



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

Realocação de Circuito Ciente de Imperfeições de Camada Física para Redes Ópticas Elásticas

Selles Gustavo Ferreira Carvalho Araújo

Teresina-PI, Agosto de 2019

Selles Gustavo Ferreira Carvalho Araújo

Realocação de Circuito Ciente de Imperfeições de Camada Física para Redes Ópticas Elásticas

Trabalho de 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

Agosto de 2019

Selles Gustavo Ferreira Carvalho Araújo

Realocação de Circuito Ciente de Imperfeições de Camada Física para Redes Ópticas Elásticas/ Selles Gustavo Ferreira Carvalho Araújo. – Teresina-PI, Agosto de 2019-

Orientador: André Castelo Branco Soares

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí – UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Agosto de 2019.

1. Redes Ópticas Elásticas. 2. Realocação de Circuito. I. André Castelo Branco Soares. II. Universidade Federal do Piauí. III. Realocação de Circuitos em Redes Ópticas Elásticas

CDU 02:141:005.7

“Realocação de Circuito ciente dos Efeitos de Camada Física em Redes Ópticas Elásticas”

SELLES GUSTAVO FERREIRA CARVALHO ARAÚJO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovada por:



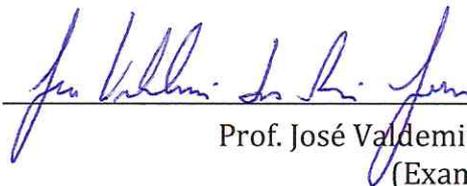
Prof. André Castelo Branco Soares
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof. Gustavo Bittencourt Figueiredo
(Examinador Externo à Instituição)



Prof. Erico Meneses Leão
(Examinador Interno)



Prof. José Valdemir dos Reis Júnior
(Examinador Interno)

Teresina, 12 de agosto de 2019

Dedico este trabalho à minha querida família e aos meus grandes amigos, por todo o apoio prestado e por ter me proporcionado sempre distrações maravilhosas. Dedico em especial a mim, por ter vencido todas as batalhas sem jamais perder o foco e a fé.

*“The greatest enemy of knowledge is not ignorance,
it is the illusion of knowledge.”
(Stephen Hawking)*

Resumo

As redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks* – EONs) têm se tornado alternativa promissora para lidar com o crescente tráfego de dados. As EONs proporcionam flexibilidade no atendimento de requisições com diferentes larguras de banda, permitindo eficiência na utilização dos recursos da rede. Os recursos para um novo circuito são alocados a partir de algoritmos RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*). Estes algoritmos possibilitam a definição da rota, a escolha do formato de modulação e a seleção da faixa de espectro. Além disso, os circuitos devem apresentar qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* – QoT) aceitáveis para operar. Quando os requisitos de alocação não são atendidos, as requisições de circuitos são bloqueadas. As principais causas de bloqueio ocorrem devido ao impacto das imperfeições de camada física (*Physical Layer Imperfections* – PLI). Para mitigar estes bloqueios, realocações de circuitos podem ser realizadas no intuito de reduzir o impacto causado pelas PLI em um ou mais enlaces, contribuindo para maior atendimento de requisições na rede. Neste contexto, esta dissertação propõe o uso de realocação de circuito para redução de bloqueios por imperfeições da camada física, problema denominado *Circuit Reallocation aware of PLI* (CR-PLI), e três estratégias de realocação para solucionar tal problema. As estratégias são: R-RQoT (Realocação de Circuito para Redução de Bloqueios relacionados à QoT), CRS-PL (*Circuit Reallocation Strategy - Physical Layer*) e JOC (*Just One Circuit Reallocation*). As estratégias propostas foram comparadas entre si e com outra estratégia de realocação comumente utilizada na literatura. Para avaliação de desempenho, foram utilizadas as métricas de probabilidade de bloqueio de banda, probabilidade de bloqueio de circuito e número médio de circuitos realocados nas topologias USA e EON.

Palavras-chaves: Redes Ópticas Elásticas. Realocação de Circuitos Ópticos. Qualidade de Transmissão.

Abstract

Elastic optical networks (EONs) have become a promising alternative to handle growing data traffic. The EONs provide flexibility in meeting requests with different bandwidths, allowing efficient use of network resources. The resources for a new circuit are allocated from RMLSA (Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment) algorithms. These algorithms allow the route definition, the choice of the modulation format and the spectrum band selection. In addition, the circuits must have transmission quality (QoT) acceptable to operate. When the allocation requirements are not met, the circuit requests are blocked. The main causes of request blocking are due to the impact of physical layer imperfections (PLI). To mitigate these blockages, circuit reallocations can be performed to reduce the impact caused by PLI on one or more links, contributing to a higher attendance of requests in the network. In this context, this dissertation proposes the use of reallocation of circuits to reduce blockages due to imperfections of the physical layer, a problem called Circuit Reallocation aware of the PLI (CR-PLI), and three reallocation strategies to solve this problem. The strategies are: R-RQoT (Circuit Relocation for Reduction of QoT Related Locks), CRS-PL (Physical Layer-aware Circuit Reallocation Strategy) and JOC (Circuit Relocation Only). The proposed strategies were compared with each other and with another reallocation strategy commonly used in the literature. For performance evaluation, we used the metrics of bandwidth blocking probability, circuit blocking probability and average number of circuits reallocated in the USA and EON topologies.

Keywords: Elastic Optical Networks. Circuit Reallocation. Quality of Transmission.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo da divisão do espectro óptico nas EONs.	5
Figura 2 – Exemplo de espectro óptico ocupado por circuitos de diferentes larguras de banda em uma rede óptica elástica.	6
Figura 3 – Espectro com ocupações espectrais para exemplificar as restrições de (a) contiguidade e (b) continuidade do espectro.	8
Figura 4 – Cenário com fragmentação do espectro óptico.	9
Figura 5 – Crescimento de ruído no sinal óptico ao longo da propagação.	13
Figura 6 – Fluxo do processo de estabelecimento de um novo circuito levando em conta os efeitos de camada física.	14
Figura 7 – Cenário de rede (a) antes e (b) após o processo de desfragmentação do espectro.	17
Figura 8 – Rerroteamento e reatribuição espectral em um processo de desfragmentação de espectro.	20
Figura 9 – Principais técnicas de migração de tráfego de dados para redes ópticas elásticas.	21
Figura 10 – Probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos RMLSA considerados neste estudo para a topologia EON.	28
Figura 11 – Probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos RMLSA considerados neste estudo para a topologia USA.	29
Figura 12 – Exemplo do problema CR-PLI. Cenário de rede (a) antes e (b) depois da realocação de circuito para redução dos impactos causados por efeitos de camada física.	30
Figura 13 – Funcionamento da estratégia de realocação de circuitos R-RQoT.	32
Figura 14 – Funcionamento da estratégia de realocação de circuitos CRS-PL.	33
Figura 15 – Funcionamento da estratégia de realocação de circuito JOC.	34
Figura 16 – Topologias de rede utilizadas nas simulações: (a) USA e (b) EON.	38
Figura 17 – Resultados de PBB das estratégias de realocação quando aplicadas ao algoritmo CS para as topologias USA e EON	41
Figura 18 – Resultados de PBB das estratégias de realocação quando aplicadas ao algoritmo KS-PC para as topologias USA e EON	42
Figura 19 – Resultados de PBB das estratégias de realocação quando aplicadas ao algoritmo KSP-RQoTO para as topologias USA e EON	42
Figura 20 – Resultados de PBB das estratégias de realocação quando aplicadas ao algoritmo MD-PC para as topologias USA e EON	43

Figura 21 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmo CS (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia JOC (CS+JOC) na topologia USA	45
Figura 22 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmo KS-PC (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia JOC (KS-PC+JOC) na topologia USA	45
Figura 23 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmo KSP-RQoTO (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia JOC (KSP-RQoTO+JOC) na topologia USA	46
Figura 24 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmo MD-PC (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia JOC (MD-PC+JOC) na topologia USA	47
Figura 25 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmo CS (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia JOC (CS+JOC) na topologia EON	47
Figura 26 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmos KS-PC (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia JOC (KS-PC+JOC) na topologia EON	48
Figura 27 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmos KSP-RQoTO (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia JOC (KSP-RQoTO+JOC) na topologia EON	49
Figura 28 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmos MD-PC (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia JOC (MD-PC+JOC) na topologia EON	49
Figura 29 – Valores de NCR para a topologia USA no cenário (a) CS, (b) KS-PC, (c) KSP-RQoTO e (d) MD-PC.	50
Figura 30 – Valores de NCR para a topologia EON no cenário (a) CS, (b) KS-PC, (c) KSP-RQoTO e (d) MD-PC.	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Efeitos de camada física.	12
Tabela 2 – Formatos de Modulação.	13
Tabela 3 – Trabalhos categorizados por tipo de gatilho.	19
Tabela 4 – Características das técnicas de migração de circuitos ópticos. Tabela adaptada de CHATTERJEE; BA; OKI 2018.	22
Tabela 5 – Trabalhos de desfragmentação <i>non hitless</i>	23
Tabela 6 – Trabalhos de desfragmentação <i>hitless</i>	24
Tabela 7 – Trabalhos de desfragmentação utilizando sobrevivência de redes	25
Tabela 8 – Cenários de avaliação para cada algoritmo de alocação de recurso na topologia USA.	38
Tabela 9 – Parâmetros de camada física usados nas simulações.	39
Tabela 10 – Nomenclatura utilizada para representação das estratégias de realocação de circuito em um cenário que utiliza o algoritmo de alocação CS.	40

Lista de abreviaturas e siglas

AEL	Ausência de Espectro Livre
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase-Shift Keying</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CR-PLI	<i>Circuit Reallocation aware of PLI</i>
CRS-PL	<i>Circuit Reallocation Strategy - Physical Layer</i>
CS	<i>Complete Sharing</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
ENF	Estado Normal de Funcionamento da rede
EONs	<i>Elastic Optical Networks</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FMA	<i>Fragmentation and Misalignment-Aware</i>
Frag	Fragmentação
FWM	<i>Four-Wave Mixing</i>
HUSIF	<i>Highest Used Slot-Index First</i>
JOC	<i>Just One Circuit Reallocation</i>
KSP	<i>K-Shortest Path</i>
KS-PC	<i>K-Shortest Path Computation</i>
KSP-RQoTO	<i>K-Shortest Path with Reduction of QoTO</i>
MbB	<i>Make-before-Break</i>
MD-PC	<i>Modified Dijkstra Path Computation</i>
MFUSF	<i>Most Frequently Used Slot First</i>

MMUSI	<i>Minimum Maximum Used Slot Index</i>
NCR	Número médio de Circuitos Realocados
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PBB	Probabilidade de Bloqueio de Banda
PBC	Probabilidade de Bloqueio de Circuito
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PLI	<i>Physical Layer Imperfections</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoT	<i>Quality of Transmission</i>
QoTN	QoT inaceitável para o Novo circuito óptico
QoTO	QoT inaceitável para os Outros circuitos ópticos
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RMLSA	<i>Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation</i>
R-RQoT	Realocação de circuitos para Redução de bloqueios relacionados à QoT.
SNetS	<i>SLICE Network Simulator</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SPM	<i>Self-Phase Modulation</i>
XPM	<i>Cross-Phase Modulation</i>

Lista de símbolos

B_s	Quantidade de <i>bits</i> por símbolo
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
Δ_f	Largura de banda do canal óptico
P_{tx}	Potência de sinal
K	Número de rotas candidatas
λ	Taxa média de geração de requisições
μ	Inverso do tempo médio de retenção dos circuitos
ρ	Intensidade de tráfego na rede em <i>Erlangs</i>
R_c	Rotas Candidatas
C	Conjunto de circuitos ativos
Req_{IB}	Requisição Iminente de Bloqueio
N	Conjunto de nós da rede
E	Conjunto de enlaces da rede
M	Conjunto de formatos de modulação
S	Conjunto de slots de frequência
W	Complexidade computacional do algoritmo de alocação

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização da Dissertação	3
1.4	Contribuições Científicas	3
2	REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS	5
2.1	Conceitos e Características	5
2.2	Problema RMLSA	6
2.3	Fragmentação	8
2.4	Camada Física	10
2.4.1	Efeitos de camada física	10
2.4.2	Informações sobre o modelo de camada física	12
2.5	Considerações Parciais	14
3	REALOCAÇÃO DE CIRCUITO PARA DESFRAGMENTAÇÃO DE ESPECTRO	17
3.1	Processo de Desfragmentação do Espectro	17
3.1.1	Momento da execução da desfragmentação (Gatilho)	18
3.1.2	Seleção de circuitos	19
3.1.3	Definição da nova solução RMLSA	20
3.1.4	Técnicas de migração de tráfego de dados	21
3.2	Trabalhos Relacionados	23
3.3	Considerações Parciais	25
4	REALOCAÇÃO DE CIRCUITO PARA REDUÇÃO DOS IMPACTOS DAS IMPERFEIÇÕES DE CAMADA FÍSICA	27
4.1	Introdução	27
4.2	Problema CR-PLI	28
4.3	Soluções CR-PLI	31
4.3.1	R-RQoT - Realocação de Circuito para Redução de Bloqueios relacionados à Qualidade de Transmissão	31
4.3.2	CRS-PL - <i>Circuit Reallocation Strategy - Physical Layer</i>	33
4.3.3	JOC - <i>Just One Circuit Reallocation</i>	34
4.4	Considerações Parciais	36

5	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	37
5.1	Parâmetros de Simulação	37
5.2	Resultados Numéricos	39
5.2.1	Probabilidade de Bloqueio de Banda	40
5.2.2	Probabilidade de Bloqueio de Circuito	44
5.2.3	Número médio de Circuitos Realocados	50
5.3	Considerações Parciais	52
6	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	55

1 Introdução

O tráfego de dados na Internet aumenta de forma significativa devido a diversos fatores. Segundo a [INDEX \(2018\)](#), os principais fatores do crescimento do tráfego são: o aumento no número de dispositivos móveis, de usuários na Internet, do número de aplicações de vídeo em tempo real, dentre outros. Neste contexto, é necessário que as redes de transporte apresentem infraestruturas capazes de suportar a demanda de tráfego exigida, mantendo a robustez, a escalabilidade e a eficiência na utilização dos recursos.

Os requisitos exigidos para lidar com o aumento e a heterogeneidade do tráfego de dados na Internet são encontrados nas redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks – EONs*) ([TOMKOS et al., 2014](#); [OKI](#); [CHATTERJEE, 2017](#)). As EONs surgiram como alternativa promissora para lidar com as necessidades e exigências do tráfego atual e do futuro. Elas apresentam características como flexibilidade no atendimento de requisições de diferentes larguras de banda, permitindo maior acomodação de circuitos na rede.

O gerenciamento do espectro óptico das EONs ocorre a partir da utilização da técnica *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) ([CHANG; GIBBY, 1968](#); [CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015](#)). A técnica OFDM divide o espectro óptico em pequenos intervalos de frequência denominados *slots*. Esta divisão proporciona acomodação mais justa das requisições comparada às redes tradicionais, evitando a subutilização e/ou superprovisionamento de espectro.

Para a transmissão de dados nas EONs, é necessário solucionar o problema de Roteamento, Nível de Modulação e Alocação Espectral (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment – RMLSA*) ([CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARI-GOS, 2011](#); [CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015](#); [COSTA; DRUMMOND, 2016](#)). O problema RMLSA consiste na definição de recursos para um novo circuito óptico e é solucionado a partir de algoritmos RMLSA. O algoritmo RMLSA é aplicado em cada requisição a ser estabelecida, buscando a otimização e eficiência na utilização dos recursos da rede.

Outro problema comum nas EONs é a fragmentação do espectro óptico, especialmente quando é considerado tráfego dinâmico. A fragmentação é potencializada pelos sucessivos estabelecimentos e finalizações dos circuitos na rede, provocando eventualmente o bloqueio de requisições ([HOROTA; FIGUEIREDO; FONSECA, 2014](#); [CHATTERJEE; BA; OKI, 2018](#)). Os bloqueios por fragmentação podem ser minimizados a partir de algoritmo de desfragmentação do espectro, que tipicamente realocam alguns circuitos já ativos para tornar o espectro contíguo ([ZHANG et al., 2013a](#); [ZHANG et al., 2014](#)).

Além de desfragmentar o espectro óptico, as realocações podem reduzir impactos

dos efeitos de camada física (*Physical Layer Imperfections* – PLI) na rede (ARAUJO et al., 2018a). A consequência dessas realocações, por exemplo, é que as interferências dos circuitos estabelecidos em novas requisições podem ser diminuídas. Isto contribui para que novas demandas de tráfego apresentem qualidade de transmissão (*Quality of Transmission* – QoT) aceitáveis para operar, permitindo seu estabelecimento e reduzindo a probabilidade de bloqueio geral de circuito na rede.

Esta dissertação endereça o problema de realocação de circuitos para redução de bloqueios de camada física, denominado *Circuit Reallocation aware of PLI* (CR-PLI). Para solucionar o problema CR-PLI, foram propostas as seguintes estratégias: R-RQoT (Realocação de Circuito para Redução de Bloqueios relacionados à QoT), CRS-PL (*Circuit Reallocation Strategy - Physical Layer*) e JOC (*Just One Circuit Reallocation*). As estratégias foram comparadas entre si e com outra estratégia de realocação comumente utilizada na literatura. Para avaliação de desempenho, foram utilizadas as métricas de Probabilidade de Bloqueio de Banda (PBB), Probabilidade de Bloqueio de Circuito (PBC) e Número médio de Circuitos Realocados (NCR) nas topologias USA e EON.

1.1 Motivação

Neste trabalho, as imperfeições de camada física são levadas em conta para o estabelecimento de requisições e, portanto, o cenário de rede se torna mais realístico comparado aos demais trabalhos da literatura que envolvem realocação de circuito. Neste cenário mais realístico, identificou-se que os bloqueios de requisições devido à camada física são mais significativos comparados aos demais tipos de bloqueios. Portanto, os trabalhos que utilizam realocação de circuito para desfragmentar o espectro (TAKAGI et al., 2011; WANG et al., 2012a; ZHANG et al., 2013a; CUGINI et al., 2013; ZHANG et al., 2014; BA; CHATTERJEE; OKI, 2017) não são apropriados para minimizar bloqueios por camada física.

Neste contexto, surge a necessidade de propor estratégias de realocação de circuito cientes de PLI. Essas estratégias buscam realocar circuito no intuito de mitigar o impacto dos efeitos da camada física nos enlaces da topologia de rede adotada. Em consequência disto, bloqueios por camada física são reduzidos, proporcionando uma diminuição na probabilidade de bloqueio geral de circuito (ARAUJO et al., 2018a; ARAUJO et al., 2018b).

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo apresentar e detalhar o problema *Circuit Reallocation aware of PLI* (CR-PLI). Além disso, visando solucionar o problema CR-PLI,

esta dissertação propõe o uso de estratégias de realocação de circuito, buscando reduzir principalmente bloqueios por camada física. Dessa forma, a utilização das estratégias de realocação de circuito contribui para a diminuição considerável da probabilidade de bloqueio geral da rede.

1.3 Organização da Dissertação

O restante desta Dissertação está organizada da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta as principais características das redes ópticas elásticas. Expõe conceitos sobre o problema de roteamento, escolha do formato de modulação e alocação de espectro. Apresenta e detalha as restrições de continuidade e contiguidade do espectro. Aponta as principais causas do problema da fragmentação do espectro óptico. Por fim, discute de maneira sucinta os efeitos de camada física considerados pelo modelo de camada física adotado neste trabalho.

O Capítulo 3 define e discute as etapas de realocação de circuito com o objetivo de desfragmentar o espectro óptico. Elenca os principais trabalhos de desfragmentação da literatura apresentando suas contribuições. Por fim, são apresentadas considerações relacionadas ao referido capítulo.

O capítulo 4 detalha o problema *Circuit Reallocation aware of* PLI (CR-PLI) e para solucionar tal problema, três soluções (R-RQoT, CRS-PL e JOC) foram propostas. As soluções buscam reduzir bloqueios por camada física, reduzindo conseqüentemente a probabilidade de bloqueio geral da rede.

O capítulo 5 apresenta um estudo de avaliação de desempenho comparando as estratégias propostas entre si e com outra estratégia comumente utilizada na literatura. A análise dos resultados é feita a partir das métricas de probabilidade de bloqueio de banda, probabilidade de bloqueio de circuito e número médio de circuitos realocados.

O Capítulo 6 discute as conclusões relacionadas a este trabalho de mestrado.

1.4 Contribuições Científicas

Durante o decorrer deste trabalho de mestrado, o problema CR-PLI tem sido identificado e estratégias para solucionar tal problema foram propostas e publicadas.

- ARAÚJO, S. G. F. C.; BARBOSA, E. L. V.; REIS JUNIOR, J. V.; SOARES, A. C. B.. Realocação de Circuitos para Redução de Bloqueio por Camada Física nas Redes Ópticas Elásticas. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC), 2018, Campos do Jordão-SP, Brasil.

- ARAÚJO, S. G. F. C.; BARBOSA, E. L. V.; REIS JUNIOR, J. V.; SOARES, A. C. B.; FONTINELE, A. C.; CAMPELO, D. R.. Circuit Reallocation Strategy Aware of the Physical Layer Effects for Elastic Optical Networks. In: IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), 2018, Natal-RN, Brasil.

2 Redes Ópticas Elásticas

Este capítulo apresenta uma visão geral das EONs, bem como os problemas típicos deste tipo de rede. A Seção 2.1 apresenta características das EONs e ilustra seu funcionamento. A Seção 2.2 detalha o problema RMLSA, apontando os requisitos necessários para o estabelecimento de nova requisição de circuito na rede. Além disso, a Seção 2.3 mostra o problema da fragmentação do espectro e suas principais métricas de medição. Por fim, a Seção 2.4 elenca os principais efeitos de camada física encontrados na literatura das EONs, categorizando-os em relação a dependência da potência de sinal do circuito.

2.1 Conceitos e Características

As redes ópticas elásticas utilizam, neste trabalho de dissertação, a técnica OFDM como alternativa à técnica tradicional de redes, já que o uso da OFDM realiza alocação de recurso mais eficiente (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). Neste tipo de rede, o espectro óptico é dividido em pequenos intervalos de frequência denominados *slots*. A Figura 1 apresenta um exemplo do espectro óptico dividido em dez (10) *slots* em uma rede óptica elástica.

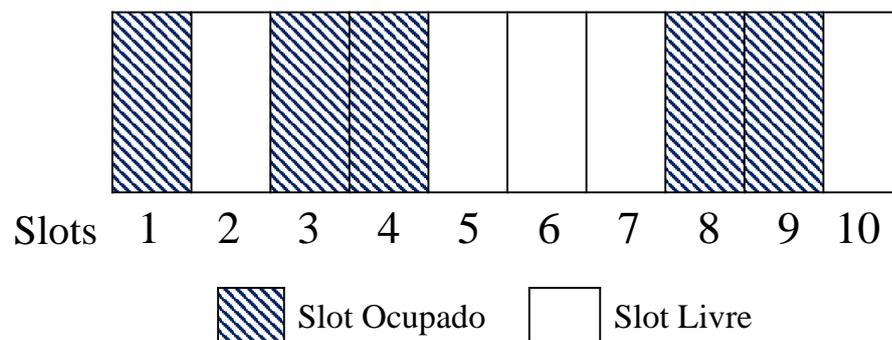


Figura 1 – Exemplo da divisão do espectro óptico nas EONs.

Como pode ser observado na Figura 1, cada *slot* pode ter dois estados distintos: “ocupado”, quando está sendo utilizado por um circuito, ou “livre” quando está disponível para ser usado no estabelecimento de uma nova requisição de circuito.

Durante o funcionamento das EONs, as requisições chegam na rede e, em seguida, verifica-se a disponibilidade de recursos livres para seus estabelecimentos. Caso existam recursos livres, o circuito é atendido. Caso contrário, a requisição é negada, caracterizando assim um bloqueio de requisição. Além disso, o recurso reservado para uma requisição varia de acordo com sua largura de banda. A partir da largura de banda, seleciona-se um

conjunto de *slots* de frequência para a transmissão das informações. A Figura 2 apresenta um exemplo de reserva de recursos nas EONs para requisições de circuitos com diferentes larguras de banda.

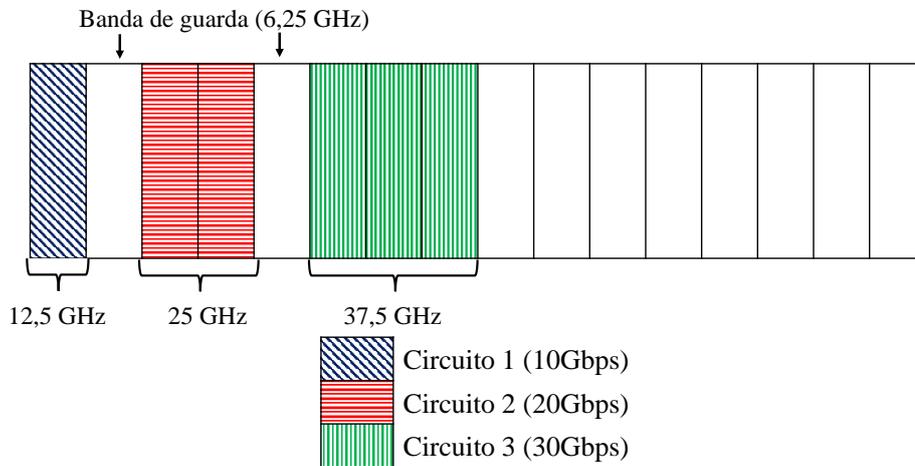


Figura 2 – Exemplo de espectro óptico ocupado por circuitos de diferentes larguras de banda em uma rede óptica elástica.

Na Figura 2 é ilustrado o estabelecimento de três circuitos distintos com larguras de banda diferentes. O estabelecimento dos circuitos é flexível e utiliza o número de *slots* necessário para atender a largura de banda requisitada. A escolha dos recursos para estabelecimento depende de algoritmos de alocação, no qual podem usar uma variedade de heurísticas. O objetivo desses algoritmos é otimizar a utilização do espectro óptico.

Vale ressaltar que, neste trabalho de mestrado, é utilizado banda de guarda entre os circuitos. A banda de guarda consiste de uma faixa espectral livre (geralmente 6,25 ou 12,5GHz) separando circuitos de um mesmo enlace, objetivando assim amenizar interferências entre circuitos estabelecidos na rede (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

2.2 Problema RMLSA

Para a transmissão de dados nas EONs é necessário solucionar o problema RMLSA (CHRISTODOULOPOULOS; TOMKOS; VARVARIGOS, 2011; CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015; COSTA; DRUMMOND, 2016). O problema RMLSA consiste em: i) definir uma rota para um par de nós origem-destino; ii) escolher um formato de modulação; e iii) selecionar uma faixa de espectro livre na rota definida. Além disso, é necessário que a QoT (FONTINELE et al., 2017) do novo circuito seja aceitável. Além disso, o estabelecimento do novo circuito na rede deve manter a QoT dos circuitos ativos também aceitáveis.

Para o subproblema de roteamento, as estratégias podem ser categorizadas em roteamento fixo, fixo alternativo e adaptativo (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015). No roteamento fixo, a rota é pré-computada para um dado par de nós origem-destino.

Dessa forma, retorna-se sempre a mesma rota para um par de nós e, geralmente, para o cálculo da rota utiliza-se um algoritmo de menor caminho, tal como o algoritmo de *Dijkstra* (DIJKSTRA, 1959).

No roteamento fixo alternativo, cada par de nós origem-destino contém uma lista ordenada com número fixo de rotas, no qual são computadas na fase *offline* da rede. Quando uma requisição chega no sistema, verifica-se se a primeira rota atende aos requisitos necessários para estabelecimento do circuito. Caso não atenda, a próxima rota é verificada até que seja alcançado o fim da lista.

Já no roteamento adaptativo, as rotas entre os pares origem-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 ativos e estado de utilização do espectro óptico.

Após solucionar o subproblema do roteamento, utiliza-se uma estratégia para selecionar o formato de modulação adequado para um novo circuito. O formato de modulação é escolhido a partir de uma lista de modulações ordenada e crescente sob o aspecto de eficiência espectral. Para viabilizar a escolha da modulação, calcula-se o número de *slots* de frequência com base na largura de banda requisitada e, em seguida, tenta-se alocar o espectro óptico referente ao número de *slots* calculado. O conhecimento da faixa de espectro óptico alocada do novo circuito faz-se necessário para que seja computada a interferência entre os circuitos ativos.

A estratégia de escolha da modulação também verifica a possibilidade de alocação de espectro respeitando as restrições do meio óptico para cada formato de modulação. Quando é possível alocar o espectro para uma requisição, computa-se a QoT para o formato de modulação considerando a rota já definida no subproblema de roteamento. Cada formato de modulação possui o seu respectivo limiar de QoT aceitável para o funcionamento adequado da transmissão. Logo, é avaliado cada formato de modulação para o novo circuito, sendo escolhido aquele que além de atender os requisitos de QoT (QoT do circuito maior ou igual ao limiar de QoT da modulação) utilize a menor quantidade de recurso possível (maior eficiência espectral) (FONTINELE et al., 2017).

Já o subproblema da alocação de espectro consiste em selecionar um conjunto de *slots* livres para o estabelecimento de uma requisição de circuito. A seleção do conjunto de *slots* é realizada a partir de políticas de alocação de espectro óptico. As principais políticas de alocação utilizadas comumente na literatura são: *First Fit*, *Last Fit*, *Best Fit* e *Random Fit* (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

A política de alocação *First Fit* busca selecionar o conjunto de *slots* mais próximo do início do espectro (menor índice). A estratégia *Last Fit* busca alocar o intervalo mais próximo do final do espectro óptico. Já na política *Best Fit*, o intervalo de *slots* selecionado

é aquele de mesmo tamanho da requisição. Caso não ocorra no espectro um intervalo de mesmo tamanho, é escolhido aquele de maior tamanho. Por fim, a estratégia *Random Fit* aloca o conjunto de *slots* de forma aleatória no espectro.

Importante realçar ainda que, a transmissão de dados ocorre totalmente em domínio óptico. Portanto, é necessário que as restrições de contiguidade e continuidade do espectro sejam atendidas para o estabelecimento de um circuito (COSTA; DRUMMOND, 2016). A restrição de contiguidade determina que os *slots* selecionados para um circuito devem ser adjacentes entre si. Já a restrição de continuidade exige que o conjunto de *slots* escolhidos deve ser o mesmo em todos os enlaces da rota definida.

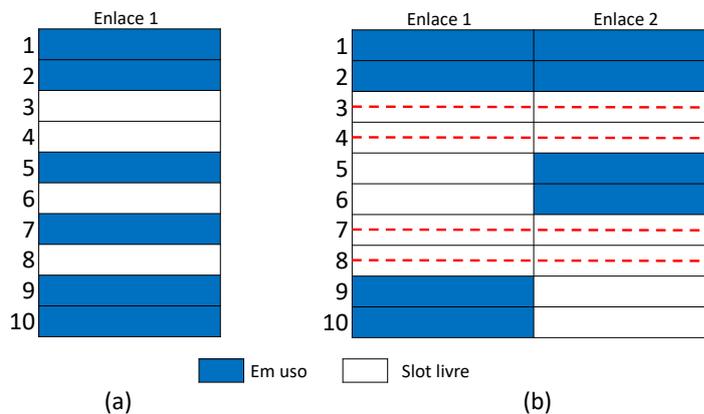


Figura 3 – Espectro com ocupações espectrais para exemplificar as restrições de (a) contiguidade e (b) continuidade do espectro.

A Figura 3 ilustra um exemplo das restrições do meio óptico. Na Figura 3(a), considerando uma rota composta apenas do Enlace 1, é possível estabelecer um circuito de 2 *slots* (*slots* 3 e 4), mas não seria possível o estabelecimento de uma requisição de 4 *slots*. Pois, o enlace possui 4 *slots* livres porém não adjacentes um ao outro, não atendendo a restrição de contiguidade do espectro. Já na Figura 3(b), cada enlace contém pelo menos 4 *slots* livres contíguos. Entretanto, apenas os *slots* 3, 4, 7 e 8 estão disponíveis simultaneamente em todos os enlaces. Neste exemplo (Figura 3(b)), não é possível estabelecer um circuito que necessite de 3 *slots* respeitando as restrições de continuidade e contiguidade de espectro.

2.3 Fragmentação

Em um cenário de rede dinâmico, as requisições chegam aleatoriamente na rede e são finalizadas após um período de tempo. Quando circuitos são finalizados e os recursos liberados, inevitavelmente são gerados pequenos blocos de *slots* não-contíguos, levando ao problema denominado de fragmentação do espectro óptico (HOROTA; FIGUEIREDO; FONSECA, 2014; CHATTERJEE; BA; OKI, 2018).

O problema da fragmentação de espectro é semelhante ao problema de fragmentação de memória em arquitetura de computadores (TOMKOS et al., 2014). A fragmentação de

memória ocorre com a alocação e liberação de dados ao longo do tempo, contribuindo para a geração de pequenas áreas livres distribuídas ao longo da memória. Uma consequência disto é que dados maiores não podem ser alocados em memória, mesmo existindo espaço livre suficiente.

Como a fragmentação de memória, a fragmentação de espectro também causa a utilização ineficiente de recursos da rede, impossibilitando o atendimento de futuras requisições e gerando bloqueios. Esses bloqueios são devido a falta de espectro contíguo disponível, proporcionando uma degradação do desempenho da rede e contribuindo para o aumento da probabilidade de bloqueio em cenários de redes com tráfegos dinâmicos.

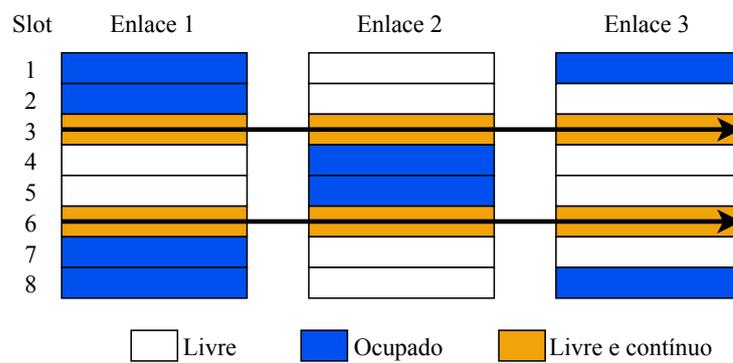


Figura 4 – Cenário com fragmentação do espectro óptico.

Para exemplificar a fragmentação do espectro óptico, a Figura 4 apresenta um exemplo considerando um cenário de rede com três enlaces de oito *slots* de frequência cada um. Os *slots* de frequência podem estar livres ou ocupados. Os *slots* ocupados são aqueles utilizados por circuitos estabelecidos na rede e os *slots* livres são aqueles que podem ser utilizados para a alocação de futuras requisições de circuito.

O estabelecimento de uma requisição de circuito com rota composta pelos 3 enlaces apresentados na Figura 4 e que necessita de 3 *slots* de frequência, não seria possível, ocorrendo um bloqueio de requisição. Este bloqueio é devido a fragmentação, pois existem 3 *slots* adjacentes em cada enlace que compõe a rota mas estes *slots* não possuem os mesmos índices, violando a restrição de continuidade de espectro. As restrições de contiguidade e continuidade contribuem para a ocorrência da fragmentação do espectro, já que para o estabelecimento de circuito elas necessitam ser atendidas.

Além disso, a fragmentação pode ser categorizada como horizontal ou vertical. Chama-se de fragmentação vertical aquela que impede o estabelecimento de circuitos devido à restrição de contiguidade de espectro. Um exemplo de fragmentação vertical é quando um circuito necessita ser estabelecido na rota composta do Enlace 2, exigindo 4 *slots* de frequência para o cenário da Figura 4. Já aquela que impede o estabelecimento de circuitos devido à restrição de continuidade de espectro é denominada de fragmentação horizontal (TALEBI et al., 2014).

Existem diversas formas de quantificar o problema da fragmentação como pode ser visto em Rosa et al. 2012. Uma forma comumente utilizada na literatura para quantificar o referido problema é a fragmentação externa, proposta por WILSON et al. 1995, denotada na Equação 2.1:

$$F_{ext} = 1 - \frac{\text{maiorBlocoLivreDeEspectro}}{\text{totalLivreDeSlots}}. \quad (2.1)$$

O parâmetro *maiorBlocoLivreDeEspectro* representa o número de *slots* do maior bloco contíguo livre do espectro, e o *totalLivreDeSlots* representa o número total de *slots* livres no enlace. Na Equação 2.1, quando a fragmentação externa é um (100%), significa que a faixa de espectro disponível está todo dividido em pequenos fragmentos. Em contrapartida, se o espectro está totalmente disponível, a fragmentação externa é zero (0%). Esta equação é válida desde que sempre exista um *slot* livre no espectro óptico.

Outra alternativa de quantificar a fragmentação do espectro leva em consideração a influência da largura de banda do circuito, ou seja, a fragmentação é maior quando os circuitos requerem maiores recursos espectrais. Este tipo de fragmentação é conhecida na literatura como fragmentação relativa e é denotada em função do número de *slots* necessário para atender uma determinada requisição, conforme mostra a Equação 2.2.

$$F(c) = 1 - \frac{c * \text{Livre}(c)}{\text{totalLivre}} \quad (2.2)$$

O parâmetro *c* corresponde ao número de *slots* de frequência requisitado por um circuito e *Livre(c)* é a função que retorna o número de requisições simultâneas de tamanho *c* que podem ser satisfeitas. Assim como na Equação 2.1, a Equação 2.2 é válida somente dentro da hipótese de que sempre haverá um *slot* disponível no espectro.

A fragmentação do espectro é um fator determinante para o desempenho da rede, visto que requisições de circuito podem ser bloqueadas devido a esse problema. Dessa forma, uma solução para mitigar a fragmentação no espectro é a execução de algoritmos de desfragmentação. Estes algoritmos buscam reorganizar circuitos ativos no intuito de gerar blocos de *slots* contíguos no espectro óptico, possibilitando o atendimento de futuras requisições de circuito. A desfragmentação será abordada de forma detalhada no Capítulo 3.

2.4 Camada Física

2.4.1 Efeitos de camada física

Naturalmente, ocorre uma degradação da qualidade do sinal óptico durante sua propagação da origem ao destino. Essa degradação é acumulada quando passa tanto nos

dispositivos da rede quanto nos próprios enlaces. Isto ocorre devido os efeitos de camada física e pode inviabilizar a comunicação, caso a BER (*Bit Error Rate*) fique intolerável no receptor (BEYRANVAND; SALEHI, 2013).

Na literatura, os efeitos de camada física podem ser categorizados em efeitos lineares, efeitos não lineares e outros efeitos (RAHBAR, 2012). Os efeitos lineares são independentes da potência do sinal óptico e afetam cada circuito separadamente (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009). Exemplos deste tipo de efeito são atenuação da fibra, dispersão cromática (*Chromatic Dispersion* - CD) e dispersão do modo de polarização (*Polarization Mode Dispersion* - PMD).

A atenuação da fibra pode ser definida como a perda de potência do sinal óptico ao longo da propagação pelos enlaces. Já a CD ocorre devido ao fato dos espectros de um sinal óptico não se propagarem com a mesma velocidade dentro da fibra. O efeito PMD acontece devido a irregularidades, como impurezas geradas no processo de fabricação da fibra, fazendo com que diferentes modos de polarização de um sinal óptico viajem em velocidades distintas (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009).

Os efeitos não lineares são fortemente dependentes da potência acumulada do sinal e da potência individual dos circuitos ópticos transportados em paralelo na mesma fibra, causando interferência nos circuitos individualmente e entre eles (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009). A auto-modulação de fase (*Self-Phase Modulation* - SPM), modulação de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation* - XPM) e mistura de quatro ondas (*Four-Wave Mixing* - FWM) são exemplos de efeitos não lineares.

O efeito SPM ocorre porque o índice de refração da fibra possui uma componente dependente de intensidade e 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. A XPM é o resultado da modulação de fase não linear de um pulso óptico causada pelas flutuações de intensidade de outros pulsos ópticos. Já a FWM ocorre quando sinais ópticos se propagam na mesma fibra simultaneamente e gera outro sinal óptico. Este efeito é fortemente depende do espaçamento entre circuitos (SARADHI; SUBRAMANIAM, 2009).

Já os efeitos da terceira categoria estão relacionados com os dispositivos ópticos presentes na rede ou ao estado atual da alocação dos circuitos (RAHBAR, 2012). Os principais efeitos desta categoria são o *crossstalk*, decorrente da incompleta isolamento dos circuitos pelos componentes ópticos, e a emissão espontânea amplificada, ruído gerado no momento da amplificação do sinal óptico. Na Tabela 1 são apresentados os efeitos de camada física mencionados para cada uma das categorias discutidas.

Além dos efeitos mencionados acima, vale citar também o efeito linear *Amplified Spontaneous Emission* (ASE) , também considerado neste trabalho de dissertação. O efeito

Tabela 1 – Efeitos de camada física.

Efeitos Lineares	Efeitos Não Lineares	Outros Efeitos
Atenuação na Fibra	Auto-Modulação de Fase	Crosstalk
Dispersão Cromática	Modulação de Fase Cruzada	Emissão
Dispersão do Modo de Polarização	Mistura de Quatro Ondas	Espontânea Amplificada

ASE corresponde ao ruído introduzido por amplificadores *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA). Os EDFA geralmente são utilizados para a amplificação do sinal óptico para que este restabeleça sua potência.

2.4.2 Informações sobre o modelo de camada física

Para este trabalho de mestrado, foi adotado o modelo de camada física proposto por (JOHANNISSON; AGRELL, 2014) e para mensurar a QoT dos circuitos ópticos, utilizou-se a relação sinal ruído (*Signal to Noise Ratio* - SNR). O cálculo do SNR de um circuito é definido pela seguinte Equação 2.3: (JOHANNISSON; AGRELL, 2014; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015; YAN et al., 2015)

$$SNR_i = \frac{I}{I_{ASE} + I_{NLI}} \quad (2.3)$$

O parâmetro I é a densidade espectral da potência do sinal (*Power Spectral Density* – PSD), definido por $I = P_{tx}/\Delta_f$, em que P_{tx} é a potência de sinal e Δ_f é a largura de banda do circuito. A PSD do ruído ASE (I_{ASE}) e dos ruídos não-lineares (I_{NLI}) são demonstrados com detalhes em (BEYRANVAND; SALEHI, 2013).

Após o cálculo do SNR para uma requisição, verifica-se se tal valor está dentro do limite aceitável exigido pela rede. Caso seja aceitável, o circuito é estabelecido por apresentar QoT satisfatória para operar. Além disso, as potências de sinal e ruído do SNR variam durante a propagação do sinal óptico ao longo dos enlaces e dispositivos de rede. A variação das potências das componentes do SNR, considerando a rota 1-2-3-4, é apresentada na Figura 5.

Observa-se na Figura 5 a redução da potência de transmissão do sinal e o crescimento da potência do ruído ao longo dos enlaces da rota. Ao avaliar a proporção de SNR ao longo da rota, o valor do SNR tende a diminuir, podendo alcançar valores inferiores ao limiar exigido pela rede. Ao alcançar um nível inadequado de SNR, o sinal óptico não é interpretado corretamente no receptor. Essa interpretação incorreta é devida à degradação do sinal, ocasionado por imperfeições da camada física.

Para cada circuito óptico a ser estabelecido na rede é definido um formato de

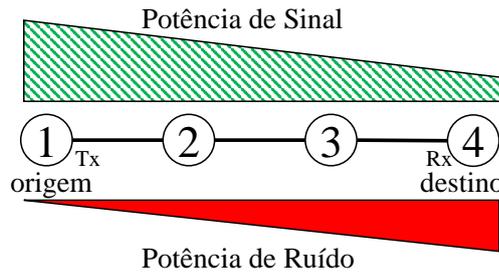


Figura 5 – Crescimento de ruído no sinal óptico ao longo da propagação.

modulação (FONTINELE et al., 2017). Os formatos de modulação apresentam tolerância a ruídos na rede e pode ser medida por meio do SNR. Os formatos de modulação mais complexos apresentam maior fragilidade aos ruídos da rede. A Tabela 2 apresenta os parâmetros dos formatos de modulação considerados neste trabalho com suas respectivas características (BEYRANVAND; SALEHI, 2013).

Tabela 2 – Formatos de Modulação.

Parâmetros	BPSK	QPSK	8QAM	16QAM	32QAM	64QAM
B_s	2	4	8	16	32	64
$SNR_{QoT} (dB)$	6	9	12	15	18	21

Na Tabela 2, o parâmetro B_s corresponde à quantidade de *bits* por símbolo de cada formato de modulação. Já o parâmetro $SNR_{QoT} (dB)$ representa o limiar de SNR dos formato de modulação. Quanto mais complexa a modulação, maior será o número de *bits* por símbolo e maior será a eficiência espectral. Além disso, as modulações que transportam mais *bits* por símbolo apresentam uma maior exigência em termos de SNR.

A partir da consideração dos valores de SNR, as requisições de circuito podem ser bloqueadas por QoTN (QoT inadequada do Novo circuito) ou QoTO (QoT inadequada para os Outros circuitos). A QoTN ocorre quando o SNR da nova requisição não apresenta valor adequado para seu funcionamento. Já a QoTO ocorre quando mesmo que uma nova requisição possua QoT adequada, o seu estabelecimento impacta nos circuitos já ativos, deixando-os com QoT inferior ao limiar exigido pela rede. Em vista disso, a Figura 6 apresenta o processo de estabelecimento de um novo circuito considerando os efeitos de camada física, ou seja, os diversos tipos de bloqueios.

Na Figura 6 é apresentado o fluxo do processo de estabelecimento de um novo circuito levando em conta os efeitos de camada física. Para o atendimento de requisição de circuito, o algoritmo de alocação de recurso busca uma rota entre o par de nós origem destino. Em seguida, utiliza-se uma política de alocação de espectro para escolher o conjunto de slots a serem usados. Caso não exista recursos livres, a requisição será bloqueada por

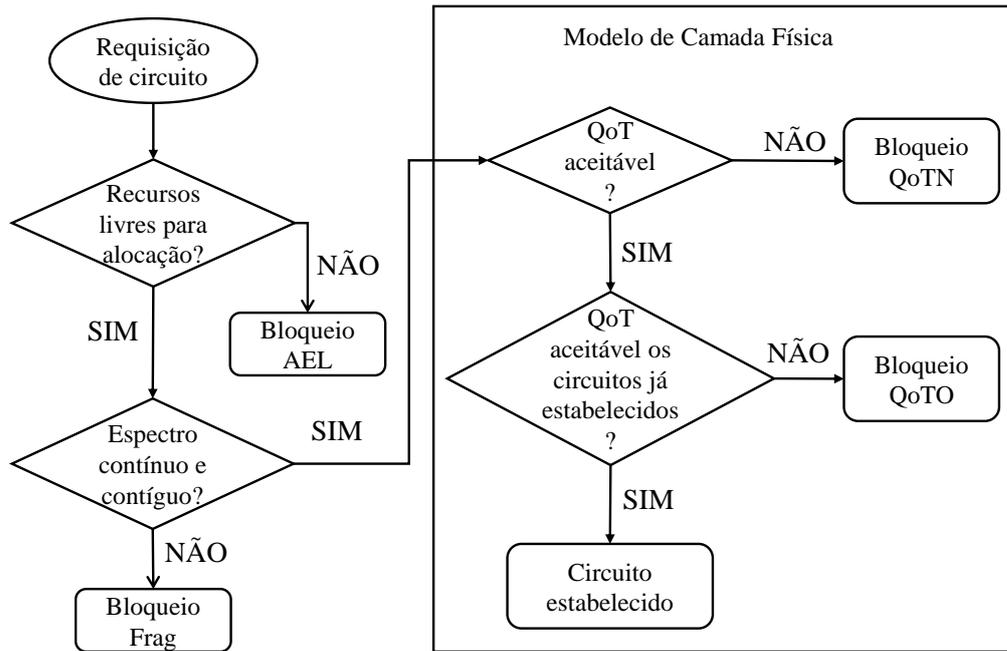


Figura 6 – Fluxo do processo de estabelecimento de um novo circuito levando em conta os efeitos de camada física.

Ausência de Espectro Livre (AEL). Caso haja recurso disponível mas não estão dispostos contínuos e/ou contíguos, a requisição é bloqueada por Fragmentação (Frag) do espectro.

Entretanto, existindo disponibilidade de recursos e espectro contínuo e contíguo para a requisição, verifica-se sua QoT (através do SNR) a partir do modelo de camada física adotado. Caso a QoT da requisição não esteja adequada, ocorrerá um bloqueio por QoTN. Caso contrário, será analisado o impacto da possível alocação da requisição nos circuitos já estabelecidos. Se o impacto tornar a QoT de algum dos circuitos já estabelecidos inaceitável, a requisição será bloqueada por QoTO.

2.5 Considerações Parciais

Este capítulo apresentou as características das redes ópticas elásticas bem como exemplos para melhor ilustrar seu funcionamento. Foram apresentados também os principais problemas decorrentes da utilização das redes ópticas elástica, como o problema RMLSA e o problema da fragmentação. O problema RMLSA é solucionado no intuito de alocar de forma eficiente os recursos de rede para o estabelecimento de novas requisições de circuito. Já para o problema da fragmentação, foi mostrado os motivos para sua ocorrência e algumas medidas que servem para quantificar o quão desorganizado está o uso do espectro óptico. Por fim, foram apresentados e detalhados os efeitos de camada física.

No próximo capítulo será apresentada uma visão geral do processo de realocação de circuito para as redes ópticas elásticas. Além disso, será apresentada como a realocação

do circuito é utilizada para desfragmentar o espectro óptico e minimizar bloqueios por fragmentação na rede.

3 Realocação de Circuito para Desfragmentação de Espectro

Este capítulo apresenta uma visão geral sobre o processo de realocação de circuito nas EONs, objetivando a desfragmentação do espectro óptico. A Seção 3.1 apresenta o conceito e característica do problema da desfragmentação para as EONs. Ainda na Seção 3.1 é apresentado e discutido sobre o i) momento para desfragmentar (Seção 3.1.1), ii) a seleção de circuitos para realocação (Seção 3.1.2), iii) a definição da nova solução RMLSA (Seção 3.1.3) e iv) as técnicas de migração de tráfego de dados (Seção 3.1.4), consideradas etapas necessárias para a o funcionamento do processo de desfragmentação. Já a Seção 3.2 elenca os principais trabalhos da literatura com suas respectivas contribuições. E por fim, na Seção 3.3 é apresentada as considerações parciais.

3.1 Processo de Desfragmentação do Espectro

O processo de desfragmentação do espectro consiste da realocação de circuitos ativos no intuito de reduzir a fragmentação da rede. Essa redução ocorre devido a geração de blocos de *slots* livres contíguos e/ou contínuos no espectro óptico, contribuindo para a acomodação de futuras requisições de circuito. A desfragmentação é um mecanismo que busca otimizar a utilização dos recursos de rede e diminuir a probabilidade de bloqueio de circuito na rede. (HOROTA; FIGUEIREDO; FONSECA, 2014; ZHANG et al., 2013a; ZHANG et al., 2014). A Figura 7 ilustra um exemplo de desfragmentação do espectro.

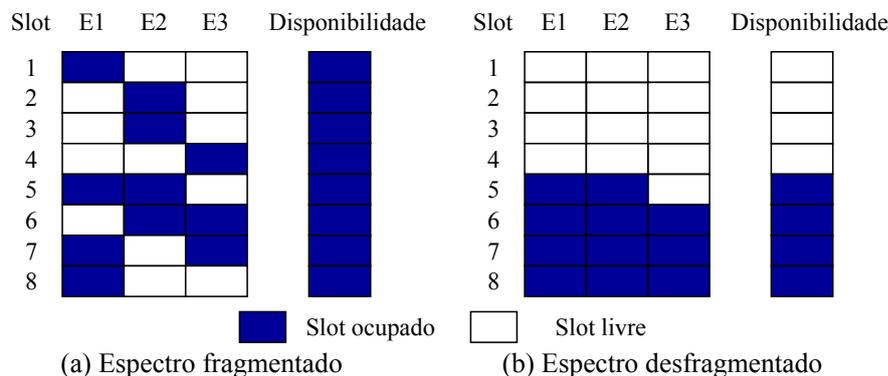


Figura 7 – Cenário de rede (a) antes e (b) após o processo de desfragmentação do espectro.

O cenário da Figura 7 apresenta uma situação hipotética do benefício da aplicação do processo de desfragmentação. Foi considerado uma rede de três enlaces (E1, E2 e E3) possuindo oito *slots* cada enlace. Na Figura 7(a), é apresentado as ocupações espectrais para cada enlace e também a disponibilidade do espectro caso uma requisição de circuito

necessite ser estabelecida na rota que utilize todos os enlaces. Neste caso, requisição de qualquer tamanho seria bloqueada ao tentar ser alocada na rota E1-E2-E3, pois não há continuidade de *slots* de frequência.

A Figura 7(b) ilustra o estado dos enlaces após a desfragmentação do espectro. Observa-se que após as realocações dos circuitos ativos, os *slots* ocupados foram agrupados nos maiores índices do espectro, proporcionando disponibilidade de quatro *slots* contíguos e contínuos considerando a rota E1-E2-E3. Dessa forma, blocos livres de espectro foram gerados para que futuras requisições de 1, 2, 3 ou 4 *slots* de frequência possam ser estabelecidas.

O sucesso do processo de desfragmentação depende da estratégia utilizada pelo algoritmo e pode ser dividido em quatro etapas. As etapas consistem em definir o momento da execução do algoritmo de desfragmentação, selecionar os circuitos a serem realocados, determinar a nova solução RMLSA para os circuitos selecionados e escolher a técnica de migração do tráfego de dados (ZHANG et al., 2014).

3.1.1 Momento da execução da desfragmentação (Gatilho)

Esta etapa define o momento de iniciar a desfragmentação do espectro. Este momento ocorre quando uma condição específica é satisfeita, denominada gatilho. No contexto das EONs, os gatilhos podem ser categorizados em reativos, proativos e híbridos (CHATTERJEE; BA; OKI, 2018). Os gatilhos reativos (PATEL et al., 2011; TAKAGI et al., 2011) são aqueles que iniciam a desfragmentação quando ocorre um bloqueio de requisição de circuito, por exemplo (WANG; MUKHERJEE, 2013). O gatilho proativo (FÁVERO et al., 2015; BA; CHATTERJEE; OKI, 2017; PROIETTI et al., 2012; ZHANG et al., 2014) objetiva prevenir bloqueios de requisições desfragmentando o espectro periodicamente, sem a necessidade de ocorrência de bloqueio. Já o gatilho híbrido consiste da combinação das categorias de gatilho reativo e proativo (WANG; MUKHERJEE, 2013).

Em termos gerais, os gatilhos estão relacionados com medida de tempo, de número de circuitos ou de tráfego. No primeiro caso, a desfragmentação ocorre a cada intervalo de tempo, por exemplo, a cada número de semanas. Já os gatilhos relacionados ao número de circuitos são disparados quando a quantidade de circuitos estabelecidos ou finalizados for igual ou superior a um limiar predefinido, como 30 (PROIETTI et al., 2012), 80 (ZHANG; YOU; ZHU, 2016) ou 300 (ZHANG et al., 2013a). Para o último caso, a desfragmentação é iniciada quando uma condição específica de tráfego é atingida, como a ocorrência de um potencial bloqueio, o enlace atingir um certo nível de fragmentação, dentre outros (FÁVERO et al., 2015).. A Tabela 3 apresenta os principais trabalhos de desfragmentação da literatura das redes ópticas elástica categorizados por tipo de gatilho.

Observa-se na Tabela 3 que os trabalhos utilizam diferentes gatilhos, tendo como

Tabela 3 – Trabalhos categorizados por tipo de gatilho.

Trabalho	Gatilho	Categoria
(PROIETTI et al., 2012)	Finalização de Circuito	Proativo
(ZHANG et al., 2013a)		
(ZHANG; YOU; ZHU, 2016)		
(WANG; SHEN; PENG, 2014)	Finalização e Bloqueio de Circuito	Híbrido
(WANG; SHEN; PENG, 2016)		
(WANG; MUKHERJEE, 2013)	Bloqueio de Circuito	Reativo
(WANG et al., 2012a)	Chegada de Circuito	
(BA et al., 2016)		
(YU et al., 2012)	Fragmentação	Proativo
(WANG et al., 2012b)		

principais a i) Finalização de Circuitos, ii) Finalização e Bloqueio de Circuito, iii) Bloqueio de Circuito, iv) Chegada de Circuito e v) baseados em alguma medida de Fragmentação. A utilização de gatilhos relacionados ao número de circuitos estabelecidos/finalizados são predominantes na literatura por ser relativamente simples sua implementação e por ser considerado um fator determinante para o aumento da fragmentação na rede.

3.1.2 Seleção de circuitos

Nesta etapa, a desfragmentação pode ser realizada de forma integral ou parcial (FÁVERO et al., 2015). A desfragmentação integral consiste da realocação de todos os circuitos ativos, buscando maior otimização na utilização dos recursos espectrais. Já a desfragmentação parcial atua em regiões específicas da rede, selecionando um conjunto de circuitos ativos para realocação segundo algum critério. A desfragmentação parcial é comumente utilizada na maioria dos trabalhos da literatura por possuir menor complexidade computacional em relação a desfragmentação integral.

Como já mencionado, a escolha dos circuito depende de critérios adotados. Em PATEL et al. 2011, todos os circuitos são realocados para desfragmentar o espectro, representando uma desfragmentação integral. Em FÁVERO et al. 2015, por exemplo, os circuitos escolhidos são aqueles que compartilham o enlace mais fragmentado da rede em um dado momento.

Já em ZHANG et al. 2013a, utilizou-se a estratégia *Most Frequently Used Slot First* (MFUSF) e *Highest Used Slot-Index First* (HUSIF) para escolher 30% dos circuitos ativos para a realocação. A estratégia MFUSF seleciona os circuitos com *slots* de maior frequência de uso enquanto a HUSIF escolhe aqueles circuitos de *slots* mais próximo do fim do espectro. Por fim, os autores em TAKAGI et al. 2011 buscaram rerrotear (alteração de rota) apenas os circuitos que estão em conflito com a rota candidata para a requisição em iminência de bloqueio. Isto significa que se não houver desfragmentação, a requisição sofrerá bloqueio.

3.1.3 Definição da nova solução RMLSA

Para realocar um circuito na rede é necessário definir sua nova solução RMLSA. Na nova solução pode ocorrer alteração de rota do circuito, processo chamado de roteamento, ou apenas alteração do conjunto de *slots*, processo conhecido como reatribuição espectral. A Figura 8 ilustra um exemplo de roteamento e reatribuição espectral em um processo de realocação de circuito.

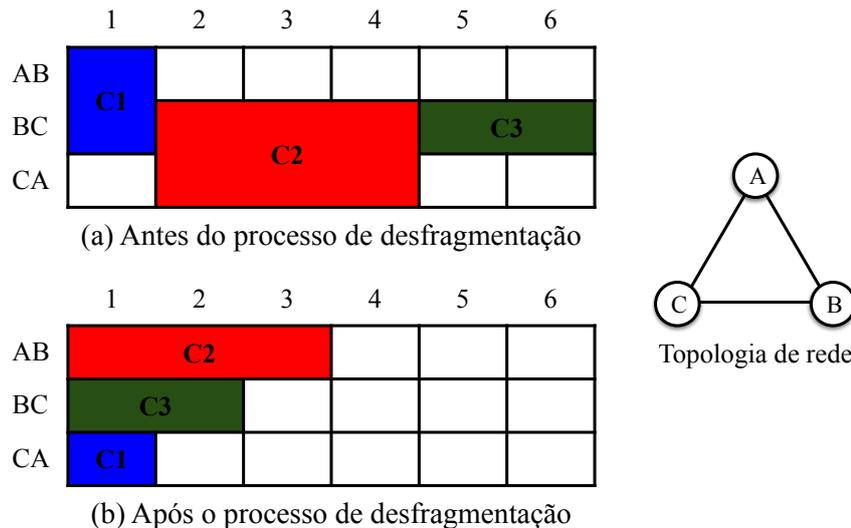


Figura 8 – Roteamento e reatribuição espectral em um processo de desfragmentação de espectro.

Na Figura 8 é considerado um cenário com três circuitos ativos (C1, C2 e C3) dispostos em uma rede de três enlaces (AB, BC e CA) composto por seis *slots* cada. A Figura 8(a) apresenta a disposição dos circuitos C1, C2 e C3 antes da desfragmentação enquanto a Figura 8(b) ilustra o cenário de rede após a desfragmentação. Observa-se, por exemplo, que o circuito C1 foi realocado da rota A-B-C para a rota A-C, ocorrendo uma alteração de rota ou roteamento. O circuito C2, assim como o C1, também sofre roteamento. Já o circuito C3 passa a utilizar um conjunto de *slots* mais próximo do início do espectro, ou seja, na Figura 8(a), C3 utiliza os *slots* 5 e 6 e após a desfragmentação, usa os *slots* 1 e 2. O tipo de realocação do circuito C3 é a reatribuição espectral, no qual é alterado apenas o conjunto de *slots* do circuito.

A nova definição RMLSA é baseada na utilização de algoritmo RMLSA. Dessa forma, o desempenho da estratégia de desfragmentação está diretamente relacionada com a combinação de algoritmos de alocação e realocação dos circuitos. Vários trabalhos na literatura apresentam avaliações indicando a influência da combinação dos algoritmos no desempenho da rede (ZHANG et al., 2013a; ZHANG et al., 2014).

Em ZHANG et al. 2014, por exemplo, foi realizado um estudo para avaliar a melhor combinação entre os algoritmos KSP (*K-Shortest Path*), MMUSI (*Minimum Maximum*

Used Slot Index) e FMA (*Fragmentation and Misalignment-Aware*) para um dado cenário. Em termos de probabilidade de bloqueio de banda, dentre as combinações possíveis, o FMA para alocação e também para realocação (FMA+FMA) apresentou melhor desempenho. O FMA é um algoritmo RMLSA que busca a rota com menor fragmentação de espectro, segundo uma medida de fragmentação adotada.

3.1.4 Técnicas de migração de tráfego de dados

Após definir a nova solução RMLSA para um circuito ativo, é necessário que haja a transferência do fluxo de informações da antiga solução RMLSA para a nova a nova solução RMLSA. A transferência desse fluxo é realizada a partir de técnicas de migração de tráfego, podendo ser categorizados em *hitless* ou *non-hitless*. As técnicas *hitless* permitem realocar circuitos sem interromper o tráfego, evitando assim a perda de dados. Já as técnicas *non-hitless* causam interrupção de tráfego e, portanto, não são adequadas em cenário de rede dinâmico (CHATTERJEE; BA; OKI, 2018).

As principais técnicas de migração de tráfego da literatura são: *reoptimization* (PATEL et al., 2011), *make-before-break* (TAKAGI et al., 2011), *push-and-pull* (WANG et al., 2012a; CUGINI et al., 2013) e *hop tuning* (PROIETTI et al., 2012). A técnica *reoptimization* é categorizada como *non-hitless* e as demais são consideradas técnicas *hitless*. O funcionamento de cada técnica é apresentado na Figura 9.

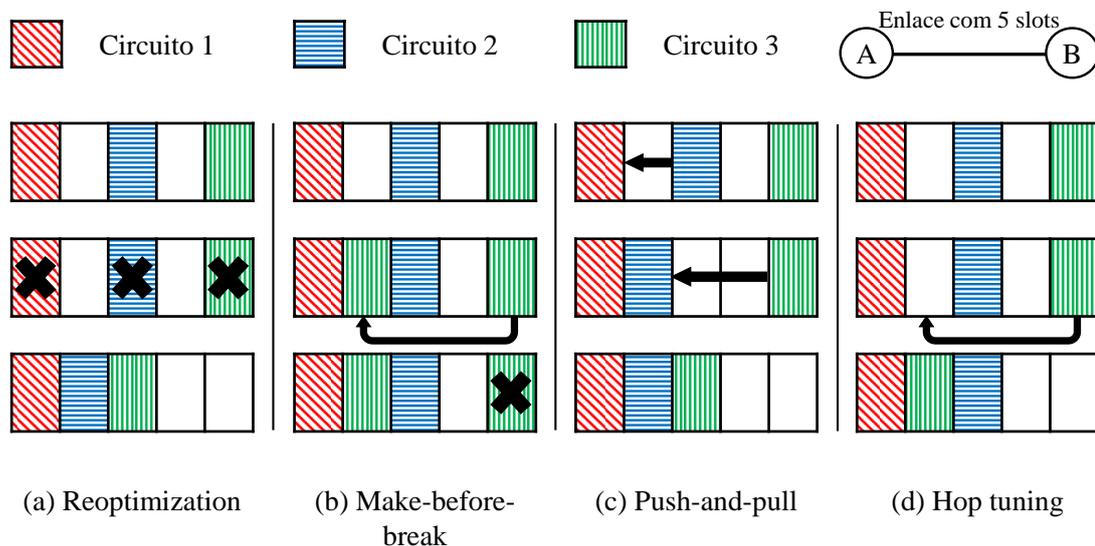


Figura 9 – Principais técnicas de migração de tráfego de dados para redes ópticas elásticas.

A Figura 9(a) exemplifica o processo de migração a partir da técnica *reoptimization*. Nesta técnica um circuito é desativado para em seguida ser restabelecido, provocando perda de dados durante a migração. Além disso, é considerada a técnica que rearranja os circuitos de forma mais otimizada comparada às demais técnicas (PATEL et al., 2011).

A técnica *make-before-break* (MbB) (Figura 9(b)) consiste de duas etapas. Na primeira etapa, é duplicado o sinal do circuito a ser realocado em uma nova rota. Em seguida, o circuito original é desativado e os dados passam a trafegar apenas na nova rota. A desvantagem do MbB é a necessidade de transmissores/receptores adicionais nos nós ópticos.

Já a técnica *push-and-pull* visa deslocar o espectro que será realocado até o espectro adjacente de maneira que sua rota não seja alterada. A Figura 9(c) ilustra o funcionamento do *push-and-pull*, onde o Circuito 2 é deslocado (*shifted*) até o Circuito 1. Em seguida, o Circuito 3 é deslocado até o Circuito 2, compactando assim o espectro utilizado e gerando blocos contíguos de *slots*.

A técnica *hop tuning*, como mostra a Figura 9(d), consiste em um deslocamento oportunista. Em vez de deslocar o Circuito 2 e em seguida o Circuito 3, a realocação é realizado apenas para o Circuito 3 através de um salto no espectro. Este salto deve ser rápido o suficiente para que não haja interrupção de tráfego.

Dentre as técnicas mencionadas acima, considerou-se neste trabalho de dissertação a técnica MbB. A escolha desta técnica é devido a maior flexibilidade em relação às demais, permitindo tanto rerroteamento quanto reatribuição espectral. Na tabela 4 é elencado mais detalhes e características sobre as principais técnicas de migração de tráfego.

Tabela 4 – Características das técnicas de migração de circuitos ópticos. Tabela adaptada de CHATTERJEE; BA; OKI 2018.

Técnica	<i>Reoptimization</i>	<i>Make-before-Break</i>	<i>Push-and-Pull</i>	<i>Hop Tuning</i>
BVT Extra	não	sim	não	não
Interrupção do Tráfego	sim	não	não	não
Velocidade da Realocação	muito lento	lento	lento	rápido
Complexidade	baixa	moderada	moderada	alta
Rerroteamento	sim	sim	não	não
Reatribuição Espectral	sim	sim	sim	sim

Observa-se na Tabela 4 que a técnica *reoptimization* apresenta a menor complexidade dentre as demais técnicas. Porém, provoca interrupção de tráfego e, conseqüentemente, perda de dados das transmissões. Já a técnica *hop tuning*, por exemplo, é a que proporciona maior rapidez na realocação do circuito mas com complexidade alta em relação às outras técnicas e não permitindo rerroteamento. A técnica *push-and-pull* apresenta complexidade moderada. Porém, também não permite o rerroteamento do circuitos. Já a MbB é a única, dentre as técnicas citadas, que permite rerroteamento e reatribuição espectral com complexidade moderada. E portanto, essa técnica permite mais possibilidades de realocação para o circuito.

3.2 Trabalhos Relacionados

Diversos trabalhos na literatura propõem estratégias de realocação de circuitos com o objetivo de desfragmentar o espectro nas EONs (TAKAGI et al., 2011; WEN et al., 2011; CUGINI et al., 2012; WANG; MUKHERJEE, 2013; ZHANG et al., 2013a; ZHANG et al., 2014; BA; CHATTERJEE; OKI, 2017). A contribuição de tais trabalhos é apresentar algoritmos que buscam otimizar os recursos da rede adotando diferentes critérios e/ou heurísticas para diminuir a fragmentação, proporcionando assim a redução da probabilidade de bloqueio geral de circuito.

Inicialmente, os trabalhos proporcionavam a desfragmentação de modo a compactar o espectro livre, gerando o maior número de blocos de *slots* livres contíguos possível (WANG; MUKHERJEE, 2012; ZHANG et al., 2013a; YIN et al., 2013; FADINI; OKI, 2014; SINGH; JUKAN, 2017). Estes trabalhos são conhecidos como *non hitless* e objetivam a maximização do uso dos recursos, aumentando a eficiência espectral e o desempenho da rede. Na Tabela 5 é apresentado os principais trabalhos *non hitless* da literatura das EONs.

Tabela 5 – Trabalhos de desfragmentação *non hitless*

Categoria		<i>Non Hitless</i>
Proativo	Reroteamento	(ZHANG et al., 2013a) (ZHANG et al., 2014)
	Reatribuição Espectral	(WANG; MUKHERJEE, 2012) (SHI et al., 2013) (YIN et al., 2013) (CHEN; JUKAN; GUMASTE, 2013) (FADINI; OKI, 2014) (SINGH; JUKAN, 2017) (ZHANG; YOU; ZHU, 2016)
Reativo	Reroteamento	(ZHANG et al., 2014) (SINGH; JUKAN, 2017)
	Reatribuição Espectral	

Em SINGH; JUKAN2017, por exemplo, são propostos dois algoritmos de desfragmentação, proativo e reativo. O algoritmo proativo é executado durante o atendimento de uma nova requisição enquanto o reativo é disparado na iminência de bloqueio. Estes algoritmos utilizam informações de *holding times* como critério para reorganização dos circuitos ativos na rede. O desempenho é avaliado em termos de ganho na utilização de espectro e probabilidade de bloqueio de banda. Para essas métricas, a estratégia reativa apresentou melhores resultados.

A contribuição dos demais artigos elencados na Tabela 5 consiste de propostas para redução da fragmentação, combinando a forma de atacar os subproblemas da desfragmentação do espectro, como a seleção de circuitos, momento da execução do algoritmo, definição da nova solução RMLSA e qual técnica utilizar para migrar o tráfego dos circuitos ativos (WANG; MUKHERJEE, 2012; SHI et al., 2013; FADINI; OKI, 2014). Entretanto tais

trabalhos por serem categorizados como *non hitless*, não utilizam técnicas de migração como *push-and-pull* e *hop tuning*.

Em contrapartida, na literatura são muitos os trabalhos que buscam desfragmentar o espectro utilizando diferentes técnicas *hitless* (TAKAGI et al., 2011; AOKI et al., 2012; WANG et al., 2012a; WANG; MUKHERJEE, 2013; SEKIYA et al., 2014; ZHANG et al., 2014). Estes trabalhos que realocam circuitos sem interromper o fluxo de informações são os que mais atraem a atenção dos pesquisadores da área devido a aproximação do cenário real. Os principais artigos de desfragmentação *hitless* são elencados na Tabela 6.

Tabela 6 – Trabalhos de desfragmentação *hitless*

Categoria		<i>Hitless</i>		
Técnicas		<i>Make-before-Break</i>	<i>Push-and-Pull</i>	<i>Hop Tuning</i>
Proativo	Rerroteamento	(TAKAGI et al., 2011)		
	Reatribuição Espectral		(SEKIYA et al., 2014) (AOKI et al., 2012) (WANG et al., 2012a) (WANG; MUKHERJEE, 2013)	(ZHANG et al., 2013b) (PROIETTI et al., 2012)
Reativo	Rerroteamento			(ZHANG et al., 2014)
	Reatribuição Espectral		(WANG; MUKHERJEE, 2013)	

Em TAKAGI et al.2011, a contribuição consiste em propor um algoritmo de desfragmentação que permite o rerroteamento dos circuitos ativos, alterando sua solução RMLSA original. Para viabilizar a realocação, são escolhidos os circuitos que impedem que uma nova requisição seja atendida. A partir disto, os circuitos são migrados para novas soluções RMLSA da rede de tal forma que a nova requisição seja estabelecida. A migração de cada circuito é realizada pela técnica MbB, também proposta pelo mesmo autor e amplamente utilizada na literatura.

Os autores em ZHANG et al.2013a detalham o problema da desfragmentação elencando suas etapas, além de propor, para tal problema, uma solução. O algoritmo proposto utiliza a estratégia MFUSF e HUSIF para escolher 30% dos circuitos ativos para a realocação. A nova solução RMLSA dos circuitos na rede é definida por algoritmos RMLSA e as migrações do tráfego de dados são realizadas usando a técnica MbB.

Outra forma de realocar circuito sem perda de dados, geralmente conhecida como *truly hitless*, utiliza cenários com sobrevivência e não necessita de técnicas de migração de tráfego (KOSAKA et al., 2012; SHAO et al., 2012; TARHAN; CAVDAR, 2013; WANG et al., 2015; WANG; SHEN; PENG, 2016; CAI et al., 2016; BA; CHATTERJEE; OKI, 2017). Os trabalhos geralmente utilizam proteção compartilhada e dedicada de circuito. A proteção compartilhada (1 : 1) consiste da reserva de recursos para a rota *backup*, porém as informações são transmitidas nesta rota apenas se a rota principal vier a falhar. A rota *backup* da proteção compartilhada pode ser reservada por outra requisição de circuito. Já na proteção dedicada (1 + 1), o sinal óptico é duplicado em duas rotas distintas, principal e *backup*, transmitindo as informações nos dois circuitos ópticos simultaneamente.

A Tabela 7 apresenta os principais trabalhos de desfragmentação categorizados por tipo de sobrevivência de redes.

Tabela 7 – Trabalhos de desfragmentação utilizando sobrevivência de redes

Sobrevivência	<i>Truly Hitless</i>
Proteção Compartilhada	(WANG; SHEN; PENG, 2016) (WANG et al., 2015) (CAI et al., 2016) (KOSAKA et al., 2012) (TARHAN; CAVDAR, 2013) (SHAO et al., 2012)
Proteção Dedicada	(WANG; SHEN; PENG, 2014) (BA; CHATTERJEE; OKI, 2017) (CHEN et al., 2016)

Os autores em KOSAKA et al.2012 e TARHAN; CAVDAR2013, por exemplo, propõem heurísticas que objetivam desfragmentar o espectro para principalmente fornecer capacidade máxima de compartilhamento da rota backup para demandas de tráfego, contribuindo para otimizar o uso dos recursos de rede.

Além de cenários com proteção compartilhada, em BA; CHATTERJEE; OKI2017, por exemplo, é utilizado proteção dedicada para realocar tanto circuitos primários quanto secundários sem a interrupção dos serviços de rede. A não interrupção é devido a possibilidade dos circuitos primários trocarem de funções com os secundários para serem realocados e vice-versa. Assim, se um circuito secundário for escolhido para realocação, o mesmo é desativado da rede para em seguida ser restabelecido em um nova solução RMLSA. O funcionamento do circuito não será prejudicada pois os dados continuam sendo transmitidos pelo caminho primário.

Os trabalhos mencionados nesta seção correspondem aos principais trabalhos que abordam o processo de desfragmentação do espectro óptico. Vale ressaltar que tais trabalhos buscam reduzir a fragmentação por ser a principal causa de bloqueios nos respectivos cenários considerados.

3.3 Considerações Parciais

Este capítulo apresentou o processo de realocação de circuito com objetivo de desfragmentar o espectro óptico. A desfragmentação se faz necessária quando a fragmentação do espectro provoca bloqueios de novas requisições de circuito na rede. Foram apresentadas as etapas da desfragmentação e uma descrição sucinta dos seus funcionamentos, mostrando a importância de como lidar com cada etapa para alcançar eficiência no desenvolvimento de estratégias. Foram elencados os principais trabalhos de desfragmentação do espectro

das redes ópticas elásticas, categorizando-os em relação a diversos critérios e mostrando suas contribuições científicas.

A realocação de circuito também é objeto do próximo capítulo. Porém, o objetivo principal é reduzir o impacto dos efeitos de camada física nos enlaces da rede. Essa redução contribui para que novas requisições sejam atendidas e a probabilidade de bloqueio geral de circuito diminuída.

4 Realocação de Circuito para Redução dos Impactos das Imperfeições de Camada Física

Este capítulo apresenta características relacionadas à realocação de circuito para redução dos impactos de efeitos de camada física para redes ópticas elásticas. A Seção 4.1 apresenta o contexto de como foi identificado o problema CR-PLI (*Circuit Reallocation of the aware* PLI) além de citar três novas estratégias para solucionar tal problema. A Seção 4.2 mostra em detalhes o funcionamento do problema CR-PLI, apresentando exemplos e os subproblemas de CR-PLI. E por fim, as estratégias propostas neste trabalho de dissertação para solucionar o problema CR-PLI são apresentadas na Seção 4.3.

4.1 Introdução

A realocação de circuito foi, inicialmente, utilizada para desfragmentar o espectro óptico devido a fragmentação ser a principal causa dos bloqueios dos circuitos (HOROTA; FIGUEIREDO; FONSECA, 2014; ZHANG et al., 2013a; ZHANG et al., 2014). Porém, a realocação de circuito pode também ser utilizada para reduzir interferências de circuitos entre si e em novas requisições, considerando cenários que levam em conta as imperfeições de camada física. Nestes cenários, os bloqueios ocasionados por efeitos de camada física ocorrem com mais frequência comparados a bloqueios por fragmentação do espectro (ARAUJO et al., 2018a; ARAUJO et al., 2018b).

Neste contexto, foi identificado o problema *Circuit Reallocation aware of the Physical Layer Imperfections* (CR-PLI) a partir de análises dos tipos de bloqueios que ocorrem na rede. Observou-se que bloqueios do tipo QoTN e QoTO acontecem com mais frequência que os demais tipos de bloqueios, influenciando diretamente para a diminuição do desempenho da rede. Os detalhes relacionados à identificação do problema CR-PLI são exibidos na Seção 4.2.

Para solucionar o problema CR-PLI, foram desenvolvidas três estratégias de realocação de circuito ciente de PLI. As estratégias são: R-RQoT (Realocação de Circuito para Redução de Bloqueios relacionados à Qualidade de Transmissão), CRS-PL (*Circuit Reallocation Strategy - Physical Layer*) e JOC (*Just One Circuit Reallocation*), detalhadas na Seção 4.3. Tais estratégias visam realocar circuitos para reduzir bloqueios de camada física porque estes tipos de bloqueios são mais significativos. A consequência disto é o melhoramento do desempenho da rede.

4.2 Problema CR-PLI

No cenário de rede deste trabalho, as componentes relacionadas à camada física (QoTN e QoTO) apresentam probabilidade de bloqueio de circuito consideravelmente maior comparadas aos bloqueios por AEL e por fragmentação. A Figura 10 apresenta a PBC para os algoritmos de alocação CS (*Complete Sharing*) (WANG; MUKHERJEE, 2012), KS-PC (*K-Shortest Path Computation*) (BEYRANVAND; SALEHI, 2013), MD-PC (*Modified Dijkstra Paths Computation*) (BEYRANVAND; SALEHI, 2013) e KSP-RQoTO (*K-Shortest Path with Reduction of QoTO*) (FONTINELE et al., 2017) na topologia EON, buscando constatar que os tipos de bloqueio QoTN e QoTO são mais expressivos.

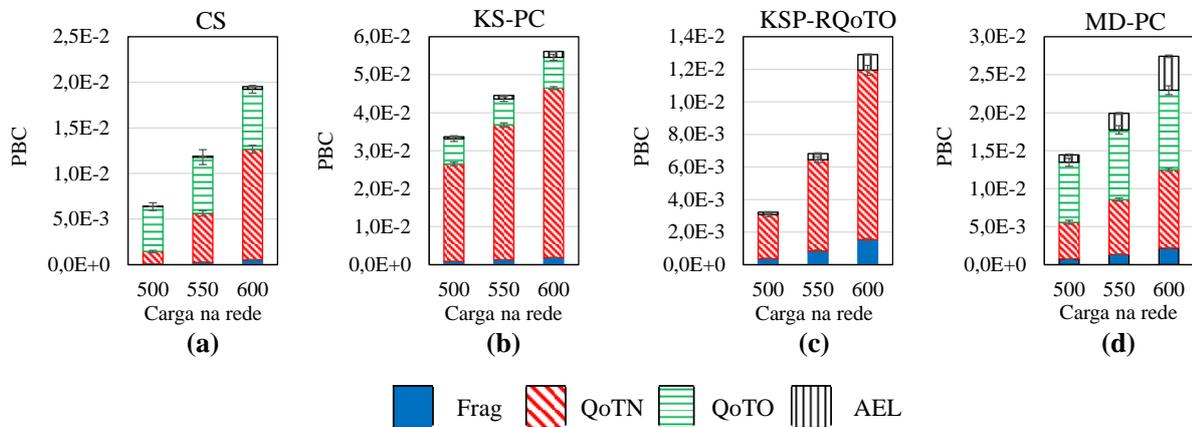


Figura 10 – Probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos RMLSA considerados neste estudo para a topologia EON.

Observa-se na Figura 10 que as componentes QoTN e QoTO são as principais causas de bloqueios de requisições para todos os algoritmos analisados em todas as cargas avaliadas. No algoritmo CS, os bloqueios relacionados às imperfeições de camada física correspondem a 62,14% do tipo QoTN e 33,71% do tipo QoTO em relação ao bloqueio total na carga 600 *Erlangs*, Figura 10(a). Para a mesma carga, no algoritmo KS-PC o bloqueio de circuito para a componente QoTN, por exemplo, é de aproximadamente 78,34% de todo o bloqueio (Figura 10(b)).

Para o algoritmo KSP-RQoTO (Figura 10(c)) a componente QoTN também foi a principal causa de bloqueio, sendo responsável por 78,47% de todo o bloqueio no último ponto de carga avaliado. Não há bloqueio QoTO para o algoritmo KSP-RQoTO porque sua heurística evita este tipo de bloqueio. Já no caso do MD-PC não foi diferente, a componente QoTN representou 37,71% do bloqueio total enquanto para a componente QoTO foi de 38,21%, para o último ponto de carga ((Figura 10(d))).

A Figura 11 apresenta a probabilidade de bloqueio dos algoritmos de alocação utilizados neste estudo para a topologia USA. Assim como a Figura 10, na Figura 11 ocorre

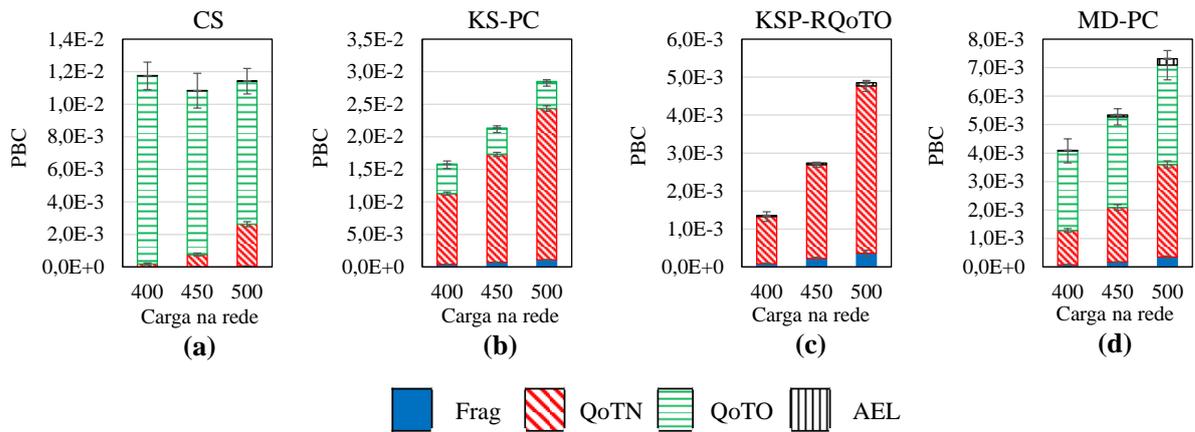


Figura 11 – Probabilidade de bloqueio de circuito dos algoritmos RMLSA considerados neste estudo para a topologia USA.

comportamento semelhante, com maior parte dos bloqueios ocasionados por imperfeições da camada física. Dessa forma, constata-se a partir dos resultados apresentados na Figura 10 e 11 que os bloqueios do tipo QoTN e QoTO são mais significativos comparados aos demais tipos de bloqueios (AEL e Frag) independente de algoritmo de alocação e da topologia de rede utilizada.

Neste contexto, surge a necessidade de elaborar alternativas no intuito de reduzir os tipos de bloqueios mais significativos que ocorrem no cenário de rede adotado neste estudo. Desta forma, entendeu-se que a realocação de circuito, utilizada para reduzir fragmentação, poderia também reduzir bloqueios de camada física. A redução de bloqueios de camada física se dá, por exemplo, pela redução de interferências dos circuitos em novas requisições a partir das realocações. Isto possibilita maior admissão de demandas de tráfego, diminuindo a probabilidade de bloqueio geral da rede (ARAÚJO et al., 2018a).

A realocação de circuito para redução de bloqueios de camada física foi identificado como um problema denominado *Circuit Reallocation aware of PLI* (CR-PLI) (ARAÚJO et al., 2018a; ARAÚJO et al., 2018b). O problema CR-PLI consiste da busca de novas soluções RMLSA para alguns ou todos os circuitos ativos levando em conta as imperfeições de camada física durante a realocação. Essas realocações objetivam principalmente reduzir o impacto dos efeitos de camada física em enlaces da rede.

O problema CR-PLI pode ser dividido em quatro subproblemas e as soluções para este problema devem abordar todas as etapas elencadas a seguir:

1. Quando: momento e/ou periodicidade de execução da estratégia de realocação ciente de PLI;
2. Quais: seleção de circuitos para realocação;

3. Como: definição da nova solução RMLSA para restabelecimento dos circuitos selecionados;
4. Técnica de migração: escolha da técnica de migração do tráfego de dados.

Vale ressaltar que o problema CR-PLI é similar ao problema de desfragmentação do espectro. Porém, a distinção entre eles é que, na desfragmentação os circuitos são realocados apenas para reduzir a fragmentação na rede. Já o problema CR-PLI consiste principalmente em realocar circuitos para mitigar bloqueios do tipo QoTN e QoTO. Além disso, dependendo da heurística adotada para solucionar o problema CR-PLI, a fragmentação também é reduzida.

A Figura 12 exemplifica o problema CR-PLI. No exemplo, é considerado uma rede com 6 nós e 7 enlaces. O estado atual da rede na Figura 12(a) é composto de 3 circuitos ativos (C1, C2 e C3) com suas respectivas características, como modulação, limiar de modulação e valor SNR do circuito, listados na tabela ao lado.

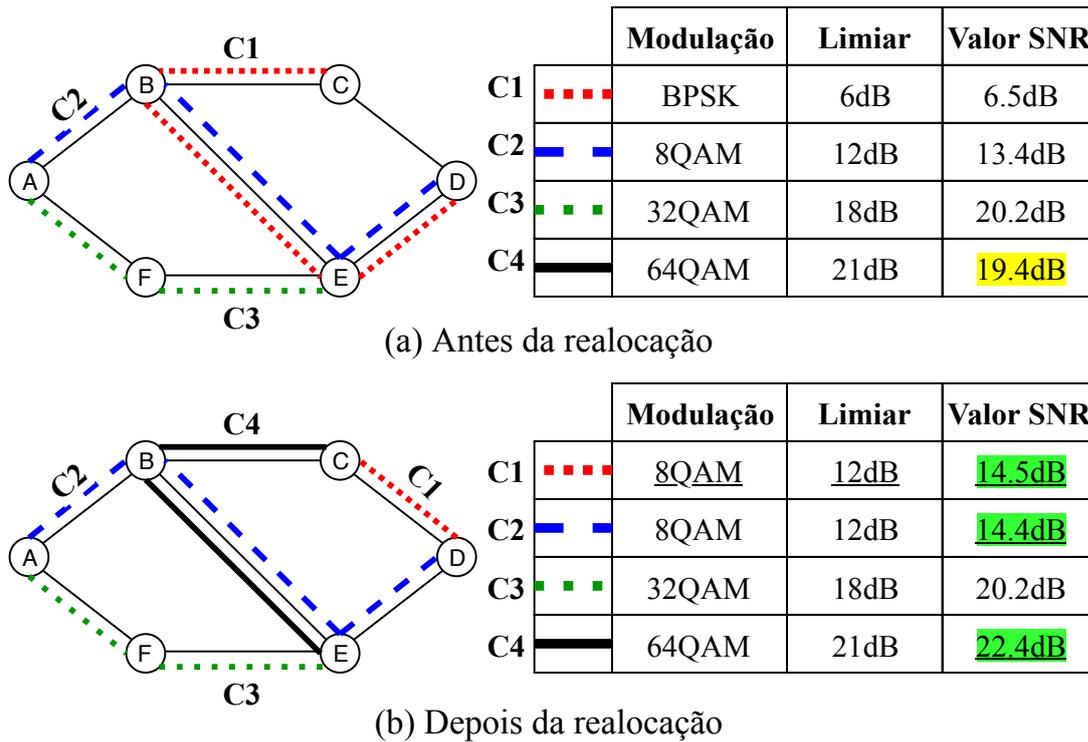


Figura 12 – Exemplo do problema CR-PLI. Cenário de rede (a) antes e (b) depois da realocação de circuito para redução dos impactos causados por efeitos de camada física.

Considerando ainda o cenário da Figura 12(a), não é possível estabelecer C4 (nova requisição) na rota C-B-E. A incapacidade de atender a requisição deve-se à interferência dos circuitos ativos que compartilham os enlaces C-B e B-E. Essa interferência é alta o suficiente para tornar a QoT de C4 inaceitável, com SNR igual a 19,4 dB, inferior ao limite de modulação de 21 dB. Isso faz com que C4 sofra um bloqueio do tipo QoTN.

A Figura 12(b) ilustra um cenário de rede após a realocação do circuito C1. Neste caso, o circuito C1 foi desativado da rota C-B-E-D e restabelecido na nova rota C-D. A realocação de C1 foi necessária para a redução dos efeitos de camada física nos enlaces da rota C-B-E-D. A redução dos efeitos provoca a diminuição das interferências dos circuitos ativos em novas requisições de circuito. Neste exemplo da Figura 12(b), as interferências forem reduzidas possibilitando o estabelecimento de C4, com SNR igual 22,4 dB. Este valor de SNR é maior que o limiar da modulação de C4 (21 dB), resultando em QoT aceitável para operar.

4.3 Soluções CR-PLI

As seções seguintes apresentam as estratégias de realocação R-RQoT, CRS-PL e JOC, desenvolvidas e propostas no decorrer deste mestrado. A estratégia R-RQoT foi proposta em um primeiro momento de investigação e visa, após um bloqueio por QoTN, realocar circuitos ativos para o atendimento de futuras requisições que poderiam ter QoT inaceitável.

Já a estratégia CRS-PL visa evitar bloqueios por camada física quando estes estão na iminência de ocorrer. Portanto, diante de um potencial bloqueio de requisição Req em uma rota R_b , a CRS-PL realoca circuitos ativos de R_b para rotas disjuntas, reduzindo assim os impactos dos efeitos de camada física e viabilizando o atendimento de Req .

Por fim, a estratégia JOC foi proposta ao final do mestrado no intuito de melhorar ainda mais o desempenho da rede. Além de apresentar melhor desempenho, o diferencial consiste da redução do número de circuitos realocados por processo de execução da estratégia JOC, limitando a no máximo 1 circuito realocado.

4.3.1 R-RQoT - Realocação de Circuito para Redução de Bloqueios relacionados à Qualidade de Transmissão

A estratégia de realocação de circuitos, denominada R-RQoT (Realocação para Redução de bloqueios relacionados à QoT), foi proposta neste trabalho para solucionar o problema CR-PLI. A execução da estratégia R-RQoT ocorre a partir do bloqueio por QoTN, pois entende-se que há interferências suficientemente grandes dos circuitos ativos em novas requisições. Portanto, são realizadas realocações de circuitos no intuito de evitar o bloqueio relacionado a QoT de futuras requisições, contribuindo para reduzir a probabilidade de bloqueio geral da rede. A Figura 13 apresenta o funcionamento da estratégia R-RQoT.

A estratégia é dividida em duas etapas: Processo de Realocação de Circuitos (Etapa 1) e Processo de Refinamento da Realocação (Etapa 2). Na Etapa 1 (Figura 13(a)), os circuitos que compartilham os enlaces da rota de Req (Requisição bloqueada por QoTN)

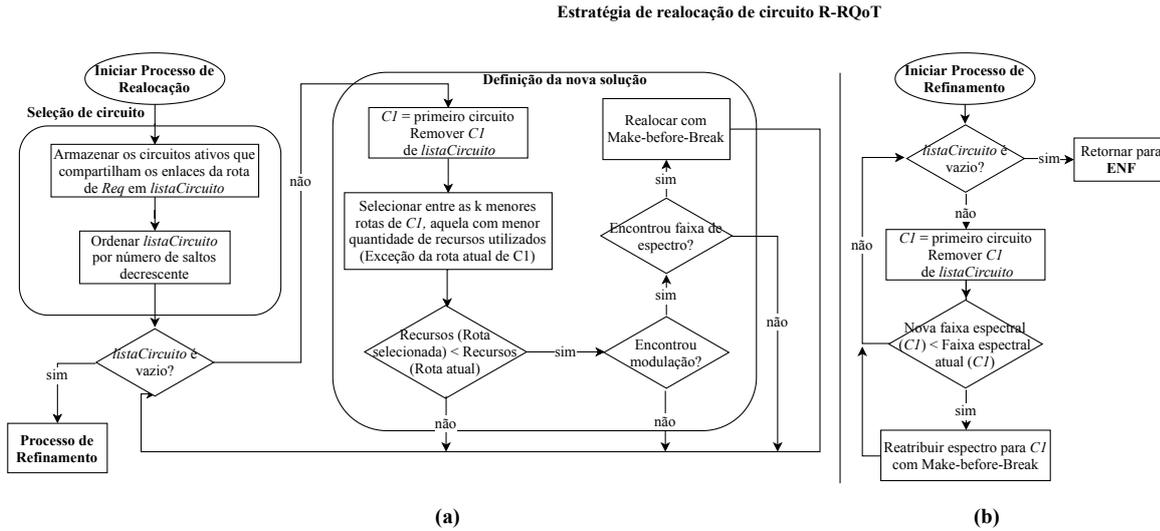


Figura 13 – Funcionamento da estratégia de realocação de circuitos R-RQoT.

são selecionados e armazenados em *listaCircuitos*. Esta, por sua vez, é ordenada de forma decrescente de quantidade de saltos (enlaces) da rota de seus circuitos. Após a ordenação, sempre o primeiro circuito (C_1) é selecionado para realocação e removido da lista até a *listaCircuitos* estiver vazia, finalizando assim a Etapa 1.

Além disso, dentre as k menores rotas para um circuito, é escolhida aquela com a menor quantidade de recursos (*slots*) utilizados. Em seguida, o número de *slots* usados da rota escolhida deve ser menor que o número de *slots* da rota em que se encontra o circuito ativo. Essa condição produz um balanceamento de carga na rede, reduzindo os efeitos de camada física nos enlaces da rede e contribuindo para o atendimento de futuras requisições de circuito.

A Figura 13(b) apresenta a Etapa 2 do algoritmo R-RQoT que consiste do processo de refinamento da realocação. Este processo objetiva reatribuir a faixa espectral aos circuitos que não foram realocados. A reatribuição visa amenizar fragmentos de espectro ocasionados pela Etapa 1, já que a ordem de realocação pode contribuir para que apenas os circuitos posicionados no meio do espectro óptico sejam realocados. Ainda na Etapa 2, a realocação de um circuito é efetivada na nova faixa de espectro se a posição desta for inferior à faixa de espectro atual do circuito não realocado. Logo, ao final desta etapa, os circuitos estarão mais próximos do início do espectro óptico. Com o término da Etapa 2, retorna-se ao Estado Normal de Funcionamento (ENF) da rede.

Vale ressaltar que na Etapa 1, a nova solução RMLSA possibilita a definição de uma nova rota, um novo formato de modulação e uma nova faixa de espectro, para um dado circuito ativo. A escolha da rota utiliza k menores caminhos. Os k menores caminhos para um par de nós origem-destino são selecionadas com base na distância das rotas. Já na Etapa 2, a nova solução RMLSA permite definir um novo formato de modulação e uma nova faixa espectral, não ocorrendo alteração de rota.

Além disso, o formato de modulação escolhido em novas soluções RMLSA é aquele com maior eficiência espectral e que apresenta QoT admissível para o circuito. Ainda, a modulação escolhida deve manter admissíveis as QoTs dos outros circuitos ativos da rede. Em seguida, é definido o intervalo de espectro a partir da política *First Fit*.

4.3.2 CRS-PL - *Circuit Reallocation Strategy - Physical Layer*

Nesta seção é apresentada a estratégia de realocação de circuito denominada CRS-PL (*Circuit Reallocation Strategy - Physical Layer*), proposta para solucionar o problema CR-PLI. O objetivo da estratégia é reorganizar circuitos na rede a fim de atender uma nova requisição iminente de bloqueio (*Req*). A estratégia CR-PLI consiste basicamente de três etapas: seleção de circuitos ativos a serem realocados, a definição da nova solução RMLSA para cada circuito selecionado e tentativa de estabelecimento da nova requisição após a execução da estratégia. A Figura 14 apresenta em detalhes o algoritmo de CRS-PL.

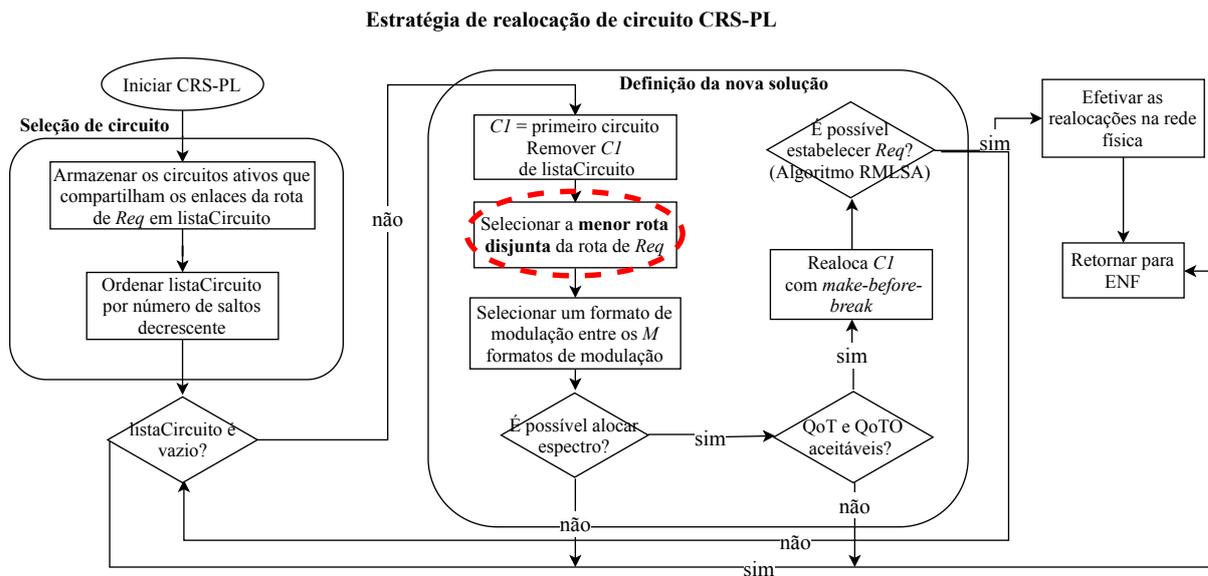


Figura 14 – Funcionamento da estratégia de realocação de circuitos CRS-PL.

Com o início do algoritmo, o vetor de *listaCircuito* armazena todos os circuitos ativos que compartilham os enlaces da rota *R*. Os circuitos em *listaCircuito* são ordenados segundo um critério de ordenação. Para esta dissertação, o critério adotado foi o número de saltos da rota de um circuito, já que as demais estratégias avaliadas utilizam o mesmo critério.

Após selecionar os circuitos para realocação, busca-se uma nova solução RMLSA para cada circuito pertencente a *listaCircuito*. Para cada circuito realocado com sucesso, tenta-se estabelecer novamente a nova requisição de circuito (*Req*). Caso *Req* seja estabelecida, a estratégia CRS-PL é finalizada e as alterações são efetivadas na rede física. Caso contrário, significa que todos os circuitos de *listaCircuito* foram realocados (se encontrado nova solução RMLSA), mas *Req* não atendeu todas as exigências da rede

para seu estabelecimento. Dessa forma, as alterações não são refletidas na rede física e é retornado para o Estado de Funcionamento Normal da rede (ENF).

A nova solução para o problema RMLSA para cada circuito ativo C_i de *listaCircuito* é solucionado da seguinte forma: busca-se a menor rota disjunta da rota original de C_i , no intuito de reduzir a interferência em novas requisições de circuito a serem estabelecidas na rota original de C_i . É selecionado o formato de modulação mais eficiente espectralmente e que atenda os requisitos de QoT dos circuitos na rede. Para a escolha da faixa de espectro é utilizada a política *First Fit*.

4.3.3 JOC - Just One Circuit Reallocation

A estratégia de realocação de circuitos, denominada JOC (*Just One Circuit Reallocation*), foi proposta neste trabalho para solucionar o problema CR-PLI. A JOC tem como objetivo realocar circuito para reduzir bloqueios de camada física. O diferencial da JOC em relação às demais estratégias consiste da realocação de um único circuito, ou seja, a JOC restringe em 1 a quantidade de circuitos realocados por processo, minimizando as alterações na rede. Além disso, as alterações na rede são efetivadas apenas se for possível prevenir um potencial bloqueio.

A Execução da estratégia JOC ocorre sempre que um potencial bloqueio está para ocorrer. Este potencial bloqueio significa que uma nova requisição será bloqueada se o atual estado da rede não for alterado. Além disso, entende-se que em um potencial bloqueio há a necessidade da realocação de circuito para reduzir o impacto dos efeitos de camada física em enlaces da rede, facilitando o atendimento de requisitos de QoT de novas requisições. A Figura 15 apresenta o funcionamento da estratégia JOC.

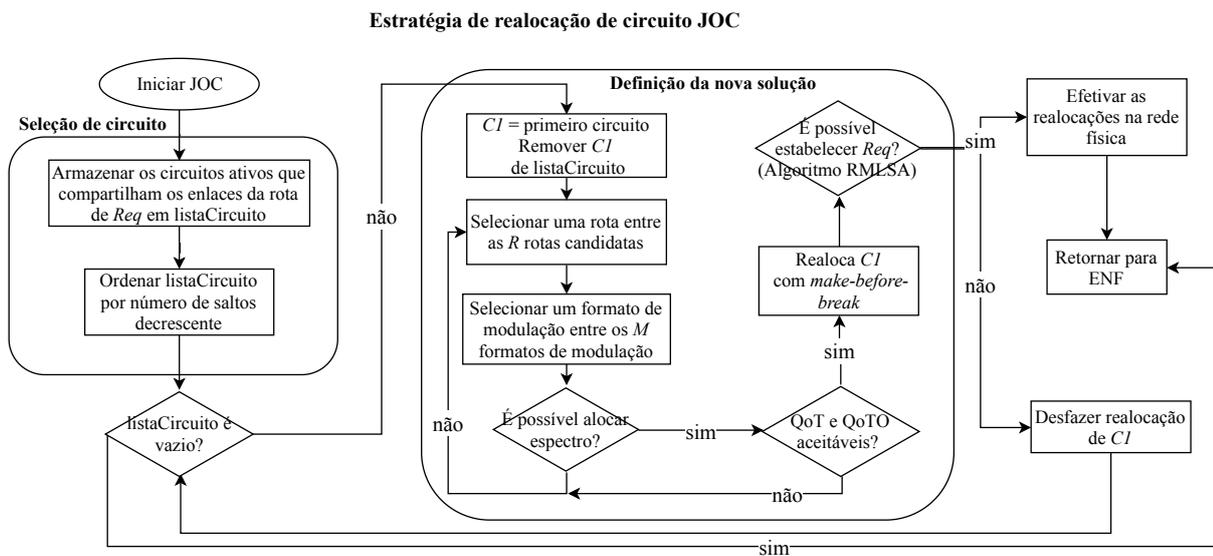


Figura 15 – Funcionamento da estratégia de realocação de circuito JOC.

A estratégia JOC é executada em um grafo auxiliar que representa o estado atual

da rede no plano de controle. Os circuitos a serem realocados são aqueles que compartilham os enlaces da rota R (rota da requisição de potencial bloqueio). Os circuitos selecionados são armazenados em *listaCircuito* e ordenados decrescentemente por número de salto. Este critério de ordenação permite a realocação dos maiores circuitos primeiro, já que estes possivelmente reduzem os impactos dos efeitos de camada física de forma mais acentuada do que aqueles com menores números de saltos.

Após a seleção dos circuitos, o processo de realocação ocorre como segue:

1. Seleciona-se o primeiro circuito ($C1$) de *listaCircuito* e o remove da lista;
2. Busca-se uma nova solução RMLSA para $C1$ e se encontrado, $C1$ é realocado com MbB;
3. Após a realocação de $C1$, verifica-se se a requisição R pode ser atendida. Se sim, o processo é finalizado e é retornado para o estado de funcionamento normal da rede;
4. Se a requisição R não puder ser atendida, é desfeita a realocação de $C1$;
5. Voltar para o passo 1 enquanto a lista não for vazia.

A técnica MbB, utilizada para migrar os circuitos, foi adotada devido a proporção de maior flexibilidade na estratégia comparada às demais técnicas, permitindo assim rerroteamento (nova rota) e/ou reatribuição de espectro (nova faixa de espectro). A rota para realocação de cada circuito é escolhida dentre as k menores rotas com adição da rota disjunta, caso esta não esteja contida nas k ($k = 4$).

O formato de modulação escolhido em novas soluções RMLSA é aquele com maior eficiência espectral e que apresenta QoT admissível para o circuito a ser realocado. No entanto, a modulação escolhida deve manter admissíveis as QoTs dos outros circuitos ativos da rede. Em seguida, é definido o intervalo de espectro a partir da política *First Fit*.

Vale ressaltar que pode ocorrer no processo a impossibilidade realocação de circuito ativo. A impossibilidade ocorre quando a nova solução RMLSA não é encontrada ou quando mesmo realocando um circuito, a requisição iminente de bloqueio será bloqueada. Portanto, diante desta situação nenhuma alteração é realizada na rede física.

Além disso, foi analisado a complexidade computacional da estratégia JOC. Na fase *offline* são calculados os k menores caminhos e a menor rota disjunta para cada par de nós origem-destino da rede, correspondendo às Rotas Candidatas (R_C) de um dado circuito C_i ($C_i \in C$). O parâmetro C corresponde ao conjunto de circuitos ativos que possuem enlaces em comum com a rota da Requisição Iminente de Bloqueio (Req_{IB}).

A complexidade computacional do algoritmo k menores caminhos é $O(k \times |N| \times (|E| + |N| \times \log|N|))$, onde k é a quantidade de menores rotas, N e E são os conjuntos

de nós e enlaces, respectivamente. Já a complexidade computacional para computar um rota disjunta é a mesma do algoritmo de menores caminhos *Dijkstra*, correspondendo a $O(|E| + |N| \times \log|N|)$ (DIJKSTRA, 1959).

Na fase *online* da rede, a complexidade computacional da estratégia JOC é $O(|C| \times |K| \times (|M| \times |E| \times |S| + W))$. O parâmetro W corresponde à complexidade computacional do algoritmo RMLSA utilizado para realocar o circuito C_i . Além disso, para cada R_C , a modulação é definida e a política *First Fit* é aplicada na escolha da faixa de espectro para C_i , resultando em tempo computacional $|M * E * S|$. Após a realocação de C_i , a Req_{IB} é estabelecida, sendo sua complexidade representada por $|W|$. Os parâmetros M , E e S representam as modulações, os enlaces e os *slots* de frequência, respectivamente.

4.4 Considerações Parciais

A fragmentação de espectro é um problema comum nas EONs e consiste da distribuição de pequenos blocos de *slots* livres ao longo do espectro óptico. Essa distribuição pode eventualmente provocar bloqueio de requisição na rede e, portanto, foram propostas estratégias de realocação de circuito para organizar a ocupação espectral, reduzindo assim a fragmentação. Essa reorganização é denominada de desfragmentação do espectro. A realocação de circuito utilizada para reduzir a fragmentação, é também utilizada neste trabalho para reduzir o impacto das imperfeições de camada física, já que os principais bloqueios ocorrem devido a tais imperfeições.

Neste capítulo foi apresentado o contexto relacionado à identificação do problema CR-PLI (*Circuit Reallocation of the aware PLI*), mostrando uma breve descrição do problema e como foi identificado. Para solucionar o problema CR-PLI, foram propostas três estratégias de realocação de circuito, são elas R-RQoT, CRS-PL e JOC. A estratégia R-RQoT foi proposta para amenizar interferências dos circuitos já ativos em novas requisições. Já a estratégia CRS-PL objetiva realocar circuitos ativos para permitir o estabelecimento de requisições iminentes de bloqueio. E por fim, a estratégia JOC foi proposta no intuito de reduzir as alterações na rede, ou seja, minimizar o número de realocações de circuito por processo.

No capítulo seguinte será apresentado uma avaliação de desempenho das estratégias de realocação propostas, comparando-as entre si e com outra estratégia de realocação comumente utilizada na literatura. Também serão apresentadas as especificações dos cenários utilizados para as simulações computacionais, mencionando as topologias de rede usadas no estudo, os parâmetros de camada física adotados, o tráfego de dados escolhido para avaliação, dentre outros. Além disso, serão apresentados os resultados numéricos das estratégias de realocação sob os aspectos de probabilidade de bloqueio de banda, probabilidade de bloqueio de circuito e número médio de circuitos realocados.

5 Avaliação de Desempenho

Este capítulo apresenta a avaliação de desempenho dos algoritmos propostos neste trabalho de dissertação. Na Seção 5.1 é elencado os parâmetros de simulação utilizados no cenário considerado neste trabalho além de detalhar como o cenário foi avaliado. Já a Seção 5.2 apresenta os resultados numéricos da avaliação de desempenho para as métricas de probabilidade de bloqueio de banda, probabilidade de bloqueio de circuito e número médio de circuitos realocados.

5.1 Parâmetros de Simulação

As estratégias de realocação de circuito propostas, R-RQoT, CRS-PL e JOC, foram comparadas entre si e com o algoritmo MBBr (TAKAGI et al., 2011). O algoritmo MBBr foi adaptado para o cenário considerado neste estudo e foi escolhido para fins de comparação devido ao uso da técnica MbB, utilizada também pelos demais concorrentes.

As estratégias propostas foram aplicadas em cenários com algoritmos de alocação CS (*Complete Sharing*) (WANG; MUKHERJEE, 2012), KS-PC (*K-Shortest Path Computation*) (BEYRANVAND; SALEHI, 2013), MD-PC (*Modified Dijkstra Paths Computation*) (BEYRANVAND; SALEHI, 2013) e KSP-RQoTO (*K-Shortest Path with Reduction of QoTO*) (FONTINELE et al., 2017). Foram utilizadas quatro rotas candidatas para os algoritmos de k menores caminhos. Além disso, utilizou-se a política de alocação *First Fit* para a definição da faixa de espectro dos novos circuitos (CHATTERJEE; SARMA; OKI, 2015).

Para avaliar os impactos dos efeitos de camada física nos circuitos ópticos, foi utilizado o modelo de camada física apresentado por JOHANNISSON; AGRELL (2014) (Seção 2.4). Este modelo foi adotado a partir da constatação da maior aproximação da expressão exata que este modelo tenta aproximar (FONTINELE et al., 2017). O modelo adotado foi implementado na ferramenta de simulação SNetS (*SLICE Network Simulator*) (FONTINELE et al., 2017), desenvolvida para avaliar o desempenho das EONs sob um amplo conjunto de métricas e utilizada neste trabalho de mestrado. Informações sobre a validação do SNetS podem ser encontradas em SANTOS (2015).

Para análise de resultados, utilizou-se quatro cenários de avaliação de desempenho. Cada cenário corresponde à utilização de um algoritmo de alocação específico, pois o algoritmo de alocação influencia diretamente no desempenho das estratégias de realocação. Dessa forma, em um único cenário, todos os algoritmos de realocação utilizam o mesmo algoritmo de alocação no intuito de manter justiça. A Tabela 8 ilustra os cenários de

avaliação para a topologia USA.

Tabela 8 – Cenários de avaliação para cada algoritmo de alocação de recurso na topologia USA.

Cenários	Algoritmo de Alocação	Algoritmo de realocação	Topologia
1	CS	MBBr, R-RQoT, CRS-PL e JOC	USA
2	KS-PC	MBBr, R-RQoT, CRS-PL e JOC	USA
3	KSP-RQoTO	MBBr, R-RQoT, CRS-PL e JOC	USA
4	MD-PC	MBBr, R-RQoT, CRS-PL e JOC	USA

Os mesmos cenários da Tabela 8 são avaliados para a topologia EON. O cenário 1, por exemplo, significa que foram aplicadas as estratégias de realocação MBBR, R-RQoT, CRS-PL e JOC, em um cenário de rede que utiliza o algoritmo CS para alocar recurso na topologia USA. Dessa forma, as estratégias de realocação avaliadas consideram em sua heurística o algoritmo de alocação recorrente. Assim, no cenário 1 é possível apenas que todos os algoritmos de realocação usem o mesmo algoritmo de alocação.

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

Para cada simulação foram realizadas 10 replicações com diferentes sementes de geração de variável aleatória utilizando um nível de confiança de 95%. Para cada replicação foram geradas 100.000 requisições de circuitos com cinco pontos de carga distintos. As topologias consideradas nas simulações são USA e EON, Figura 16. O valor apresentado em cada enlace da topologia indica a distância do enlace em quilômetros.

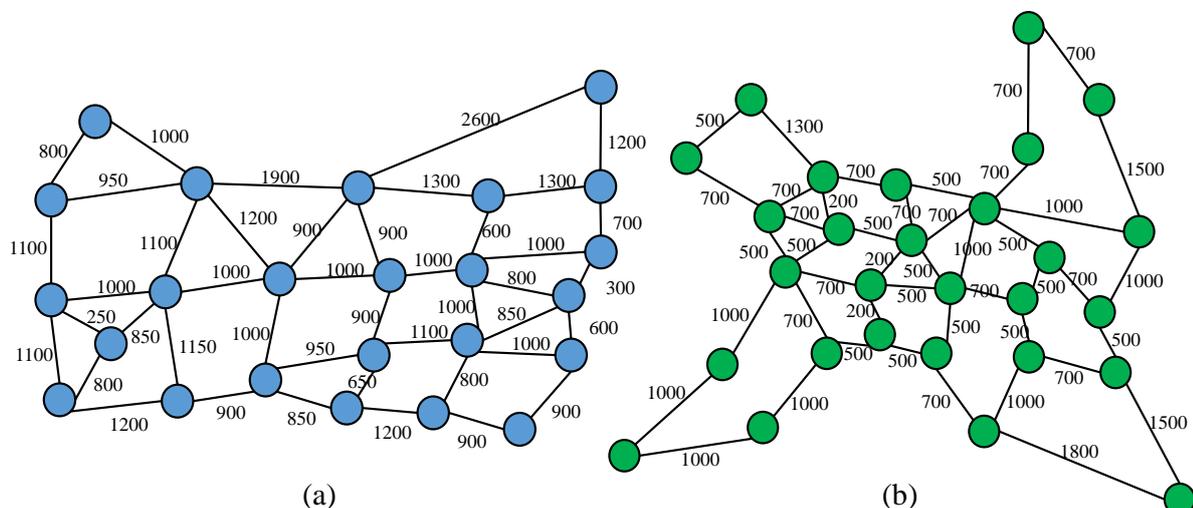


Figura 16 – Topologias de rede utilizadas nas simulações: (a) USA e (b) EON.

Os formatos de modulação considerados neste estudo foram BPSK, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM e 64QAM, com seus respectivos limiares de SNR listados na Tabela 2 da Seção 2.4. As larguras de banda adotadas variam uniformemente entre 10 Gbps, 40 Gbps, 80 Gbps, 100 Gbps, 160 Gbps, 200 Gbps e 400 Gbps. O cálculo da largura de banda de uma requisição i para uma taxa de bits B_n , com nível de modulação L_m e sobrecarga de *Forward Error Correction* (FEC) F , é observado na Equação 5.1 (GAO et al., 2014):

$$B_i = \frac{1.1B_n(1 + F)}{2\log_2 L_m} \quad (5.1)$$

Após a definição da largura de banda, busca-se um número inteiro de *slots* de frequência que atenda 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 em conjunto com os bits de dados. Esses bits adicionais transportam informação redundante e são utilizados pelo receptor para corrigir erros nos bits de dados transmitidos (GAO et al., 2014).

Todos os enlaces da rede são bidirecionais e possuem largura de banda do espectro dividida em 400 *slots* de frequência. Um *slot* de frequência possui largura de banda de 12,5 GHz e a banda de guarda possui largura de banda de 6,25 GHz (GAO; CHEN; SHIEH, 2012). Os ganhos dos amplificadores são ajustados para compensar as perdas dos dispositivos e da fibra. Outros parâmetros utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 9 (BEYRANVAND; SALEHI, 2013; ZHAO; WYMEERSCH; AGRELL, 2015).

Tabela 9 – Parâmetros de camada física usados nas simulações.

Descrição	Valores
Densidade espectral de potência do sinal	-17 dBm/GHz
Atenuação da fibra	0.2 dB/km
Parâmetro de dispersão da fibra	16 ps ² /km
Coefficiente não linear da fibra	1.3 (Wkm) ⁻¹
Tamanho de um span	100 km
Figura de ruído do amplificador	6 dB
Potência de saturação do amplificador	16 dBm

5.2 Resultados Numéricos

Para a avaliação de desempenho das estratégias propostas, foram consideradas as métricas de avaliação i) Probabilidade de Bloqueio de Banda (PBB), ii) Probabilidade de Bloqueio de Circuito (PBC) e iii) Número médio de Realocação de Circuito (NCR). Os resultados numéricos das métricas foram obtidos utilizando a ferramenta de simulação SNetS e observados em duas topologias reais distintas.

Os cenários com realocação são apresentados com a legenda +JOC, +CRS-PL, +R-RQoT e +MBBr. Por exemplo, na Figura 17, a legenda +JOC significa que o algoritmo de alocação é o CS e a estratégia de realocação é a JOC (CS+JOC). Na Tabela 10 é mostrado um exemplo da nomenclatura utilizada para o cenário do algoritmo de alocação CS. Segue a mesma ideia para os demais cenários.

Tabela 10 – Nomenclatura utilizada para representação das estratégias de realocação de circuito em um cenário que utiliza o algoritmo de alocação CS.

Sigla	Significado	Descrição
Sem realocação	CS	Algoritmo de alocação CS sem estratégia de realocação
+CRS-PL	CS+CRS-PL	Algoritmo de alocação CS com estratégia de realocação CRS-PL
+JOC	CS+JOC	Algoritmo de alocação CS com estratégia de realocação JOC
+MBBr	CS+MBBr	Algoritmo de alocação CS com estratégia de realocação MBBR
+R-RQoT	CS+R-RQoT	Algoritmo de alocação CS com estratégia de realocação R-RQoT

5.2.1 Probabilidade de Bloqueio de Banda

Nesta seção são apresentados os resultados da Probabilidade de Bloqueio de Banda (PBB) para os diversos cenários de avaliação. A PBB faz distinção entre os bloqueios de circuitos com requisitos de larguras de banda diferentes, consistindo da razão entre a quantidade de banda bloqueada e quantidade de banda requisitada. O cálculo da PBB é definido da seguinte forma:

$$PBB = \frac{\sum LBB_i * TB_i}{\sum LB_j * T_j}.$$

Os parâmetros LBB_i e TB_i são a largura de banda e o tempo de duração de cada circuito bloqueado, respectivamente. Já LB_j e T_j representam, nesta ordem, a largura de banda e a duração de cada circuito requisitado. Os resultados numéricos da PBB são em função da carga de tráfego na rede, definida de modo que os valores de PBB não ultrapassasse 10% de bloqueio.

A Figura 17 exhibe a PBB das estratégias de realocação propostas em comparação com a estratégia já consagrada na literatura (MBBr). O algoritmo de alocação CS foi utilizado no cenário da Figura 17 e os resultados foram obtidos usando as duas topologias reais de rede consideradas nesta avaliação de desempenho.

Segundo a Figura 17, as estratégias propostas (R-RQoT, CRS-PL e JOC) apresentaram reduções significativas em relação ao CS (Sem Realocação), já que este não utiliza mecanismo para lidar com bloqueios de requisições. Dentre as estratégias propostas, a R-RQoT apresentou desempenho inferior à MBBR em termos de PBB. O desempenho inferior é devido à abordagem adotada do MBBR ser diferente da R-RQoT quando se trata da requisição iminente de bloqueio. Após o processo de realocação realizado pela estratégia

R-RQoT, a requisição iminente de bloqueio é bloqueada enquanto nas demais estratégias é feita uma nova tentativa de estabelecimento. Essa nova tentativa é uma particularidade significativa para a eficiência dos algoritmos de realocação avaliados neste trabalho.

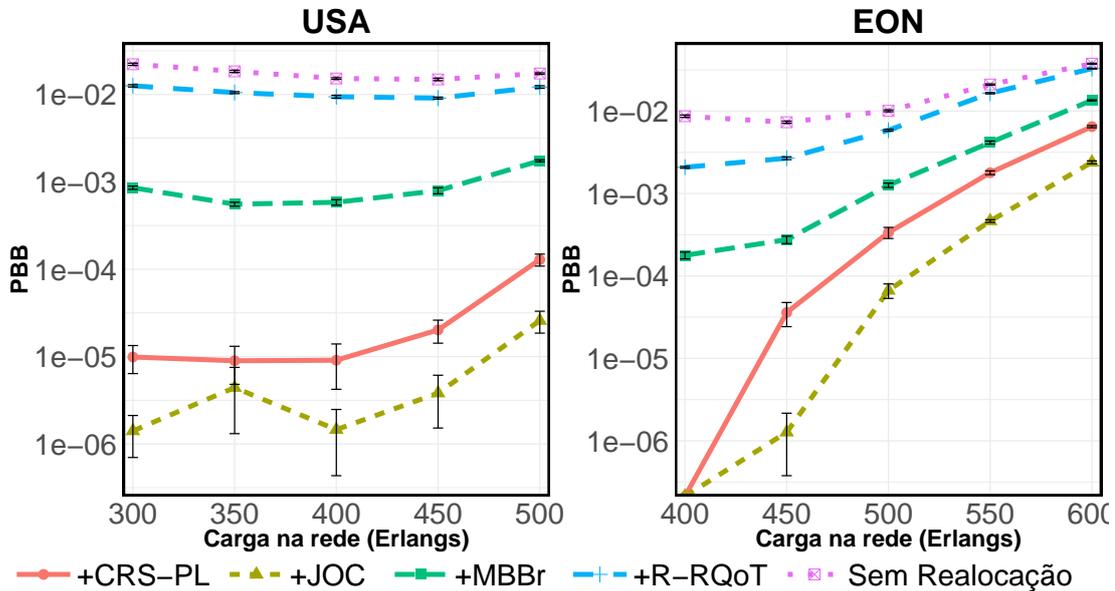


Figura 17 – Resultados de PBB das estratégias de realocação quando aplicadas ao **algoritmo CS** para as topologias **USA** e **EON**.

Analisando a Figura 17 de forma mais específica, observa-se que a estratégia JOC apresenta o melhor desempenho de PBB comparada às demais estratégias. Considerando a carga 500 *Erlangs*, a JOC apresenta redução de PBB de 79,92%, 98,52% e 99,79% comparada aos algoritmos de realocação CRS-PL, MBr e R-RQoT para a topologia USA. Já para a carga 600 *Erlangs* na topologia EON, os resultados da utilização da JOC apresentaram reduções respectivamente de 63,07%, 82,27% e 92,69% em relação às estratégias CRS-PL, MBr e R-RQoT.

A Figura 18 mostra os resultados de PBB em um cenário que usa o algoritmo de alocação KS-PC. O mesmo comportamento mencionado na Figura 17 é mantido no gráfico da Figura 18. A estratégia JOC apresenta melhor resultado numérico em termos de PBB, seguido da CRS-PL, MBr e por último R-RQoT.

Como já mencionado sobre o gráfico da Figura 18, nota-se o desempenho superior da JOC em todos os pontos de carga avaliados. Na topologia USA, a estratégia JOC alcançou redução de 99,38% de PBB comparada ao KS-PC (Sem Realocação) para o último ponto de carga. Considerando também o último ponto de carga na topologia EON, a JOC apresentou 60,11% de redução comparado à CRS-PL, realizando alterações mínimas na rede (menor número de circuitos realocados) em relação às demais estratégias.

O cenário de avaliação utilizando o algoritmo KSP-RQoTO é apresentado na Figura 19. Nesta Figura é mostrada a PBB para as estratégias de realocação avaliadas em função da carga na rede para as topologias USA e EON. Nas duas topologias analisadas, todas

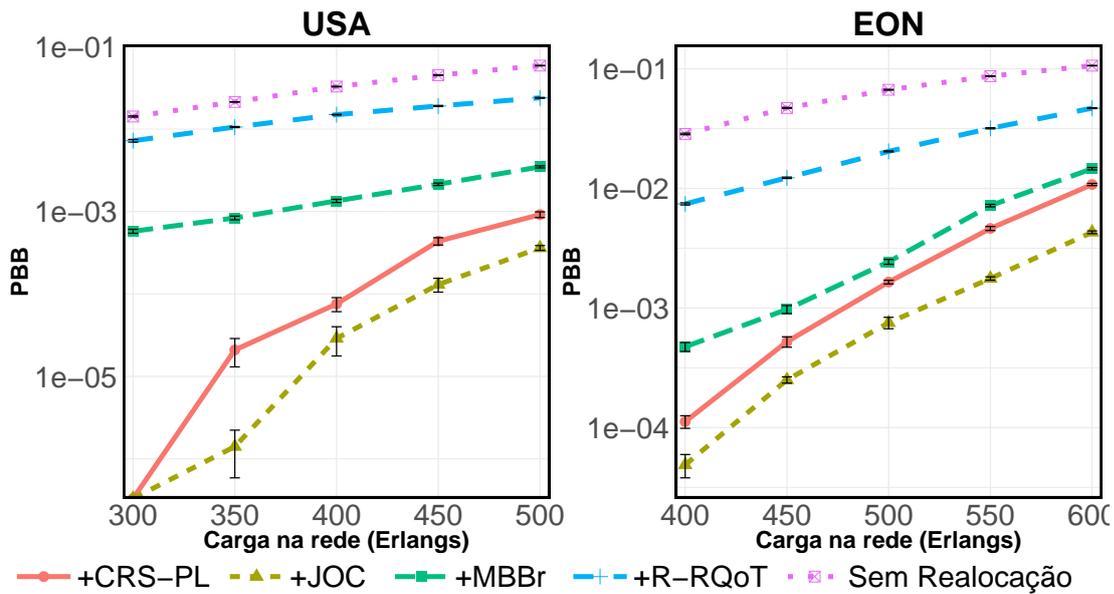


Figura 18 – Resultados de PBB das estratégias de realocação quando aplicadas ao **algoritmo KS-PC** para as topologias **USA** e **EON**.

as estratégias apresentaram reduções consideráveis quando comparadas ao KSP-RQoTO (Sem Realocação), apesar das estratégias provocarem aumento no custo computacional da rede.

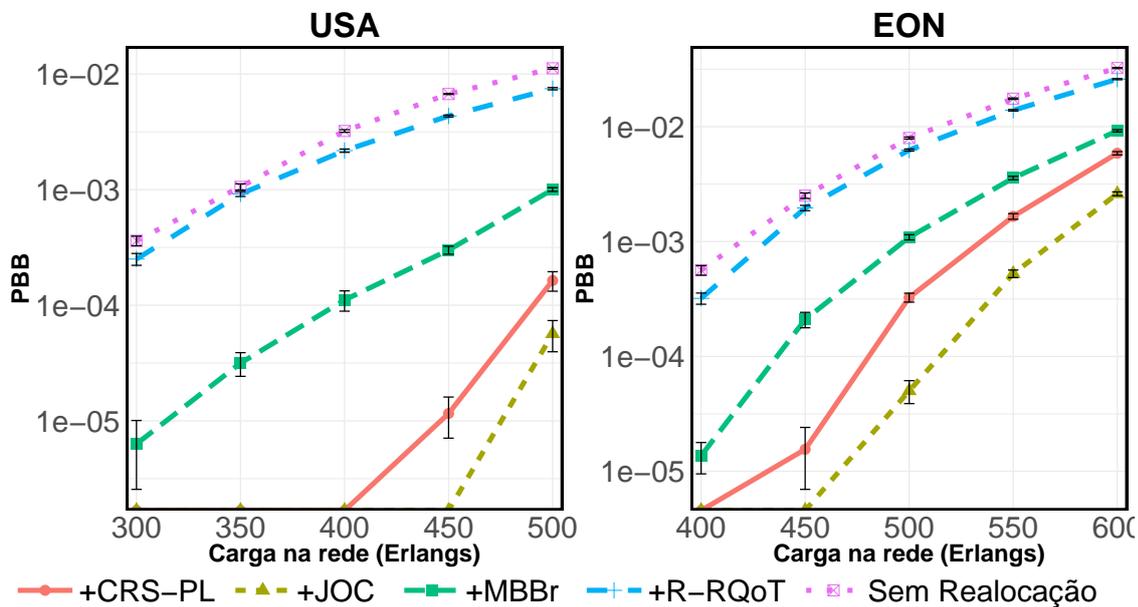


Figura 19 – Resultados de PBB das estratégias de realocação quando aplicadas ao **algoritmo KSP-RQoTO** para as topologias **USA** e **EON**.

Considerando uma análise comparativa apenas entre os algoritmos de alocação de recurso utilizados, o KSP-RQoTO realiza o estabelecimento de requisições de forma mais otimizada possível, ou seja, possui a menor PBB levando em conta os mesmos parâmetros de simulação (FONTINELE et al., 2017). Como as estratégias de realocação fazem uso dos algoritmos de alocação para tentativa de atendimento da requisição iminente de bloqueio,

realizar realocação de circuito no cenário da Figura 19 é mais complexo. A complexidade é referente à dificuldade de encontrar novos recursos para o restabelecimento de circuito.

Apesar da alta complexidade em realocar circuito no referido cenário, Figura 19, as estratégias apresentaram reduções de PBB quando foram utilizadas em ambas as topologias adotadas. A diminuição de PBB da JOC na topologia USA foi tão acentuada que houveram bloqueios apenas nas cargas 450 e 500 *Erlangs*. Além disso, a JOC obteve redução de aproximadamente 55,6% em relação à CRS-PL para a topologia EON, considerando o último ponto de carga.

Por fim, as estratégias de realocação foram avaliadas no cenário que utiliza o algoritmo MD-PC para alocar recursos na rede. O MD-PC, assim como o CS, KS-PC e KSP-RQoTO, são os principais algoritmos de alocação de recurso cientes de PLI da literatura das EONs. A Figura 20 exhibe os resultados da PBB das estratégias de realocação de circuito para ambas as topologias adotadas.

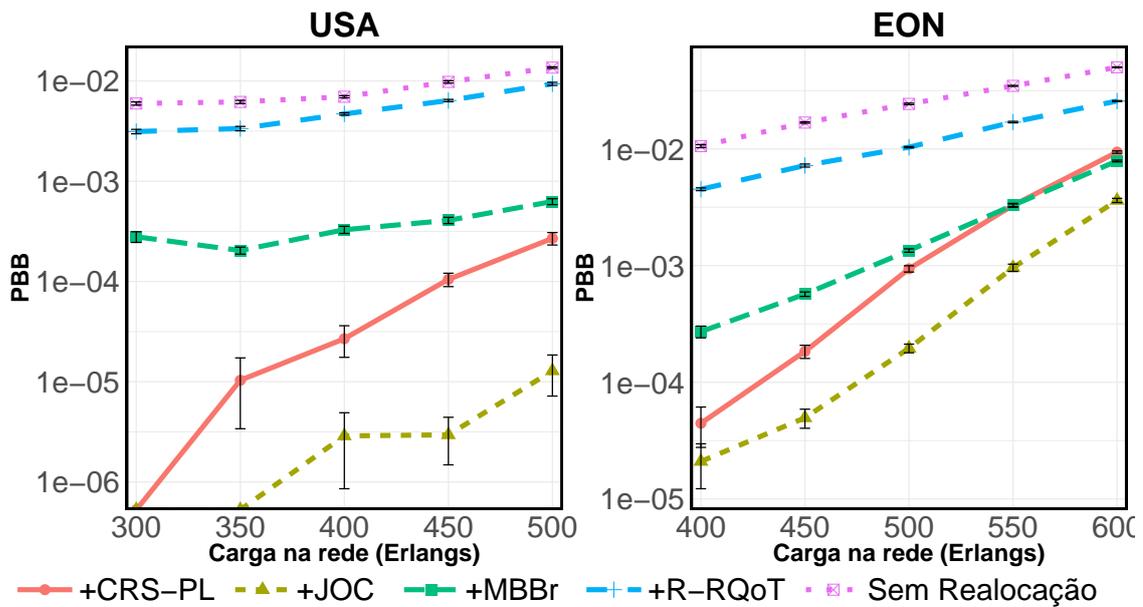


Figura 20 – Resultados de PBB das estratégias de realocação quando aplicadas ao **algoritmo MD-PC** para as topologias USA e EON.

No cenário da Figura 20, a ordem de estratégias mais eficiente em termos de PBB foi mantida, apresentando comportamento semelhante dos cenários anteriores. A R-RQoT obteve resultado de PBB reduzida em relação ao MD-PC (sem realocação) em ambas as topologias. A CRS-PL já se mostrou mais eficiente em relação a R-RQoT e MBBR em termos de PBB. Entretanto, a JOC foi a estratégia com melhor desempenho comparada às demais estratégias tanto para a topologia USA como para a EON.

Considerando a carga de tráfego 500 *Erlangs*, a redução da estratégia JOC quando aplicada ao cenário da Figura 20 para a topologia USA foi de 95,23% de PBB comparada aos resultados da CRS-PL. Já para a topologia EON houve uma diminuição de 61,45% de

PBB em relação a estratégia CRS-PL, levando em conta a carga 600 *Erlangs*. A CRS-PL foi utilizada para fins de comparação com a JOC por ser a estratégia com melhores resultados em termos de PBB comparada às estratégias MBBr e R-RQoT.

As reduções de PBB observadas quando as estratégias de realocação de circuito são utilizadas independente de topologia e de algoritmo de alocação de recurso para o cenário de rede considerado. Os desempenhos diferentes das estratégias são devido aos critérios adotados serem distintos, possuindo cada uma sua particularidade. Vale ressaltar que as estratégias R-RQoT, CRS-PL e JOC, foram propostas no decorrer do mestrado em momentos diferentes.

5.2.2 Probabilidade de Bloqueio de Circuito

Além da PBB, foi utilizada para avaliação de desempenho a métrica Probabilidade de Bloqueio de Circuito (PBC). A PBC pode ser decomposta em quatro componentes (como já mencionado na Seção 4.2) no intuito de diferenciar as causas de bloqueio. As componentes são: AEL, Frag, QoTN e QoTO.

O bloqueio de um circuito causado pela fragmentação ocorre quando há quantidade de slots suficientes para atender a requisição e esses slots não estão dispostos de forma contígua e/ou contínua no espectro óptico. Quando a quantidade de slots é insuficiente para a alocação de um circuito, ocorre bloqueio por AEL.

As componentes de bloqueio QoTN e QoTO surgem devido a consideração dos efeitos de camada física. Os bloqueios por QoTN acontecem quando as interferências dos circuitos ativos são altas o suficiente para degradar a QoT do novo circuito, tornando-a inaceitável. Já os bloqueios por QoTO ocorrem quando o impacto do estabelecimento de um novo circuito torna a QoT de circuitos já estabelecidos abaixo do limiar exigido pela rede.

As Figuras 21, 22, 22 e 24, mostram as componentes de bloqueio nos cenários com e sem a aplicação da estratégia JOC para a topologia USA em cenários com diferentes algoritmos de alocação (CS, KS-PC, KSP-RQoTO e MD-PC). As Figuras a seguir são compostas dos resultados de um cenário sem realocação, com realocação (aplicação da JOC) e um gráfico com *zoom* nos intervalos do cenário com realocação, mostrando que o bloqueio não é zero em muitos casos. A estratégia JOC foi a escolhida para fins de comparação por apresentar melhor desempenho. É notório que as componentes de camada física (QoTN e QoTO) apresentam as maiores probabilidades de bloqueio. Além disso, observa-se que a utilização da JOC produz reduções consideráveis de bloqueios QoTN e QoTO comparadas às componentes Frag e AEL nas diferentes cargas de tráfego analisadas.

A Figura 21 apresenta os resultados numéricos para as componentes de bloqueio em um cenário sem realocação, utilizando o algoritmo CS, e ao seu lado os resultados com

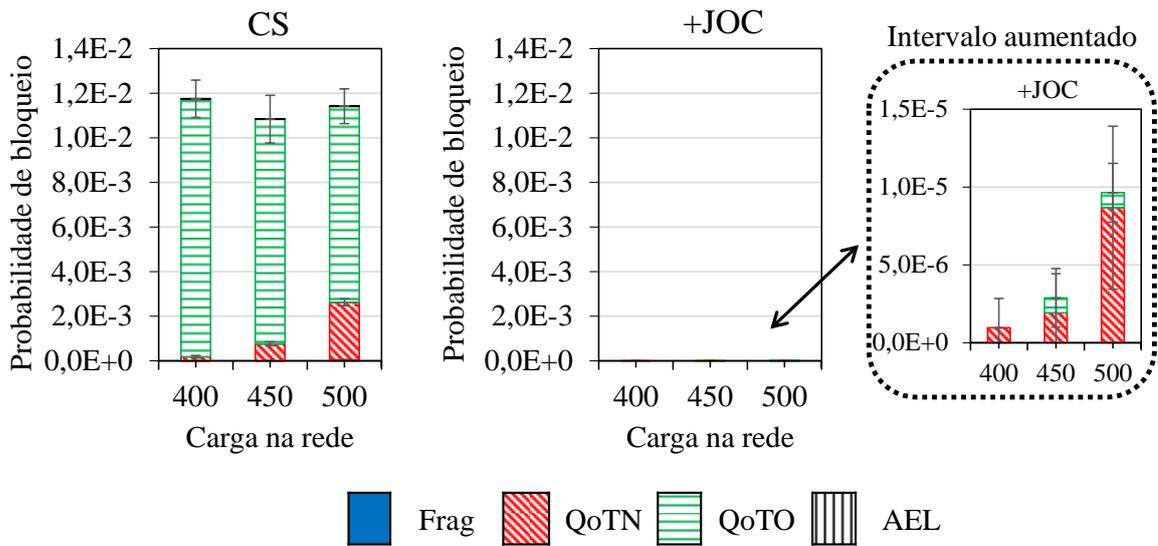


Figura 21 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmo **CS** (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia **JOC** (CS+JOC) na topologia **USA**.

realocação, usando a estratégia JOC. Comparando os cenários da Figura 21, os bloqueios do tipo QoTN e QoTO da +JOC são drasticamente reduzidos em todos os pontos de cargas analisados em relação ao CS. Em termos numéricos, o bloqueio do CS foi reduzido de 0,0114% para 0,00000963% com utilização da +JOC, correspondendo a uma diminuição de 99,92% de probabilidade de bloqueio para a carga de tráfego 500 *Erlangs*.

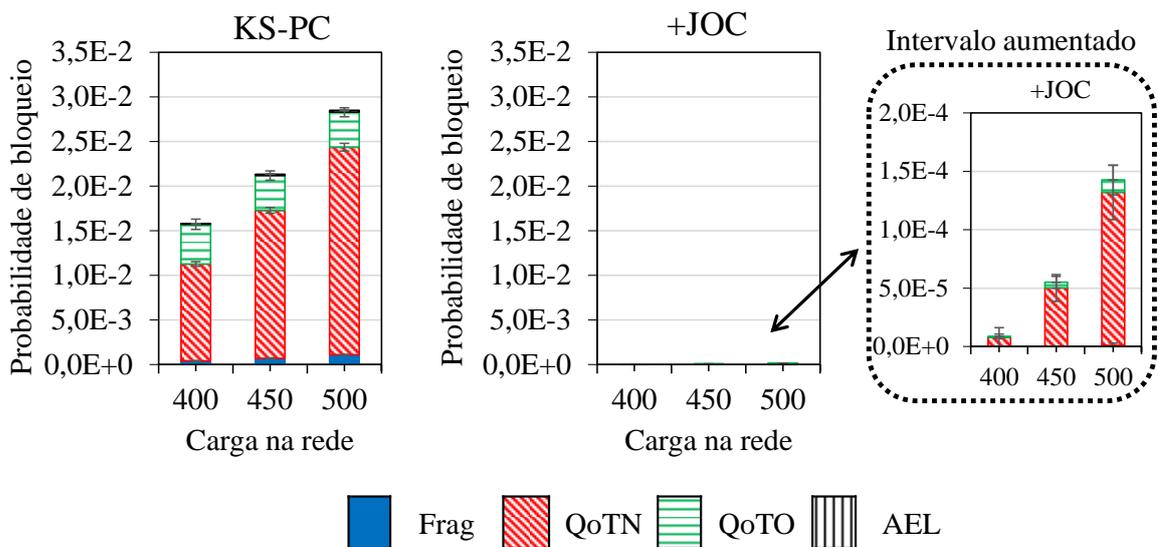


Figura 22 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmo **KS-PC** (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia **JOC** (KS-PC+JOC) na topologia **USA**.

De forma similar, as reduções consideráveis de bloqueios QoTN e QoTO são observadas na Figura 22 para o algoritmo KS-PC sem e com aplicação da estratégia JOC. Para todos os pontos de cargas houveram diminuições de bloqueios do tipo QoTN e QoTO. Porém, levando em conta a carga de 500 Erlangs, as reduções de bloqueio apenas do tipo QoTN e QoTO foram aproximadamente de 99,44% e 99,73% comparadas ao cenário sem realocação, respectivamente.

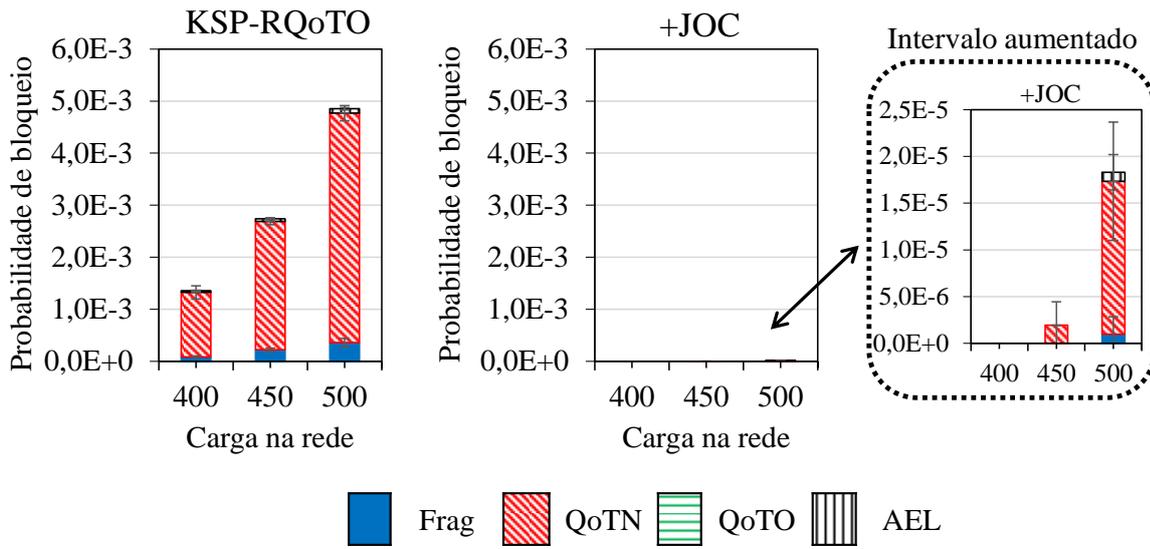


Figura 23 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmo **KSP-RQoTO (Sem realocação)** em relação aos resultados da estratégia **JOC (KSP-RQoTO+JOC)** na topologia **USA**.

A Figura 23 mostra os resultados das componentes de bloqueio no cenário KSP-RQoTO. A heurística do algoritmo KSP-RQoTO não permite a ocorrência de bloqueios do tipo QoTO. Quando a estratégia JOC é aplicada no cenário KSP-RQoTO, a restrição de evitar bloqueio QoTO é mantida e, portanto, a redução significativa ocorre na componente QoTN. Nos diferentes valores de cargas na rede houveram diminuições da probabilidade de bloqueio. Em termos numéricos, o bloqueio apenas da componente QoTN para o KSP-RQoTO é próximo de 0,0044058039% enquanto para o +JOC é cerca de 0,000016378%, reduzindo os bloqueios QoTN em 99,63% para o último ponto de carga.

As realocações dos circuitos promovidas pela estratégia JOC contribuem também para a diminuição de bloqueios de camada física para o cenário MD-PC. A partir da utilização da JOC, Figura 24, nota-se uma maior admissão de requisições de circuito, utilizando os recursos de forma eficiente e melhorando o desempenho da rede. Levando em conta as componentes QoTN e QoTO para o ponto de carga 500 *Erlangs*, as reduções de bloqueio correspondem aproximadamente 99,91% e 99,99%, respectivamente.

No intuito de realizar uma avaliação mais completa do comportamento da estratégia de realocação escolhida para análise, aplicou-se a JOC nos cenários CS, KS-PC, KSP-

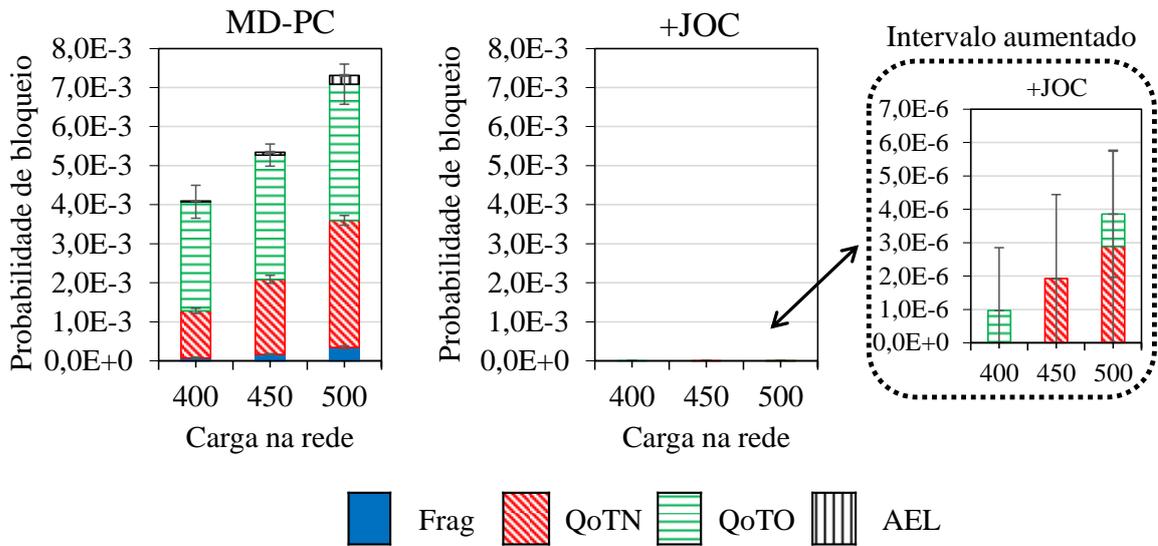


Figura 24 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmo MD-PC (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia JOC (MD-PC+JOC) na topologia USA.

RQoTO e MD-PC, para a topologia de rede EON. Assim como na topologia USA, observa-se reduções significativas de bloqueios por camada física quando a JOC é utilizada na topologia EON. As Figuras 25, 26, 27 e 28, mostram os resultados numéricos das componentes de probabilidade de bloqueio para a topologia EON nos cenários avaliados.

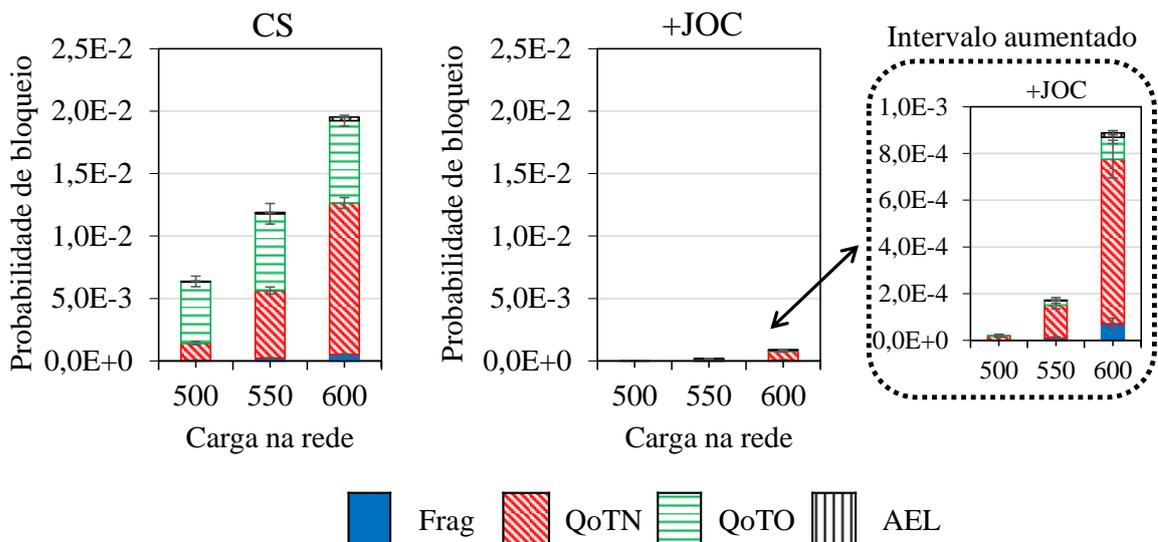


Figura 25 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmo CS (Sem realocação) em relação aos resultados da estratégia JOC (CS+JOC) na topologia EON.

Considerando a Figura 25, a probabilidade de bloqueio do CS é próxima de 0,02%

para a carga 600 Erlangs enquanto para o +JOC é pouco menos que 0,001%. Esta redução mostra que as realocações realizadas com o uso da JOC são eficientes no tocante a atender requisições iminentes de bloqueio, contribuindo para o estabelecimento de circuito e, conseqüentemente, diminuição de bloqueios na rede. Com relação a bloqueios apenas de camada física, as componentes QoTN e QoTO foram reduzidas respectivamente em 94,18% e 98,57% comparadas aos resultados de CS (sem realocação).

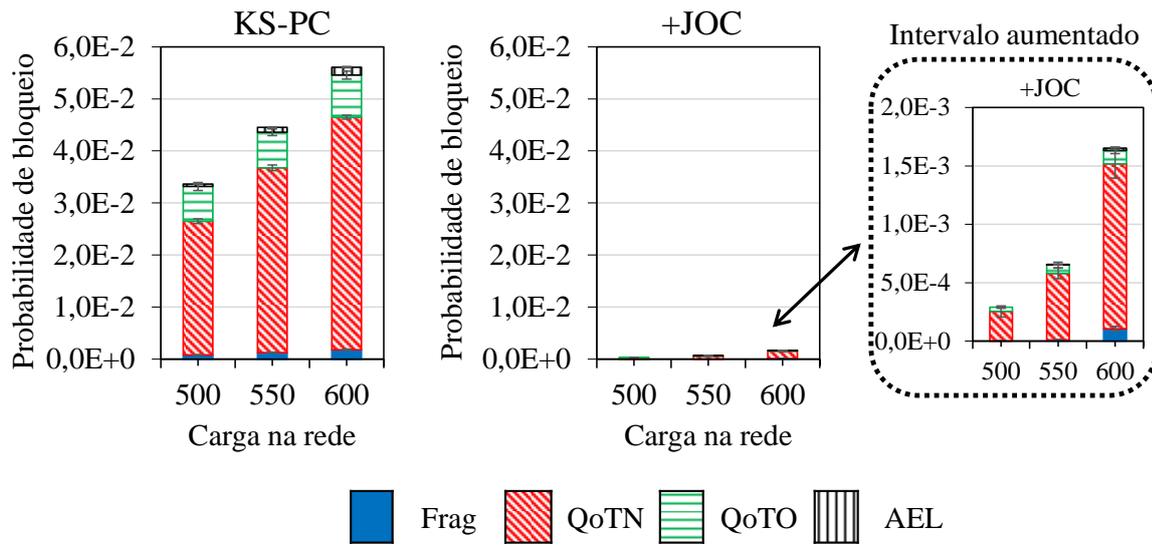


Figura 26 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmos **KS-PC (Sem realocação)** em relação aos resultados da estratégia **JOC (KS-PC+JOC)** na topologia **EON**.

A Figura 26 mostra os resultados numéricos das componentes de probabilidade de bloqueio para o algoritmo KS-PC sem e com realocação (+JOC). Nota-se, assim como na Figura 22, a diminuição expressiva de bloqueios de camada física. Os bloqueios do tipo QoTN para o KS-PC correspondem a aproximadamente 0,055% enquanto para o +JOC é cerca de 0,002%. Vale ressaltar que houve diminuição significativa em todos os pontos de cargas considerados, conforme é observado na Figura 26.

O objetivo de evitar bloqueio do tipo QoTO ocorre também para a topologia EON, ou seja, independe de topologia de rede. A Figura 27 apresenta as componentes de probabilidade de bloqueio em um cenário sem realocação (KSP-RQoTO) e com realocação (+JOC). Observa-se, por exemplo, que entre as componentes de bloqueio, a QoTN sofreu a maior redução em todos os pontos de cargas, quando a JOC é aplicada no KSP-RQoTO. Considerando a carga 600 *Erlangs*, o bloqueio do tipo QoTN diminui em 92,07% do +JOC em relação ao KSP-RQoTO.

A estratégia JOC se mostra eficiente também quando aplicada em cenário que utiliza o algoritmo MD-PC. Na Figura 28 é apresentado a probabilidade de bloqueio sem e com a utilização da JOC. Comparando os resultados do MD-PC e +JOC, percebe-se

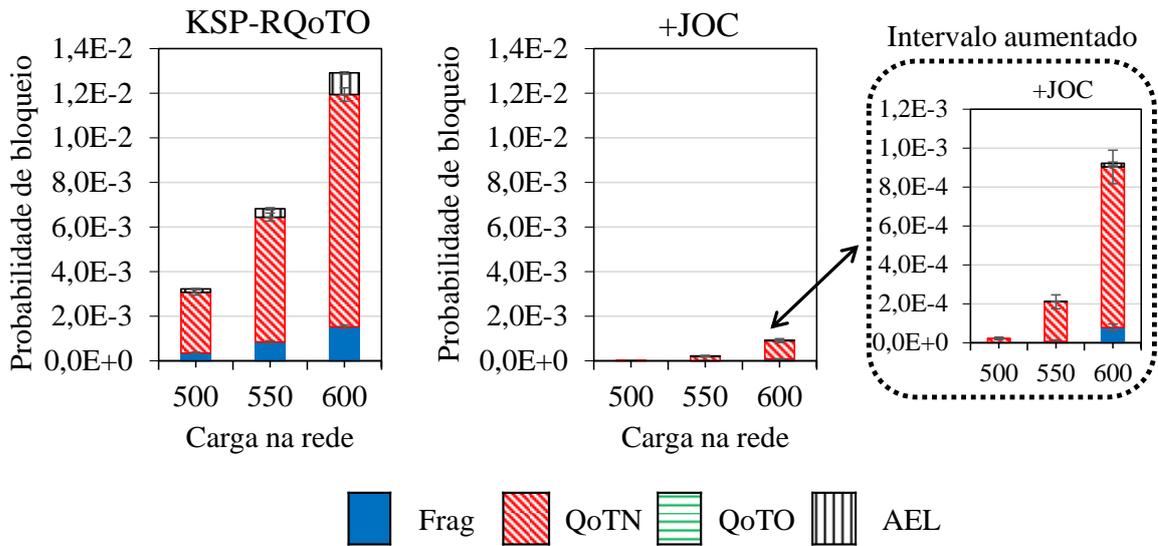


Figura 27 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmos **KSP-RQoTO (Sem realocação)** em relação aos resultados da estratégia **JOC (KSP-RQoTO+JOC)** na topologia **EON**.

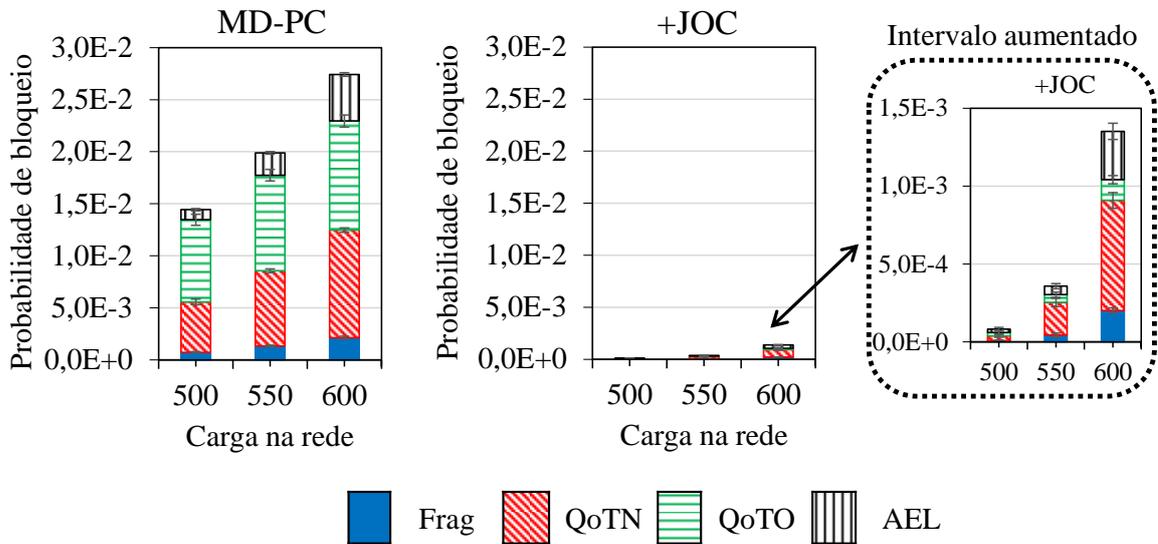


Figura 28 – Resultados numéricos das componentes da PBC para o algoritmos **MD-PC (Sem realocação)** em relação aos resultados da estratégia **JOC (MD-PC+JOC)** na topologia **EON**.

reduções expressivas nas cargas de tráfego avaliadas. As componentes QoTN e QoTO sofreram as maiores reduções de bloqueio devido aos rerroteamentos de circuitos realizados pela JOC quando uma requisição está em iminência de bloqueio. Em termos de valores numéricos, enquanto o bloqueio é próximo de 0,0275% para o MD-PC, o bloqueio é pouco mais de 0,00125% para o +JOC, levando em conta a carga de tráfego 600 *Erlangs*.

As reduções mencionadas e observadas nas Figuras acima ocorrem porque a realo-

cação de circuito para rota distinta realizada, a partir da estratégia JOC, contribui para diminuição dos impactos dos efeitos de camada física na rede. Os efeitos SPM, XPM e FWM, ocasionados por interferências de circuitos ativos que compartilham enlaces da rede são consideravelmente mitigados a partir da migração de tráfego de dados de circuitos ativos proporcionada pela estratégia JOC.

5.2.3 Número médio de Circuitos Realocados

Outra métrica importante para análise de desempenho é o NCR. A métrica NCR representa o número médio de circuitos realocados por processo de realocação, ou seja, quantidade de circuitos que sofreram rerroteamento na rede a partir da execução da estratégia de realocação. O cálculo do NCR consiste do seguinte:

$$\text{NCR} = \frac{\sum_1^t \text{numeroCircuitosRealocados}}{t}.$$

A variável t é o número total de processos de realocação ocorridos a cada simulação, ou seja, a quantidade de vezes que as estratégias são executadas. Para cada processo, soma-se o número de circuitos realocados e, ao final da simulação, tal valor é dividido por t para obter o valor de NCR. Quanto menor o NCR, menor número de alterações são realizadas e, portanto, os custos de migração de circuitos são minimizados.

Assim como nas outras métricas de avaliação utilizadas para analisar o desempenho da rede neste trabalho, a métrica NCR também foi analisada considerando o cenário com diferentes algoritmos de alocação em ambas as topologias adotadas. A seguir são apresentados os gráficos dos valores de NCR em função da carga na rede para as estratégias de realocação de circuito cientes de PLI.

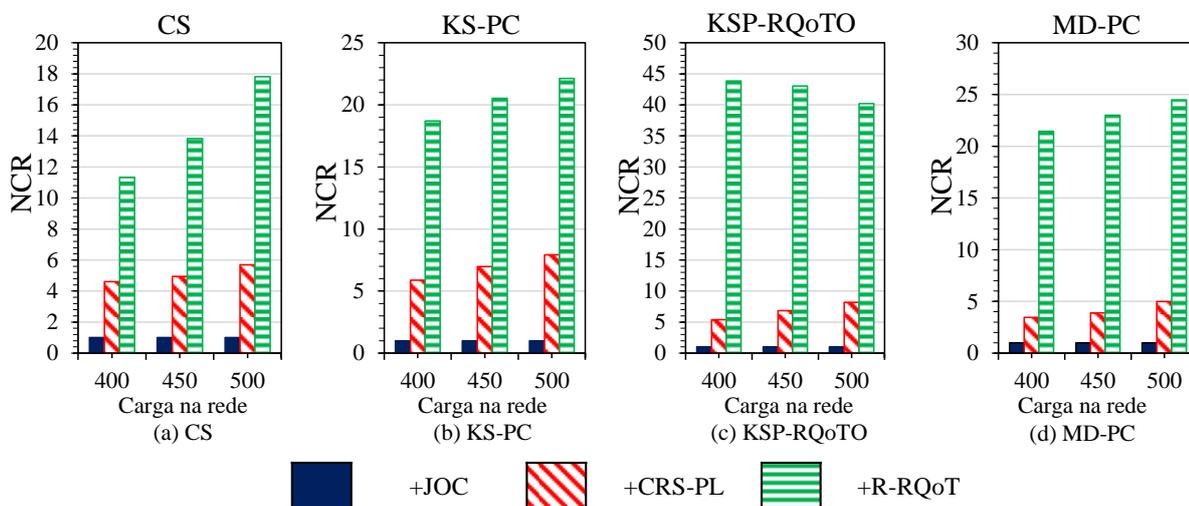


Figura 29 – Valores de NCR para a topologia USA no cenário (a) CS, (b) KS-PC, (c) KSP-RQoTO e (d) MD-PC.

A Figura 29 mostra os valores de NCR das estratégias de realocação cientes de imperfeições de camada física para a topologia USA. Os valores de NCR foram obtidos para os cenários CS, KS-PC, KSP-RQoTO e MD-PC, considerando diferentes cargas de tráfego na rede.

A Figura 29(a) apresenta o NCR para as estratégias JOC, CRS-PL e R-RQoT no cenário CS. Observa-se que o valor de NCR da JOC é o menor dentre as estratégias avaliadas para todos os pontos de carga. Na Figura 29(b), os valores de NCR também se mantêm o mesmo para a JOC, correspondendo a no máximo 1 circuito realocado por processo de realocação.

Os valores de NCR da Figura 29(c) são aproximadamente 1, 8 e 40, para as estratégias JOC, CRS-PL e R-RQoT, respectivamente, considerando a carga 500 *Erlangs*. Ainda que no cenário KSP-RQoTO foi observado redução de NCR para a estratégia CRS-PL, a JOC permanece com apenas 1 circuito realocado por processo. O mesmo ocorre para o cenário da Figura 29(d), com menor valor sendo da estratégia JOC.

A métrica NCR foi avaliada nos diferentes cenários de algoritmo de alocação para a topologia EON. A avaliação foi feita considerando diferentes cargas na rede, assim como no cenário da Figura 29. Os resultados numéricos da métrica NCR para a topologia EON são apresentados na Figura 30.

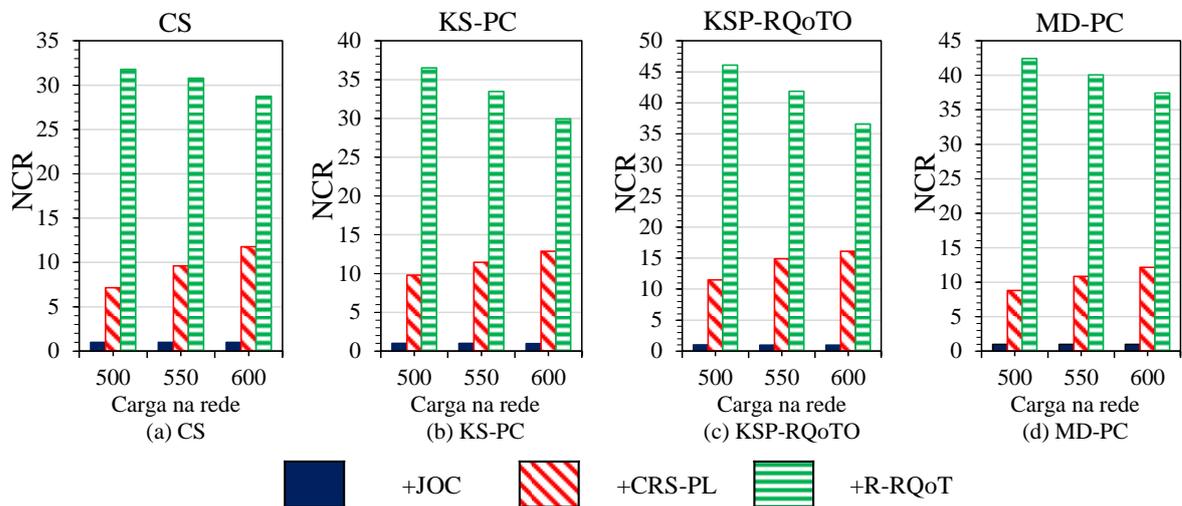


Figura 30 – Valores de NCR para a topologia EON no cenário (a) CS, (b) KS-PC, (c) KSP-RQoTO e (d) MD-PC.

A Figura 30(a) consiste dos valores de NCR quando as estratégias de realocação cientes de PLI são aplicadas no CS. Em todos os pontos de carga o valor de NCR é no máximo 1 para a estratégia JOC. De forma semelhante, na Figura 30(b) a estratégia JOC possui o menor valor de NCR em relação aos concorrentes, com média de até 1 circuito realocado por processo para as cargas avaliadas. Isto significa que apenas 1 circuito foi necessário para a estratégia JOC evitar o bloqueio de requisições enquanto a estratégia

CRS-PL necessitou do rerroteamento de aproximadamente 13 circuitos ativos, considerando o último ponto de carga (Figura 30(b)).

Já na Figura 30(c), foram observados os resultados do NCR quando as estratégias cientes de PLI foram aplicadas ao KSP-RQoTO. Da mesma forma dos outros cenários, a estratégia JOC apresentou o menor número de circuitos realocados por processo em comparação às demais estratégias. Considerando a carga 600 *Erlangs*, enquanto as estratégias CRS-PL e R-RQoT apresentam valores de NCR aproximados de 16 e 37 respectivamente, a JOC apresenta NCR igual a 1. Assim como a Figura 30(c), na Figura 30(d), a JOC também possui valor de NCR igual a 1, enquanto o CRS-PL apresenta NCR próximo de 37 considerando o último ponto de carga.

Os valores NCR da estratégia JOC são iguais a 1 em diferentes pontos de carga devido a heurística permitir apenas 1 realocação, ou seja, dos circuitos selecionados para realocação, busca-se aquele que, se realocado, viabiliza o atendimento da requisição iminente de bloqueio. A realocação de apenas 1 único circuito por processo é independente da carga na rede e da topologia utilizada. A heurística da JOC minimiza as alterações na rede e diminui drasticamente os custos operacionais. Apenas as estratégias cientes de PLI foram consideradas para a análise dos valores de NCR.

Vale ressaltar que as estratégias JOC e CRS-PL realocam circuitos no intuito de atender a requisição iminente de bloqueio. Já a R-RQoT realoca circuito objetivando evitar bloqueios de futuras requisições com características semelhantes às aquelas bloqueadas. Portanto, a abordagem diferente reflete no valor expressivo de NCR para a estratégia R-RQoT.

5.3 Considerações Parciais

Neste capítulo foi descrito o cenário de avaliação de desempenho. Foram mostrados os parâmetros utilizados para as simulações computacionais realizadas para obtenção dos resultados de cada algoritmo considerado. As estratégias propostas foram comparadas entre si e com outra estratégia de realocação para melhor avaliar o comportamento das soluções.

Além disso, as análises dos resultados foram feitas adotando as métricas probabilidade de bloqueio de banda, probabilidade de bloqueio de circuito e número médio de circuitos realocados. Os resultados das métricas foram observados em duas topologias distintas, considerando diferentes cargas de tráfego na rede.

6 Conclusões

As redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks* – EONs) surgiram para lidar com o crescente tráfego de dados no núcleo dos sistemas de comunicação. As EONs apresentam características como flexibilidade no atendimento de requisições de diferentes larguras de banda e eficiência na utilização do espectro. Estas características proporcionam maior otimização dos recursos de rede em relação a redes ópticas tradicionais.

A técnica utilizada para gerenciar o espectro óptico nas EONs, neste trabalho, foi a *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). A OFDM permite a divisão do espectro em pequenos intervalos de frequência de 12,5 GHz, denominados *slots*. Os *slots* podem ser agrupados para formar maiores canais de comunicação e atender requisições de circuito de grandes larguras de banda.

Para o estabelecimento de requisição de circuito nas EONs é necessário solucionar o problema RMLSA. A partir do problema RMLSA será definido a rota, a modulação e a faixa espectral para a transmissão dos dados do novo circuito na rede. Além disso, as requisições devem apresentar qualidade de transmissão aceitável para operar.

Outro problema das EONs é a fragmentação do espectro. A fragmentação ocorre devido o estabelecimento e finalização de circuitos e impede que novas requisições sejam atendidas na rede. Para mitigar a fragmentação, pode ser realizado realocação de circuito no intuito de desfragmentar o espectro óptico.

Além de desfragmentar o espectro, as realocações podem ser utilizadas para reduzir o impacto causado por imperfeições de camada física (*Physical Layer Imperfections* – PLI) em enlaces da rede. Os efeitos de camada física são os principais causadores de bloqueios em cenários que levam em conta as PLI. As realocações neste cenário provocam reduções significativas na probabilidade de bloqueio geral de circuito.

Neste contexto, foi identificado e proposto o problema CR-PLI (*Circuit Reallocation of the PLI*), no qual permite a realocação de circuito para reduzir os impactos dos efeitos de camada física. Para solucionar o problema CR-PLI, foram propostas três estratégias de realocação de circuito cientes de PLI, a R-RQoT (Realocação para Redução de bloqueios relacionados à QoT), a CRS-PL (*Circuit Reallocation Strategy - PL*) e a JOC (*Just One Circuit Reallocation*). Vale ressaltar que cada estratégia possui sua particularidade e foram propostas em momentos distintos ao longo deste mestrado.

A avaliação de desempenho das soluções proposta foi realizada a partir de simulações computacionais, onde as estratégias foram comparadas entre si e com outra estratégia de realocação da literatura. As métricas de avaliação utilizadas para análise de desempenho

foram a probabilidade de bloqueio de banda (PBB), probabilidade de bloqueio de circuito (decomposta em componentes) (PBC) e número médio de circuitos realocados (NCR). Os resultados foram obtidos considerando as topologias de rede USA e EON.

Pelos resultados apresentados, notou-se que as estratégias R-RQoT, CRS-PL e JOC, apesar de utilizarem critérios distintos para realocação dos circuitos, melhoram o desempenho da rede em termos de PBC e PBB em relação ao cenário sem realocação. Além disso, as reduções de bloqueios foram significativas para as diferentes cargas de tráfego analisadas com a aplicação de todas as soluções propostas. Estas reduções consideráveis foram semelhantes para ambas as topologias de rede adotadas nos experimentos.

Em relação aos tipos de bloqueios, os relacionados às imperfeições de camada física foram os que sofreram as reduções mais significativas. As reduções desse tipo de bloqueio ocorreram principalmente devido as realocações, promovidas pelas estratégias, buscarem diminuir os impactos dos efeitos de camada física em enlaces da rede. A estratégia CRS-PL, por exemplo, realiza as migrações de circuitos para as menores rotas disjuntas, diminuindo carga de tráfego nas rotas originais e, conseqüentemente, mitigando as interferências dos circuitos ativos entre si e destes em novas requisições.

Dentre as estratégias de realocação propostas para solucionar o problema CR-PLI, a JOC apresentou melhor desempenho em todos os cenários avaliados. Considerando a topologia USA, por exemplo, a estratégia JOC apresentou reduções de PBB de pelo menos 65,36%. Já para a topologia EON, a redução de PBB da JOC foi de pelo menos 55,6%, diminuindo principalmente bloqueio do tipo QoTN e QoTO.

Vale ressaltar ainda que o melhor desempenho da estratégia JOC foi alcançado reduzindo consideravelmente as alterações de circuitos já estabelecidos quando comparada às demais estratégias. Logo, considerando a métrica de número médio de realocações, notou-se que, mesmo a estratégia JOC realocar apenas um único circuito por processo de realocação, apresentou o melhor desempenho dentre as soluções propostas. Dessa forma, conclui-se que uma estratégia de realocação pode apresentar a maior redução de bloqueio realocando o menor número de circuito ativo da rede em relação a outras soluções.

Em relação aos trabalhos futuros, pretende-se analisar o desempenho das estratégias propostas em cenários com tráfego não uniforme, buscando assim maior aproximação de modelagem de carga de tráfego mais realística. Além disso, pretende-se também analisar o funcionamento das estratégias de realocação de circuito cientes de PLI em cenários com sobrevivência de redes. A sobrevivência de redes é um mecanismo fundamental utilizado para garantir o funcionamento da rede mesmo após a ocorrência de eventuais falhas.

Referências

AOKI, Y. et al. Dynamic and flexible photonic node architecture with shared universal transceivers supporting hitless defragmentation. In: *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3. ISSN 1550-381X. Citado na página 24.

ARAUJO, S. et al. R-rqot: Uma nova estratégia de realocação de circuito ciente dos efeitos de camada física para redes Ópticas elásticas. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 2, 27 e 29.

ARAUJO, S. et al. Circuit reallocation strategy aware of the physical layer effects for elastic optical networks. In: *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 00970–00975. ISSN 1530-1346. Citado 3 vezes nas páginas 2, 27 e 29.

BA, S. et al. Route partitioning scheme for elastic optical networks with hitless defragmentation. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 8, n. 6, p. 356–370, June 2016. ISSN 1943-0620. Citado na página 19.

BA, S.; CHATTERJEE, B. C.; OKI, E. Defragmentation scheme based on exchanging primary and backup paths in 1+1 path protected elastic optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 25, n. 3, p. 1717–1731, June 2017. ISSN 1063-6692. Citado 5 vezes nas páginas 2, 18, 23, 24 e 25.

BEYRANVAND, H.; SALEHI, J. A. 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 6 vezes nas páginas 11, 12, 13, 28, 37 e 39.

CAI, A. et al. Multicast routing and distance-adaptive spectrum allocation in elastic optical networks with shared protection. *Journal of Lightwave Technology*, v. 34, n. 17, p. 4076–4088, Sep. 2016. ISSN 0733-8724. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

CHANG, R.; GIBBY, R. A theoretical study of performance of an orthogonal multiplexing data transmission scheme. *IEEE Transactions on Communication Technology*, v. 16, n. 4, p. 529–540, August 1968. Citado na página 1.

CHATTERJEE, B. C.; BA, S.; OKI, E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 20, n. 1, p. 183–210, Firstquarter 2018. Citado 6 vezes nas páginas 15, 1, 8, 18, 21 e 22.

CHATTERJEE, B. C.; SARMA, N.; OKI, E. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 17, n. 3, p. 1776–1800, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2431731>>. Citado 5 vezes nas páginas 1, 5, 6, 7 e 37.

- CHEN, B. et al. Cost-effective survivable virtual optical network mapping in flexible bandwidth optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 34, n. 10, p. 2398–2412, May 2016. ISSN 0733-8724. Citado na página 25.
- CHEN, X.; JUKAN, A.; GUMASTE, A. Multipath de-fragmentation: Achieving better spectral efficiency in elastic optical path networks. In: *2013 Proceedings IEEE INFOCOM*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 390–394. ISSN 0743-166X. Citado na página 23.
- CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E. A. 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 2 vezes nas páginas 1 e 6.
- COSTA, L. R.; DRUMMOND, A. C. Novo algoritmo RMLSA com roteamento multihop em redes ópticas elásticas. *XXXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2016)*., 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2431731>>. Citado 3 vezes nas páginas 1, 6 e 8.
- CUGINI, F. et al. Push-pull defragmentation without traffic disruption in flexible grid optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 1, p. 125–133, Jan 2013. ISSN 0733-8724. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 21.
- CUGINI, F. et al. Push-pull technique for defragmentation in flexible optical networks. In: *OFC/NFOEC*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3. ISSN pending. Citado na página 23.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numer. Math.*, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, v. 1, n. 1, p. 269–271, dez. 1959. ISSN 0029-599X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF01386390>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 36.
- FADINI, W.; OKI, E. A subcarrier-slot partition scheme for wavelength assignment in elastic optical networks. In: *2014 IEEE 15th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 7–12. ISSN 2325-5552. Citado na página 23.
- FÁVERO, R. V. et al. A new elastic optical network defragmentation strategy based on the reallocation of lightpaths sharing the most fragmented link. In: *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- FONTINELE, A. et al. An efficient IA-RMLSA algorithm for transparent elastic optical networks. *Computer Networks*, v. 118, p. 1–14, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.03.003>>. Citado 6 vezes nas páginas 6, 7, 13, 28, 37 e 42.
- 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 39.
- 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 na página 39.

- HOROTA, A.; FIGUEIREDO, G. B.; FONSECA, N. L. S. d. Routing and spectrum assignment algorithm with fragmentation minimization in elastic optical networks. In: *2014 Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 436–442. Citado 4 vezes nas páginas 1, 8, 17 e 27.
- INDEX, C. V. N. *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022*. 2018. <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.htm>>. Citado na página 1.
- 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 2 vezes nas páginas 12 e 37.
- KOSAKA, S. et al. Shared protected elastic optical path network design that applies iterative re-optimization based on resource utilization efficiency measures. In: *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3. ISSN 1550-381X. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- OKI, E.; CHATTERJEE, B. C. Design and control in elastic optical networks: Issues, challenges, and research directions. In: *2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 546–549. Citado na página 1.
- PATEL, A. N. et al. Defragmentation of transparent flexible optical WDM (FWDM) networks. In: *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–3. ISSN pending. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 21.
- PROIETTI, R. et al. Rapid and complete hitless defragmentation method using a coherent rx lo with fast wavelength tracking in elastic optical networks. *Opt. Express*, OSA, v. 20, n. 24, p. 26958–26968, Nov 2012. Disponível em: <<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-20-24-26958>>. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 21 e 24.
- 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 na página 11.
- Rosa, A. et al. Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks. In: *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 242–246. ISSN 1949-4092. Citado na página 10.
- SANTOS, I. Alocação de recursos para o estabelecimento de circuitos em redes Ópticas wdm e ofdm. *Teresina: Universidade Federal do Piauí*, p. 88, 2015. Citado na página 37.
- SARADHI, C. V.; SUBRAMANIAM, S. Physical layer impairment aware routing (pliar) in wdm optical networks: issues and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 11, n. 4, p. 109–130, Fourth 2009. ISSN 1553-877X. Citado na página 11.
- SEKIYA, M. et al. Photonic network defragmentation technology improving resource utilization during operation. v. 50, p. 101–109, 01 2014. Citado na página 24.

- SHAO, X. et al. Shared-path protection in ofdm-based optical networks with elastic bandwidth allocation. In: *OFC/NFOEC*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- SHI, W. et al. On the effect of bandwidth fragmentation on blocking probability in elastic optical networks. *IEEE Transactions on Communications*, v. 61, n. 7, p. 2970–2978, July 2013. ISSN 0090-6778. Citado na página 23.
- SINGH, S. K.; JUKAN, A. Efficient spectrum defragmentation with holding-time awareness in elastic optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 9, n. 3, p. B78–B89, March 2017. ISSN 1943-0620. Citado na página 23.
- TAKAGI, T. et al. Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation. In: *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–3. ISSN 1550-381X. Citado 7 vezes nas páginas 2, 18, 19, 21, 23, 24 e 37.
- 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 na página 9.
- TARHAN, A.; CAVDAR, C. Shared path protection for distance adaptive elastic optical networks under dynamic traffic. In: *2013 5th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 62–67. ISSN 2157-023X. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- TOMKOS, I. et al. A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges. *Proceedings of the IEEE*, v. 102, n. 9, p. 1317–1337, Sept 2014. ISSN 0018-9219. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 8.
- WANG, C. et al. Protection path-based hitless spectrum defragmentation in elastic optical networks: Shared backup path protection. In: *2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–3. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- WANG, C.; SHEN, G.; PENG, L. Protection path-based hitless spectrum defragmentation for elastic optical networks: 1+1 path protection. In: *Asia Communications and Photonics Conference 2014*. Optical Society of America, 2014. p. AF3E.3. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ACPC-2014-AF3E.3>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 25.
- WANG, C.; SHEN, G.; PENG, L. Protection lightpath-based hitless spectrum defragmentation for distance adaptive elastic optical networks. *Opt. Express*, OSA, v. 24, n. 5, p. 4497–4511, Mar 2016. Disponível em: <<http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-24-5-4497>>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 24 e 25.
- WANG, R.; MUKHERJEE, B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth networks. In: *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2907–2911. ISSN 1930-529X. Citado 3 vezes nas páginas 23, 28 e 37.

- WANG, R.; MUKHERJEE, B. Provisioning in elastic optical networks with non-disruptive defragmentation. *Journal of Lightwave Technology*, v. 31, n. 15, p. 2491–2500, Aug 2013. ISSN 0733-8724. Citado 4 vezes nas páginas [18](#), [19](#), [23](#) e [24](#).
- WANG, X. et al. A hitless defragmentation method for self-optimizing flexible grid optical networks. In: *2012 38th European Conference and Exhibition on Optical Communications*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3. ISSN 1550-381X. Citado 4 vezes nas páginas [2](#), [19](#), [21](#) e [24](#).
- WANG, X. et al. Utilization entropy for assessing resource fragmentation in optical networks. In: *OFC/NFOEC*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3. ISSN pending. Citado na página [19](#).
- WEN, K. et al. Dynamic on-demand lightpath provisioning using spectral defragmentation in flexible bandwidth networks. In: *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–3. ISSN 1550-381X. Citado na página [23](#).
- WILSON, P. R. et al. Dynamic storage allocation: A survey and critical review. In: BALER, H. G. (Ed.). *Memory Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995. p. 1–116. ISBN 978-3-540-45511-0. Citado na página [10](#).
- 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 na página [12](#).
- 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 [23](#).
- YU, X. et al. Spectrum compactness based defragmentation in flexible bandwidth optical networks. In: *OFC/NFOEC*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–3. ISSN pending. Citado na página [19](#).
- ZHANG, M. et al. Bandwidth defragmentation in dynamic elastic optical networks with minimum traffic disruptions. In: *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 3894–3898. ISSN 1550-3607. Citado 9 vezes nas páginas [1](#), [2](#), [17](#), [18](#), [19](#), [20](#), [23](#), [24](#) e [27](#).
- ZHANG, M. et al. Spectrum defragmentation algorithms for elastic optical networks using hitless spectrum retuning techniques. 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 [24](#).
- ZHANG, M. et al. Dynamic and adaptive bandwidth defragmentation in spectrum-sliced elastic optical networks with time-varying traffic. *Journal of Lightwave Technology*, v. 32, n. 5, p. 1014–1023, March 2014. ISSN 0733-8724. Citado 8 vezes nas páginas [1](#), [2](#), [17](#), [18](#), [20](#), [23](#), [24](#) e [27](#).
- ZHANG, M.; YOU, C.; ZHU, Z. On the parallelization of spectrum defragmentation reconfigurations in elastic optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 24, n. 5, p. 2819–2833, October 2016. ISSN 1063-6692. Citado 3 vezes nas páginas [18](#), [19](#) e [23](#).
- ZHAO, J.; WYMEERSCH, H.; AGRELL, E. Nonlinear impairment-aware static resource allocation in elastic optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, v. 33, n. 22, p. 4554–4564, Nov 2015. ISSN 0733-8724. Citado 2 vezes nas páginas [12](#) e [39](#).