



Universidade Federal do Piauí
Centro de Ciências da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

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

Alexandre Cardoso Fontinele

Teresina-PI, 19 de Fevereiro de 2016

Alexandre Cardoso Fontinele

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

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (área de concentração: Ciência da Computação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Piauí – UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: André Castelo Branco Soares

Teresina-PI

19 de Fevereiro de 2016

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus pois sem ele eu não chegaria a lugar algum.

Agradeço aos meus pais, Elias Pereira Fontinele e Albertina Sales Cardoso Fontinele, por sempre terem acreditado em mim e pelo exemplo que me foi dado desde criança.

Agradeço ao meu orientador, André Castelo Branco Soares, por ter me guiado em mais uma fase, pela paciência e ajuda nesse período.

Agradeço ao meu colega de trabalho, Iallen Gábio de Sousa Santos, pelas idéias trocadas e pela parceria nas pesquisas científicas realizadas.

Agradeço também ao pessoal do *Distributed Systems and Networks Laboratory* (DiSNeL) pelas discussões enriquecedoras sobre os assuntos de pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Ciência da Computação da UFPI que de forma direta ou indireta, contribuíram para a minha formação e de outros colegas.

À CAPES e UFPI pelo apoio financeiro para realização deste trabalho de pesquisa.

E por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao infinito e amém... ops, além.

Resumo

A rede óptica elástica baseada na tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) é uma candidata promissora para transportar o tráfego heterogêneo no futuro das redes de alta velocidade. Isso se deve a sua capacidade de alocar de maneira mais eficiente a largura de banda da fibra óptica quando comparada a rede óptica *Wavelength Division Multiplexing* (WDM). A resolução do problema de roteamento e alocação de espectro é necessária para a alocação de recursos. A alocação de recursos tem como finalidade o estabelecimento de circuitos ópticos por onde os dados serão transmitidos. A dinâmica de alocação e liberação de recursos espectrais nas redes ópticas elásticas provoca a fragmentação do espectro óptico. Tal problema pode influenciar diretamente a eficiência dessas redes. Além disso, o sinal óptico sofre degradação durante a sua propagação devido às imperfeições da camada física. Portanto, algoritmos de roteamento e alocação de espectro devem levar em conta o nível de fragmentação de espectro gerado na rede e a qualidade de transmissão do circuito a ser estabelecido. Este trabalho propõe um novo algoritmo de roteamento e alocação de espectro ciente dos efeitos de camada física para redes ópticas elásticas. O objetivo do algoritmo proposto é reduzir a probabilidade de bloqueio causada pela degradação da qualidade de transmissão quando novos circuitos são estabelecidos. Nosso algoritmo é comparado com outros algoritmos *Impairment-Aware Routing and Spectrum Assignment* (IA-RSA): *Modified Dijkstra Path Computation* (MD-PC) e *K-Shortest Path Computation* (KS-PC). De modo a avaliar o desempenho do algoritmo proposto, simulações computacionais foram realizadas usando a ferramenta de simulação *SLICE Network Simulator* (SNetS). Os resultados das simulações mostram que o algoritmo proposto apresenta um desempenho superior ao dos algoritmos MD-PC e KS-PC em termos de i) probabilidade de bloqueio de circuitos, ii) probabilidade de bloqueio de banda, iii) justiça no atendimento de diferentes pares de nós origem e destino e iv) justiça no atendimento de diferentes larguras 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. Além disso, o algoritmo proposto apresenta um desempenho superior quando comparado aos algoritmos KS-PC e MD-PC em termos de justiça.

Palavras-chaves: redes ópticas, OFDM, RSA, transparente, camada física.

Abstract

Elastic optical network based on Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology is considered to be a promising solution for future high-speed network design. This is due to the ability of elastic optical network allocate more efficient the bandwidth of the optical fiber when compared to Wavelength Division Multiplexing (WDM) optical network. The resolution of the routing and spectrum assignment problem is required for resource allocation. Resource allocation is aimed at the establishment of optical circuits where the data will be transmitted. Dynamic allocation and release of spectral resources in elastic optical networks causes the fragmentation of the optical spectrum. Such problem can directly influence the efficiency of these networks. Besides, the optical signal suffers degradation during its propagation due to imperfections the physical layer. Therefore, Routing and Spectrum Assignment (RSA) algorithms should take into account the level of spectrum fragmentation on the network and Quality of Transmission (QoT) of the established circuit. This work proposes a new RSA algorithm that considers the impact of the physical layer effects for elastic optical networks. The goal of the proposed algorithm is to reduce the blocking probability caused by degradation of QoT when new circuits are established. Our algorithm is compared to others Impairment-Aware Routing and Spectrum Assignment (IA-RSA) algorithms: Modified Dijkstra Path Computation (MD-PC) e K-Shortest Path Computation (KS-PC). Computer simulations were performed using the simulation tool SLICE Network Simulator (SNetS) in order to evaluate the performance of the proposed algorithm. Simulation results show that the proposed algorithm has a better performance than the MD-PC and KS-PC algorithms in terms of i) circuit blocking probability, ii) bandwidth blocking probability, iii) fairness in attending to the different source and destination node pairs and iv) fairness in attending to the different bandwidths for EON and NSFNet topologies. In general, in terms of circuit blocking probability, the algorithm proposed achieved a minimal gain of 78.10% and 55.75% when compared to the KS-PC and MD-PC algorithms, respectively. In terms of bandwidth blocking probability, the proposed algorithm presented a minimum gain of 71.96% and 41.89% in relation to KS-PC and MD-PC algorithms, respectively. Besides, the proposed algorithm has superior performance when compared to KS-PC and MD-PC algorithms in terms of fairness.

Keywords: optical network, OFDM, RSA, transparent, physical layer.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Utilização do espectro de uma fibra óptica em redes ópticas WDM e OFDM (Adaptada de (SANTOS, 2015)).	1
Figura 2 – Divisão de recursos espectrais nas redes ópticas OFDM (Adaptada de (SANTOS, 2015)).	2
Figura 3 – Camadas componentes da arquitetura de gerenciamento de uma rede óptica.	3
Figura 4 – Arquitetura da rede óptica elástica (Adaptada de (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015)).	9
Figura 5 – Eficiência espectral contra alcance de transmissão (Adaptada de (ZHOU et al., 2012)).	9
Figura 6 – Arquitetura do BV-WXC (Adaptada de (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015)).	10
Figura 7 – Cenário com fragmentação (Adaptada de (SANTOS, 2015)).	12
Figura 8 – Densidade espectral de potência do ruído não linear no centro de frequência de 21 circuitos ópticos para três diferentes separações entre circuitos (Adaptada de (JOHANNISSON; AGRELL, 2014)).	20
Figura 9 – Arquitetura assumida para uma rota com um salto.	22
Figura 10 – Fluxograma do algoritmo KSP-RQoTO.	27
Figura 11 – (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.	28
Figura 12 – Topologias usadas no estudo de avaliação de desempenho. O número em cada enlace corresponde a distância em km.	30
Figura 13 – Probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO para as topologias (a) EON e (b) NSFNet.	31
Figura 14 – 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.	33
Figura 15 – Probabilidades de bloqueio de banda obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO para as topologias (a) EON e (b) NSFNet.	35
Figura 16 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de circuito obtidas para cada par de nós origem e destino para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO nas topologias (a) EON e (b) NSFNet.	36

Figura 17 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de banda obtidas para cada largura de banda para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO nas topologias (a) EON e (b) NSFNet. 37

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre algoritmos de roteamento (Adaptada de (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015))	13
Tabela 2 – Complexidade de tempo para as políticas de alocação de espectro (Adaptada de (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015)).	14
Tabela 3 – Formatos de modulação considerados.	23
Tabela 4 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.	31
Tabela 5 – Probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,25) para a topologia EON.	32
Tabela 6 – Probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,5) para a topologia NSFNet.	32
Tabela 7 – Componentes das probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelo algoritmo KS-PC para as topologias EON e NSFNet.	32
Tabela 8 – Componentes das probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelo algoritmo MD-PC para as topologias EON e NSFNet.	34
Tabela 9 – Componentes das probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelo algoritmo KSP-RQoTO para as topologias EON e NSFNet.	34
Tabela 10 – Probabilidades de bloqueio de banda obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,25) para a topologia EON.	35
Tabela 11 – Probabilidades de bloqueio de banda obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,5) para a topologia NSFNet.	35
Tabela 12 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de circuito obtidas para cada par de nós origem e destino para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,25) na topologia EON.	37
Tabela 13 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de circuito obtidas para cada par de nós origem e destino para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,5) na topologia NSFNet.	37
Tabela 14 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de banda obtidas para cada largura de banda para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,25) na topologia EON.	38
Tabela 15 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de banda obtidas para cada largura de banda para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,5) na topologia NSFNet.	38

Lista de abreviaturas e siglas

3R	Reamplificar, Remodelar e Retemporizar
AEL	Ausência de Espectro Livre
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
BV-SSS	<i>Bandwidth Variable Spectrum Selective Switches</i>
BVT	<i>Bandwidth Variable Transceivers</i>
BV-WXC	<i>Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connects</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CE	Consecutividade de Espectro
CL	<i>Connection List</i>
CS	<i>Complete Sharing</i>
CT	Complexidade de Tempo
DCF	<i>Dispersion Compensation Fiber</i>
DGC	<i>Dynamic Graph Coloring</i>
DP	<i>Dedicated Partition</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
FA	<i>Fragmentation-Aware</i>
FA-CA	<i>Fragmentation-Aware RSA with Congestion Avoidance</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i>
GL	<i>Group List</i>
IA-RSA	<i>Impairment Aware – Routing and Spectrum Assignment</i>

IA-RWA	<i>Impairment Aware – Routing and Wavelength Assignment</i>
KS-PC	<i>K-Shortest Path Computation</i>
KSP-RQoTO	<i>K-Shortest Path with Reduction of QoTO</i>
MD-PC	<i>Modified Dijkstra Path Computation</i>
MPSC	<i>Maximize Path Spectrum Consecutiveness</i>
NF	<i>Noise Figure</i>
NLI	<i>Nonlinear Impairments</i>
O-E-O	Óptico-Eletro-Óptico
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSNR	<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>
OXC	<i>Optical Cross-Connect</i>
PB	Probabilidade de Bloqueio
PLI	<i>Physical Layer Impairment</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PP	<i>Pseudo Partition</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoT	<i>Quality of Transmission</i>
QoT-RSA	<i>Quality of Transmission Aware RSA</i>
QoTN	QoT inaceitável para o novo circuito óptico
QoTO	QoT inaceitável para os outros circuitos já estabelecidos
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RA	Roteamento Adaptativo
RF	Roteamento Fixo
RFA	Roteamento Fixo Alternativo
RMSA	<i>Routing, Modulation and Spectrum Allocation</i>

RSA	<i>Routing and Spectrum Assignment</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SNetS	<i>SLICE Network Simulator</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
TCM	Tempo de Configuração Médio
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>

Lista de símbolos

α	Atenuação na fibra.
B_i	Largura de banda da conexão i .
B_n	Taxa de bits de uma conexão.
β_2	Parâmetro de dispersão da fibra.
Δ_f	Largura de banda de um circuito óptico.
$\Delta_{f_{ij}}$	Espaçamento da frequência entre as conexões i e j .
ΔSNR	Diferença entre a SNR atual do circuito em estabelecimento e o limiar de SNR do formato de modulação.
$\Delta\text{SNR}_{MOD\&REQ}$	Valor de avaliação relacionando um formato de modulação com uma requisição de circuito.
$\Delta\text{SNR}_{MOD\&ROTA}$	Valor de avaliação relacionando formato de modulação com uma rota.
F	Fator de emissão espontânea.
G_{AMP}	Ganho do amplificador óptico.
γ	Coefficiente não linear da fibra.
I	Densidade espectral da potência de sinal.
I_{ASE}	Densidade espectral de potência do ruído ASE.
I_{NLI}	Densidade espectral de potência do ruído dos efeitos não lineares.
K	Número de rotas candidatas para qualquer par.
L_c	Comprimento da maior rota candidata para qualquer par.
L_m	Comprimento da maior rota fixa para qualquer par.
L_s	Tamanho de um span.
λ	Taxa média de geração de requisições.
M	Quantidade de formatos de modulação.
M_m	Quantidade de símbolos do formato de modulação m .

$mod_{escolhido}$	Formato de modulação escolhido para um requisição.
L_m	Número do nível do formato de modulação m .
μ	Inverso do tempo médio de retenção dos circuitos.
N	Número de nós da rede.
P_{tx}	Potência de sinal.
QoT_{mod}	Qualidade de transmissão para um formato de modulação.
ρ	Intensidade de tráfego na rede em erlangs.
$rota$	Rota selecionada para a requisição de circuito óptico.
SNR_{QoT}	Limiar de SNR relacionado com um formato de modulação
σ	Valor mínimo de ΔSNR exigido pelo algoritmo KSP-RQoTO
W	Quantidade de comprimentos de onda multiplexados.
Z	Número de conexões requisitadas na rede.
ζ	Taxa de compensação de dispersão.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Impacto do estabelecimento de um circuito nos outros circuitos	3
1.2	Motivação	4
1.3	Objetivos	4
1.4	Organização da Dissertação	5
1.5	Contribuições Científicas	6
2	REDES ÓPTICAS	7
2.1	Tipos de redes ópticas	7
2.2	Arquitetura da rede óptica elástica	8
2.3	Roteamento e alocação de espectro	11
2.3.1	RSA sequencial	12
2.3.2	RSA integrado	15
2.4	RSA ciente de imperfeições de camada física	16
2.5	Considerações finais	17
3	CAMADA FÍSICA	19
3.1	Efeitos de Camada Física	19
3.2	Modelo de camada física para redes ópticas elásticas	21
3.3	Considerações finais	23
4	K MENORES CAMINHOS COM REDUÇÃO DE QOTO	25
4.1	Algoritmo Proposto	25
4.2	Estudo de Avaliação de Desempenho	29
4.2.1	Probabilidade de Bloqueio	31
4.2.2	Justiça	36
4.3	Considerações finais	39
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS	43

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; SARMA; OKI, 2015). Nas últimas décadas, as soluções de redes ópticas de transporte implantadas e estudadas na literatura eram fortemente baseadas na tecnologia *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) (NATH; CHATTERJEE; BHATTACHARYA, 2014).

Em uma rede óptica WDM o espectro é dividido em comprimentos de onda de tamanho fixo (RAHBAR, 2012; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). Como cada requisição de circuito pode requerer diferentes larguras de banda a utilização de comprimentos de onda de tamanho fixo provoca a subutilização dos recursos da rede. A Figura 1 apresenta a utilização do espectro de uma fibra óptica em uma rede óptica WDM e em uma rede óptica OFDM. Na Figura 1, os circuitos ópticos 1 (40 Gbps), 2 (100 Gbps) e 3 (10 Gbps) não ocuparam toda a largura de banda disponível por comprimento de onda em uma rede óptica WDM. Nota-se na Figura 1 o desperdício do espectro da fibra óptica em uma rede óptica WDM.

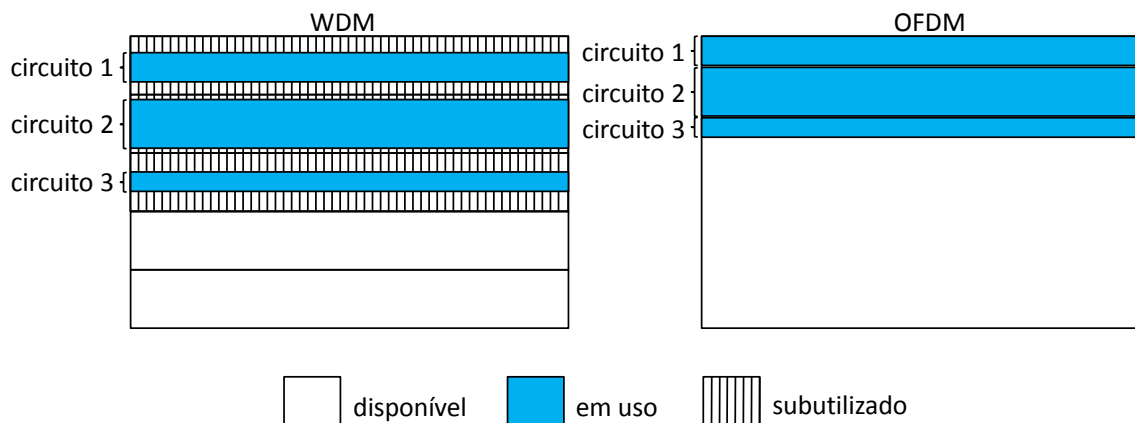


Figura 1 – Utilização do espectro de uma fibra óptica em redes ópticas WDM e OFDM (Adaptada de (SANTOS, 2015)).

Devido a esse aspecto, o uso da tecnologia *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) foi proposto recentemente para redes ópticas de transporte. 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; SARMA; OKI, 2015). A utilização do espectro óptico em uma rede óptica OFDM reduz o desperdício de espectro quando comparada à utilização do espectro óptico de uma rede óptica WDM (Figura 1). 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.

Um circuito óptico elástico pode ter seus parâmetros de transmissão ajustados, tais como largura de banda, formato da modulação e espaçamento entre os circuitos (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). O formato de modulação depende do alcance óptico e da eficiência espectral desejada. A quantidade de slots de frequência utilizados por circuito depende do formato de modulação e da largura de banda requisitada. A Figura 2 exemplifica a divisão dos recursos espectrais em redes ópticas OFDM. Como pode ser observado, cada circuito óptico possui uma quantidade de slots de frequência e formato de modulação diferente. Por exemplo, foram necessários 5 slots de frequência para o estabelecimento do circuito 2 utilizando o formato de modulação *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK) (ESSIAMBRE et al., 2010). O espectro óptico não utilizado entre os circuitos corresponde à banda de guarda. A banda de guarda é usada para evitar a interferência entre circuitos adjacentes (ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015).

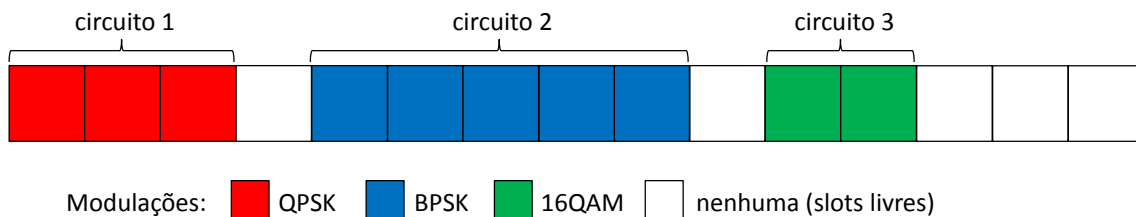


Figura 2 – Divisão de recursos espectrais nas redes ópticas OFDM (Adaptada de (SANTOS, 2015)).

Nas redes ópticas elásticas transparentes, área 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*) (TALEBI et al., 2014). 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.

A qualidade da solução RSA encontrada determina a quantidade de circuitos que podem ser estabelecidos em uma determinada topologia e, conseqüentemente, determina também a quantidade de circuitos rejeitados (bloqueados). O tipo de tráfego considerado no escopo desta dissertação é o tráfego dinâmico (RAHBAR, 2012). No tráfego dinâmico as requisições chegam de acordo com um processo de Poisson e são desativadas após um período de tempo. O problema RSA é resolvido para cada circuito a medida que são requisitados.

As camadas que compõem a arquitetura de gerenciamento de uma rede óptica (SÓCRATES-DANTAS et al., 2014) são apresentadas na Figura 3. Na camada superior estão as redes clientes que solicitam serviços para a rede óptica. A camada do meio, que é o Plano de Controle, é a interface entre a camada cliente e a camada física. Para um cliente se comunicar com outro cliente, ele deverá primeiro contactar o Plano de Controle que executa o algoritmo RSA e, caso seja possível, estabelece a comunicação alocando os devidos recursos da camada física. As ligações entre os nós na camada do Plano de Controle são implementadas por conexões lógicas, não correspondendo necessariamente a uma conexão física equivalente na camada física. A camada física corresponde à camada inferior, onde estão os dispositivos ópticos. Os dados entre os clientes trafegam efetivamente através da camada física.

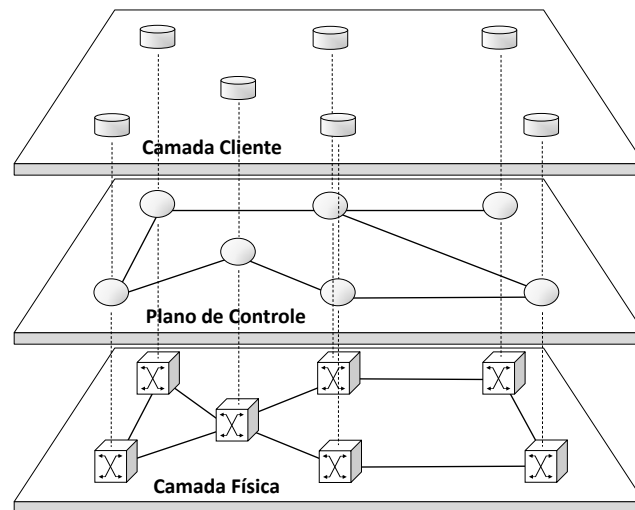


Figura 3 – Camadas componentes da arquitetura de gerenciamento de uma rede óptica.

1.1 Impacto do estabelecimento de um circuito nos outros circuitos

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 (considerando uma **BER** máxima tolerável de 10^{-3} com a utilização de técnicas de correção de erros (ESSIAMBRE et al., 2010; GAO et al., 2014)) no receptor, inviabilizando a comunicação (RAHBAR, 2012).

Um circuito óptico pode degradar a qualidade de transmissão (**QoT** – *Quality of Transmission*) de outros circuitos significativamente (tornando a **BER** intolerável) devido aos efeitos de camada física. O impacto de um circuito em outro circuito geralmente ocorre quando eles possuem nós ou enlaces em comum. Desse modo, para um novo circuito óptico ser estabelecido é necessário o atendimento de algumas exigências (FONTINELE et al.,

2016). Primeira, deve existir a disponibilidade de espectro na rota selecionada para o novo circuito; Segunda, a QoT para o circuito deve estar aceitável; E terceira, se o novo circuito for atendido, deve-se manter aceitável a QoT para todos os demais circuitos ópticos ativos na rede.

Nesse contexto, algoritmos RSA que levam em consideração as imperfeições de camada física (IA-RSA – *Impairment-Aware RSA*) tornam-se mais apropriados para o problema de roteamento e alocação de espectro (BEYRANVAND; SALEHI, 2013).

1.2 Motivação

Vários trabalhos existentes relacionados com RSA em redes ópticas elásticas são baseados em limites de alcance de transmissão (JINNO et al., 2010; CHRISTODOULOUPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011; WAN; HUA; ZHENG, 2012; ZHOU et al., 2012; ZHU et al., 2013; GONG et al., 2013; IZQUIERDO-ZARAGOZA; PAVON-MARINO; BUENO-DELGADO, 2014; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). Nesses trabalhos cada formato de modulação possui um alcance máximo de transmissão. Além disso, é utilizada uma banda de guarda, que consiste de um número de slots de frequência que são posicionados entre dois canais adjacentes para evitar a interferência entre eles. Entretanto, tais métodos falham em considerar o impacto de um circuito nos outros. Assim, o limite de alcance de transmissão e a banda de guarda podem superestimar ou subestimar as degradações de camada física nas conexões (ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015).

Ainda são poucos os trabalhos (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015) que propõem algoritmos RSA e utilizam expressões analíticas para modelar as imperfeições de camada física em redes ópticas elásticas OFDM. A motivação deste trabalho é seguir uma modelagem mais realística, em que, os efeitos de camada física são modelados por meio de expressões analíticas. E o impacto do estabelecimento de um circuito nos demais circuitos já ativos na rede também é levado em consideração para o estabelecimento de um circuito óptico.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral propor um novo algoritmo de roteamento e alocação de espectro ciente dos efeitos da camada física visando reduzir a probabilidade de bloqueio causada pela degradação da qualidade de transmissão quando novos circuitos são estabelecidos. O objetivo geral pode ser dividido nos seguintes objetivos específicos:

- Implementar o modelo de camada física para redes ópticas elásticas apresentado em (JOHANNISSON; AGRELL, 2014; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015; YAN et

al., 2015) na ferramenta de simulação *SLICE Network Simulator* (SNetS) (SANTOS, 2015);

- Analisar o impacto do estabelecimento de um circuito nos outros circuitos já ativos na rede através do estudo das componentes da probabilidade de bloqueio geral;
- Propor um novo algoritmo IA-RSA visando reduzir o bloqueio gerado pela degradação da QoT dos circuitos já ativos na rede;
- Avaliar o desempenho de algoritmos IA-RSA por meio de simulações computacionais utilizando a ferramenta de simulação SNetS.

1.4 Organização da Dissertação

O restante desta Dissertação está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 2 traz uma revisão da literatura sobre as redes ópticas de transporte. São expostas as principais características das redes ópticas WDM e OFDM. É exibida a arquitetura da rede óptica elástica OFDM e seus principais componentes. Apresenta os principais conceitos sobre o problema de roteamento e alocação de espectro em redes ópticas elásticas. Discute a classificação dos tipos de soluções para o problema de roteamento e alocação de espectro. Por fim, apresenta o conceito de algoritmos de roteamento e alocação de espectro ciente de imperfeições de camada física.

O Capítulo 3 mostra uma classificação para os efeitos de camada física em redes ópticas. Discute de maneira os efeitos de camada física considerados pelo modelo de camada física adotado (JOHANNISSON; AGRELL, 2014; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015) neste trabalho. Por último, apresenta o modelo de camada física adotado e o seu uso para verificar a qualidade de transmissão de um circuito em uma rede óptica elástica.

O Capítulo 4 apresenta um novo algoritmo de roteamento e alocação de espectro ciente de imperfeições de camada física em redes ópticas elásticas. Exibe um estudo de avaliação de desempenho comparando o algoritmo proposto com outros algoritmos RSA ciente de imperfeições de camada física em termos probabilidade de bloqueio de circuito, probabilidade de bloqueio de banda, justiça no atendimento de diferentes pares de nós origem e destino e justiça no atendimento de diferentes larguras de banda.

O Capítulo 5 discute as conclusões sobre o trabalho e propostas de trabalhos futuros.

1.5 Contribuições Científicas

É oportuno esclarecer que no início deste trabalho de mestrado o problema do impacto da camada física na qualidade dos circuito ópticos foi estudado no âmbito das redes **WDM**. Nesse contexto algumas soluções foram propostas e publicadas.

- FONTINELE, A.; SANTOS, I.; SOARES, A.; DURÃES, G.; MARANHÃO, J. Preventive Assignment of Regenerator in Translucent Optical Networks. In: Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems (SBRC), 2014. p. 353–360.
- FONTINELE, A.; SANTOS, I.; SOARES, A.; MARANHÃO, J.; MAZULLO, F. A Solution to the MCSP Problem Considering Physical Layer Degradations in Transparent Optical Networks. In: Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on Applied Computing. Salamanca, Spain: ACM, 2015. (SAC 2015), p. 662–664. ISBN 978-1-4503-3196-8.
- FONTINELE, A.; SANTOS, I.; DURÃES, G.; SOARES, A. Achievement of Fair and Efficient Regenerator Allocations in Translucent Optical Networks Using the Novel Regenerator Assignment Algorithm. *Optical Switching and Networking*, v. 19, Part 1, p. 22 – 39, 2016. ISSN 1573-4277.
- SOARES, A.; FONTINELE, A.; DURÃES, G.; GIOZZA, W.; AMAZONAS, J. R. Circuit-Switched Translucent Optical Networks Planning with User Level QoS. In: Proceedings of the 31th Annual ACM Symposium on Applied Computing. Pisa, Italy: ACM, 2016. (SAC 2016). ISBN 978-1-4503-3739-7. (*Artigo aceito para publicação*)
- FONTINELE, A.; SANTOS, I.; NETO, J.; CAMPELO, D.; SOARES, A. Um Novo Algoritmo RSA Ciente de Imperfeições de Camada Física para Redes Ópticas Elásticas. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2016. (*Artigo submetido*)

2 Redes Ópticas

Este capítulo aborda os principais aspectos das redes ópticas elásticas [OFDM](#). Na Seção [2.1](#) são apresentadas as principais características dessas redes [WDM](#) e [OFDM](#). Discute-se a evolução das redes ópticas [WDM](#), passando pelas redes ópticas opacas, transparentes e translúcidas, até chegar às redes ópticas elásticas [OFDM](#). A Seção [2.2](#) descreve a arquitetura da rede óptica elástica e os seus principais componentes. Na Seção [2.3](#) são tratados os principais conceitos sobre o problema [RSA](#) e como os algoritmos que são propostos para solucionar tal problema podem ser classificados em duas categorias: sequencial ou integrado. Por fim, na Seção [2.4](#) é discutido o conceito de [RSA](#) ciente de imperfeições de camada física ([IA-RSA – Impairment-Aware RSA](#)) e descritas algumas propostas presentes na literatura.

2.1 Tipos de redes ópticas

Uma rede óptica é constituída por um conjunto de nós e um conjunto de enlaces de fibras ópticas que ligam esses nós. A princípio, nas redes ópticas, os dados deveriam ser convertidos do domínio óptico para o domínio eletrônico nos nós da rede. Depois de processada, a informação seria convertida de novo para o domínio óptico. Essa conversão é conhecida na literatura como conversão óptica-elétrica-óptica ([O-E-O](#)). Os dispositivos da rede que realizam essa operação são os transponders ([SHEN; TUCKER, 2007](#)). A realização dessa conversão permitia a regeneração do sinal óptico por meio de três processos: reamplificação, reformatação e reajuste temporal do pulso. A realização desses três processos no sinal é conhecida na literatura como regeneração [3R](#). Devido a essa conversão em todos os nós da rede, essas redes são conhecidas como redes ópticas opacas. Nas redes ópticas opacas a qualidade da transmissão ([QoT](#)) entregue no nó destino é sempre alta. A principal desvantagem desse tipo de rede são os altos custos de implantação e manutenção ([NATH; CHATTERJEE; BHATTACHARYA, 2014](#)).

O elevado custo das redes ópticas opacas e as vantagens oferecidas pelos sistemas ópticos levaram ao surgimento de uma nova abordagem de implementação de redes ópticas, chamada de redes totalmente ópticas ou redes ópticas transparentes. Nestas redes, o sinal óptico é transmitido do nó de origem até o nó de destino totalmente no domínio óptico sem sofrer conversão [O-E-O](#) nos nós intermediários. Isso foi possível devido ao surgimento de novos dispositivos ópticos como os amplificadores ópticos à fibra dopada com érbio ([EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier](#)), multiplexadores/demultiplexadores ópticos e comutadores ópticos ([OXC – Optical Cross-Connect](#)) ([RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009](#)). Esses equipamentos permitiram uma redução de custo na implantação e manutenção das

redes ópticas transparentes em relação às redes ópticas opacas. Entretanto, um circuito óptico que percorre uma grande distância pode não ser estabelecido devido ao acúmulo de degradações geradas pela camada física, uma vez que não existe mais a regeneração 3R nos nós intermediários (NATH; CHATTERJEE; BHATTACHARYA, 2014).

Para combinar as vantagens das redes ópticas opaca e transparente em uma única implementação foi proposta a rede óptica translúcida. A rede óptica translúcida consiste em uma rede óptica transparente em que certa quantidade de regeneradores 3R são estrategicamente posicionados na rede. Esse tipo de rede possui, ao mesmo tempo, um custo menor de implementação e manutenção (Devido a um número menor de regeneradores em comparação a uma rede opaca) e consegue uma QoT satisfatória para boa parte dos sinais que são transmitidos na rede. Isso é possível porque o sinal óptico pode utilizar um regenerador disponível toda vez que sua QoT ficar abaixo de um limiar aceitável pré-definido pela rede (NATH; CHATTERJEE; BHATTACHARYA, 2014).

As redes ópticas opaca, transparente e translúcida apresentadas até o momento utilizam a tecnologia WDM. A tecnologia WDM divide o espectro óptico em comprimentos de onda com espaçamento fixo, ou seja, cada requisição de circuito solicita uma fatia de espectro de tamanho fixo para ser transmitida. Se um comprimento de onda transporta baixa largura de banda, uma grande lacuna de espectro fica sem utilização. Para superar essa limitação foi apresentada uma rede óptica com eficiência na utilização do espectro, baseada na tecnologia OFDM.

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, de acordo com um dado formato 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 entre circuitos adjacentes. Essas redes são chamadas de redes ópticas elásticas OFDM (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

2.2 Arquitetura da rede óptica elástica

A Figura 4 mostra a arquitetura típica da rede óptica elástica, que consiste principalmente de *Bandwidth Variable Transponder* (BVT) e *Bandwidth Variable Cross-connect* (BV-WXC).

BVTs são utilizados para adaptar a largura de banda por meio do ajuste da taxa de bits da transmissão ou formato de modulação. BVTs dão suporte a transmissões de alta velocidade usando formatos de modulação mais eficientes espectralmente, como, por exemplo, a utilização do formato de modulação 64-*Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) para circuitos ópticos de curta distância. Para circuitos ópticos de longa distância

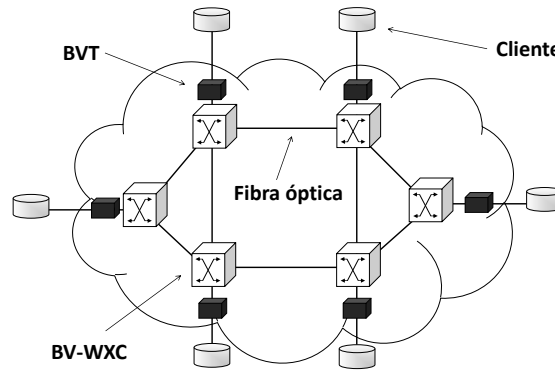


Figura 4 – Arquitetura da rede óptica elástica (Adaptada de (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015)).

são utilizados formatos de modulação mais robustos em termo de distância, porém menos eficientes em termos de alocação de espectro, tais como os formatos de modulação *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) ou *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK) (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). Portanto, BVTs são capazes de negociar eficiência espectral para um alcance da transmissão.

A Figura 5 ilustra a eficiência espectral contra o alcance de transmissão para alguns formatos de modulação. Na Figura 5, na área modulação adaptativa, é possível observar a quantidade de símbolos na constelação de sinal por formato de modulação. A quantidade de bits por símbolo para um formato de modulação é dada por $\log_2 M$, em que M corresponde a quantidade de símbolos do formato de modulação.

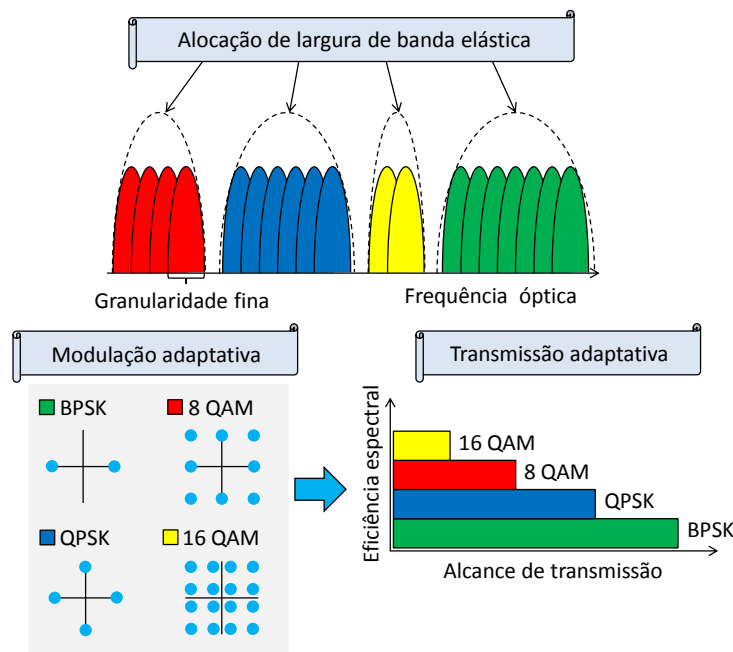


Figura 5 – Eficiência espectral contra alcance de transmissão (Adaptada de (ZHOU et al., 2012)).

Para a mesma taxa de dados o formato de modulação 16-QAM (4 bits por símbolo)

carrega duas vezes o número de bits por símbolos do que o formato de modulação QPSK (2 bits por símbolo), portanto requerendo metade da taxa de símbolo e, conseqüentemente, metade da largura de banda espectral. Pode-se economizar na alocação da largura de banda espectral por reduzir a taxa de símbolos e aumentar o número de bits por símbolos para transmitir a mesma taxa de dados. Desde que o nível alto de carga de bit diminui a distância entre dois pontos próximos na constelação de sinal, o formato de modulação 16-QAM sofre penalidade na sua qualidade de transmissão quando comparados com QPSK (JINNO et al., 2010). Observa-se pela Figura 5, na área transmissão adaptativa, que o alcance de transmissão do formato de modulação 16-QAM é menor quando comparado com o alcance de transmissão do formato de modulação QPSK.

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 (sinais transientes), e termina em um BVT no nó de destino.

A Figura 6 mostra um exemplo de implementação de um BV-WXC, em que o BV-SSS (*Bandwidth Variable Spectrum Selective Switches*) é usado para fornecer as funcionalidades de *add-drop* para sinais locais, agregação de sinal e roteamento para sinais transientes. Normalmente, um BV-SSS realiza multiplexação/demultiplexação de espectro e funções de comutação óptica. O BV-WXC configura a sua janela de comutação de uma forma flexível de acordo com a largura espectral do sinal óptico de entrada.

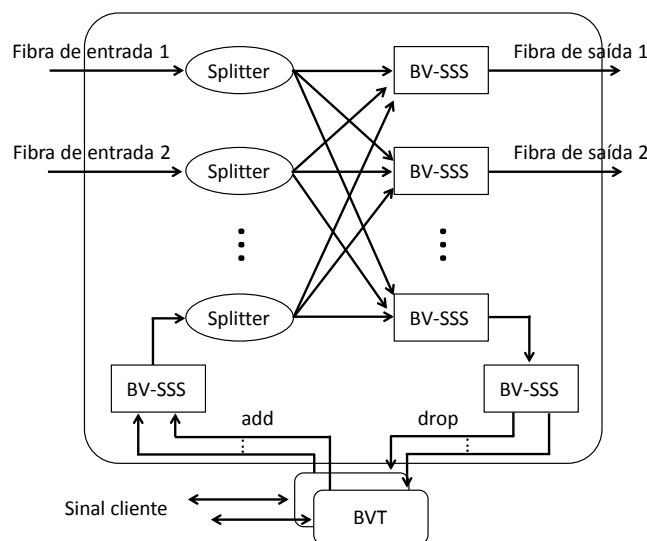


Figura 6 – Arquitetura do BV-WXC (Adaptada de (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015)).

2.3 Roteamento e alocação de espectro

Em uma rede óptica, para que os clientes (nós) 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 tráfegos (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 (slots de frequência) a serem implantados na rede. No tráfego dinâmico, que é considerado neste trabalho, as requisições chegam aleatoriamente e são desativadas após um período de tempo.

Em um ambiente de tráfego dinâmico, o objetivo é reduzir o bloqueio de requisições. Uma requisição é rejeitada sempre que não houver recursos disponíveis para que o circuito seja estabelecido ou a sua qualidade de transmissão não alcançar um requisito mínimo pré-estabelecido.

O algoritmo [RSA](#) é usado para encontrar uma rota apropriada para um par de nós origem e destino e alocar um adequado conjunto de slots de frequência para o circuito óptico requisitado. 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. Se a requisição solicita t unidades de espectro, então t slots de frequência contíguos devem ser alocados para a requisição de circuito (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 a 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 provoca a fragmentação do espectro, problema que pode influenciar diretamente na eficiência das redes ópticas elásticas [OFDM](#) (Figura 7). 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; SARMA; OKI, 2015](#)) têm sido propostas.

Na Figura 7 é apresentado um exemplo de fragmentação do espectro. No exemplo, ilustram-se três enlaces com slots de frequência livres e outros ocupados. Ao tentar estabelecer um circuito que utiliza uma rota que passa pelos três enlaces apresentados na Figura 7 e que necessita de 3 slots de frequência, deve-se primeiramente procurar 3 slots livres adjacentes em cada enlace para garantir a contiguidade do espectro. Observa-se na Figura 7, a existência de 3 slots livres adjacentes em cada enlace.

O próximo passo é procurar a mesma faixa de espectro livre em cada enlace. Ou seja, devem existir os mesmos 3 slots livres simultaneamente em todos os enlaces. Esta

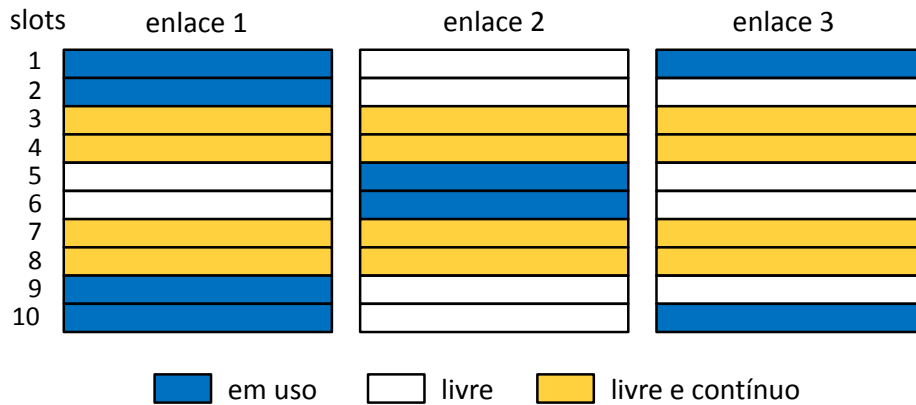


Figura 7 – Cenário com fragmentação (Adaptada de (SANTOS, 2015)).

propriedade é conhecida como continuidade obrigatória de espectro. No exemplo, não existe a disponibilidade de 3 slots livres para respeitar a restrição de continuidade, por isso não é possível estabelecer um circuito que necessita de 3 slots de frequência. Neste exemplo, ocorre um bloqueio de circuito devido à fragmentação do espectro óptico.

Chama-se de fragmentação vertical a fragmentação que impede o estabelecimento de circuitos devido à restrição de contiguidade de espectro. Já a fragmentação que impede o estabelecimento de circuitos devido à restrição de continuidade de espectro é denominada de fragmentação horizontal (TALEBI et al., 2014), conforme exemplo da Figura 7.

2.3.1 RSA sequencial

Embora o problema RSA seja um problema *NP-hard* (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011), ele pode ser resolvido de maneira integrada ou sequencial. O problema RSA resolvido de maneira separada consiste em um primeiro momento definir uma rota para o estabelecimento do circuito óptico. E em um segundo momento definir a quantidade e quais serão os slots de frequência alocados para o estabelecimento do circuito óptico.

Para o subproblema de roteamento, três abordagens podem ser amplamente encontradas na literatura: roteamento fixo, fixo alternativo e adaptativo (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). O roteamento fixo (RF) é o mais simples e sempre devolve a mesma rota, que é pré-computada, para um dado par origem e destino. Para o cálculo da rota para um dado par origem e destino geralmente utiliza-se um algoritmo de menor caminho, tal como o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

No roteamento fixo alternativo (RFA), cada nó da rede mantém uma tabela de roteamento, que contém uma lista ordenada com um número fixo de rotas. Essas rotas são computadas *off-line*. Quando uma conexão é requisitada, a primeira rota da lista é verificada. Caso não seja possível encontrar um conjunto de slots de frequência, as próximas

rotas da lista serão verificadas até se encontrar uma rota em que haja um conjunto de slots de frequência disponível ou até que seja alcançado o fim da mesma.

No roteamento adaptativo (RA), as rotas entre os pares origem e destino são escolhidas dinamicamente, dependendo da informação do estado atual da rede. A informação do estado atual da rede é determinada pelo conjunto de todos os circuitos que estão atualmente ativos. Por exemplo, considerando que no estado inicial uma rede teria o custo um associado a cada enlace. Cada vez que um novo circuito é estabelecido, o custo de cada enlace da rota selecionada para o novo circuito seria incrementado. E cada vez que um circuito é encerrado o custo de cada enlace seria decrementado. Assim, um algoritmo de RA utilizaria esse custo, que é alterado dinamicamente com o estabelecimento e encerramento de circuitos, para definir suas rotas.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os algoritmos de roteamento em termos de probabilidade de bloqueio, tempo de configuração médio e complexidade de tempo. A probabilidade de bloqueio na rede é definida como a taxa do número de conexões bloqueadas pelo número de conexões requisitadas. O tempo de configuração médio da rede é definido como o tempo total de execução necessário para estabelecer todos os circuitos na rede pelo número de circuitos com sucesso (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Tabela 1 – Comparação entre algoritmos de roteamento (Adaptada de (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015))

Roteamento		Análise de desempenho			On/Off line
		PB	TCM	CT	
Estático	RF	> outros	< outros	$O(L_m Z)$	Off line
	RFA	< RF	> RF	$O(L_c K Z)$	Off line
Dinâmico	RA	< outros	> outros	$O(L_c N^2 Z)$	On line

Na Tabela 1, L_m é o comprimento da maior rota fixa para qualquer par, L_c é o comprimento da maior rota candidata para qualquer par, K é o número de rotas candidatas para qualquer par, N é o número de nós da rede, Z é o número de circuitos requisitados na rede, PB é a probabilidade de bloqueio, TCM é o tempo de configuração médio e CT é a complexidade de tempo. Como é possível observar na Tabela 1, o roteamento fixo tem a menor complexidade de tempo e o menor tempo de configuração médio entre os algoritmos de roteamento. Entretanto, sua probabilidade de bloqueio é a maior. O roteamento adaptativo apresenta o melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio, mas sua complexidade de tempo é maior que a dos outros. Já o roteamento fixo alternativo possui o melhor custo benefício entre probabilidade de bloqueio e complexidade de tempo.

Para o subproblema da alocação de espectro existem várias heurísticas e cada uma delas pode ser utilizada em conjunto com qualquer estratégia de roteamento. As principais heurísticas utilizadas na literatura (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015) são:

First Fit, *Random Fit*, *Last Fit*, *Least Used*, *Most Used* e *Exact Fit*. A heurística *First Fit* indexa os slots de frequência e mantém uma lista com os slots disponíveis. No momento do estabelecimento de um circuito óptico ela busca escolher um ou mais slots com os menores índices presentes nesta lista. Assim como no *First Fit*, a heurística *Random Fit*, também mantém uma lista com os slots disponíveis. Mas no momento do estabelecimento de um circuito óptico ela busca escolher um ou mais slots aleatoriamente nesta lista. O *Last Fit* sempre tenta escolher um ou mais slots com os maiores índices presentes na lista de slots disponíveis.

A política *Least Used* aloca espectro para um circuito óptico de uma lista de slots disponíveis que têm sido usados pelo menor número de enlaces na rede. Selecionar slots dessa maneira é uma tentativa de espalhar a carga de forma uniforme entre todos os slots. A política *Most Used* aloca espectro para um circuito óptico de uma lista de slots disponíveis que têm sido usados pelo maior número de enlaces na rede. Selecionar slots dessa maneira é uma forma de tentar realizar a reutilização máxima do espectro na rede. A política *Exact Fit* busca em todo o conjunto de slots disponíveis o número exato de slots que são necessários para atender a quantidade de slots requisitados pelo circuito. Se existe um bloco de slots disponíveis que corresponde a quantidade de slots requisitados, esse será a faixa de espectro alocada. Caso contrário, os slots são alocados de acordo com a política *First Fit*. Ao selecionar slots de frequência desta maneira tenta-se reduzir o problema de fragmentação de espectro na rede (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

A Tabela 2 apresenta a complexidade de tempo para as políticas de alocação de espectro. As políticas de alocação de espectro *Least Used* e *Most Used* têm alto complexidade de tempo quando comparadas as outras políticas. Essas duas políticas requerem informação global da rede, ou seja, necessitam de informações sobre o estado de utilização dos enlaces da rede. As políticas *First Fit*, *Random Fit*, *Last Fit* e *Exact Fit* têm baixa complexidade de tempo. L_m é o comprimento da maior rota fixa para qualquer par, E é o número de enlaces da rede, W_s é o número de slots de frequência por fibra e Z é o número de requisições de circuitos na rede.

Tabela 2 – Complexidade de tempo para as políticas de alocação de espectro (Adaptada de (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015)).

Política de alocação de espectro	Complexidade de tempo
<i>First Fit</i>	$O(L_m W_s Z)$
<i>Random Fit</i>	$O(L_m W_s Z)$
<i>Last Fit</i>	$O(L_m W_s Z)$
<i>Exact Fit</i>	$O(L_m W_s Z)$
<i>Least Used</i>	$O(L_m E W_s Z)$
<i>Most Used</i>	$O(L_m E W_s Z)$

2.3.2 RSA integrado

Algoritmos **RSA** sequenciais são computacionalmente mais simples que os algoritmos **RSA** integrados. Diferentes trabalhos presentes na literatura consideram roteamento e alocação de espectro ao mesmo tempo, o que é chamado de **RSA** integrado (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). Geralmente utilizam uma matriz para descrever o estado do espectro no enlace ou caminho, considerando as restrições de continuidade e contiguidade. Depois escolhem a matriz candidata disponível com o melhor desempenho.

Os autores em (WANG et al., 2012) propõem uma nova métrica para avaliar a fragmentação de espectro ao longo de um enlace ou rota, chamada de consecutividade de espectro (**CE**). Ainda em (WANG et al., 2012), são propostos três algoritmos **RSA** integrados que retêm a **CE** tanto quanto possível ao estabelecer um circuito e reduzir a fragmentação do espectro.

Os autores em (ZHOU et al., 2012) focam em resolver junto o problema **RSA** com a seleção da modulação. Este tipo de problema é chamado de problema *Routing, Modulation and Spectrum Allocation* (**RMSA**). É proposto um algoritmo genético para resolver o problema **RMSA**. Em (YIN et al., 2013b) é investigado como o estabelecimento de circuitos em um cenário de tráfego dinâmico fragmenta os recursos espectrais nos enlaces ao longo de uma rota. Ainda em (YIN et al., 2013b), são propostos dois algoritmos, *Fragmentation-Aware RMSA* e *Alignment-Aware RMSA*, para resolver o problema **RMSA** e aliviar a fragmentação na rede.

Em (YIN et al., 2013a) o problema da fragmentação do espectro em redes ópticas elásticas é estudado em duas dimensões: i) fragmentação do espectro em cada enlace e ii) fragmentação espacial entre os enlaces candidatos e seus vizinhos. São propostos dois algoritmos **RSA** integrados chamados *Fragmentation-Aware (FA) RSA* e *Fragmentation-Aware RSA with Congestion Avoidance (FA-CA)* para aliviar a fragmentação espectral no processo de provisionamento de circuitos ópticos.

Em (LEIVA et al., 2014) é proposto um algoritmo **RSA** integrado chamado de *Dynamic Graph Coloring* (**DGC**). O algoritmo **DGC** cria um sub grafo da rede com apenas as unidades de slots de frequência disponíveis. Depois é executado o algoritmo de menor caminho de Dijkstra sobre o sub grafo. O resultado da busca é o menor caminho possível com espectro disponível suficiente para estabelecer um dado circuito.

Em (WANG; MUKHERJEE, 2014) são apresentados três algoritmos de alocação de espectro que trabalham de forma integrada com o roteamento k menores caminhos. Os métodos são chamados *Complete Sharing* (**CS**), *Pseudo Partition* (**PP**) e *Dedicated Partition* (**DP**). No **CS** a rota e os slots de frequência são selecionados de forma a alocar um faixa de espectro mais próxima do início do espectro óptico. O **PP** divide as requisições de circuitos ópticos de acordo com a largura de banda requisitada. Algumas

requisições alocam slots de frequência utilizando a política *First Fit* e outras alocam slots de frequência utilizando a política *Last Fit*. Já o DP divide os slots de frequência em regiões que são dedicadas para cada tipo de requisição. Os tipos das requisições são definidos pela quantidade de slots de frequência requerida para cada requisição.

2.4 RSA ciente de imperfeições de camada física

Quando os algoritmos *Routing and Wavelength Assignment* (RWA) utilizam informações da camada física para tomar decisões sobre a alocação dos recursos da rede eles são chamados de *Impairment Aware – RWA* (IA-RWA). Vários trabalhos (RAHBAR, 2012; SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009) apresentam estudos sobre algoritmos IA-RWA em redes ópticas WDM.

Vários trabalhos existentes em redes ópticas elásticas utilizam um limiar de alcance de transmissão (JINNO et al., 2010; CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARI-GOS, 2011; WAN; HUA; ZHENG, 2012; ZHOU et al., 2012; ZHU et al., 2013; GONG et al., 2013; IZQUIERDO-ZARAGOZA; PAVON-MARINO; BUENO-DELGADO, 2014; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 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; WYMEERSCH; AGRELL, 2015).

O conceito de algoritmos RSA ciente 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; SALEHI, 2013). Também é importante escolher o formato de modulação adequado para um circuito através de algoritmos RSA ciente de qualidade transmissão (QoT-Aware RSA) (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Em (YANG; 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 deve 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 as rotas 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 (BEYRANVAND; SALEHI, 2013) propõem um esquema de RSA ciente de QoT para redes ópticas elásticas. O esquema emprega três etapas: i) cálculo

das rotas viáveis, ii) seleção de uma rota e iii) alocação de espectro. O artigo apresenta um modelo analítico (expressões matemáticas) para calcular o *Optical Signal to Noise Ratio* (OSNR) de uma dada rota. Baseado no esquema proposto são apresentados dois algoritmos **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 todas as rotas possíveis entre um dado par de nós 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 (**YEN, 1971**) é utilizado para obter as k rotas candidatas. Para cada rota do conjunto de rotas candidatas é determinado um formato de modulação adequado. A rota é retirada do conjunto de rotas candidatas se não for possível encontrar um formato de modulação para a rota em questão. A próxima etapa é determinar a rota mais qualificada, referenciada como rota dominante, em termos das métricas de **QoT** e eficiência espectral.

Os autores em (**ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015**) estudam o problema **RSA** para o estabelecimento de circuitos *off-line* em redes ópticas elásticas **OFDM** considerando os efeitos de camada física. Ainda em (**ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015**), os autores propõem uma nova formulação de programação linear inteira e duas heurísticas de **RSA** cientes de efeitos de camada física, chamadas *Group List (GL)* e *Connection List (CL)*. As duas heurísticas ordenam de forma decrescente os circuitos pelos seus requerimentos de taxa de bits. Na **GL**, os circuitos são agrupados, e posteriormente 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 rejeição sinal-ruído 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.

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; SARMA; OKI, 2015; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015**).

2.5 Considerações finais

A rede óptica baseada na tecnologia **WDM** divide o espectro óptico em comprimentos de onda de tamanho fixo. Devido à variedade de larguras de bandas requisitadas

esse tamanho fixo dos comprimentos de onda acaba por gerar em alguns casos a subutilização do espectro óptico. Para superar essa limitação foi proposta a rede óptica baseada na tecnologia **OFDM**. Com a tecnologia **OFDM** o espectro óptico é dividido em slots de frequência com tamanho bem inferior ao do comprimento de onda. A alocação de espectro é ajustada de acordo com a largura de banda requisitada alocando um ou mais slots de frequência por circuito óptico.

Este capítulo apresentou um breve histórico sobre as redes ópticas **WDM**. Discutindo as características das redes ópticas opaca, transparente e translúcida. Foram discutidas também as características da rede óptica elástica **OFDM**. E ainda foi apresentada a arquitetura da rede óptica elástica.

Também foi discutido o problema **RSA** que está presente em redes ópticas elásticas. Foi feito um paralelo entre o problema **RSA** e problema **RWA**, este último é típico de redes ópticas **WDM**. Foi mostrado que os algoritmos que são propostos para solucionar o problema **RSA** são classificados em sequenciais ou integrados.

Algoritmos **RSA** sequenciais resolvem o problema roteamento de alocação de espectro de maneira separada. Primeiro definem uma rota para o circuito óptico e depois decide qual será o espectro óptico a ser alocado. Já os algoritmos **RSA** integrados, resolvem o problema de roteamento e alocação de espectro ao mesmo tempo. Neste capítulo foram mostradas propostas de algoritmos **RSA** presentes na literatura pertencentes as duas classes.

Na Seção 2.4 foi apresentado o conceito de **IA-RSA**. Ainda nessa seção foram apresentados trabalhos que utilizam modelos analíticos para estimar a **QoT** dos circuitos ópticos (**BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015**). Já em (**YANG; KUIPERS, 2012**) cada formato de modulação possui um alcance máximo de transmissão. A escolha do formato de modulação adequado é baseada na distância total da rota e no alcance máximo de transmissão do formato de modulação.

O Capítulo 3 apresentará as imperfeições de camada física consideradas pelo modelo de camada física adotado (**JOHANNISSON; AGRELL, 2014; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015**). As imperfeições de camada física degradam a qualidade do sinal durante a transmissão de um circuito óptico. Tal degradação pode acarretar em uma qualidade de transmissão inaceitável no receptor.

3 Camada Física

Este capítulo aborda as imperfeições de camada física encontradas nas redes ópticas elásticas. Na Seção 3.1 são apresentados os efeitos de camada física e suas categorias. A Seção 3.2 descreve o modelo de camada física para redes ópticas elásticas adotado neste trabalho e a sua aplicação para verificar a QoT de um circuito óptico.

3.1 Efeitos de Camada Física

O sinal óptico ao ser transmitido por enlaces e dispositivos ópticos perde qualidade de sinal devido aos efeitos de camada física. As degradações causadas pelos efeitos da camada física são classificadas em três categorias (RAHBAR, 2012): efeitos lineares, efeitos não lineares e outros efeitos.

Na primeira categoria estão os efeitos que são independentes da potência do sinal e afetam cada circuito separadamente. Dentre os efeitos lineares estão (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009): atenuação na fibra, Dispersão Cromática (CD – *Chromatic Dispersion*) e Dispersão do Modo de Polarização (PMD – *Polarization Mode Dispersion*).

Os efeitos presentes na segunda categoria são fortemente dependentes da potência acumulada e da potência individual dos circuitos ópticos transportados em paralelo na mesma fibra, causando interferências nos circuitos individualmente e entre eles. Dentre os efeitos não lineares estão (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009): Auto-Modulação de Fase (SPM – *Self-Phase Modulation*), Modulação de Fase Cruzada (XPM – *Cross-Phase Modulation*) e Mistura de Quatro Ondas (FWM – *Four-Wave Mixing*).

Os efeitos presentes na terceira categoria estão relacionados com os dispositivos ópticos presentes na rede ou ao estado atual da alocação dos circuitos na rede. O estabelecimento de um novo circuito óptico poderá afetar uma ou mais circuitos já ativos na rede. Em (RAHBAR, 2012) são apresentados dois efeitos nessa categoria: *Crosstalk* e Emissão Espontânea Amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*).

Vários estudos (RAHBAR, 2012; SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009) considerando efeitos de camada física foram realizados em redes ópticas baseadas em WDM. A literatura apresenta alguns trabalhos que modelam os efeitos de camada física em redes ópticas elásticas OFDM (CHEN; SHIEH, 2010; GAO; CHEN; SHIEH, 2012b; GAO; CHEN; SHIEH, 2012a; BEYRANVAND; SALEHI, 2013; GAO et al., 2014; JOHANNISSON; AGRELL, 2014; POGGIOLINI et al., 2015; ALVES; CARTAXO, 2015).

Em (JOHANNISSON; AGRELL, 2014) é apresentada uma comparação entre o seu modelo de camada física proposto (Modelo 2) e o modelo de camada física proposto em

(BEYRANVAND; SALEHI, 2013) (Modelo 1). Os dois modelos compartilham a mesma teoria, por isso os resultados de simulações numéricas dos dois modelos foram comparados com a expressão exata que os modelos tentam aproximar. A Figura 8 apresenta a comparação entre os dois modelos e a integração numérica da expressão exata. Observar-se pela Figura 8, que o comportamento da curva do Modelo 2 é semelhante ao comportamento da curva de integração numérica da expressão exata. As curvas do Modelo 2 e da expressão exata demonstram os diferentes impactos do ruído não linear sobre os diferentes canais. Nota-se pela Figura 8 que os circuitos nas bordas do espectro sofrem menos impacto que os circuitos no centro do espectro. Já a curva apresentada pelo Modelo 1 não apresenta esse comportamento. Em vista disso, o modelo de camada física apresentado em (JOHANNISSON; AGRELL, 2014) (Modelo 2) foi adotado neste trabalho. A seguir, são apresentados de forma resumida os efeitos de camada física considerados pelo modelo de camada física adotado neste trabalho.

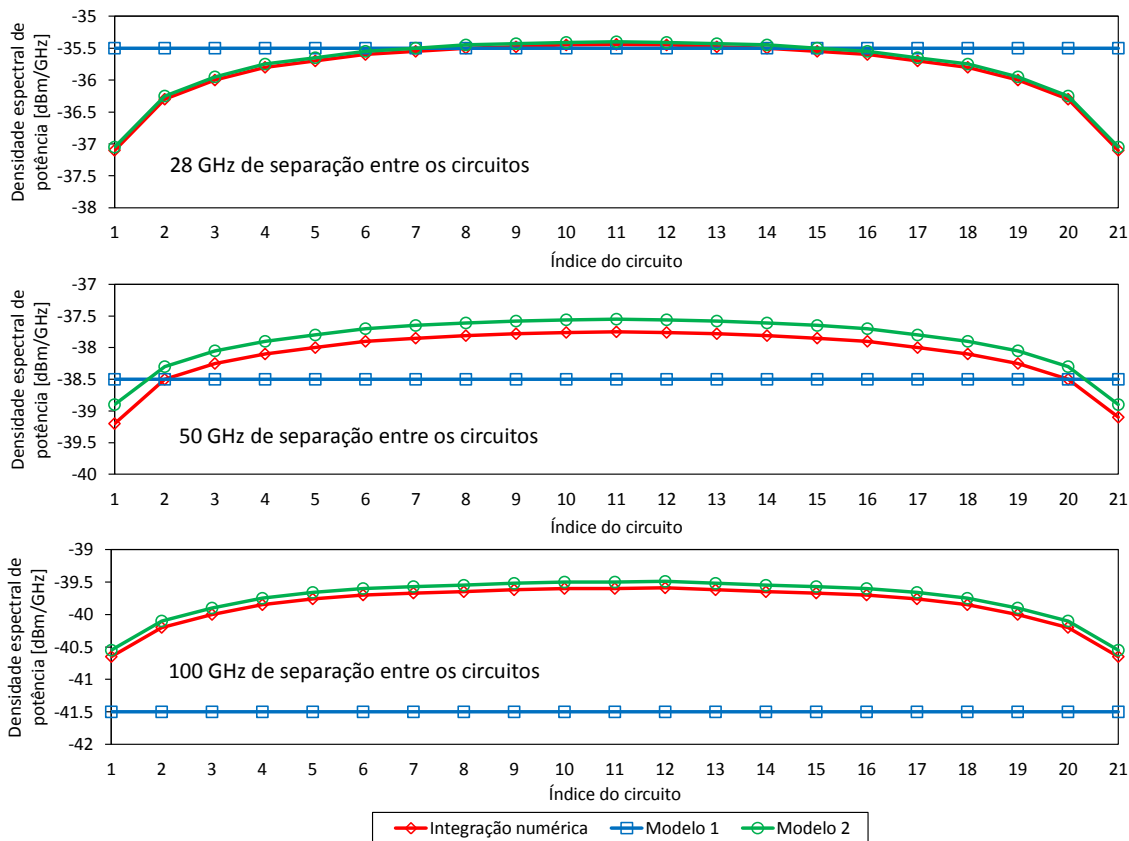


Figura 8 – Densidade espectral de potência do ruído não linear no centro de frequência de 21 circuitos ópticos para três diferentes separações entre circuitos (Adaptada de (JOHANNISSON; AGRELL, 2014)).

A potência do sinal é reduzida pela atenuação da fibra após longas distâncias de propagação até ficar abaixo do limiar detectável pelos receptores ópticos, tornando necessária a amplificação óptica do sinal. A amplificação óptica usual é feita através de amplificadores ópticos EDFA. Amplificadores ópticos EDFA introduzem o ruído denominado

ASE. O ruído **ASE** afeta todas os circuitos que passam pelo amplificador e se propaga com o sinal até o receptor causando a degradação do desempenho do sistema. O **ASE** é quantificado com a figura de ruído (**NF** – *Noise Figure*). A **NF** é um fator que diz o quanto é maior a densidade espectral de potência de ruído na saída do amplificador comparada com a densidade espectral de potência de ruído na entrada do amplificador (**SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009**).

A dispersão é o nome dado para qualquer efeito em que diferentes componentes do sinal transmitido viajam em diferentes velocidades na fibra, chegando em diferentes tempos no receptor. **CD** é o termo dado para o fenômeno em que diferentes componentes espectrais de um pulso viajam em diferentes velocidades. Após determinada distância de propagação, as diferentes componentes espectrais estão atrasadas entre si e o pulso sofrerá um alargamento temporal (**RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009**). A **CD** depende da taxa de bits, formato de modulação e do tipo de fibra. Em sistemas reais, técnicas de compensação, chamadas de Fibra de Compensação de Dispersão (**DCF** – *Dispersion Compensation Fiber*), são comumente utilizadas para enlaces muito longos (**SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009**).

A **SPM** ocorre porque o índice de refração da fibra possui uma componente dependente de intensidade. Isso provoca um deslocamento de fase induzida que é proporcional à intensidade do pulso e faz com que diferentes partes do pulso sofram diferentes deslocamentos de fase (**RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009**). O **XPM** é o deslocamento de fase de um sinal causado pelas flutuações de intensidade de outros canais que compartilham a mesma fibra a diferentes frequências ópticas. O efeito da **XPM** pode ser reduzido aumentando o espaçamento entre circuitos ou fazendo com que circuitos operem a taxas de bits diferentes (**SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009**). **FWM** é a interação não linear entre três frequências ópticas (f_i, f_j e f_k) dando origem a uma quarta frequência ($f_{ijk} = f_i \pm f_j \pm f_k$). Se a quarta frequência (f_{ijk}) for igual ou próxima à frequência de um circuito tal que o ruído interferente resultante caia dentro da largura de banda do circuito, haverá penalidades na transmissão. O efeito **FWM** é independente de taxa de bits, mas é fortemente dependente do espaçamento entre circuitos e da dispersão da fibra. Quanto mais próximos os circuitos maior o efeito **FWM** (**SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009**).

3.2 Modelo de camada física para redes ópticas elásticas

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 relação sinal-ruído (**SNR** – *Signal to Noise Ratio*) correspondente a uma taxa de erro de bit (**BER** – *Bit Error Rate*) aceitável, por exemplo 10^{-3} (**BEYRANVAND; SALEHI, 2013; GAO et al., 2014**).

A Figura 9 apresenta a arquitetura assumida para uma rota com um salto (*span*). Da esquerda para a direita tem-se: laser transmissor no BVT do nó de origem (A), BV-WXC (onde há um *splitter* e BV-SSS) do nó de origem (B), fibra óptica (C), amplificador óptico (D), n spans (E), BV-WXC (onde há um *splitter* e BV-SSS) do nó de destino (F) e receptor no BVT do nó de destino (G).

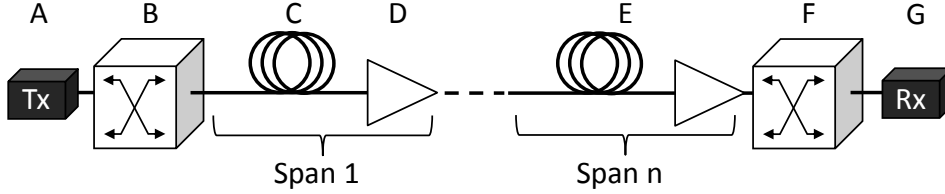


Figura 9 – Arquitetura assumida para uma rota com um salto.

Na região linear do OFDM óptico, o alcance de transmissão é limitado pelo ruído ASE, enquanto na região não linear é limitado pelas não linearidades da fibra tais como FWM, XPM e SPM (BEYRANVAND; SALEHI, 2013).

Para calcular a SNR de um circuito, foi adotado o modelo de camada física apresentado em (JOHANNISSON; AGRELL, 2014; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015; YAN et al., 2015). O cálculo da SNR para um circuito i usando uma rota r_i é expressa pela Equação 3.1:

$$SNR_i = \frac{I}{I_{ASE} + I_{NLI}}. \quad (3.1)$$

A variável I é 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 pela Equação 3.2:

$$I_{ASE} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{ASE}^0, \quad (3.2)$$

em que N_l é o número de spans do enlace l e $I_{ASE}^0 = (G_{AMP} - 1)Fh\nu$. A variável F é o fator de emissão espontânea, que corresponde à metade da figura de ruído (NF – *Noise Figure*) do amplificador (BEYRANVAND; SALEHI, 2013), h é a constante de Planck, ν 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 pela Equação 3.3:

$$I_{NLI} = \sum_{l \in r_i} N_l I_{NLI}^l. \quad (3.3)$$

em que I_{NLI}^l , a PSD do ruído NLI em um único span do enlace l , é expressa pela Equação 3.4 (ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015):

$$I_{NLI}^l = \frac{3\gamma^2 I^3}{2\pi\alpha|\beta_2|} \left(a \sinh \left(\frac{\pi^2 |\beta_2|}{2\alpha} B_i^2 \right) + \sum_j \ln \left[\left(\Delta_{f_{ij}} + \frac{B_j}{2} \right) / \left(\Delta_{f_{ij}} - \frac{B_j}{2} \right) \right] \right), \quad (3.4)$$

em que, j é outro circuito usando o enlace l , B_i e B_j são, respectivamente, as larguras de bandas para os circuitos i e j , $\Delta_{f_{ij}}$ é o espaçamento da frequência central entre os circuitos i e j , γ é o coeficiente de não linearidade da fibra, β_2 é o parâmetro de dispersão da fibra e α é a atenuação de potência causada pela fibra.

Para estimar a BER, para um circuito i , relacionada a um formato de modulação m é utilizada a Equação 3.5 (SHAFIK; RAHMAN; ISLAM, 2006; SCHMOGROW et al., 2012):

$$BER_i \approx \frac{1 - L_m^{-1} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{3 \log_2 L_m \sqrt{2} SNR_i}{L_m^2 - 1 k_m^2 \log_2 M_m}} \right]}{\log_2 L_m}, \quad (3.5)$$

em que, M_m é a quantidade de símbolos do formato de modulação. L_m é o nível do formato de modulação. A quantidade de bits por símbolo para um formato de modulação é dado por $\log_2 M_m$. A Tabela 3 apresenta os valores para M_m , L_m , k e o limiar de SNR (SNR_{QoT}) relacionados com os respectivos formatos de modulação (SCHMOGROW et al., 2012; BEYRANVAND; SALEHI, 2013).

Tabela 3 – Formatos de modulação considerados.

	BPSK	QPSK	8QAM	16QAM	32QAM	64QAM
L	2	3	4	5	6	7
M	2	4	8	16	32	64
k^2	1	1	1	9/5	17/10	7/3
$SNR_{QoT}(dB)$	6	9	12	15	18	21

3.3 Considerações finais

Imperfeições de camada física degradam a QoT de um circuito óptico a medida que o seu sinal se propaga pelos enlaces e dispositivos ópticos da rede. As imperfeições da camada física são classificadas em três categorias: efeitos lineares, efeitos não lineares e outros efeitos. Os efeitos lineares são independentes da potência do sinal e afetam cada circuito separadamente. Os efeitos não lineares são fortemente dependentes da potência acumulada e da potência individual dos circuitos ópticos transportados em paralelo na mesma fibra. Na terceira categoria estão os efeitos relacionados com os dispositivos ópticos presentes na rede ou o estado atual da alocação dos circuitos na rede.

O modelo de camada física para redes ópticas elásticas que é aplicado para checar a qualidade de transmissão de um circuito óptico foi mostrado. Foram discutidos de forma resumida os efeitos de camada física que estão presentes no modelo de camada física adotado.

No próximo capítulo é apresentado um novo algoritmo de roteamento e alocação de espectro que leva em consideração os efeitos de camada física para decidir a solução de

roteamento. Também é discutido um estudo de avaliação de desempenho do algoritmo proposto.

4 K menores caminhos com redução de QoTO

Este capítulo apresenta um novo algoritmo de roteamento e alocação de espectro ciente de imperfeições de camada física para redes ópticas elásticas chamado de *K-Shortest Path with Reduction of QoTO* (**KSP-RQoTO**). O algoritmo proposto busca estabelecer novos circuitos reduzindo o impacto na QoT dos outros circuitos já ativos na rede. Na Seção 4.2 é apresentado um estudo de avaliação de desempenho comparando o algoritmo proposto com outros algoritmos **IA-RSA** em termos de i) probabilidade de bloqueio de circuitos, ii) probabilidade de bloqueio de banda, iii) justiça no atendimento de diferentes pares de nós origem e destino e iv) justiça no atendimento de diferentes larguras de banda.

4.1 Algoritmo Proposto

Os algoritmos **IA-RSA**, **KS-PC** e **MD-PC**, propostos em (BEYRANVAND; SALEHI, 2013) escolhem o formato de modulação baseado na QoT estimada para uma dada rota. O Algoritmo 1 é utilizado para selecionar o formato de modulação para os algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** neste trabalho.

Algoritmo 1 Seleção do formato de modulação pela QoT.

```

1:  $R$  = taxa de bits da requisição
2:  $rota$  = rota selecionada para a requisição
3:  $M$  = quantidade de formatos de modulação
4:  $i = 0$ 
5:  $mod_{escolhido} = -1$ 
6: while  $i < M$  do
7:   if for possível alocar espectro utilizando o formato de modulação  $i$  considerando  $R$ 
   then
8:      $QoT_{mod}$  = computa a QoT para o formato de modulação  $i$  considerando a  $rota$ 
9:     if  $QoT_{mod}$  está aceitável then
10:       $mod_{escolhido} = i$ 
11:     end if
12:   end if
13:    $i = i + 1$ 
14: end while
15: return formato de modulação correspondente ao índice  $i$ 

```

O Algoritmo 1 busca o formato de modulação adequado para uma dada requisição partindo da modulação com menor eficiência espectral até a modulação com maior eficiência espectral. O algoritmo verifica se é possível alocar espectro respeitando as restrições de

continuidade e contiguidade do espectro óptico para cada formato de modulação (Linha 7). Ou seja, calcula-se a quantidade de slots de frequência de acordo com a largura de banda requisitada e em seguida tenta-se alocar o espectro óptico referente à quantidade de slots de frequência definida. Deve-se conhecer a faixa de espectro óptico alocada para cada circuito para computar as interferências entre os circuitos. Se for possível alocar o espectro, computa-se a QoT para o formato de modulação considerando a rota selecionada para a requisição (Linha 8). Cada formato de modulação possui o seu respectivo limiar de SNR (BEYRANVAND; SALEHI, 2013). Em seguida a QoT estimada para o formato de modulação é verificada (Linha 9). Se a QoT estiver aceitável (respeita o limiar de SNR do formato de modulação), a variável $mod_{escolhido}$ guarda o índice do formato de modulação em avaliação (Linha 10).

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 for 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 trabalho 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 de nós origem e destino da rede em uma fase *off-line*. No momento que a rede está em operação, o algoritmo proposto busca diminuir os bloqueios de circuitos causados pela degradação da qualidade de transmissão dos outros circuitos ópticos já ativos na rede. O algoritmo proposto tenta diminuir estes bloqueios evitando alocar rotas que acarretem em uma degradação nos circuitos ópticos já ativos mais frágeis em termos de SNR. Ele tenta alocar uma das *k* rotas alternativas de forma a minimizar o bloqueio do tipo QoTO. O fluxograma ilustrado na Figura 10 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 QoTO está aceitável (respeita o limiar de SNR do formato de modulação). Em caso afirmativo, é computado o $\Delta SNR_{MOD\&REQ}$ para o circuito em estabelecimento. O ΔSNR é a diferença entre a 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. Um

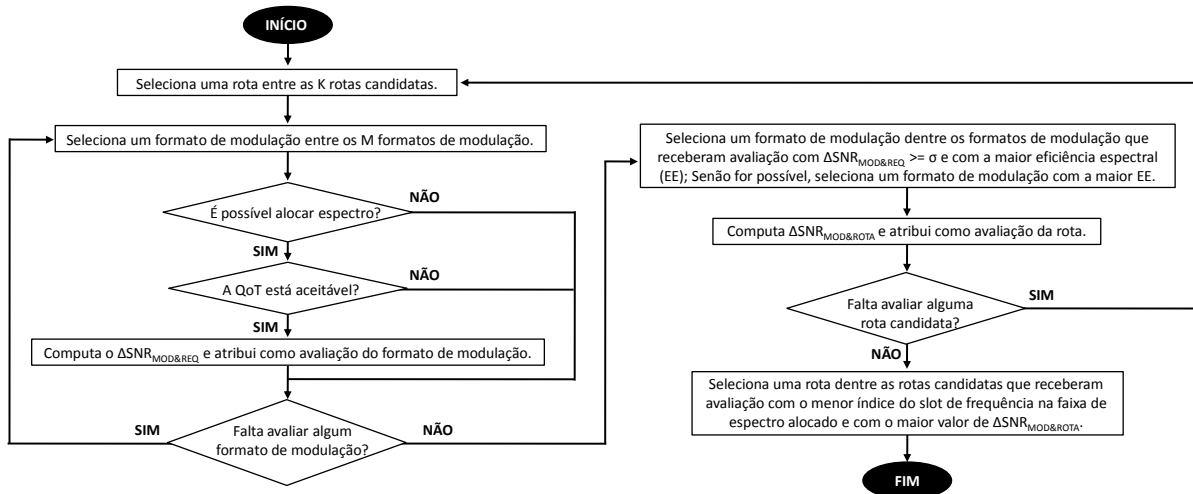


Figura 10 – Fluxograma do algoritmo KSP-RQoTO.

circuito óptico fica mais vulnerável ao estabelecimento de futuros circuitos quanto menor for o seu ΔSNR . O valor do $\Delta\text{SNR}_{\text{MOD}\&\text{REQ}}$ é atribuído como avaliação para o formato de modulação em análise.

Dentre os formatos de modulação que receberam avaliação, é selecionado o formato de modulação com a maior eficiência espectral que possua o $\Delta\text{SNR}_{\text{MOD}\&\text{REQ}} \geq \sigma$. O 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 do σ , o algoritmo escolhe aquele formato de modulação que apresentar a maior eficiência espectral.

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 $\Delta\text{SNR}_{\text{MOD}\&\text{ROTA}}$. 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 $\Delta\text{SNR}_{\text{MOD}\&\text{ROTA}}$. O valor de $\Delta\text{SNR}_{\text{MOD}\&\text{ROTA}}$ 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 $\Delta\text{SNR}_{\text{MOD}\&\text{ROTA}}$ 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; MUKHERJEE, 2014). Ao escolher a rota como maior valor de $\Delta\text{SNR}_{\text{MOD}\&\text{ROTA}}$

neste passo, o algoritmo proposto evita degradar os circuitos ópticos ativos mais frágeis, isto é, os circuitos ativos com o menor Δ SNR. Quanto mais circuitos ópticos frágeis na rede, maior a probabilidade de novas requisições sofrerem 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 seguir. A Figura 11 apresenta as curvas de probabilidade de bloqueio de circuitos em função da carga na topologia EON (Figura 12) 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; SARMA; OKI, 2015). Neste cenário (Figura 11(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.

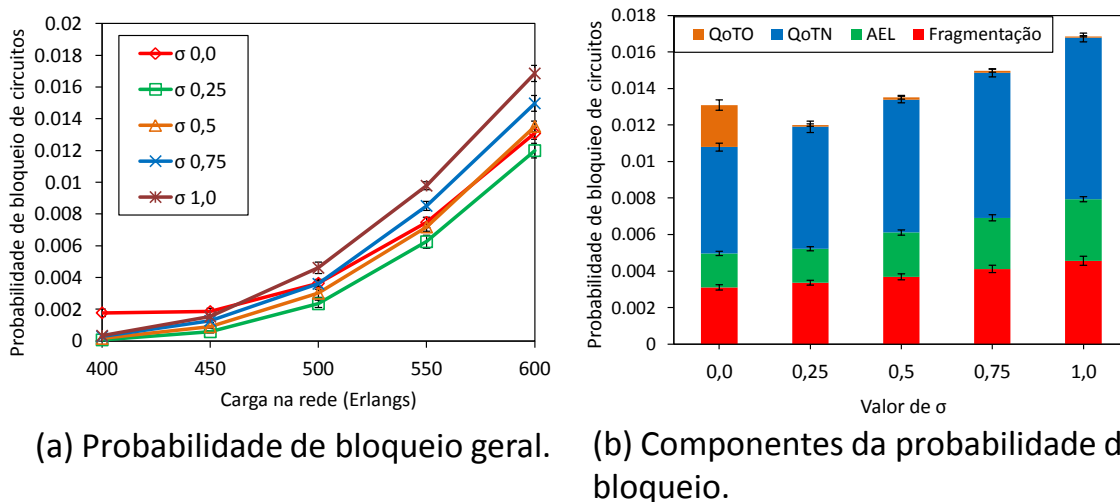


Figura 11 – (a) Curvas de probabilidade de bloqueio em função da carga na topologia EON utilizando diferentes valores para σ . (b) Composição da probabilidade de bloqueio geral de acordo com o valor de σ na topologia EON sob uma carga de 600 Erlangs.

Para definir o valor ideal para o σ , o algoritmo KSP-RQoTO simula o comportamento da rede considerando diferentes valores para o σ em ordem crescente. Quanto menor o valor de incremento do σ mais refinada será a busca pelo valor ideal para o σ . Porém, terá um maior custo computacional, já que serão realizadas mais simulações da rede. Este estudo foi realizado com valores menores que 0,25 para o incremento do σ , entretanto, estes valores não apresentaram uma melhoria significativa em relação ao valor 0,25. Por esse motivo, na Figura 11 são apresentados os valores para o σ com o incremento de 0,25.

A Figura 11(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 evitando 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 11(b). Ocorre um aumento na probabilidade de bloqueio. Isso porque estão sendo selecionados formatos de modulação com menor eficiência espectral. Formatos de modulação com menor eficiência espectral 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.

A probabilidade de bloqueio devido à fragmentação do espectro ou a indisponibilidade de espectro é mais provável em formatos de modulação com menor eficiência espectral. Formatos de modulação com maior eficiência espectral necessitam de SNR melhor para alcançar a mesma BER de formatos de modulação com menor eficiência espectral. Por isso, a probabilidade de bloqueio devido a QoT para formatos de modulação com maior eficiência espectral é mais provável que para formatos de modulação com menor eficiência espectral (FALLAHPOUR et al., 2014).

4.2 Estudo de Avaliação de Desempenho

O algoritmo proposto, KSP-RQoTO, foi comparado com os algoritmos KS-PC e MD-PC sob os aspectos de i) probabilidade de bloqueio de circuito, ii) probabilidade de bloqueio de banda, iii) justiça no atendimento de diferentes pares de nós origem e destino e iv) justiça no atendimento de diferentes larguras de banda. Foram utilizadas quatro rotas candidatas para os algoritmos de k menores caminhos. O algoritmo *First-Fit* foi utilizado para a alocação de espectro (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Para avaliar os impactos dos efeitos de camada física nos circuitos ópticos, o modelo de camada física apresentado na Seção 3.2 foi implementado no SNetS (SANTOS, 2015). O SNetS é uma ferramenta de simulação desenvolvida para permitir a avaliação de desempenho de redes ópticas elásticas OFDM. Informações sobre a validação do SNetS 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 distribuída 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 12. O valor apresentado em cada enlace da topologia indica a distância do enlace em km.

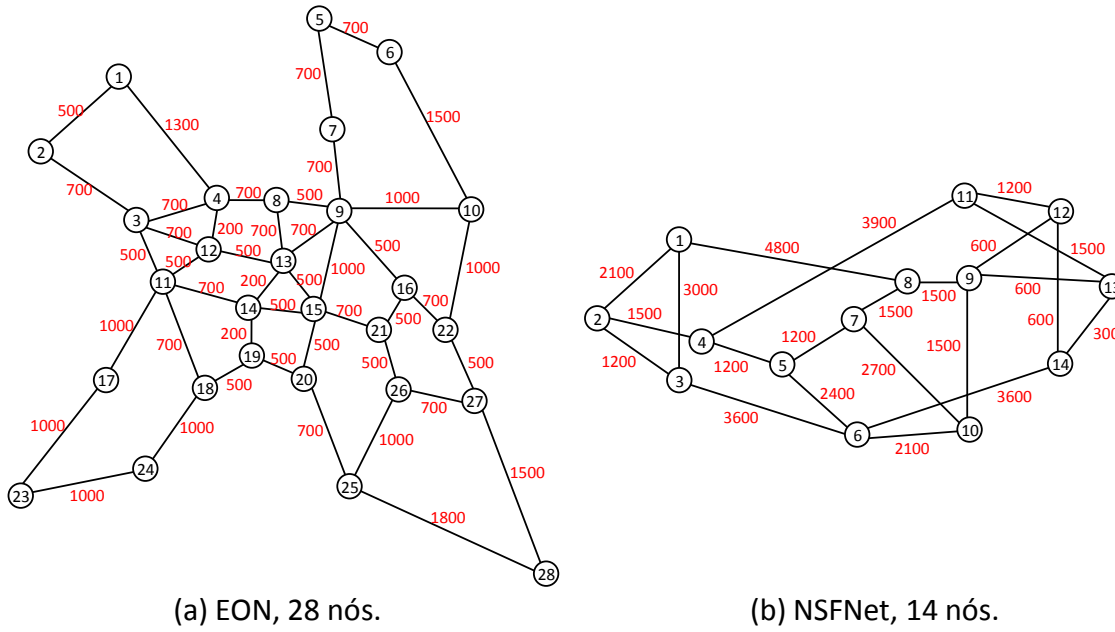


Figura 12 – Topologias usadas no estudo de avaliação de desempenho. O número em cada enlace corresponde a distância em km.

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 (SNR_{QoT}) e níveis estão listados na Tabela 3 presente na Seção 3.2. Para 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 *Forward Error Correction* (FEC) F é utilizada a Equação 4.1 (GAO et al., 2014):

$$B_i = \frac{1.1B_n(1+F)}{2 \log_2 L_m}. \quad (4.1)$$

Depois encontra-se um número inteiro de slots de frequência que cobre 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). Os 7% da FEC correspondem à transmissão adicional de bits juntamente com os bits de dados. Esses bits adicionais transportam informação redundante e são utilizados pelo receptor para corrigir a maiorias dos erros nos bits de dados transmitidos (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2009).

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 4 (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015).

Tabela 4 – Parâmetros de camada física utilizados nas simulações.

Descrição	Valor
Potência na saída do transmissor (P_{TX})	0 dBm
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

4.2.1 Probabilidade de Bloqueio

A Figura 13 e as Tabelas 5 e 6 apresentam 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. Os valores utilizados para a carga na rede em cada topologia foram escolhidos para que a probabilidade de bloqueio ficasse abaixo de 10%. O valor entre parênteses no algoritmo **KSP-RQoTO**, Figura 13 e Tabelas 5 e 6, corresponde ao valor ideal para o σ . Observando a Figura 13 e as Tabelas 5 e 6, nota-se que sob os valores de carga analisados, o algoritmo **KSP-RQoTO** apresentou um melhor desempenho em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos do que os algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** para as duas topologias consideradas.

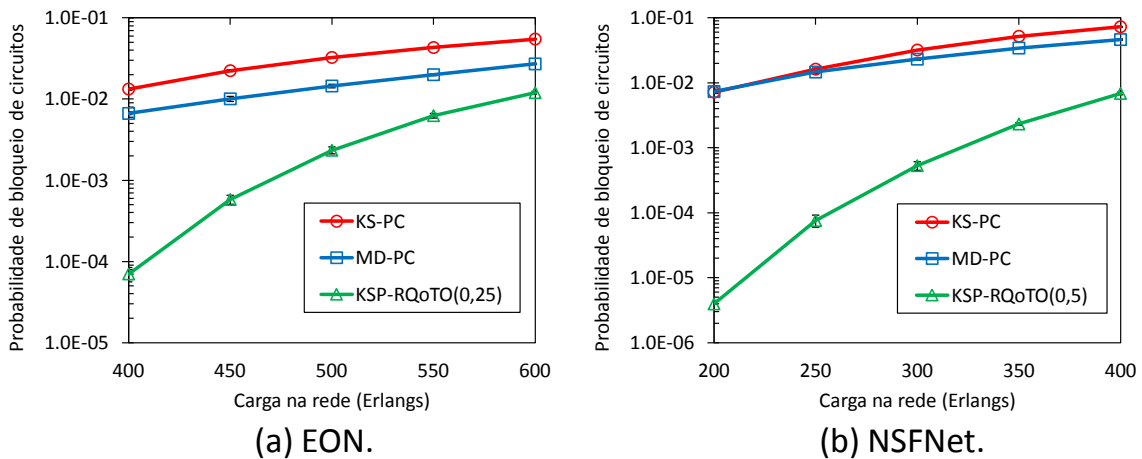


Figura 13 – Probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelos algoritmos **KS-PC**, **MD-PC** e **KSP-RQoTO** para as topologias (a) EON e (b) NSFNet.

Sob uma carga de 600 erlangs na topologia EON, Figura 13(a) e Tabela 5, os algoritmos **KS-PC**, **MD-PC** e **KSP-RQoTO** obtiveram 0,055, 0,027 e 0,012 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. Sob uma carga de 400 erlangs na topologia NSFNet, Figura 13(b) e Tabela 6, os algoritmos **KS-PC**, **MD-PC** e **KSP-RQoTO** alcançaram 0,073, 0,046 e 0,007 de probabilidade de bloqueio de circuito, respectivamente.

Tabela 5 – Probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,25) para a topologia EON.

Carga	KS-PC	MD-PC	KSP-RQoTO(0,25)
400	$1,33E-2 \pm 4,9E-4$	$6,65E-3 \pm 2,2E-4$	$7,03E-5 \pm 1,4E-5$
450	$2,23E-2 \pm 6,1E-4$	$1,01E-2 \pm 7,5E-4$	$5,80E-4 \pm 7,4E-5$
500	$3,26E-2 \pm 4,5E-4$	$1,43E-2 \pm 7,5E-4$	$2,34E-4 \pm 2,3E-4$
550	$4,31E-2 \pm 6,4E-4$	$2,00E-2 \pm 5,6E-4$	$6,25E-3 \pm 4,1E-4$
600	$5,47E-2 \pm 5,4E-4$	$2,71E-2 \pm 4,7E-4$	$1,20E-2 \pm 4,6E-4$

Tabela 6 – Probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,5) para a topologia NSFNet.

Carga	KS-PC	MD-PC	KSP-RQoTO(0,5)
200	$7,12E-3 \pm 3,6E-4$	$7,32E-3 \pm 3,6E-4$	$3,95E-6 \pm 100E-6$
250	$1,62E-2 \pm 6,5E-4$	$1,47E-2 \pm 6,3E-4$	$7,60E-5 \pm 1,6E-5$
300	$3,20E-2 \pm 5,3E-4$	$2,31E-2 \pm 8,4E-4$	$5,31E-4 \pm 8,1E-5$
350	$5,21E-2 \pm 1,0E-3$	$3,43E-2 \pm 4,3E-4$	$2,32E-3 \pm 1,0E-5$
400	$7,29E-2 \pm 9,6E-4$	$4,63E-2 \pm 1,1E-3$	$6,86E-3 \pm 3,2E-4$

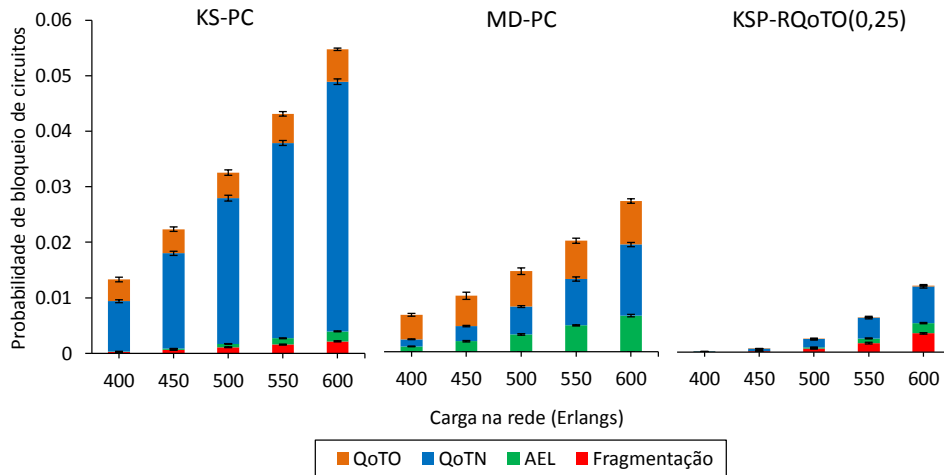
O ganho do algoritmo **KSP-RQoTO** em relação aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** foi de aproximadamente 90,59% e 85,18%, respectivamente.

A Figura 14 e as Tabelas 7, 8 e 9 exibem 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 no algoritmo **KSP-RQoTO**, Figura 14, corresponde ao valor ideal para o σ .

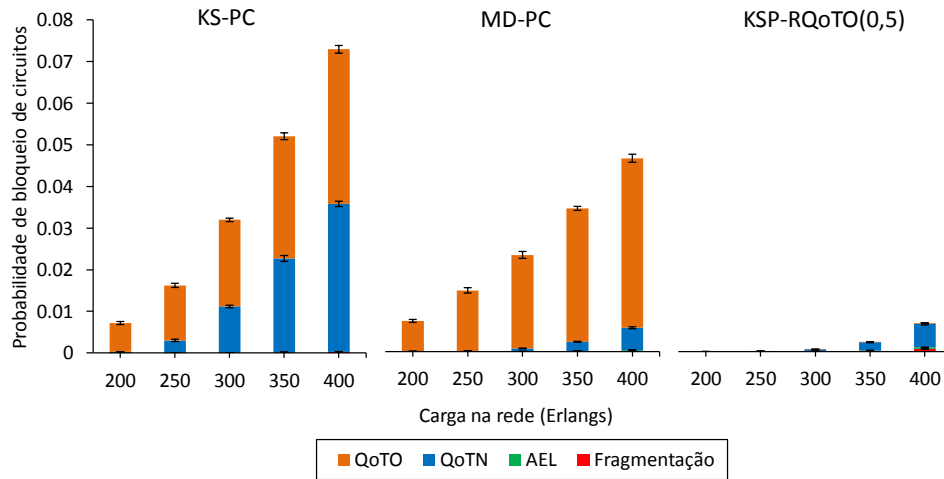
Tabela 7 – Componentes das probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelo algoritmo KS-PC para as topologias EON e NSFNet.

Carga	EON			
	QoTO	QoTN	AEL	Fragmentação
400	$3,91E-3 \pm 4,2E-4$	$9,05E-3 \pm 2,6E-4$	$9,78E-5 \pm 1,2E-5$	$2,28E-4 \pm 3,4E-5$
450	$4,35E-3 \pm 4,0E-4$	$1,72E-2 \pm 3,8E-4$	$2,43E-4 \pm 3,2E-5$	$5,97E-4 \pm 6,3E-5$
500	$4,60E-3 \pm 4,9E-4$	$2,63E-2 \pm 5,2E-4$	$6,16E-4 \pm 4,2E-5$	$1,09E-3 \pm 7,8E-5$
550	$5,25E-3 \pm 4,0E-4$	$3,52E-2 \pm 4,5E-4$	$1,12E-3 \pm 7,7E-5$	$1,57E-3 \pm 8,8E-5$
600	$5,84E-3 \pm 2,2E-4$	$4,50E-2 \pm 5,0E-4$	$1,80E-3 \pm 8,3E-5$	$2,15E-3 \pm 1,1E-4$
Carga	NSFNet			
	QoTO	QoTN	AEL	Fragmentação
200	$6,93E-3 \pm 3,7E-4$	$2,60E-4 \pm 4,7E-5$	$9,87E-7 \pm 1,9E-6$	$0,00E+0 \pm 0,0E+0$
250	$1,32E-2 \pm 5,0E-4$	$3,02E-3 \pm 2,8E-4$	$1,97E-6 \pm 2,6E-6$	$1,09E-5 \pm 6,7E-6$
300	$2,08E-2 \pm 4,2E-4$	$1,11E-2 \pm 3,1E-4$	$7,90E-6 \pm 7,5E-6$	$2,76E-5 \pm 1,2E-5$
350	$2,94E-2 \pm 8,1E-4$	$2,25E-2 \pm 7,1E-4$	$2,76E-5 \pm 1,3E-5$	$1,38E-4 \pm 2,4E-5$
400	$3,71E-2 \pm 9,2E-4$	$3,55E-2 \pm 6,4E-4$	$5,33E-5 \pm 1,2E-5$	$2,63E-4 \pm 4,7E-5$

Analisando as componentes da probabilidade de bloqueio quando os algoritmos **KS-PC**, **MD-PC** e **KSP-RQoTO** são aplicados na topologia EON, Figura 14(a) e Tabelas



(a) EON.



(b) NSFNet.

Figura 14 – 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.

7, 8 e 9, percebe-se que a componente **QoTN** é a principal responsável pelos bloqueios dos circuitos. Nota-se pela Figura 14(a) e pela Tabela 9 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 14(b) e nas Tabelas 7 e 8 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 14(b) e pela Tabela 9, 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 da razão da quantidade de banda bloqueada (somatório da largura de banda vezes

Tabela 8 – Componentes das probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelo algoritmo MD-PC para as topologias EON e NSFNet.

Carga	EON			
	QoTO	QoTN	AEL	Fragmentação
400	$4.40\text{E-}3 \pm 2.6\text{E-}4$	$1.28\text{E-}3 \pm 7.1\text{E-}5$	$9.74\text{E-}4 \pm 6.6\text{E-}5$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$
450	$5.45\text{E-}3 \pm 6.5\text{E-}4$	$2.72\text{E-}3 \pm 1.3\text{E-}4$	$1.90\text{E-}3 \pm 1.3\text{E-}4$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$
500	$6.35\text{E-}3 \pm 5.9\text{E-}4$	$5.01\text{E-}3 \pm 1.7\text{E-}4$	$3.13\text{E-}3 \pm 1.4\text{E-}4$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$
550	$6.88\text{E-}3 \pm 4.6\text{E-}4$	$8.33\text{E-}3 \pm 3.8\text{E-}4$	$4.75\text{E-}3 \pm 1.1\text{E-}4$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$
600	$7.83\text{E-}3 \pm 4.0\text{E-}4$	$1.28\text{E-}2 \pm 3.8\text{E-}4$	$6.51\text{E-}3 \pm 2.2\text{E-}4$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$
Carga	NSFNet			
	QoTO	QoTN	AEL	Fragmentação
200	$7.31\text{E-}3 \pm 3.6\text{E-}4$	$9.87\text{E-}6 \pm 5.8\text{E-}6$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$
250	$1.46\text{E-}2 \pm 6.4\text{E-}4$	$9.18\text{E-}5 \pm 1.5\text{E-}5$	$9.87\text{E-}7 \pm 1.9\text{E-}6$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$
300	$2.24\text{E-}2 \pm 8.3\text{E-}4$	$7.31\text{E-}4 \pm 7.3\text{E-}5$	$1.58\text{E-}5 \pm 7.2\text{E-}6$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$
350	$3.20\text{E-}2 \pm 4.8\text{E-}4$	$2.23\text{E-}3 \pm 9.8\text{E-}5$	$1.06\text{E-}4 \pm 3.2\text{E-}5$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$
400	$4.06\text{E-}2 \pm 9.6\text{E-}4$	$5.33\text{E-}3 \pm 2.2\text{E-}4$	$3.53\text{E-}4 \pm 3.3\text{E-}5$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$

Tabela 9 – Componentes das probabilidades de bloqueio de circuito obtidas pelo algoritmo KSP-RQoTO para as topologias EON e NSFNet.

Carga	EON			
	QoTO	QoTN	AEL	Fragmentação
400	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$	$4.84\text{E-}5 \pm 7.6\text{E-}6$	$3.80\text{E-}6 \pm 3.0\text{E-}6$	$1.80\text{E-}5 \pm 8.1\text{E-}6$
450	$1.90\text{E-}6 \pm 3.7\text{E-}6$	$4.09\text{E-}4 \pm 5.6\text{E-}5$	$4.94\text{E-}5 \pm 2.0\text{E-}5$	$1.20\text{E-}4 \pm 1.9\text{E-}5$
500	$1.04\text{E-}5 \pm 1.3\text{E-}5$	$1.50\text{E-}3 \pm 1.8\text{E-}4$	$2.53\text{E-}4 \pm 4.0\text{E-}5$	$5.83\text{E-}4 \pm 5.5\text{E-}5$
550	$2.66\text{E-}5 \pm 2.0\text{E-}5$	$3.78\text{E-}3 \pm 2.3\text{E-}4$	$8.44\text{E-}4 \pm 8.5\text{E-}5$	$1.60\text{E-}3 \pm 1.6\text{E-}4$
600	$9.40\text{E-}5 \pm 6.5\text{E-}5$	$6.68\text{E-}3 \pm 3.1\text{E-}4$	$1.86\text{E-}3 \pm 1.1\text{E-}4$	$3.36\text{E-}3 \pm 1.3\text{E-}4$
Carga	NSFNet			
	QoTO	QoTN	AEL	Fragmentação
200	$2.96\text{E-}6 \pm 4.1\text{E-}6$	$9.87\text{E-}7 \pm 1.9\text{E-}6$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$
250	$6.91\text{E-}6 \pm 7.7\text{E-}6$	$6.42\text{E-}5 \pm 8.8\text{E-}6$	$0.0\text{E+}0 \pm 0.0\text{E+}0$	$4.94\text{E-}6 \pm 6.0\text{E-}6$
300	$2.67\text{E-}5 \pm 2.0\text{E-}5$	$4.56\text{E-}4 \pm 6.5\text{E-}5$	$7.90\text{E-}6 \pm 3.9\text{E-}6$	$4.05\text{E-}5 \pm 1.5\text{E-}5$
350	$7.41\text{E-}5 \pm 2.1\text{E-}5$	$1.96\text{E-}3 \pm 1.1\text{E-}4$	$1.13\text{E-}4 \pm 1.8\text{E-}5$	$1.82\text{E-}4 \pm 2.5\text{E-}5$
400	$1.82\text{E-}4 \pm 5.2\text{E-}5$	$5.67\text{E-}3 \pm 2.4\text{E-}4$	$3.86\text{E-}4 \pm 6.5\text{E-}5$	$6.31\text{E-}4 \pm 4.8\text{E-}5$

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).

A Figura 15 e as Tabelas 10 e 11 apresenta as probabilidades de bloqueio de banda 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 no algoritmo KSP-RQoTO, Figura 15 e Tabelas 10 e 11, corresponde ao valor ideal para o σ .

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 0,105, 0,051 e 0,030, 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

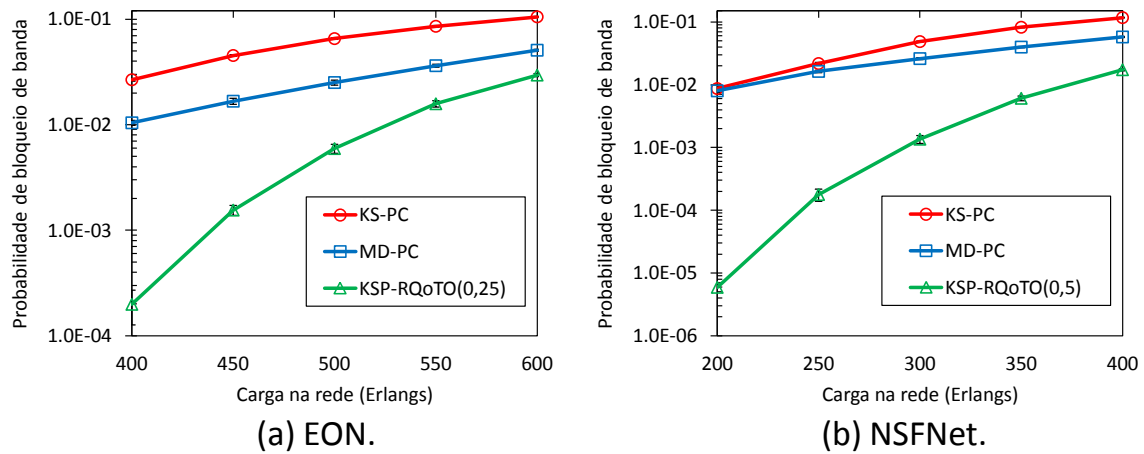


Figura 15 – Probabilidades de bloqueio de banda obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO para as topologias (a) EON e (b) NSFNet.

Tabela 10 – Probabilidades de bloqueio de banda obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,25) para a topologia EON.

Carga	KS-PC	MD-PC	KSP-RQoTO(0,25)
400	$2,67E-2 \pm 8,0E-4$	$1,04E-2 \pm 5,7E-4$	$1,98E-4 \pm 7,2E-5$
450	$4,53E-2 \pm 8,6E-4$	$1,67E-2 \pm 1,1E-4$	$1,55E-3 \pm 1,7E-4$
500	$6,55E-2 \pm 1,1E-3$	$2,51E-2 \pm 1,4E-3$	$5,95E-3 \pm 5,8E-4$
550	$8,58E-2 \pm 1,5E-3$	$3,63E-2 \pm 1,2E-3$	$1,58E-2 \pm 1,1E-3$
600	$1,05E-1 \pm 9,8E-4$	$5,09E-2 \pm 1,0E-3$	$2,96E-2 \pm 9,8E-4$

Tabela 11 – Probabilidades de bloqueio de banda obtidas pelos algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,5) para a topologia NSFNet.

Carga	KS-PC	MD-PC	KSP-RQoTO(0,5)
200	$8,68E-3 \pm 6,2E-4$	$7,98E-3 \pm 5,1E-4$	$5,90E-6 \pm 1,0E-6$
250	$2,17E-2 \pm 9,5E-4$	$1,63E-2 \pm 7,6E-4$	$1,73E-4 \pm 3,9E-5$
300	$4,87E-2 \pm 9,9E-4$	$2,61E-2 \pm 9,6E-4$	$1,35E-3 \pm 2,0E-4$
350	$8,23E-2 \pm 1,6E-3$	$3,98E-2 \pm 9,4E-4$	$6,08E-3 \pm 5,3E-4$
400	$1,17E-1 \pm 1,3E-3$	$5,76E-2 \pm 1,2E-3$	$1,73E-2 \pm 7,0E-4$

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 0,117, 0,058 e 0,017, 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 nas topologias EON e NSFNet.

4.2.2 Justiça

Em todos os cenários avaliados, o algoritmo **KSP-RQoTO** mostrou um desempenho superior quando comparados aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos. Essa métrica é uma média entre as probabilidades de bloqueio de cada par de nós origem e destino. Um valor baixo de probabilidade de bloqueio média não significa um desempenho satisfatório individualmente para cada par de nós origem e destino. Alguns pares podem apresentar baixa probabilidade de bloqueio em detrimento de outros com altas taxas desta mesma métrica. Por isso é relevante o uso de métricas auxiliares para quantificar a justiça na rede, ou seja, medir a diferença entre as probabilidades de bloqueio para cada par de nós origem e destino na rede.

A seguir os algoritmos **KS-PC**, **MD-PC** e **KSP-RQoTO** são avaliados em termos de justiça no atendimento dos diferentes pares de nós origem e destino da rede. Para isso foi utilizado o desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio obtidas para cada par de nós origem e destino. O desvio padrão representa como as probabilidades de bloqueio dos pares se distanciam da probabilidade de bloqueio média da rede.

A Figura 16 e as Tabelas 12 e 13 mostram o desempenho dos algoritmos **KS-PC**, **MD-PC** e **KSP-RQoTO** em termos do desvio padrão entre as probabilidade de bloqueio de circuito para cada par de nós origem e destino nas topologias EON e NSFNet. Como pode ser observado na Figura 16 e nas Tabelas 12 e 13, o algoritmo **KSP-RQoTO** mostra um menor desvio padrão quando comparado aos outros algoritmos analisados para ambas as topologias consideradas. Isto significa que o algoritmo **KSP-RQoTO** apresenta um maior nível de justiça no atendimento de diferentes pares de nós origem e destino na rede quando aplicado nas topologias EON e NSFNet em relação ao algoritmos **KS-PC** e **MD-PC**.

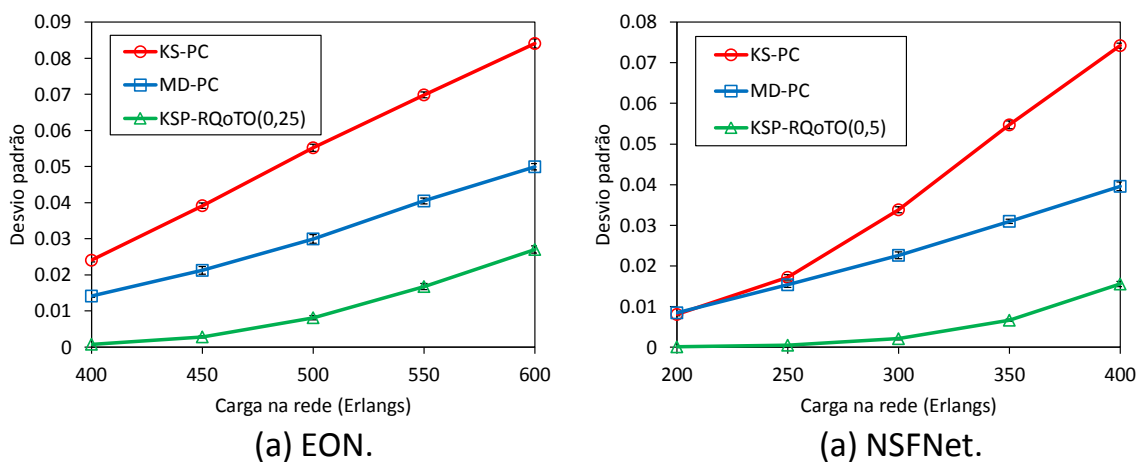


Figura 16 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de circuito obtidas para cada par de nós origem e destino para os algoritmos **KS-PC**, **MD-PC** e **KSP-RQoTO** nas topologias (a) EON e (b) NSFNet.

A Figura 17 e as Tabelas 14 e 15 exibem o desempenho dos algoritmos **KS-PC**,

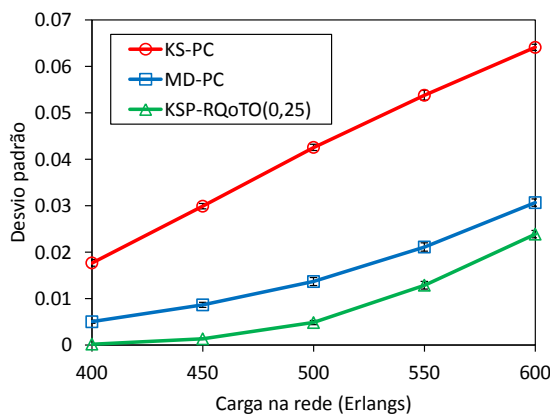
Tabela 12 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de circuito obtidas para cada par de nós origem e destino para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,25) na topologia EON.

Carga	KS-PC	MD-PC	KSP-RQoTO(0,25)
400	$2,41E-2 \pm 4,8E-4$	$1,41E-2 \pm 3,7E-4$	$7,79E-4 \pm 1,3E-4$
450	$3,92E-2 \pm 7,5E-4$	$2,12E-2 \pm 1,1E-3$	$2,81E-3 \pm 2,9E-4$
500	$5,52E-2 \pm 9,9E-4$	$3,00E-2 \pm 1,2E-3$	$8,13E-3 \pm 6,0E-4$
550	$6,99E-2 \pm 8,1E-4$	$4,05E-2 \pm 8,2E-4$	$1,68E-2 \pm 8,5E-4$
600	$8,41E-2 \pm 1,3E-3$	$4,99E-2 \pm 8,8E-4$	$2,70E-2 \pm 9,9E-4$

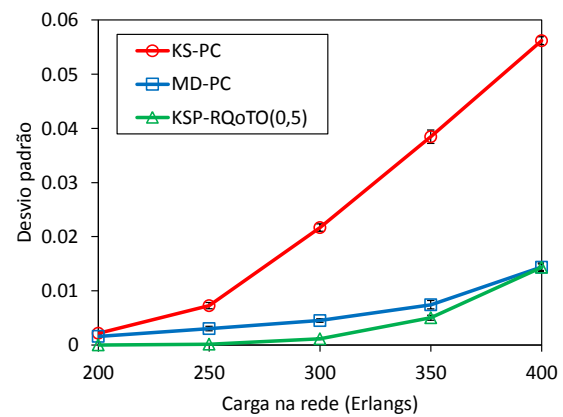
Tabela 13 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de circuito obtidas para cada par de nós origem e destino para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,5) na topologia NSFNet.

Carga	KS-PC	MD-PC	KSP-RQoTO(0,5)
200	$8,03E-3 \pm 3,5E-4$	$8,43E-3 \pm 3,3E-4$	$4,44E-5 \pm 4,6E-5$
250	$1,72E-2 \pm 6,6E-4$	$1,53E-2 \pm 6,6E-4$	$4,49E-4 \pm 8,0E-5$
300	$3,38E-2 \pm 7,4E-4$	$2,26E-2 \pm 8,4E-4$	$2,06E-3 \pm 3,0E-4$
350	$5,47E-2 \pm 9,6E-4$	$3,10E-2 \pm 5,3E-4$	$6,60E-3 \pm 2,9E-4$
400	$7,42E-2 \pm 6,2E-4$	$3,96E-2 \pm 1,1E-3$	$1,55E-2 \pm 6,4E-4$

MD-PC e KSP-RQoTO em termos do desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de banda para cada largura de banda nas topologias EON e NSFNet. Nota-se pela Figura 17(a) e pela Tabela 14 que o algoritmo KSP-RQoTO alcançou os menores valores para o desvio padrão em todos os pontos de carga quando aplicado na topologia EON. Ou seja, o algoritmo KSP-RQoTO apresentou um maior nível de justiça quando comparado aos algoritmos KS-PC e MD-PC na topologia EON.



(a) EON.



(a) NSFNet.

Figura 17 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de banda obtidas para cada largura de banda para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO nas topologias (a) EON e (b) NSFNet.

Analisando a Figura 17(b) e a Tabela 15, observa-se que o algoritmo KSP-RQoTO apresentou um desempenho superior em termos de justiça no atendimento de diferentes

Tabela 14 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de banda obtidas para cada largura de banda para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,25) na topologia EON.

Carga	KS-PC	MD-PC	KSP-RQoTO(0,25)
400	1,77E-2 ± 7,1E-4	5,00E-3 ± 3,4E-4	1,80E-4 ± 6,6E-5
450	2,99E-2 ± 5,8E-4	8,64E-3 ± 5,5E-4	1,32E-3 ± 1,5E-4
500	4,26E-2 ± 6,8E-4	1,37E-2 ± 8,6E-4	4,82E-3 ± 4,6E-4
550	5,38E-2 ± 1,0E-3	2,11E-2 ± 8,9E-4	1,29E-2 ± 8,2E-4
600	6,41E-2 ± 6,7E-4	3,07E-2 ± 7,8E-4	2,39E-2 ± 8,0E-4

Tabela 15 – Desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio de banda obtidas para cada largura de banda para os algoritmos KS-PC, MD-PC e KSP-RQoTO(0,5) na topologia NSFNet.

Carga	KS-PC	MD-PC	KSP-RQoTO(0,5)
200	2,17E-3 ± 3,4E-4	1,60E-3 ± 2,2E-4	8,39E-6 ± 1,1E-5
250	7,26E-3 ± 5,8E-4	3,03E-3 ± 4,2E-4	1,48E-4 ± 3,5E-5
300	2,17E-2 ± 6,8E-4	4,50E-3 ± 3,3E-4	1,15E-3 ± 1,6E-4
350	3,85E-2 ± 1,2E-3	7,43E-3 ± 7,8E-4	5,03E-3 ± 4,6E-4
400	5,62E-2 ± 7,2E-4	1,44E-2 ± 7,7E-4	1,43E-2 ± 6,0E-4

larguras de banda quando comparado ao algoritmo **KS-PC** para todos os pontos de cargas estudados na topologia NSFNet. Ainda na Figura 17(b) e na Tabela 15, o algoritmo **KSP-RQoTO** apresentou um melhor desempenho em termos de justiça no atendimento de diferentes larguras de banda quando comparado ao algoritmo **MD-PC** para a maioria dos pontos de cargas estudados na topologia NSFNet. Apenas para a carga de 400 Erlangs o algoritmo **KSP-RQoTO** alcançou o mesmo valor de desvio padrão que o algoritmo **MD-PC**.

Nas topologias EON e NSFNet existiram circuitos com rotas com no mínimo um salto e no máximo nove saltos. Circuitos ópticos que tendem a possuir rotas com muitos saltos (de sete a nove saltos) são mais propícios a possuírem uma maior probabilidade de bloqueio geral (composta por fragmentação, **AEL**, **QoTN** e **QoTO**). Quando circuitos com rotas com muitos saltos são estabelecidos são geradas degradações em uma quantidade maior de circuitos, em comparação a circuitos com rotas com poucos saltos (de um a três saltos). O estabelecimento de circuitos com rotas com muitos saltos pode levar a uma maior probabilidade de bloqueio por **QoTO**. O algoritmo **KSP-RQoTO** busca escolher a rota e a faixa de espectro de forma a alocar uma faixa de espectro mais próxima do início do espectro. Essa estratégia busca reduzir a fragmentação do espectro óptico na rede. A outra estratégia utilizada pelo algoritmo **KSP-RQoTO** é selecionar rotas que causam menos bloqueios do tipo **QoTO**. A combinação dessas duas estratégias aumentam as chances de circuitos que possuem rotas com muitos saltos serem estabelecidos. Dessa forma, o algoritmo **KSP-RQoTO** alcança um maior nível de justiça quando comparado aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** para os cenários estudados.

4.3 Considerações finais

Este capítulo apresentou 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 causando um menor impacto no **QoT** dos outros circuitos já ativos na rede. O algoritmo **KSP-RQoTO** apresentou um desempenho superior aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** em termos de probabilidade de bloqueio de circuito e probabilidade de bloqueio de banda nos cenários estudados.

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

Também foi realizado um estudo de avaliação de desempenho em termos de justiça no atendimento de diferentes pares de nós origem e destino e justiça no atendimento de diferentes larguras de banda. Para tal análise, o desvio padrão alcançado pelos algoritmos **KS-PC**, **MD-PC** e **KSP-RQoTO** foi comparado. Nesta avaliação, o algoritmo **KSP-RQoTO** demonstrou um melhor desempenho em termos de justiça quando comparado aos outros algoritmos.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

A rede óptica baseada na tecnologia **OFDM** foi proposta para superar o desperdício no uso do espectro óptico gerada pela tecnologia **WDM**. A tecnologia **OFDM** divide o espectro em slots de frequência que são alocados de acordo com a necessidade de largura da banda das requisições. Para a transmissão dos dados são estabelecidos circuitos ópticos. A resolução do problema de roteamento e alocação de espectro (**RSA**) é necessária a fim de estabelecer um circuito óptico. Nessas redes os algoritmos **RSA** devem levar em conta o nível de fragmentação de espectro gerado na rede e a **QoT** do circuito a ser estabelecido.

Neste trabalho foi apresentado um novo algoritmo **IA-RSA** para redes ópticas elásticas, chamado de **KSP-RQoTO**. O objetivo do algoritmo **KSP-RQoTO** é reduzir os bloqueios do tipo **QoTO**. O algoritmo **KSP-RQoTO** possui dois passos: i) Seleciona um formato de modulação para cada rota candidata buscando estabelecer circuitos mais resistentes a interferências de novos circuitos; ii) Seleciona uma rota entre as rotas candidatas evitando alocar rotas que acarretem em uma degradação maior em termos de **SNR** nos circuitos ópticos já ativos na rede.

Foi realizado um estudo de avaliação de desempenho, por meio de simulações, comparando o algoritmo **KSP-RQoTO** com outros dois algoritmos **IA-RSA**: **KS-PC** e **MD-PC**. O algoritmo **KSP-RQoTO** apresentou um desempenho superior aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos, probabilidade de bloqueio de banda, justiça no atendimento de diferentes pares de nós origem e destino e justiça no atendimento de diferentes larguras de banda.

Pelos resultados apresentados, percebe-se que o algoritmo **KSP-RQoTO** apresentou um desempenho superior aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos. O ganho mínimo, em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos, do algoritmo **KSP-RQoTO** em relação aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** foi de 78,10% e 55,75%, respectivamente, na topologia EON. Em termos de probabilidade de bloqueio de circuitos na topologia NSFNet, o ganho mínimo do algoritmo **KSP-RQoTO** em relação aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** foi de 90,59% e 85,18%, respectivamente.

Como o algoritmo **KSP-RQoTO** evita alocar rotas que acarretem em uma degradação nos circuitos ópticos mais frágeis em termos de **QoT** ocorre uma redução na componente **QoTO** da probabilidade de bloqueio. Esse comportamento fica mais evidente com a análise das componentes das probabilidades de bloqueio geral obtidas pelos algoritmos, que mostraram que o algoritmo **KSP-RQoTO** reduziu significativamente os bloqueios do tipo **QoTO** em relação aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC**.

Em termos de probabilidade de bloqueio de banda, o algoritmo **KSP-RQoTO**

também apresentou um desempenho superior aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC** quando aplicados às topologias EON e NSFNet. O algoritmo **KSP-RQoTO** obteve um ganho, em termos de probabilidade de bloqueio de banda, de pelo menos 71,96% e 41,89% em relação aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC**, respectivamente, na topologia EON. Para a topologia NSFNet, o algoritmo **KSP-RQoTO** obteve, em termos de probabilidade de bloqueio de banda, ganho mínimo de 85,22% e 69,94% em relação aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC**, respectivamente.

Foi realizado um estudo para avaliar o quão justos são os algoritmos **KSP-RQoTO**, **KS-PC** e **MD-PC** no atendimento de diferentes pares de nós origem e destino e no atendimento de diferentes larguras de banda. Neste estudo o desvio padrão entre as probabilidades de bloqueio foi utilizado como métrica. Os resultados demonstraram que o algoritmo **KSP-RQoTO** apresentou um melhor desempenho em termos de justiça quando comparado aos algoritmos **KS-PC** e **MD-PC**.

Circuitos ópticos que tendem a possuir rotas com muitos saltos (de sete a nove saltos) ao serem estabelecidos acabam por degradar outros circuitos e podem gerar uma maior probabilidade de bloqueio geral (composta por fragmentação, **AEL**, **QoTN** e **QoTO**). O algoritmo **KSP-RQoTO** utiliza estratégias que buscam selecionar a rota e a faixa de espectro de forma a alocar uma faixa de espectro mais próxima do início do espectro e escolher a rota que gera menos degradações nos outros circuitos já ativos na rede. Essas estratégias possibilitam o aumento do estabelecimento de circuitos que possuem rotas com muitos saltos. Desse modo, o algoritmo **KSP-RQoTO** alcança um maior nível de justiça em relação aos outros algoritmos **IA-RSA** considerados nesse estudo.

O algoritmo **KSP-RQoTO** estabelece o circuito óptico usando o algoritmo *First-Fit* para alocar os slots de frequência. Outros estudos podem ser conduzidos para avaliar o desempenho da nossa proposta usando um algoritmo de alocação de espectro que considera os efeitos de camada física. Em trabalhos futuros, nós pretendemos estudar o desempenho da nossa proposta em redes ópticas elásticas translúcidas.

Referências

- ALVES, T. M. F.; CARTAXO, A. V. T. Performance assessment of xpm-limited direct-detection short-reach dsb ofdm optical systems. *J. Opt. Commun. Netw.*, OSA, v. 7, n. 8, p. 736–747, Aug 2015. Disponível em: <<http://jocn.osa.org/abstract.cfm?URI=jocn-7-8-736>>. Citado na página 19.
- BEYRANVAND, H.; SALEHI, J. A quality-of-transmission aware dynamic routing and spectrum assignment scheme for future elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 18, p. 3043–3054, Sept 2013. ISSN 0733-8724. Citado 11 vezes nas páginas 4, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26 e 30.
- CHATTERJEE, B.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, PP, n. 99, p. 1–1, 2015. ISSN 1553-877X. Citado 15 vezes nas páginas 11, 13, 1, 2, 4, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 28 e 29.
- CHEN, X.; SHIEH, W. Closed-form expressions for nonlinear transmission performance of densely spaced coherent optical ofdm systems. *Opt. Express*, OSA, v. 18, n. 18, p. 19039–19054, Aug 2010. Disponível em: <<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-18-18-19039>>. Citado na página 19.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 9, p. 1354–1366, May 2011. ISSN 0733-8724. Citado 3 vezes nas páginas 4, 12 e 16.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *NUMERISCHE MATHEMATIK*, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959. Citado na página 12.
- ESSIAMBRE, R. et al. Capacity limits of optical fiber networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 28, n. 4, p. 662–701, Feb 2010. ISSN 0733-8724. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.
- FALLAHPOUR, A. et al. Energy efficient routing and spectrum assignment with regenerator placement in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 10, p. 2019–2027, May 2014. ISSN 0733-8724. Citado na página 29.
- FONTINELE, A. et al. Achievement of fair and efficient regenerator allocations in translucent optical networks using the novel regenerator assignment algorithm. *Optical Switching and Networking*, v. 19, Part 1, p. 22 – 39, 2016. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427715000879>>. Citado na página 4.
- GAO, G.; CHEN, X.; SHIEH, W. Analytical expressions for nonlinear transmission performance of coherent optical ofdm systems with frequency guard band. *Journal of Lightwave Technology*, v. 30, n. 15, p. 2447–2454, Aug 2012. ISSN 0733-8724. Citado na página 19.
- GAO, G.; CHEN, X.; SHIEH, W. Influence of pmd on fiber nonlinearity compensation using digital back propagation. *Opt. Express*, OSA, v. 20, n. 13, p. 14406–14418, Jun 2012.

Disponível em: <<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-20-13-14406>>. Citado na página 19.

GAO, G. et al. Influence of physical layer configuration on performance of elastic optical ofdm networks. *IEEE Communications Letters*, v. 18, n. 4, p. 672–675, April 2014. ISSN 1089-7798. Citado 4 vezes nas páginas 3, 19, 21 e 30.

GONG, L. et al. Efficient resource allocation for all-optical multicasting over spectrum-sliced elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 5, n. 8, p. 836–847, Aug 2013. ISSN 1943-0620. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 16.

IZQUIERDO-ZARAGOZA, J.-L.; PAVON-MARINO, P.; BUENO-DELGADO, M.-V. Distance-adaptive online rsa algorithms for heterogeneous flex-grid networks. In: *2014 International Conference on Optical Network Design and Modeling*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 204–209. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 16.

JINNO, M. 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, p. 138–145, August 2010. ISSN 0163-6804. Citado 3 vezes nas páginas 4, 10 e 16.

JOHANNISSON, P.; AGRELL, E. Modeling of nonlinear signal distortion in fiber-optic networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 23, p. 4544–4552, Dec 2014. ISSN 0733-8724. Citado 7 vezes nas páginas 11, 4, 5, 18, 19, 20 e 22.

LEIVA, A. et al. A joint rsa algorithm for dynamic flexible optical networking. In: *2014 IEEE Latin-America Conference on Communications (LATINCOM)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. Citado na página 15.

NATH, I.; CHATTERJEE, M.; BHATTACHARYA, U. A survey on regenerator placement problem in translucent optical network. In: *2014 International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 408–413. Citado 3 vezes nas páginas 1, 7 e 8.

POGGIOLINI, P. et al. A simple and effective closed-form gn model correction formula accounting for signal non-gaussian distribution. *J. Lightwave Technol.*, OSA, v. 33, n. 2, p. 459–473, Jan 2015. Disponível em: <<http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-33-2-459>>. Citado na página 19.

RAHBAR, A. G. Review of dynamic impairment-aware routing and wavelength assignment techniques in all-optical wavelength-routed networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 14, n. 4, p. 1065–1089, Fourth 2012. ISSN 1553-877X. Citado 6 vezes nas páginas 1, 2, 3, 11, 16 e 19.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K.; SASAKI, G. *Optical networks: a practical perspective*. 3rd. ed. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2009. ISBN 978-0-12-374092-2. Citado 3 vezes nas páginas 7, 21 e 30.

SANTOS, I. *Alocação de Recursos para o Estabelecimento de Circuitos em Redes Ópticas WDM e OFDM*. Teresina: Universidade Federal do Piauí, 2015. 88 p. Disponível em: <<https://dl.dropboxusercontent.com/u/58561826/dissertacoes/2015/Iallen2015.pdf>>. Citado 6 vezes nas páginas 11, 1, 2, 5, 12 e 29.

SARADHI, C. V.; SUBRAMANIAM, S. Physical layer impairment aware routing (pliar) in wdm optical networks: Issues and challenges. *Commun. Surveys Tuts.*, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 11, n. 4, p. 109–130, out. 2009. ISSN 1553-877X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/SURV.2009.090407>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 19 e 21.

SCHMOGROW, R. et al. Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 24, n. 1, p. 61–63, Jan 2012. ISSN 1041-1135. Citado na página 23.

SÓCRATES-DANTAS, J. et al. Challenges and requirements of a control plane for elastic optical networks. *Computer Networks*, v. 72, p. 156 – 171, 2014. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128614002618>>. Citado na página 3.

SHAFIK, R.; RAHMAN, S.; ISLAM, R. On the extended relationships among evm, ber and snr as performance metrics. In: *2006. ICECE '06. International Conference on Electrical and Computer Engineering*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 408–411. Citado na página 23.

SHEN, G.; TUCKER, R. Translucent optical networks: the way forward [topics in optical communications]. *IEEE Communications Magazine*, v. 45, n. 2, p. 48–54, Feb 2007. ISSN 0163-6804. Citado na página 7.

TALEBI, S. et al. Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey. *Optical Switching and Networking*, v. 13, p. 34 – 48, 2014. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427714000253>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 12.

WAN, X.; HUA, N.; ZHENG, X. Dynamic routing and spectrum assignment in spectrum-flexible transparent optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 4, n. 8, p. 603–613, Aug 2012. ISSN 1943-0620. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 16.

WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks. *Optical Switching and Networking*, v. 11, Part A, p. 83 – 91, 2014. ISSN 1573-4277. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427713000799>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 27.

WANG, Y. et al. Spectrum consecutiveness based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks. *Chinese Optics Letters*, 2012. Citado na página 15.

YAN, L. et al. Link-level resource allocation for flexible-grid nonlinear fiber-optic communication systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 27, n. 12, p. 1250–1253, June 2015. ISSN 1041-1135. Citado 3 vezes nas páginas 4, 5 e 22.

YANG, S.; KUIPERS, F. Impairment-aware routing in translucent spectrum-sliced elastic optical path networks. In: *2012 17th European Conference on Networks and Optical Communications (NOC)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.

YEN, J. Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, v. 17, n. 11, p. 712–716, 1971. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.17.11.712>>. Citado na página 17.

YIN, Y. et al. Spectral and spatial 2d fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks [invited]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 5, n. 10, p. A100–A106, Oct 2013. ISSN 1943-0620. Citado na página 15.

YIN, Y. et al. Fragmentation-aware routing, modulation and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks. In: *2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–3. Citado na página 15.

ZHAO, J.; WYMEERSCH, H.; AGRELL, E. Nonlinear impairment aware resource allocation in elastic optical networks. In: *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–3. Citado 8 vezes nas páginas 2, 4, 5, 16, 17, 18, 22 e 30.

ZHOU, X. et al. Dynamic rmsa in elastic optical networks with an adaptive genetic algorithm. In: *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2912–2917. ISSN 1930-529X. Citado 5 vezes nas páginas 11, 4, 9, 15 e 16.

ZHU, Z. et al. Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-/multi-path routing. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 1, p. 15–22, Jan 2013. ISSN 0733-8724. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 16.