit*, a qual seleciona a primeira faixa de espectro disponível que atenda o circuito.

5. Avaliação de Desempenho

Para estudo da avaliação de desempenho da estratégia proposta, foram realizadas simulações computacionais na ferramenta SNetS (*SLICE Network Simulator*) [Santos 2015] utilizando o modelo de camada física adotado por [Fontinele et al. 2017]. A estratégia R-RQoT foi aplicada nos algoritmos RMLSA cientes de camada física KSP-PC e KSP-RQoTO. Os resultados foram avaliados em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos (e suas componentes) e probabilidade de bloqueio de banda. Além disso, adotou-se duas topologias reais NSFNet e EON para análise de desempenho. A topologia NSFNet (14 nós) é apresentada na Figura 2(a) enquanto na Figura 2(b) é apresentada a topologia EON (28 nós), com suas respectivas distâncias (km) entre os nós.

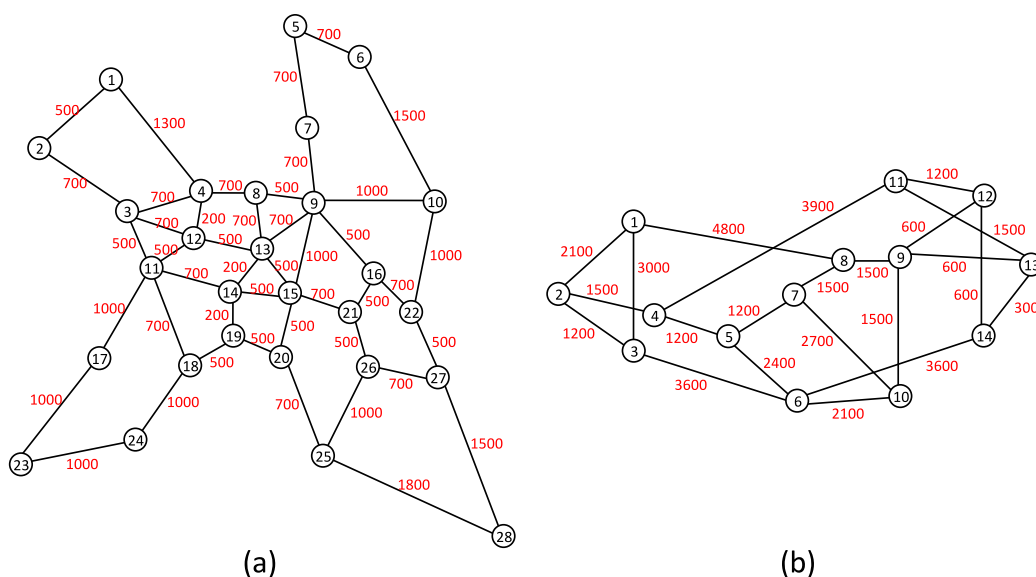


Figura 2. Topologias reais utilizadas nas simulações: (a) topologia EON e (b) topologia NSFNet.

Neste trabalho foi considerado cenário de tráfego dinâmico. As requisições de circuitos são geradas segundo um processo de Poisson com taxa de chegada média λ e o tempo médio de retenção dos circuitos distribuído exponencialmente com média $1/\mu$. A carga de tráfego em *Erlangs* pode ser definida por $\rho = \lambda/\mu$ e distribuída uniformemente entre todos os pares de nós origem e destino.

Para cada simulação foram realizadas 10 replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória utilizando um nível de confiança de 95%. Para cada replicação foram geradas 100.000 requisições de circuitos com 5 pontos de carga. Neste trabalho, o *Signal Noise Ratio* (SNR) foi utilizado para mensurar a QoT [Rahbar 2012].

Foram adotadas as larguras de banda de 10, 40, 80, 100, 160, 200 e 400 Gbps. Os formatos de modulação utilizados neste estudo foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM, com os seus respectivos limiares de SNR de 6 dB, 9 dB, 12 dB, 15 dB, 18 dB e 21 dB [Beyranvand and Salehi 2013]. Todos os enlaces da rede são bidirecionais e o espectro é dividido em 400 *slots* de frequência. Um *slot* de frequência possui largura de banda de 12,5 GHz e a banda de guarda utilizada possui largura de banda de 6,25 GHz. Outros parâmetros utilizados estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.

Descrição	Valor
Densidade espectral de potência do sinal	-17 dBm/GHz
Atenuação da fibra (α)	0,2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra (β_2)	16 ps ² /km
Coefficiente 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

O KS-PC/R-RQoT e KSP-RQoTO/R-RQoT são os algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO com aplicação da estratégia R-RQoT. A velocidade de um evento de reconfiguração é considerada suficientemente rápida de tal forma que o estado da rede não seja alterado durante a execução da estratégia. A Figura 3 apresenta a probabilidade de bloqueio de circuito para as topologias NSFNet e EON.

Observa-se que na Figura 3(a) os algoritmos KS-PC/R-RQoT e KSP-RQoTO/R-RQoT apresentam uma redução de até 29,75% e 44,06% comparado aos algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO, respectivamente. Já na Figura 3(b), os algoritmos KS-PC/R-RQoT e KSP-RQoTO/R-RQoT apontam uma redução de até 49,42% e 31,91% quando comparado aos algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO, respectivamente. A redução do bloqueio para as duas topologias foi consequência da realocação de alguns circuitos. A realocação permitiu tornar as QoTs admissíveis de novas requisições de circuitos.

A Figura 4 apresenta as componentes da probabilidade de bloqueio de circuitos dos algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO com e sem a utilização da estratégia proposta em ambas as topologias utilizadas. Na Figura 4(a), nota-se que as componentes QoTN e QoTO são maiores causadoras de bloqueios. Isso ocorre em consequência dos efeitos de camada física. No entanto, com o uso da estratégia R-RQoT houve redução nos bloqueios relacionados a QoT, principalmente na componente QoTN. Isso ocorre devido à estratégia

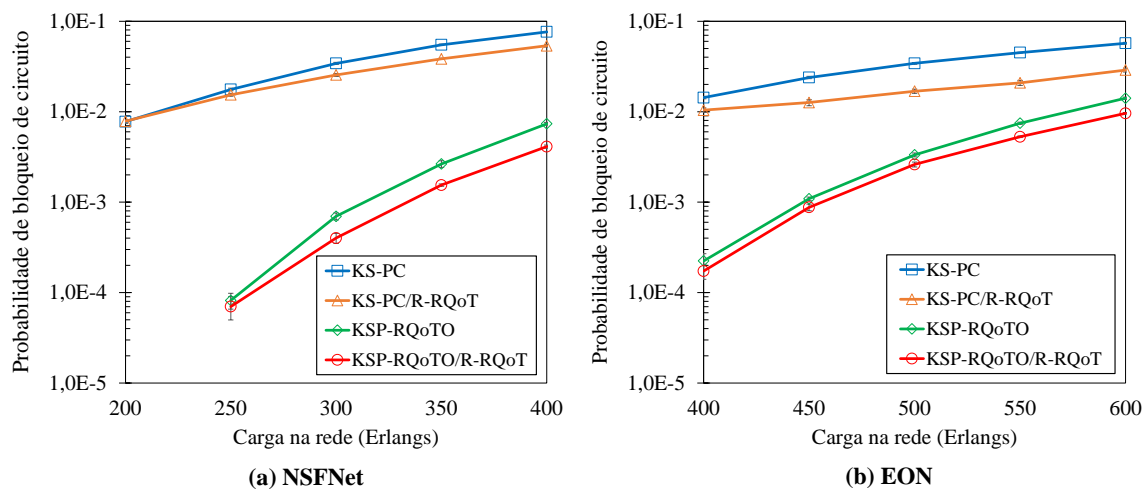


Figura 3. Probabilidade de bloqueio de circuitos para as topologias (a) NSFNet e (b) EON.

de realocação dos circuitos permitir um balanceamento de carga, no qual provoca redução das interferências dos circuitos já ativos entre si e destes em novas requisições de circuitos. A Figura 4(b) apresentou reduções de bloqueios referente a componente QoTN de até 72,72% para o KS-PC/R-RQoT comparado ao KS-PC. E a redução obtido no algoritmo KSP-RQoTO, utilizando a estratégia R-RQoT, foi de cerca de 30,1%.

Para melhor visualizar os resultados, a Tabela 2 apresenta os bloqueios de cada componente do KS-PC com e sem a utilização da estratégia R-RQoT na topologia NSFNet. Para todos os pontos de carga a componente QoTN sofreu redução de bloqueio de forma considerável, enquanto a componente QoTO sofreu um pequeno aumento em alguns pontos de carga. Considerando a carga 400 Erlangs, a componente QoTN apresentou bloqueio de cerca de 0,034251 para o KS-PC, enquanto que para o KS-PC/R-RQoT foi de aproximadamente 0,0081246, resultando em uma redução próxima de 76,28%. A redução significativa da componente QoTN se deve ao fato de a heurística da estratégia R-RQoT permitir principalmente que requisições de circuitos com características similares de requisições que foram bloqueadas por QoTN, sejam atendidas.

Ainda para a topologia NSFNet, a Tabela 3 apresenta as componentes do bloqueio geral de circuitos referente ao KSP-RQoTO e KSP-RQoTO/R-RQoT. Em termos de fragmentação e AEL, as reduções no bloqueio não foram tão significativas quanto as reduções da componente QoTN. Não há bloqueio por QoTO para o KSP-RQoTO e KSP-RQoTO/R-RQoT devido a estratégia de alocação de circuitos não permitir esse tipo de bloqueio.

Para a topologia EON, a redução do bloqueio por QoTN, por exemplo, foi de até 73,01% e 29,06% para algoritmos KS-PC/R-RQoT e KSP-RQoTO/R-RQoT comparados ao KS-PC e KSP-RQoTO, respectivamente. A realocação de circuitos ativos contribuiu para redução dos efeitos de camada física nas novas requisições de circuitos. Devido ao limite de páginas, a tabela com os resultados das componentes de bloqueio geral para a topologia EON não foi inserida no artigo.

A Figura 5 apresenta a probabilidade de bloqueio de circuitos para as larguras de

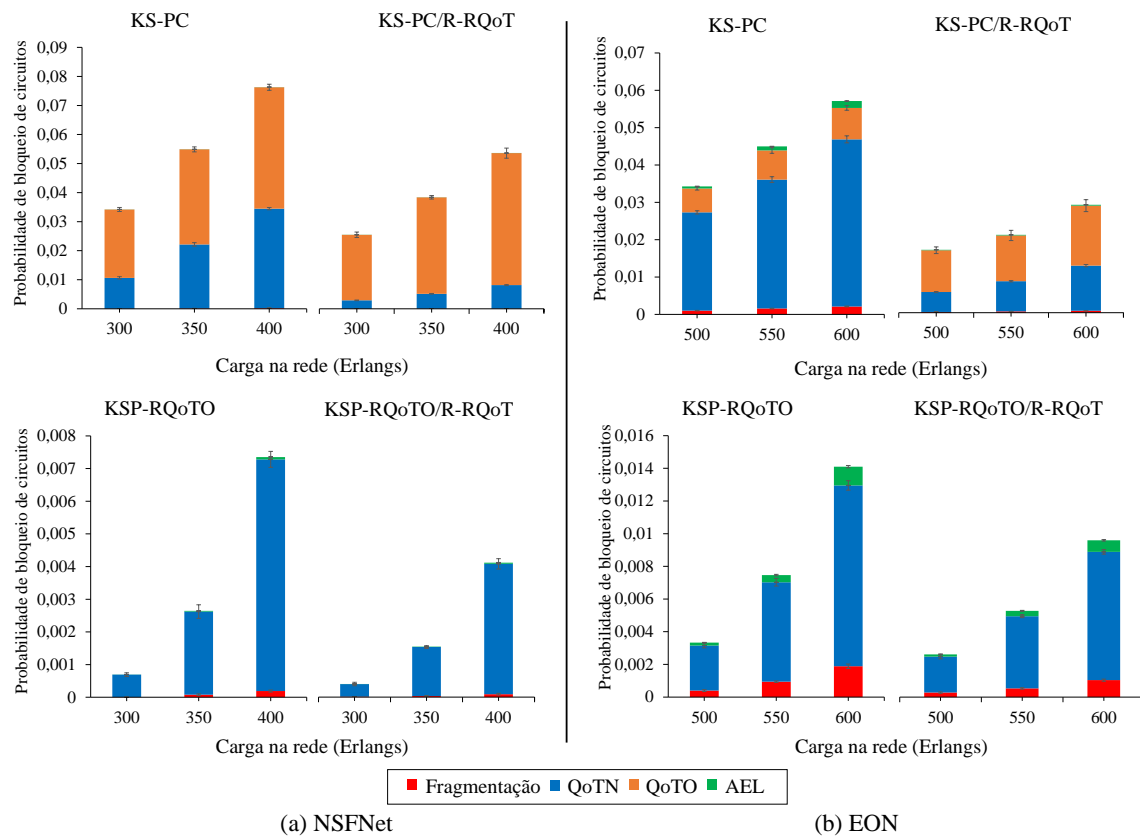


Figura 4. Componentes da probabilidade de bloqueio geral nas topologias (a) NSFNet e (b) EON.

Tabela 2. Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito obtidas para o KS-PC sem e com aplicação do R-RQoT para a topologia NSFNet.

KS-PC				
Carga	Fragmentação	QoTN	QoTO	AEL
200	0,00E+0 ± 0,00E+0	2,37E-4 ± 4,93E-5	7,53E-3 ± 3,35E-4	0,00E+0 ± 0,00E+0
250	8,88E-6 ± 4,51E-6	2,88E-3 ± 1,68E-4	1,47E-2 ± 6,44E-4	9,87E-7 ± 1,93E-6
300	2,66E-5 ± 1,00E-5	1,06E-2 ± 3,87E-4	2,35E-2 ± 6,99E-4	6,91E-6 ± 4,12E-6
350	1,20E-4 ± 2,81E-5	2,21E-2 ± 6,05E-4	3,27E-2 ± 8,70E-4	2,57E-5 ± 9,66E-6
400	2,19E-4 ± 3,11E-5	3,43E-2 ± 3,69E-4	4,18E-2 ± 1,03E-3	5,14E-5 ± 1,18E-5
KS-PC com R-RQoT				
Carga	Fragmentação	QoTN	QoTO	AEL
200	1,98E-6 ± 2,58E-7	1,47E-4 ± 2,15E-5	7,70E-3 ± 3,50E-4	9,87E-7 ± 1,94E-6
250	4,94E-6 ± 4,33E-6	1,07E-3 ± 7,03E-5	1,43E-2 ± 5,57E-4	1,98E-6 ± 2,58E-6
300	1,28E-5 ± 6,48E-6	2,90E-3 ± 1,03E-4	2,26E-2 ± 9,45E-4	1,98E-6 ± 2,58E-6
350	1,78E-5 ± 6,95E-6	5,15E-3 ± 9,77E-5	3,32E-2 ± 6,06E-4	3,95E-6 ± 3,16E-6
400	3,46E-5 ± 1,45E-5	8,12E-3 ± 1,69E-4	4,54E-2 ± 1,73E-3	1,88E-5 ± 4,52E-6

banda 100, 160, 200 e 400Gbps as topologia NSFNet (Figura 5(a)) e EON (Figura 5(b)). Foram utilizadas para análise os três últimos pontos de carga.

Tabela 3. Componentes da probabilidade de bloqueio de circuito obtidas para o KSP-RQoTO sem e com aplicação do R-RQoT para a topologia NSFNet.

KSP-RQoTO				
Carga	Fragmentação	QoTN	QoTO	AEL
200	0,00E+0 ± 0,00E+0	0,00E+0 ± 0,00E+0	0,00E+0 ± 0,00E+0	0,00E+0 ± 0,00E+0
250	9,87E-7 ± 1,94E-6	8,00E-5 ± 1,64E-5	0,00E+0 ± 0,00E+0	9,87E-7 ± 1,94E-6
300	5,93E-6 ± 4,28E-6	6,87E-4 ± 5,83E-5	0,00E+0 ± 0,00E+0	3,95E-6 ± 3,16E-6
350	7,90E-5 ± 2,24E-5	2,54E-3 ± 2,08E-4	0,00E+0 ± 0,00E+0	2,17E-5 ± 9,03E-6
400	1,92E-4 ± 2,92E-5	7,09E-3 ± 2,44E-4	0,00E+0 ± 0,00E+0	7,11E-5 ± 1,65E-5
KSP-RQoTO com R-RQoT				
Carga	Fragmentação	QoTN	QoTO	AEL
200	0,00E+0 ± 0,00E+0	2,96E-6 ± 2,96E-6	0,00E+0 ± 0,00E+0	0,00E+0 ± 0,00E+0
250	1,98E-6 ± 2,58E-6	6,72E-5 ± 1,77E-5	0,00E+0 ± 0,00E+0	9,87E-7 ± 1,94E-6
300	1,38E-5 ± 4,28E-6	3,84E-4 ± 5,35E-5	0,00E+0 ± 0,00E+0	2,96E-6 ± 2,96E-6
350	3,16E-5 ± 6,95E-6	1,50E-3 ± 4,30E-5	0,00E+0 ± 0,00E+0	1,28E-5 ± 8,19E-6
400	8,99E-5 ± 2,28E-5	3,99E-3 ± 1,58E-4	0,00E+0 ± 0,00E+0	3,46E-5 ± 7,21E-6

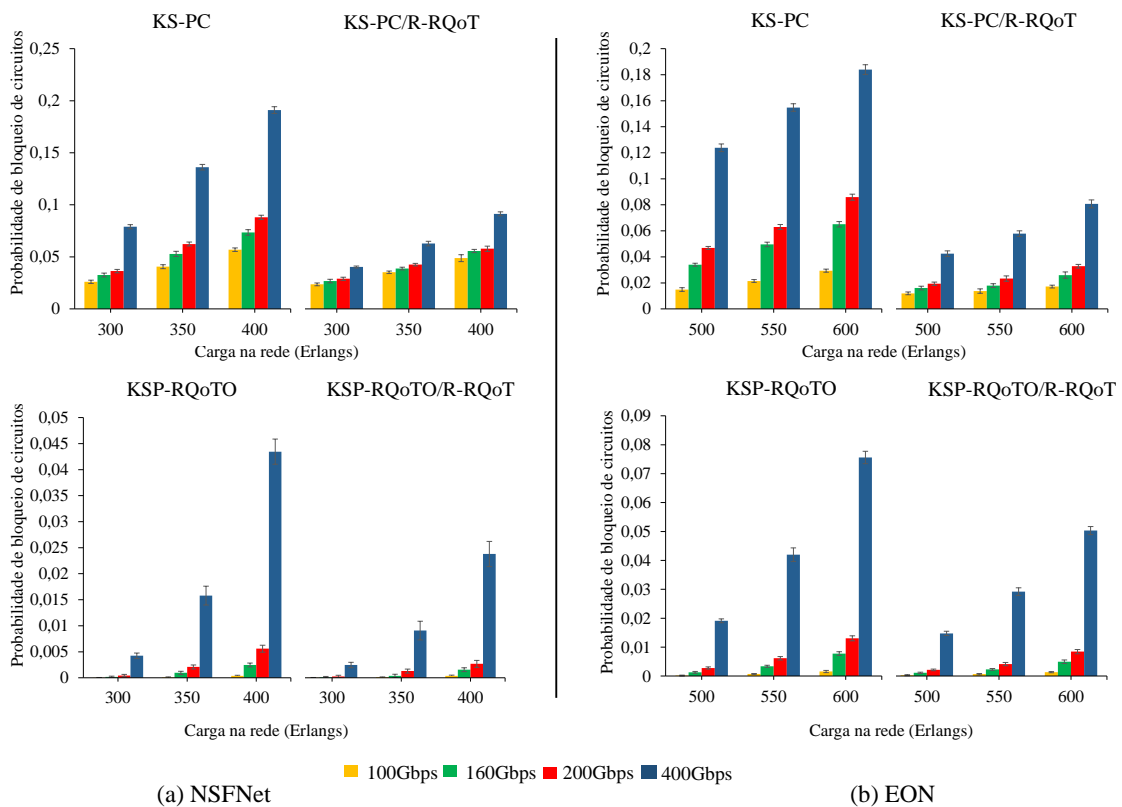


Figura 5. Probabilidade de bloqueio de circuito para diferentes larguras de banda (100, 160, 200 e 400Gbps) nas topologias (a) NSFNet e (b) EON.

Observando a Figura 5(a) e Figura 5(b) as maiores larguras de banda sofrem mais bloqueios devido a necessidade de utilização de mais recursos da rede. Considerando a largura de banda de 400Gbps na Figura 5(a), os algoritmos KS-PC/R-RQoT e o KSP-RQoTO/R-RQoT apresentaram um bloqueio próximo de 0,1 e 0,025 para carga de tráfego de 400 Erlangs, respectivamente. Para a mesma carga de tráfego, os algoritmos KS-PC

e KSP-RQoTO possuem bloqueios próximos de 0,2 e 0,045, como mostra a Figura 5(a). A redução do KS-PC/R-RQoT em relação ao KSPC foi cerca de 52,2% enquanto que o KSP-RQoTO/R-RQoT comparado ao KSP-RQoTO foi de 45,23%, aproximadamente, para a largura de banda 400Gbps. Para esta mesma largura de banda na Figura 5(b), as reduções foram respectivamente de 55% e 34,21% para o KS-PC/R-RQoT e KSP-RQoTO/R-RQoT comparados ao KS-PC e KSP-RQoTO. Logo, para o cenário avaliado, a realocação de circuitos permitiu também a redução de bloqueios de circuitos de grandes larguras de banda.

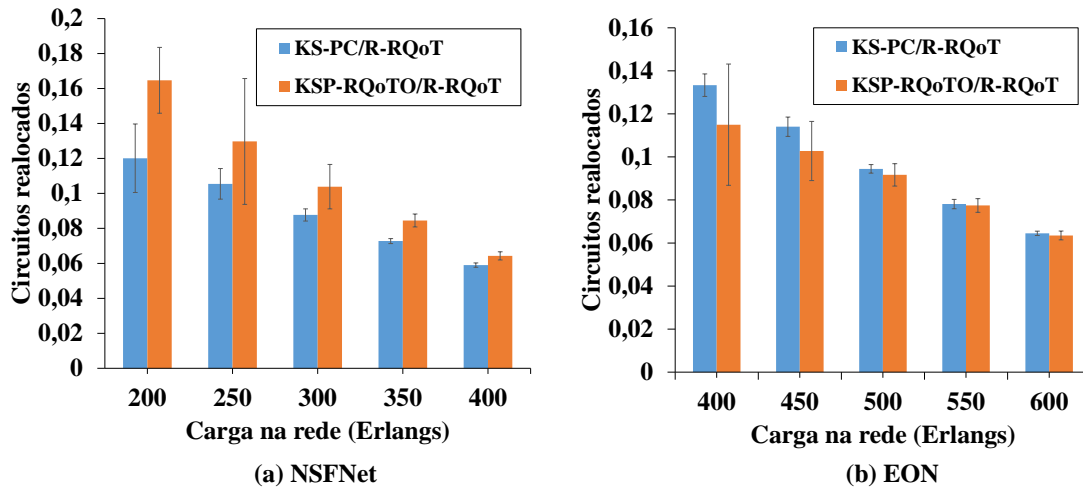


Figura 6. Circuitos realocados para os algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO com utilização da estratégia R-RQoT para as topologias (a) NSFNet e (b) EON.

Na Figura 6, observa-se que com o crescimento da carga de tráfego a quantidade de circuitos realocados tende a diminuir. Isto ocorre devido a rede utilizar mais recursos reduzindo as alternativas de novas rotas e faixa de espectro disponíveis para a realocação dos circuitos. Dessa forma, na topologia NSFNet (Figura 6(a)), nota-se que no processo de realocação da rede, o KS-PC/R-RQoT aponta uma média de aproximadamente 12% e 6% dos circuitos ativos realocados para as cargas 200 e 400 *Erlangs*, respectivamente. Para a topologia EON (Figura 6(b)), o KSP-RQoTO/R-RQoT alcançou uma média de realocação de 11,5% para o primeiro ponto de carga e 6,5% para o último ponto de carga.

6. Conclusão

No presente artigo, foi proposta uma estratégia de realocação de circuitos ciente dos efeitos de camada física, denominada de R-RQoT. Essa estratégia tem como objetivo principal a realocação de circuitos para a redução das interferências dos circuitos estabelecidos entre si e destes em novas requisições de circuitos. Em consequência disso, ocorre uma redução principalmente na probabilidade de bloqueios relacionados às QoTs dos circuitos.

A estratégia R-RQoT foi aplicada nos algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO. A avaliação de desempenho foi realizada sob os aspectos da probabilidade de bloqueio de circuitos e probabilidade de bloqueio de banda nas topologias NSFNet e EON.

Em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos, para a topologia NSFNet, os algoritmos KS-PC e KSP-RQoTO, com a aplicação da estratégia R-RQoT, apresentaram

reduções de até 29,75% e 44,06%, respectivamente. Já para a topologia EON, o bloqueio foi reduzido até 49,42% para o KS-PC e 31,91% para o KSP-RQoTO.

Em termos de probabilidade de bloqueio por banda na topologia NSFNet, o algoritmo KS-PC apresentou redução de aproximadamente 42,46% enquanto o KSP-RQoTO apresentou redução de 45,42%. Já os resultados de 55,9% e 33,53% correspondem respectivamente às reduções de bloqueios para o KS-PC e KSP-RQoTO para a topologia EON. As reduções na probabilidade de bloqueio de banda foram alcançadas com a utilização da estratégia R-RQoT, proposta neste artigo.

Referências

- Ba, S., Chatterjee, B. C., and Oki, E. (2017). Defragmentation scheme based on exchanging primary and backup paths in 1+1 path protected elastic optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 25(3):1717–1731.
- Beyranvand, H. and Salehi, J. A. (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 and Tutorials*, 17(3):1776–1800.
- Cisco, V. N. I. (2016). O tráfego global de IP vai multiplicar-se por três entre 2015 e 2020. https://www.cisco.com/c/pt_pt/about/press/news-archive-2016/20160608.html.
- Costa, L. R. and Drummond, A. C. (2016). Novo algoritmo RMLSA com roteamento multihop em redes ópticas elásticas. *XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2016)*.
- Cugini, F., Paolucci, F., Meloni, G., Berrettini, G., Secondini, M., Fresi, F., Sambo, N., Poti, L., and Castoldi, P. (2013). Push-pull defragmentation without traffic disruption in flexible grid optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 31(1):125–133.
- Cugini, F., Secondini, M., Sambo, N., Bottari, G., Bruno, G., Iovanna, P., and Castoldi, P. (2012). Push-pull technique for defragmentation in flexible optical networks. In *OFC/NFOEC*, pages 1–3.
- Fávero, R. V., Marçal, J. S., Silva, P. C. B., Bonani, L. H., and Abbade, M. L. F. (2015). A new elastic optical network defragmentation strategy based on the reallocation of lightpaths sharing the most fragmented link. In *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pages 1–5.
- Fontinele, A., Santos, I., Neto, J. N., Campelo, D. R., and Soares, A. (2017). An efficient IA-RMLSA algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, 118:1–14.
- Horota, A., Figueiredo, G. B., and d. Fonseca, N. L. S. (2014). Routing and spectrum assignment algorithm with fragmentation minimization in elastic optical networks. In *2014 Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems*, pages 436–442.

- Patel, A. N., Ji, P. N., Jue, J. P., and Wang, T. (2011). Defragmentation of transparent flexible optical WDM (FWDM) networks. In *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, pages 1–3.
- 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. In *Universidade Federal do Piauí*.
- Shakya, S. and Cao, X. (2013). Spectral defragmentation in elastic optical path networks using independent sets. In *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, pages 1–3.
- Takagi, T., Hasegawa, H., i. Sato, K., Sone, Y., Hirano, A., and Jinno, M. (2011). Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation. In *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, pages 1–3.
- Tomkos, I., Azodolmolky, S., Solé-Pareta, J., Careglio, D., and Palkopoulou, E. (2014). A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges. *Proceedings of the IEEE*, 102(9):1317–1337.
- Wang, R. and Mukherjee, B. (2013). Provisioning in elastic optical networks with non-disruptive defragmentation. *Journal of Lightwave Technology*, 31(15):2491–2500.
- Wang, X., Kim, I., Zhang, Q., Palacharla, P., and Sekiya, M. (2012). A hitless defragmentation method for self-optimizing flexible grid optical networks. In *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*, pages 1–3.
- Wen, K., Yin, Y., Geisler, D. J., Chang, S., and Yoo, S. J. B. (2011). Dynamic on-demand lightpath provisioning using spectral defragmentation in flexible bandwidth networks. In *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, pages 1–3.
- Yin, Y., Wen, K., Geisler, D. J., Liu, R., and Yoo, S. J. B. (2012). Dynamic on-demand defragmentation in flexible bandwidth elastic optical networks. *Opt. Express*, 20(2):1798–1804.
- Zhang, M., Shi, W., Gong, L., Lu, W., and Zhu, Z. (2013). Bandwidth defragmentation in dynamic elastic optical networks with minimum traffic disruptions. In *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 3894–3898.
- Zhang, M., You, C., Jiang, H., and Zhu, Z. (2014). Dynamic and adaptive bandwidth defragmentation in spectrum-sliced elastic optical networks with time-varying traffic. *Journal of Lightwave Technology*, 32(5):1014–1023.
- Zhang, M., You, C., and Zhu, Z. (2016). On the parallelization of spectrum defragmentation reconfigurations in elastic optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 24(5):2819–2833.