

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE
CAMPINAS**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

RICARDO VICENTE FÁVERO

**NOVA ESTRATÉGIA DE DESFRAGMENTAÇÃO DE
CANAIS PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**

**CAMPINAS
2015**

RICARDO VICENTE FÁVERO

**NOVA ESTRATÉGIA DE DESFRAGMENTAÇÃO DE
CANALIS PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação na área de concentração Gestão de Redes e Serviços, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadores:

Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade no período de fevereiro de 2014 a julho de 2015 e o Prof. Dr. Antonio Carlos Demanboro após este período.

**CAMPINAS
2015**

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3827
F273n

Fávero, Ricardo Vicente.

Nova estratégia de desfragmentação de canais para redes ópticas elásticas / Ricardo Vicente Fávero. - Campinas: PUC-Campinas, 2015. 81p.

Orientadores: Marcelo Luís Francisco Abbade, Antonio Carlos Demanboro.

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Comunicações óticas. 2. Redes de computadores. 3. Algoritmos de computador. 4. Fibras óticas. 5. Sistemas de telecomunicação. I. Abbade, Marcelo Luís Francisco. II. Demanboro, Antonio Carlos. III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

22. ed. CDD – t621.3827

RICARDO VICENTE FÁVERO

**NOVA ESTRATÉGIA DE DESFRAGMENTAÇÃO DE
CANAIS PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Área de Concentração: Gerência de Redes de Teleinformática. Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Demanboro.

Dissertação defendida e aprovada em 13 de novembro de 2015 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Antonio Carlos Demanboro
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Eric Alberto de Mello Fagotto
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Luiz Henrique Bonani do Nascimento
Universidade Federal do ABC

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e irmãos pela compreensão e apoio em todos os momentos desse período de estudos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade, pela sua motivação, dedicação, apoio em todos os momentos. Responsável por manter linhas de pesquisas de alto nível com resultados expressivos.

Ao Prof. Dr. Antonio Carlos Demanboro, pelas orientações finais na conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Luiz Henrique Bonani do Nascimento da Universidade Federal do ABC pelas explicações e dicas importantes no desenvolvimento do trabalho.

Aos companheiros de pesquisa Paulo Cesar Barreto da Silva e Juliano Marçal. Paulo pelo excelente trabalho iniciado e pela disponibilidade para orientar e explicar o trabalho desenvolvido. E Juliano pela disposição e companheirismo nos trabalhos realizados.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas pela bolsa de estudos concedida para o Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica.

Ao Centro Universitário da Fundação Educacional Guaxupé por ceder o laboratório de informática para as simulações realizadas para este trabalho.

NOTA DO ORIENTADOR

Fui guindado à condição de orientador da presente orientação por razões meramente circunstanciais.

O Prof. Marcelo Abbade, idealizador e orientador desta dissertação até julho de 2015, está atualmente vinculado a outra Instituição de Ensino e, em virtude disto, assumi a orientação a partir de agosto de 2015.

Neste sentido, por razões éticas, esta nota tem por objetivo afirmar que todo o mérito do trabalho não cabe a este orientador, mas ao Prof. Marcelo e ao discente Ricardo, que a desenvolveram.

Coube a mim a tarefa de dar sugestões pontuais ao estilo do texto e em contribuir com a tabulação dos resultados e com as conclusões da dissertação.

Espero, sinceramente, ter executado esta tarefa no nível que vinha sendo feita anteriormente.

Agradeço a oportunidade em participar desta orientação, com profundo respeito e admiração por aqueles que vieram antes e a construíram.

Prof. Dr. Antonio Carlos Demanboro.

“I . . . managed to illuminate the interior of a stream [of water] in a dark space. I have discovered that this arrangement . . . offers in its results one of the most beautiful, and most curious, experiments that one can perform in a course on optics.”

J. Daniel Colladon, 1842.

City of Light: The Store of Fiber Optics

RESUMO

FÁVERO, Ricardo Vicente. **Nova estratégia de desfragmentação de canais para redes ópticas elásticas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientas e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2015.

As redes ópticas de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) acomodam o tráfego em canais fixos de 100, 50 e 25 GHz. Esta condição de grade fixa limita o número de conexões por fibra óptica (80 canais na banda C), e não permite taxas de transmissão com ocupação espectral acima de 50 GHz. Para melhorar estes fatores, foram propostas as redes ópticas elásticas (EON) com canais flexíveis, visando acomodar adequadamente as taxas de transmissão demandas pelos usuários. Esta proposta possibilita maior eficiência espectral e também amplia as taxas de transmissão suportadas pela rede. A eficiência espectral nas EONs é obtida com os algoritmos de roteamento e atribuição espectral (*Routing and Spectrum Assignment*, RSA), que atuam para maximizar seu uso espectral. Mesmo com o uso de RSAs, as EONs ainda apresentam índices de fragmentação consideráveis. Neste contexto, este trabalho propõe uma nova estratégia de desfragmentação espectral para EONs. Esta proposta de desfragmentação seleciona as conexões do enlace mais fragmentado, para o processo de desfragmentação. A desfragmentação baseia seu processo de realocação de conexões por RSA, denominado DF-RSA. O DF-RSA determina a nova posição e realiza a realocação das conexões. Com o uso de simulação computacional da operação de funcionamento da EON, foram submetidas várias demandas de taxas de transmissão com diferentes modulações e cargas de tráfego entre 45 e 100 erlang. Foram propostos dois cenários de simulação. No primeiro, foi comparado o desempenho do algoritmo RSA *First-Fit* (FF) com e sem o processo de desfragmentação. Considerou-se como ponto de início das desfragmentações (gatilho), o número de conexões liberadas da rede. Neste cenário obteve-se até 48% de ganho relativo na minimização da probabilidade de bloqueio. No segundo cenário, foram comparados os desempenhos dos seguintes algoritmos RSAs: FF, *Maximize Path Spectrum Consecutiveness* (MPSC) e *Fragmentation Aware* (FA). O FF foi avaliado com e sem desfragmentação e os demais somente com desfragmentação. Empregou-se como gatilho o eventual bloqueio de conexão. O segundo cenário alcançou mais de 80% de ganho relativo de probabilidade de bloqueio para carga de tráfego de 50 erlang. Conclui-se que a nova estratégia de desfragmentação para EONs oferece ganhos consideráveis na utilização espectral e, conseqüentemente, redução na probabilidade de bloqueio.

Palavras-chave: Redes ópticas elásticas, redes ópticas transparentes, algoritmos de roteamento e atribuição espectral, estratégias de desfragmentação de canais ópticos e simulador de redes ópticas elásticas.

ABSTRACT

FÁVERO, Ricardo Vicente. **A New Elastic Optical Network Defragmentation of channels Strategy**. 2015. *Dissertation (Master in Telecommunications Management Network) – Graduate in Electrical Engineering, Center for Science, Technology and Environmental, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2015.*

The wavelength division multiplexing (WDM) optical network accommodates traffic load in 100, 50 and 25 GHz fixed-grid channel. This fixed-grid condition limits the number of lightpath for each optical fiber (80 channels in c-band) and doesn't allow bit rates with bandwidth over 50 GHz. To improve these factors, the flexibly grid elastic optical network (EON) was proposed, aiming accommodate adequately bit rates demand by customers. This proposal allows efficiency bandwidth and also expands bit rates supported by network. The EON bandwidth efficiency is obtained by routing and spectrum assignment (RSA) algorithm which acts to maximize the bandwidth utilization. Even with RSA, EON still show fragmentation rates substantial. In this context, this work proposes a new elastic optical network defragmentation strategy. This defragmentation strategy selects the lightpaths from the most fragmented link. The defragmentation process is based on RSA (DF-RSA). The DF-RSA determines the new position to reallocate the connection selected and performs. Using computer simulation of EON operation, were submitted several bit rates demands with different modulations format and traffic load between 45 and 100 erlang. Two simulation scenarios were proposed. The first one, compare the performance of RSA algorithm first-fit (FF) with and without defragmentation. It was considered as defragmentation process beginning point (trigger), the number of release connections. This scenario had until 48% of relative gain on minimizing blocking probability. The second scenario compared the performance of the follows RSA algorithms: FF, Maximize Path Spectrum Consecutiveness (MPSC) and Fragmentation Aware (FA). The FF was evaluated with and without defragmentation process and the others just with defragmentation process. The trigger employed was eventual connection blocked. The second scenario reached over the 80% blocking probability relative gain in 50 erlang traffic load. We conclude that the new elastic optical network defragmentation offers substantial gain bandwidth utilization and consequently blocking probability reduction.

Key-words: *Elastic optical networks, transparent optical networks, routing and spectrum assignment algorithms, defragmentation strategy for optical channel and elastic optical network simulator.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.(a) Ocupação espectral com grade fixa de 50 GHz (ITU), (b) Ocupação espectral com grade flexível da EON.	13
Figura 2. Arquitetura simplificada de um ROADM.....	16
Figura 3. Topologia de rede com 6 nós e 8 enlaces.....	17
Figura 4. (a) Ocupação espectral em um caminho óptico com 3 enlaces. (b) Ocupação espectral agrupada após o processo de desfragmentação.....	23
Figura 5. Exemplos do índice de fragmentação f	30
Figura 6. Fluxograma da nova estratégia de desfragmentação proposta	32
Figura 7. Interface do EONSim v3.0.....	38
Figura 8. Trecho de código contendo exemplos de interfaces de RSA.....	39
Figura 9. Gráfico com resultados de simulação do cenário presente em ZHANG, ZHAO e WANG (2012) do RSA MTLSC	41
Figura 10. Gráfico com resultados de simulação do cenário presente em SILVA (2013).....	42
Figura 11. Resultados de simulação do cenário presente em YIN et al. (2013) dos RSA FF e FA	43
Figura 12. Topologia de rede NSFnet com 14 nós e 21 enlace	44
Figura 13. Resultados da probabilidade de bloqueio com <i>First-Fit</i> e aplicação da estratégia de desfragmentação proposta com $R = 100$, $R = 50$ e $R = 10$ (FÁVERO et al., 2015)	47
Figura 14. Ganho na Probabilidade de Bloqueio com a estratégia de desfragmentação proposta com $R = 10$, $R = 50$ e $R = 100$ em relação ao RSA FF (FÁVERO et al., 2015)	49

Figura 15. Índice de fragmentação f antes da desfragmentação e depois da desfragmentação para $R = 10$ (a), $R = 50$ (b) e $R = 100$ (c) (FÁVERO et al., 2015)	51
Figura 16. Número de eventos relativos de desfragmentação com resultados melhores em f (FÁVERO et al., 2015).....	52
Figura 17. Melhoria em f para o enlace mais fragmentado (FÁVERO et al., 2015)	53
Figura 18. Probabilidade de Bloqueio dos RSAs FF sem desfragmentação e FF, MPSC e FA com desfragmentação.....	55
Figura 19. Ganho na Probabilidade de Bloqueio com a estratégia de desfragmentação proposta com os RSAs para realocação FF, MPSC e FA em relação ao RSA FF sem desfragmentação	56
Figura 20 Número de eventos relativos de desfragmentação com resultados melhores em f	57
Figura 21 Melhoria em f para o enlace mais fragmentado	58
Figura 22 (a) Número de eventos de desfragmentação com os RSAs FF, FA e MPSC (b) Ampliação do número de eventos de desfragmentação de 65 e 75 E.	59

LISTA DE ACRÔNIMOS

64-QAM	<i>64 Quadrature Amplitude Modulation</i>
BVT	<i>Bandwidth Variable Transceiver</i>
CEA	Conexão em Análise
DF-RSA	Desfragmentação Baseado em RSA
DP-16QAM	<i>Dual Polarization 16 Quadrature Amplitude Modulation</i>
DP-QPSK	<i>Dual Polarization and Quadrature Phase-Shift-Keying</i>
EON	<i>Elastic Optical Network</i>
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
ED	Estado de Desfragmentação
EFN	Estado de Funcionamento Normal
FA	<i>Fragmentation Aware</i>
FF	<i>First-Fit</i>
FSU	<i>Frequency Slot Units</i>
GSFIA	Grupo de Sistemas Fotônicos e Internet Avançada
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LC	<i>Liquid Crystal</i>
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i>
MPSC	<i>Maximize Path Spectrum Consecutiveness</i>
OOK	<i>On-off keying</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-shift Keying</i>
ROADM	<i>Reconfigurator Optical Add-Drop Multiplexer</i>
RSA	<i>Routing and Spectral Assignment</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SG	Sistema de Gerenciamento
TON	<i>Transparente Optical Networks</i>
WSS	<i>Wavelength Selective Switch</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

LISTA DE EQUAÇÕES

- 1 Índice de fragmentação f
- 2 Ganho na probabilidade de bloqueio G_B
- 3 Média do ganho do índice de desfragmentação $f - G_f$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Histórico.....	1
1.2. Motivação e Revisão da Literatura.....	4
1.3. Objetivos e Contribuições	7
1.4. Organização da dissertação.....	8
2. REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS.....	10
2.1. Motivações	10
2.2. Grade Flexível	12
2.3. Formatos de Modulação Eficientes	13
2.4. Atualização Tecnológica	14
2.5. Algoritmos RSA	16
3. DESFRAGMENTAÇÃO E REALOCAÇÃO DE CONEXÕES.....	22
3.1. Visão geral do processo de desfragmentação da EON	22
3.2. Realocação de Caminhos Ópticos baseados em RSA.....	24
3.3. Gatilho e Periodicidade da Desfragmentação.....	25
3.4. Região de Desfragmentação.....	27
3.5. Estratégias de Migração de Caminhos Ópticos para Minimizar Interrupção do Serviço	28
3.6. Estratégia de Desfragmentação Proposta	29

4.	AMBIENTE DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	36
4.1.	Simulador de Redes Ópticas Elásticas EONSim	36
4.2.	Etapas de Desenvolvimento.....	37
4.3.	Reprodução de Resultados.....	40
4.4.	Configuração para Simulação dos novos cenários.....	44
5.	RESULTADOS.....	46
5.1.	Aspectos Gerais sobre os Resultados	46
5.2.	Resultados da Estratégia de Desfragmentação com frequência por conexões liberadas 47	
5.3.	Resultados da Estratégia de Desfragmentação com frequência por conexão bloqueada 54	
6.	CONCLUSÃO.....	61
7.	TRABALHO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO.....	63
8.	SOFTWARE DESENVOLVIDO.....	64
9.	REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

1.1. Histórico

Em 1966 o grupo de pesquisadores do *Standard Telecommunication Laboratories* liderado por Charles K. Kao propôs e demonstrou a transmissão de dados por luz usando como meio guiado a fibra óptica. Seguindo o projeto da equipe de Kao, a empresa Norte Americana *Corning Glass Works* produziu a primeira fibra óptica para transmissão em longas distâncias em 1970 (HECHT, 2004).

Em sua forma mais utilizada, a fibra óptica consiste de um núcleo cilíndrico, cujo diâmetro é da ordem de dezenas de micros (μm), revestido por uma camada externa de índice de refração menor (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010). Vários materiais podem ser utilizados para a fabricação de fibras, mas nas aplicações em telecomunicações, tanto o núcleo como a casca são feitos de Sílica. Em geral, as fibras apresentam baixa atenuação nas faixas de frequência óptica de 0,8, 1,3 e 1,55 μm . As duas últimas dessas janelas são as de menor perda de potência e possuem respectivamente 0,50 dB/km e 0,25 dB/km.

A transmissão na fibra óptica é realizada por emissão de feixe luminoso. O transmissor, com uso de foto emissores, transforma o sinal binário elétrico em sinal óptico (feixe luminoso) e injeta na fibra óptica. No destino ocorre o processo inverso, ou seja, o sinal óptico é transformado em sinal elétrico com o uso de fotodetectores no receptor.

As fibras ópticas podem ser classificadas como multimodo ou monomodo. No primeiro destes tipos, um único sinal de entrada é gerado normalmente por

diodo emissor de luz (LED), espalhado em vários caminhos por reflexões sucessivas (modos) dentro da fibra. Como cada modo propaga-se com uma velocidade própria, efeito conhecido como dispersão intermodal (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010), limita a capacidade sistêmica deste tipo de fibra. De fato, para taxas de alguns mega bits por segundo (Mbits/s), o alcance destes sistemas é restrito a distâncias em torno de 10 km, antes da utilização de regeneradores eletrônicos. O regenerador eletrônico é um repetidor de sinal, com receptor e transmissor óptico, recupera o sinal óptico, transforma em elétrico, corrige, amplifica, transforma novamente em sinal óptico e retransmite.

Em 1984 iniciou-se o uso da fibra óptica monomodo que, com um núcleo de tamanho reduzido ($\sim 10 \mu\text{m}$), garante que o sinal de entrada, gerado por diodo laser (LD), seja propagado por um único modo. Desta forma, eliminou-se o problema de dispersão intermodal e ampliaram-se as taxas de transmissão para centenas de megabits por segundo e a distância para cerca de 40 km entre as regenerações do sinal óptico. De fato, ainda persistiu o problema de dispersão cromática, causada pela diferença de velocidade entre os comprimentos de onda (cores) na reflexão do sinal óptico. (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010).

No final da década de 1980, a invenção dos amplificadores à fibra dopada com Érbio (*Erbium doped fiber amplifier* - EDFA) permitiu que o alcance de sinais ópticos fosse estendido sem a utilização de regeneradores elétricos e de conversões optoeletrônicas e eletro-ópticas, que introduzem custos desnecessários e limitam a banda dos sinais transmitidos. Estes equipamentos provêm uma banda de amplificação de cerca de 4 THz e, inicialmente, atuavam

na banda C da terceira janela (1530 a 1565 nm). Além disso, os EDFAs podem ser utilizados para amplificar sinais que se propagam por enlaces de, tipicamente, 80 km ou mais.

Vários avanços tecnológicos confluíram na década de 1990 para o desenvolvimento da tecnologia por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing - WDM*). Esta tecnologia permite que vários sinais, em portadoras ópticas distintas, sejam multiplexados em uma mesma fibra óptica. Em particular, a União Internacional de Telecomunicação (*International Telecommunication Union - ITU*) padronizou a divisão dessa faixa de frequência em canais espaçados por 100 GHz, e posteriormente, por 50 GHz que resulta na utilização de aproximadamente 80 canais na faixa de amplificação dos EDFAs.

Nos anos 2000, a tecnologia WDM evoluiu para a criação de redes ópticas transparentes (*transparente optical networks - TON*) que, a partir da utilização de comutadores ópticos associados a multiplexadores e demultiplexadores ópticos, permitiu que o roteamento de sinais, até então realizado no domínio eletrônico, passasse a ser feito no domínio óptico (RAMASWAMI; SIVARAJAN; SASAKI, 2010).

Comercialmente, as TONs oferecem o serviço de comunicação baseado em estabelecimento de circuitos. Os circuitos são estabelecidos por caminho óptico entre determinada origem e determinado destino. A conexão entre a origem e o destino é feita a partir da conexão de vários enlaces ópticos para suportar o tráfego, normalmente em um único comprimento de onda. O conjunto de todos os enlaces ópticos que atendem uma conexão entre dois clientes da TON em um dado comprimento de onda é usualmente chamado de caminho óptico

(*optical lightpath*). À medida que o tráfego evolui, novos caminhos ópticos são estabelecidos com o auxílio de algoritmos de roteamento e atribuição de comprimento de onda (*Routing and Wavelength Assignment - RWA*). Os RWAs atribuem o mesmo comprimento de onda no canal de 50 GHz da grade fixa ao longo dos enlaces de fibras ópticas adjacentes no caminho óptico definido (GERSTEL et al., 2012).

1.2. Motivação e Revisão da Literatura

O uso de modulações avançadas nas redes ópticas possibilitou o aumento da eficiência espectral, mais bits por unidade de frequência, mas para sinais com taxas de transmissão acima de 200 Gb/s é necessário utilizar bandas espectrais superiores a 50 GHz. Por exemplo, sinais com taxas de transmissão de 400 Gb/s com modulação *Dual Polarization and Quadrature Phase-Shift-Keying* (DP-QPSK) e 1 Tb/s com modulação de *Dual Polarization 16 Quadrature Amplitude Modulation* (DP-16QAM) ocupam respectivamente 85 GHz e 200 GHz de banda espectral (GERSTEL et al., 2012). É importante ressaltar que, a grade fixa de 50 GHz das redes WDM tradicionais não comporta essa expansão das bandas. O aumento do espaçamento da grade fixa da rede WDM permitiria a expansão das taxas de transmissão, mas tal abordagem provocaria ineficiência espectral. O aumento do espaçamento do canal iria diminuir o número de canais e conseqüentemente diminuir o número de conexões estabelecidas, mesmo se houvesse solicitações de conexões com taxas de transmissão menores. Como por exemplo, 10 e 40 Gb/s, teriam alocação de um canal cada, mas com subutilização espectral do canal.

Uma possível solução para esse problema é a adoção de uma grade flexível de canais que aloque, a cada conexão, uma banda suficientemente larga para comportar o sinal transmitido e, eventualmente, separações de guarda para as bandas adjacentes. Redes que operem com tal grade flexível são chamadas de redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks*, EON) e constituem o objeto de estudo desta dissertação.

O novo paradigma de EONs permite que uma dada banda, ao invés de apenas um canal, seja alocada entre os clientes de uma TON. Assim, os caminhos ópticos das EONs correspondem ao conjunto de todos os enlaces ópticos que atendem a conexão dos clientes envolvidos considerando-se a banda em questão. Uma vez que este caminho óptico é determinado, a gerência da EON não precisa conhecer e não atua sobre o conteúdo da banda alocada à conexão em questão. Nos casos em que esta banda é suficientemente larga, o cliente que requereu a conexão terá um grau de liberdade bastante elevado para decidir sobre os sinais que serão transmitidos. De fato, em uma EON, este cliente pode colocar qualquer número de canais, com qualquer formato de modulação que atenda aos requisitos de serviço desejados dentro da banda alocada. O cliente em questão pode, até mesmo, alterar, ao longo do tempo, o número de canais e os respectivos formatos de modulação sem precisar contactar a gerência da EON. Nesta abordagem, a banda reservada para uma dada conexão é usualmente chamada de supercanal (RAHN et al., 2012).

Nas EONs, a escolha dos caminhos ópticos é feita por algoritmos de alocação e atribuição espectral (*routing and spectral assignment*, RSA). À medida que as conexões são requisitadas e desfeitas, parte do espectro

disponibilizado pelas fibras que compõem uma EON é, respectivamente, ocupado e liberado. Em condições de tráfego intenso, assim como ocorre nas redes de grade fixa, pode não haver recursos disponíveis para a alocação de banda e isso pode implicar o bloqueio de conexões.

Além disso, a natureza dinâmica do tráfego pode criar, entre duas bandas alocadas a determinadas conexões, regiões espectrais de largura limitada e insuficiente para acomodar certas requisições de novas bandas. Este processo de fragmentação do espectro é uma característica típica de EONs e não ocorre nas redes ópticas de grade fixa. De forma geral, a fragmentação (ZHANG; ZHAO; WANG, 2012) espectral dependerá do desempenho do RSA utilizado e pode limitar o provimento de uma eficiência espectral elevada, que é o objetivo fundamental de uma EON.

No momento em que esta dissertação é concluída, as EONs constituem uma tecnologia bastante promissora para a evolução das TONs e existem alguns *testbeds* em RAHN et al. (2012), GEISLER et al. (2011) e BOSCO et al. (2011) para testar o desempenho deste novo tipo de rede. No entanto, no melhor de nosso conhecimento, não há, ou, na melhor das hipóteses, há poucas redes comerciais que atuam como EONs. Por esta razão, a investigação do desempenho de RSAs e de estratégias que contribuam para reduzir os efeitos prejudiciais da fragmentação espectral é de extremo interesse para as operadoras de rede e constitui um assunto acadêmico de relevância apreciável.

1.3. Objetivos e Contribuições

Esse trabalho teve como objetivo principal a proposta de uma estratégia que utiliza técnicas de desfragmentação espectral para realocar caminhos ópticos, aumentar a utilização espectral e minimizar a probabilidade de bloqueio em redes ópticas elásticas. Para isto, foi feita, por meio de simulações computacionais, uma investigação sistemática sobre a alocação e realocação de caminhos ópticos e atribuição espectral em redes ópticas elásticas. As principais contribuições deste trabalho são:

1. o desenvolvimento de uma nova versão do simulador de redes ópticas elásticas EONSim com modularização do código e adição de novas funcionalidades;
2. a proposta de uma nova estratégia de desfragmentação espectral e realocação de canais em redes ópticas elásticas. Essa nova estratégia de desfragmentação seleciona as conexões que compartilham o enlace mais fragmentado e realiza a realocação baseado em RSA;
3. Avaliação de duas estratégias de gatilhos para determinar o início e frequência das desfragmentações. A primeira baseada na frequência de conexões liberadas da EON e a segunda baseada na iminência de bloqueio de solicitação de conexão;
4. os testes da estratégia proposta a partir de simulações no EONSim e a análise dos resultados comparados com simulações de RSAs existentes na literatura.

1.4. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira. O Capítulo 2 apresenta os conceitos sobre as redes ópticas elásticas. Em particular, são detalhados os fatores que limitam a utilização de redes WDM de grade fixa, bem como os benefícios da adoção de grades flexíveis. Este capítulo também discorre sobre as funções que diferenciam os equipamentos de ambos os tipos de abordagem. Por fim, apresenta-se uma revisão da literatura sobre algoritmos RSAs.

O Capítulo 3 é relativo à desfragmentação e à realocação de canais em EONs. Inicialmente, apresentam-se aspectos gerais sobre os dois processos que dão título ao capítulo. A seguir, discute-se, a partir da visão do Grupo de Sistemas Fotônicos e Internet Avançada da Puc-Campinas (GSFIA), as questões sobre quando e onde a desfragmentação espectral pode ser feita em redes ópticas elásticas. Após isso, discorre-se sobre formas de migração de tráfego sem interrupção de serviço em EONs. Ao final do capítulo, descrevem-se as propostas do autor acerca da estratégia de desfragmentação e realocação de canais, que constituem uma das quatro principais contribuições do trabalho.

O Capítulo 4 descreve o ambiente de simulação computacional baseado em *software* utilizado para produzir os resultados desse trabalho. Inicialmente, apresenta-se a nova versão do simulador de redes ópticas elásticas EONSim. Em seguida são descritas as etapas de desenvolvimento da nova versão do EONSim que suporta a desfragmentação. Na sequência são apresentadas as reproduções de resultados obtidas no EONSim de trabalhos relacionados na literatura para validação da nova versão. Por fim, são demonstrados os

parâmetros utilizados nas simulações dos cenários para validação da estratégia de desfragmentação, proposta nesse trabalho.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com a estratégia de desfragmentação proposta. Inicialmente, são apresentados os aspectos gerais sobre os resultados obtidos no EONSim v3. Em seguida são apresentados e analisados os resultados obtidos da estratégia de desfragmentação com frequência de desfragmentação por conexões liberadas. Finalizando, são apresentados e analisados os resultados obtidos com a estratégia de desfragmentação baseada no gatilho por eventual bloqueio de conexão.

Por fim o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho desenvolvido e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

Este capítulo apresenta alguns aspectos importantes das redes ópticas elásticas. A Seção 2.1 descreve as principais inovações das EONs. A Seção 2.2 aborda as questões associadas à grade flexível nas EONs. A Seção 2.3 discute como os formatos avançados de modulação influenciaram as propostas relativas às EONs. A Seção 2.4 descreve as atualizações tecnológicas necessárias para a implantação das EONs. Finalmente, a Seção 2.5 apresenta os algoritmos RSAs.

2.1. Motivações

Desde o surgimento da Internet, na década de 1990, o crescente aumento do número de usuários e do volume de tráfego gerado por estes, tem requerido um constante aumento na banda oferecida pelas redes de comunicação. No núcleo das redes ópticas, a tecnologia WDM de grade fixa com espaçamento de 50 GHz está em seu limite de utilização e não poderá ser usada quando taxas maiores de transmissão, que requerem bandas superiores a estes 50 GHz, tornarem-se necessárias. Além disso, ao contrário do que ocorre hoje, espera-se que em um futuro próximo uma mesma fibra seja utilizada para transportar simultaneamente sinais com diferentes formatos de modulação, diferentes taxa de transmissão e diferentes ocupações de banda. Assim, a utilização de uma grade fixa sempre comprometerá a eficiência espectral da rede, pois essa grade deverá comportar os sinais de banda mais larga e conseqüentemente deixará uma banda ociosa para os canais que ocupem bandas menores. Neste contexto, as EONs foram recentemente propostas e

tornaram-se fortes candidatas a constituir o futuro das redes WDM (GERSTEL et al., 2012).

Nas redes WDM, a largura espectral do canal ocupado é influenciada pelo formato de modulação e pela quantidade máxima possível de filtros utilizados ao longo dos caminhos ópticos na rede. O formato de modulação é escolhido em função da relação entre o sinal e o ruído óptico (OSNR) e distância suportada. Os filtros ópticos utilizados nos nós ópticos no processo de comutação estreitam o espectro óptico. Nas redes WDM, a largura do espectro óptico é determinada considerando-se o pior caso, ou seja, a atribuição espectral é sempre dimensionada para atender a rota para o caminho óptico mais longo possível da topologia da rede.

A flexibilidade das EONs permite adaptar o formato de modulação às taxas de transmissão e distâncias atribuídas às conexões. Assim, a atribuição de canais poderá ser adaptada de forma eficiente para o caminho óptico estabelecido.

A EON acomoda em bandas justas as necessidades das taxas de transmissão demandadas pelos usuários. Assim, a EON acomoda taxas menores em bandas suficientes e ainda permite acomodar taxas elevadas em bandas superiores ao tamanho tradicional dos canais das redes WDM (50 GHz). Quando este tipo de rede for implantada, os canais das EONs poderão comportar sinais com taxas de transmissão até mesmo superiores a 1 Tb/s em conjunto com outros de taxas menores.

2.2. Grade Flexível

As redes WDM utilizam grade fixa para a atribuição de canais, independentemente da taxa de transmissão e formato de modulação adotado. Nesse contexto, há limitação no uso de taxas de transmissão elevadas e também não existe eficiência no uso espectral para taxas de transmissão menores. Esses dois principais fatores motivam a implantação das EONs. A proposta é que a grade flexível da EON ajuste-se à ocupação espectral de cada canal de acordo com a necessidade da taxa de transmissão demandada pelo usuário. Também permite a expansão das taxas de transmissão na ordem de grandeza de terabits por segundo (GERSTEL et al., 2012).

A divisão da banda espectral nas EONs é feita com unidades de intervalo de frequência (*Frequency Slot Units* - FSU). O FSU assume a menor unidade de banda. O tamanho do FSU pode assumir qualquer valor suportado pela granularidade dos transmissores, comutadores ópticos e receptores. Atualmente, consideram-se FSUs de 12,5, 6,125 e até 3,025 GHz de banda (GERSTEL et al., 2012). As conexões entre clientes ocupam o número adequado de FSUs demandado pela sua taxa de transmissão e formato de modulação.

A Figura 1 exemplifica a economia de banda entre a alocação de banda na grade fixa de 50 GHz (ITU) da rede WDM e a alocação de banda na EON de grade flexível com FSUs de 12,5 GHz. A Figura 1(a) ilustra a ocupação de banda em uma grade fixa de 50 GHz, com 2 canais de 10 Gb/s com modulação *on-off keying* (OOK), banda de 25 GHz, dois canais de 40 Gb/s com modulação por quadratura de desvio de fase em polarização dupla (*dual polarization and quadrature phase-shift-keying*, DP-QPSK), banda de 25 GHz, e dois canais de

100 Gb/s com modulação DP-QPSK, banda de 50 GHz. Neste caso, o conjunto de canais ocupam uma banda total de 300 GHz na rede de grade fixa, mas 100 GHz desta banda estão ociosos. A Figura 1(b) mostra a ocupação espectral em grade flexível da EON com tamanho de FSU de 12,5 GHz. Neste caso, a banda total ocupada é de 200 GHz, correspondente ao mínimo teórico, o que implica a liberação de 33% da banda ocupada no caso de grade fixa.

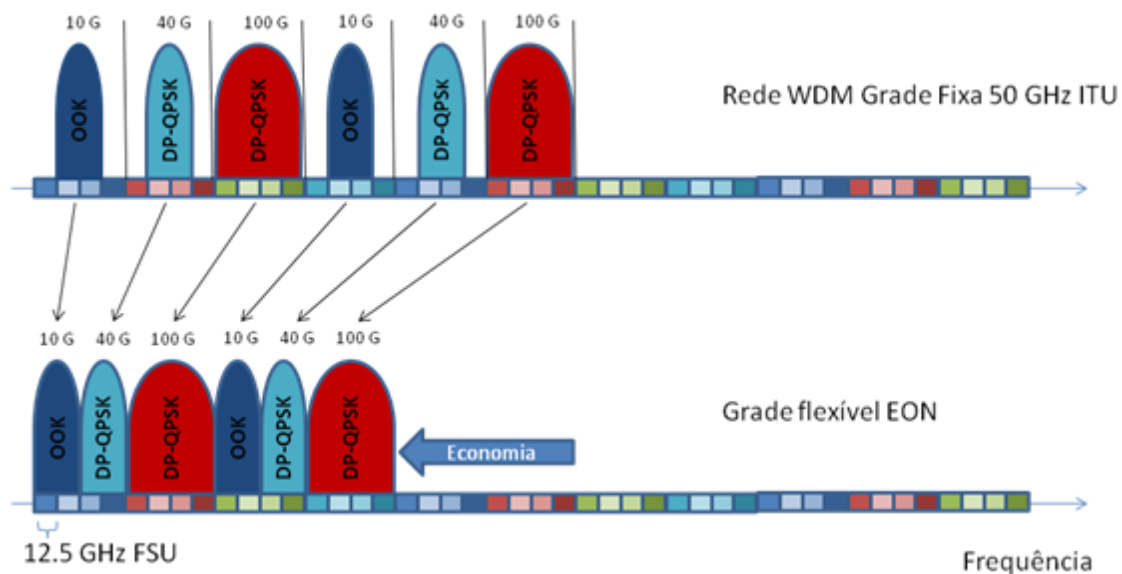


Figura 1.(a) Ocupação espectral com grade fixa de 50 GHz (ITU), (b) Ocupação espectral com grade flexível da EON.

2.3. Formatos de Modulação Eficientes

A flexibilidade no formato de modulação é uma característica importante das EONs. As EONs podem atribuir o formato de modulação considerando as condições do canal óptico de transmissão e, assim, atribuir formatos de modulação adequados ao seu alcance em relação à distância do caminho óptico fim a fim. Essa flexibilidade permite à EON utilizar formatos de modulação mais eficientes para caminhos ópticos curtos, e ainda estabelecer caminhos ópticos mais longos com formatos de modulação menos complexos.

Como exemplo (JINNO et al., 2010), o formato de modulação por quadratura de desvio de fase (*quadrature phase-shift keying*, QPSK) acomoda duas vezes mais bits por símbolo em relação ao formato de modulação OOK. Da mesma forma, o formato de modulação por quadratura de amplitude 64 (*64 quadrature amplitude modulation*, 64-QAM) acomoda três vezes mais bits em relação ao formato de modulação QPSK.

2.4. Atualização Tecnológica

O avanço nos equipamentos de transmissão é considerado fator primordial para a implantação das EONs. As EONs requisitam flexibilidade na atribuição espectral dos equipamentos, de forma a adaptar a ocupação espectral com eficiência às demandas de taxas de transmissão. Outra característica importante das EONs é que os equipamentos de transmissão podem ser configurados por *software*. Isso torna possível criar um ambiente dinâmico e automático para operação da rede com estabelecimento de novas conexões, realocação de conexões existentes e liberação dos recursos de rede no término das conexões, sem a necessidade de qualquer intervenção manual e interrupção dos serviços. O transmissor óptico de largura de banda flexível (*Bandwidth Variable Transceiver* - BVT) e o comutador óptico (*Reconfigurator Optical Add-Drop Multiplexer* - ROADM) são equipamentos que atendem aos requisitos demandados pelas EON.

Os BVTs ajustam a largura do canal óptico de acordo com a taxa de transmissão e o formato de modulação adotado. Um único BVT pode ser fatiado em vários transmissores virtuais. Cada transmissor virtual pode possuir sua própria taxa de transmissão e seu próprio formato de modulação. Como

exemplo, GERSTEL et al. (2012) menciona que um BVT com capacidade de 400 Gb/s de taxa de transmissão pode ser fatiado para atender três conexões ópticas de 100 Gb/s, 100 Gb/s e 200 Gb/s.

Os ROADMs são equipamentos que permitem o roteamento do sinal óptico pelos enlaces de fibra óptica, possuem portas de entrada e saída que atuam injetando e retirando tráfego da rede e ainda podem ser configurados com canais de diferentes larguras de banda por canal. Um dos principais componentes do ROADM é o comutador óptico de seleção por comprimento de onda (*Wavelength Selective Switch – WSS*). Os WSSs, com o uso de tecnologias, como os sistemas microeletromecânicos (*microelectromechanical systems - MEMS*) e cristais líquidos (*liquid crystal - LC*) (STRASSER; WAGENER, 2010), comutam e multiplexam em comprimentos de onda, sem a necessidade de converter em óptico elétrico e elétrico em óptico dos comutadores eletrônicos, o sinal óptico. Os ROADMs podem ser configurados remotamente por *software*. Isso permite que a administração/gerência da rede fique centralizada em um único local. A operação da EON com os ROADMs, no estabelecimento, realocação e retirada das conexões, são realizadas dinamicamente, sem a necessidade de interrupção dos serviços em operação (STRASSER; WAGENER, 2010). A Figura 2 apresenta um diagrama com um ROADM.

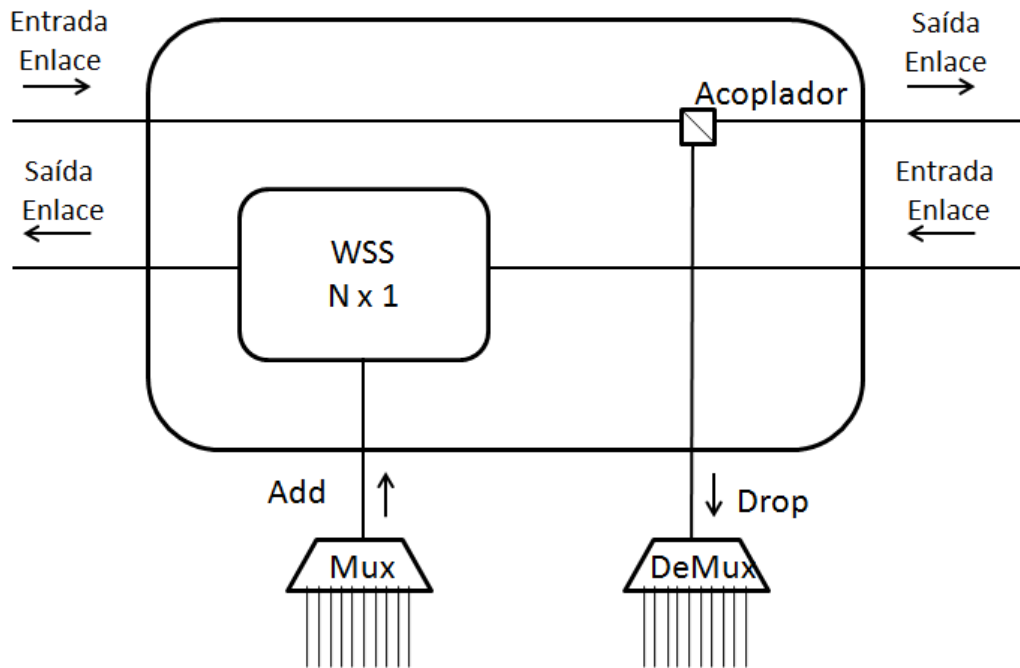


Figura 2. Arquitetura simplificada de um ROADM

Os ROADMs possuem portas para inserir tráfego na rede (*add*) com multiplexadores de comprimento de onda, portas para retirar tráfego da rede (*drop*) com demultiplexadores de comprimento de onda, além de WSSs que comutam o tráfego dos enlaces de entrada para os enlaces de saída. A configuração dos ROADMs é realizada por *software* com os algoritmos de roteamento e atribuição espectral (RSA). O desempenho dos RSA influencia o nível de utilização espectral que a EON pode alcançar. Na próxima seção serão apresentados as principais funcionalidades e objetivos dos RSAs.

2.5. Algoritmos RSAs

Os algoritmos RSAs representam funções chave para a implantação das EONs. O uso eficiente dos recursos da EON está diretamente ligado à estratégia adotada pelo RSA. Os RSAs têm duas principais funções na

operação da EON. A primeira é a definição da rota a ser estabelecida e a segunda é a atribuição espectral para novas solicitações de conexões.

O RSA relaciona, em uma lista ordenada, os caminhos possíveis entre a origem e o destino definidos pela solicitação de conexão do cliente. Os caminhos possíveis podem ser ordenados por distância, número de nós ópticos ao longo do caminho ou outra métrica que seja conveniente.

Para determinar o caminho mais curto entre uma origem e um destino pode-se adotar o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959). Nesse algoritmo, a EON é considerada como um grafo em que os nós ópticos são vértices e os enlaces são arestas. Cada enlace possui um custo próprio determinado a partir de alguma métrica considerada conveniente.

Outra abordagem interessante para a composição dos caminhos possíveis do RSA é o algoritmo proposto por YEN (1971), que encontra os caminhos entre determinadas origem e destino. Neste caso, há uma ordenação adicional do caminho mais curto ao caminho mais longo.

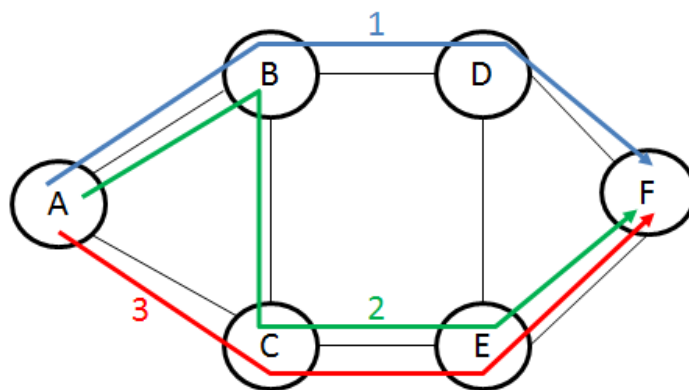


Figura 3. Topologia de rede com 6 nós e 8 enlaces

A Figura 3 apresenta uma topologia de rede simples com seis nós (*switches*) e 8 enlaces para exemplificar o processo de roteamento em uma rede óptica. A Figura 3 exemplifica o processo de roteamento de 3 caminhos

ópticos candidatos entre o nó de origem A e o nó de destino F. O primeiro caminho óptico candidato conecta os switches A,B,D e F, o segundo passa pelos nós A,B,C,E e F e o terceiro pelos nós A,C,E e F. A seleção da rota óptica (*lightpath*) a ser estabelecida para a nova conexão está relacionada à estratégia de atribuição espectral do RSA. É importante notar que uma rota óptica em uma EON é composta não apenas pelo conjunto de enlaces que conectam os nós de origem e destino, mas também pelo comprimento de onda da portadora óptica e pelo número de FSUs que constitui o canal a ser alocado. A atribuição espectral nas EON é um fator importante para obtenção dos índices de eficiência na utilização espectral da rede. Essa função é realizada pelo algoritmo RSA nas EONs.

Assim, os RSAs devem satisfazer simultaneamente as condições de continuidade de comprimento de onda e de contiguidade de FSU (ZHANG; ZHAO; WANG, 2012). A primeira destas estabelece que a alocação de um canal em uma EON só é possível quando uma mesma portadora óptica estiver disponível para este canal em todos os enlaces que compõe a rota entre origem e destino. Essa condição já precisava ser cumprida pelos algoritmos de alocação e roteamento de comprimento de onda (*routing and wavelength assignment*, RWA) utilizados nas redes WDM de grade fixa. A condição de continuidade pode ser relaxada, ao menos parcialmente, se a EON possuir, em ao menos alguns de seus nós, conversores ópticos de comprimentos de onda. No entanto, dado que estes dispositivos ainda não são disponíveis comercialmente, a maioria dos trabalhos da literatura pressupõe que a condição de continuidade deve ser obedecida e este também é o caso desta dissertação.

A condição de contiguidade estabelece que a alocação de um canal em uma EON só é possível quando todos os FSUs deste canal podem ser contiguamente dispostas em um dado intervalo de frequências. Dado que a alocação de FSUs não era feita nas redes de grade fixa, a condição de contiguidade é, até o momento, uma exclusividade das EONs. No melhor de nosso conhecimento, a literatura atual não aborda nenhuma estratégia em que essa condição possa ser relaxada e, novamente, a obediência a esta condição será considerada no presente trabalho.

As informações anteriores evidenciam que a aplicação de algoritmos como os de DIJKSTRA (1959) e/ou de YEN (1971) para determinar a rota óptica de menor custo em uma EON devem, obrigatoriamente, considerar o comprimento de onda da portadora e o número de FSUs a ser utilizado, de tal forma que as condições de continuidade de comprimento de onda e de contiguidade de FSUs sejam cumpridas.

O RSA mais simples é o *First-Fit* (GERSTEL et al., 2012), que consiste em acomodar uma nova rota óptica nos FSUs com menor frequência possível, que satisfaçam as condições de continuidade e contiguidade. O RSA *First-Fit* tem na estratégia de atribuição espectral sua principal virtude, o uso do caminho óptico de menor curso. No entanto, não avalia a condição de continuidade e contiguidade dos FSUs livres para atribuições espectrais futuras.

Em outros RSAs, a estratégia de atribuição espectral consiste em encontrar o melhor caminho candidato de forma a minimizar a fragmentação espectral, visando manter o maior número de FSUs contíguos para solicitações de conexões futuras. Em ZHANG, ZHAO e WANG (2012) é adotado um índice de consecutividade de FSUs livres ao longo dos caminhos candidatos, no qual é

escolhido o caminho candidato que mantém o maior índice de consecutividade. Em YIN et al. (2013), considera-se como índice para a escolha do caminho candidato o menor número de cortes em blocos de FSUs livres. O corte em um bloco de FSUs livres é representado pela divisão de um bloco de FSUs livres em dois blocos menores após o estabelecimento de uma nova conexão.

A operação normal de funcionamento da EON consiste na sucessiva aplicação de RSA para atribuição de novos caminhos ópticos. Ao longo do tempo as conexões são encerradas e os recursos da EON são liberados. Eventualmente, mesmo com o uso de RSAs eficientes no uso espectral, isto levará a uma condição de fragmentação espectral, na qual o número de FSUs livres, entre duas regiões espectrais utilizadas por determinadas rotas ópticas, pode ser insuficiente para alocar novas conexões entre clientes. Esta fragmentação não ocorre nas redes de grade fixa e trata-se de um problema novo que pode reduzir consideravelmente a eficiência espectral e o desempenho das EONs. A solução deste problema é de grande interesse acadêmico e pode contribuir para reduzir custos de operadoras que venham a implantar EONs e está sendo amplamente investigada na literatura.

A fragmentação em EON ocorre no aumento de blocos de FSUs livres pequenos na rede. Os blocos pequenos de FSUs diminuem a possibilidade de encontrar o número de FSU necessários e consecutivos ao longo do caminho óptico para acomodar novas conexões.

Em particular esse trabalho propõe uma estratégia de desfragmentação para EON, com objetivo de minimizar a fragmentação espectral e assim maximizar a utilização espectral na EON. O próximo capítulo aborda as

questões relacionadas a desfragmentação em EON e, em particular, a seção 2.5 apresenta a estratégia de desfragmentação proposta nesse trabalho.

3. DESFRAGMENTAÇÃO E REALOCAÇÃO DE CONEXÕES

Este capítulo descreve as principais questões relacionadas com a desfragmentação da EON. Inicialmente, a Seção 3.1 apresenta uma visão geral sobre o processo de desfragmentação da EON. A Seção 3.2 descreve de que forma será realizada a realocação das conexões. A Seção 3.3 aborda a questão da periodicidade e do momento de início do processo de desfragmentação. A Seção 3.4 aborda a questão da região da rede à qual a desfragmentação será aplicada. A Seção 3.5 aborda a questão de como migrar o tráfego sem interromper os serviços ativos. Finalmente, a Seção 3.6 descreve a estratégia de desfragmentação proposta por este trabalho.

3.1. Visão geral do processo de desfragmentação da EON

O processo de desfragmentação da EON consiste na organização do tráfego das conexões ativas em regiões espectrais contíguas nos enlaces ópticos a fim de disponibilizar o maior número de FSU livres contíguos para acomodar conexões de solicitações futuras.

A Figura 4(a) exemplifica acomodações espectrais hipotéticas em um conjunto de três enlaces ópticos, L1, L2 e L3, com 9 FSUs, numerados de 1 a 9, disponíveis.

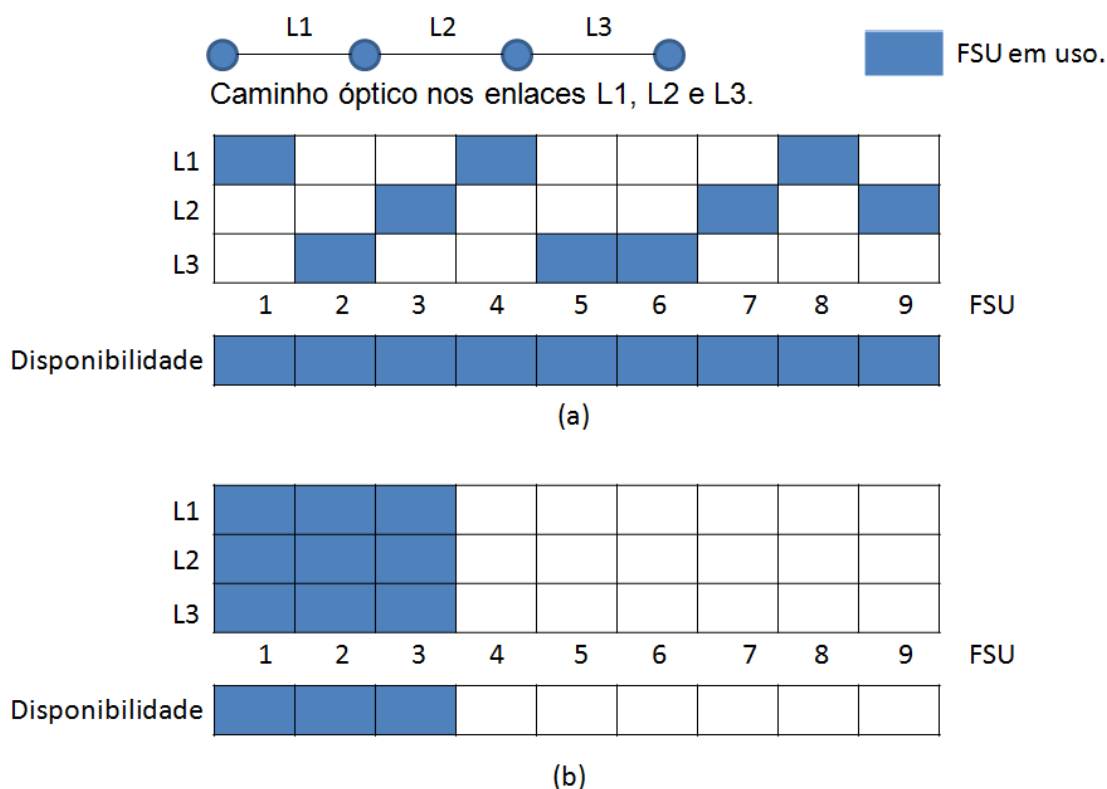


Figura 4. (a) Ocupação espectral em um caminho óptico com 3 enlaces. (b) Ocupação espectral agrupada após o processo de desfragmentação

Na situação da Figura 4(a), que poderia ocorrer após sucessivas solicitações para o estabelecimento e a liberação de conexões entre clientes, a distribuição dos FSUs ocupados inviabiliza a aceitação de novas conexões, mesmo havendo disponibilidade de FSUs. Isto é decorrência da fragmentação espectral causada pelo desalinhamento entre as conexões ativas da rede. A Figura 4(b) mostra a ocupação dos FSUs após um processo de desfragmentação hipotético. Esse processo de desfragmentação conseguiu agrupar 100% das conexões ativas na região dos FSUs de menor número. Neste caso 66% dos FSUs ficam disponíveis para conexões futuras.

A eficiência no processo de desfragmentação está relacionada com a estratégia de desfragmentação adotada. Segundo ZHANG et al. (2014), a estratégia de desfragmentação em EON pode ser dividida em 4 questões: de

que forma será realizada a realocação das conexões (será discutido com detalhes na Seção 3.2); qual a periodicidade e o momento para iniciar o processo de desfragmentação (Seção 3.3); qual a região da rede que será afetada pela desfragmentação (Seção 3.4); e como migrar o tráfego sem interromper os serviços ativos (Seção 3.5).

3.2. Realocação de Caminhos Ópticos baseados em RSA

A desfragmentação baseado em RSA (DF-RSA) (ZHANG et al., 2013) consiste em definir a combinação de um RSA para estabelecer as conexões no estado de funcionamento normal da rede (EFN), quando a EON atua estabelecendo novas conexões e finalizando conexões extintas, e também um RSA para a realocação de conexões no estado de desfragmentação (ED), quando a EON realiza as realocações das conexões selecionadas. No processo de realocação baseado em RSA, tem-se como tomada de decisão, ou seja, definir a nova posição da conexão a ser realocada, a própria estratégia do RSA selecionado para realocação. Nesse caso, o RSA selecionado para realocação é adaptado para receber como entrada, em vez de uma solicitação de conexão, uma conexão já estabelecida na EON. Assim a realocação da conexão pode ser feita no mesmo caminho óptico em região espectral diferente ou até mesmo em outro caminho óptico e conseqüentemente em outra região espectral, segundo a heurística de seleção de caminho óptica do RSA selecionado para realocação.

A escolha dos RSAs para alocação e para realocação é um fator importante para determinar a eficiência da EON. Uma boa combinação resulta em menores índices de fragmentação, melhor utilização dos recursos da rede e

menor probabilidade de bloqueio para novas solicitações de conexões. Em ZHANG et al. (2014) foram apresentados os resultados experimentais da simulação do funcionamento da EON com várias combinações de RSAs, para roteamento e atribuição espectral no EFN e realocação das conexões no ED. Obteve-se o melhor resultado de probabilidade de bloqueio com o uso do RSA FA (YIN et al., 2013) nos dois estados de funcionamento da EON, ou seja, o FA foi usado no EFN para o roteamento e atribuição espectral e também no ED para a realocação das conexões.

3.3. Gatilho e Periodicidade da Desfragmentação

Uma questão importante no processo de desfragmentação é definir o momento de iniciar a desfragmentação, ou seja, o momento adequado para minimizar a fragmentação da rede. Em termos gerais, a desfragmentação pode ser iniciada a partir de alguma condição específica, que será chamada de gatilho. Os gatilhos podem, ao menos, estar relacionados com alguma medida 1) de tempo, 2) do número de conexões ou 3) de tráfego.

No primeiro destes casos, o gatilho de desfragmentação é disparado a cada intervalo de tempo, por exemplo, a cada número de semanas. A implementação desta estratégia é relativamente simples, mas só deve ser eficaz quando o número de requisições de conexões for aproximadamente constante ao longo do tempo e a carga da rede for relativamente baixa.

Gatilhos disparados devido a conexões podem levar em conta o número de solicitações para estabelecimento e/ou liberação de conexões. A implementação desta estratégia também é relativamente simples e seu

desempenho não deve ser afetado por variações temporais no número de requisições de conexões.

No caso de gatilhos relacionados ao tráfego, o processo de desfragmentação é iniciado quando uma condição específica de tráfego é atingida. São exemplos destas condições: a) a ocorrência de um potencial bloqueio de conexão, b) o fato de um enlace atingir certo nível de ocupação espectral e c) o fato de um enlace atingir certo nível de fragmentação. Observa-se que este último caso depende de alguma definição sobre o nível de fragmentação. Além disso, definições distintas deste nível podem levar a diferentes desempenhos para a estratégia em questão. Também se observa que a estratégia mencionada em 'a' está relacionada a um momento crítico para uma conexão e requer que a desfragmentação seja realizada de maneira imediata, se houver a expectativa de alocação de rota para a conexão com bloqueio potencial. Isto demandará que a rede faça operações com uma agilidade considerável para, por exemplo, evitar a interrupção dos serviços. Por outro lado, os gatilhos das estratégias 'b' e 'c' não ocorrem (ao menos necessariamente) em momentos críticos e a gerência da EON possui mais tempo para implementar as ações convenientes. De maneira geral, a implementação de gatilhos baseados em condições de tráfego requer uma complexidade maior que os dois outros gatilhos mencionados, em virtude da necessidade de monitoração da carga, possivelmente, em diferentes pontos da rede.

Obviamente, é possível pensar em estratégias com gatilhos híbridos. Por exemplo, quando a carga está abaixo de um limite, supondo-se abaixo de 20%

da ocupação espectral oferecida pela EON, pode-se adotar um gatilho baseado no tempo e acima deste limite pode-se utilizar um gatilho baseado no tráfego.

A literatura aponta a existência de vários gatilhos possíveis. Por exemplo, a inexistência de recursos na rede para uma nova solicitação de conexão foi adotada em TAKAGI et al. (2011). A desfragmentação antes de bloqueios de conexão apresentou experimentalmente 10% de melhoria na acomodação de novas conexões em relação ao processo sem a desfragmentação.

Outro fator importante é a frequência das desfragmentações. Ou seja, é importante considerar qual seria o intervalo entre desfragmentações adequado para manter índices baixos de fragmentação e manter um nível tolerável de complexidade na operação da rede. Não é desejável que o processo de desfragmentação afete a operação normal da rede. Além de intervalos homogêneos, é possível considerar intervalos adaptativos em função de algum parâmetro. Por exemplo, em ZHANG et al., (2014) foi apresentado um tempo variável entre desfragmentações. Esse tempo variou em função da carga de tráfego da rede, sendo menor entre desfragmentações quando o tráfego está intenso na rede e maior quando a carga da rede é baixa.

3.4. Região de Desfragmentação

A desfragmentação das conexões na EON pode ser realizada de forma integral ou parcial. A desfragmentação integral consiste em agrupar todas as conexões ativas da rede em determinada região espectral, normalmente naquela em que os FSUs têm índices mais baixos (menores frequências ópticas). É importante ressaltar que, o processo de desfragmentação deve respeitar os requisitos de consecutividade, bem como a contiguidade dos FSUs

nos enlaces ao longo do caminho pertencentes às conexões. Esse processo pode tornar a rede indisponível no período de desfragmentação, assim inviabilizando a operação normal da EON durante o processo de desfragmentação. A desfragmentação parcial atua em regiões específicas da rede, selecionando um conjunto de conexões a serem desfragmentadas. Em ZHANG et al. (2013), utilizou-se um índice de FSU com maior frequência de uso como estratégia de seleção das conexões a serem desfragmentadas.

3.5. Estratégias de Migração de Caminhos Ópticos para Minimizar Interrupção do Serviço

A migração de tráfego durante a realocação da conexão é um fator essencial no processo de desfragmentação. A migração do tráfego da rede deve ser feita de forma transparente para os usuários. A interrupção do serviço na realocação da conexão pode significar a inviabilização do processo de desfragmentação na EON. O processo de migração de tráfego pode ser feito de duas formas.

Na primeira, a migração do tráfego da rede pode ser feita utilizando recursos adicionais de rede (transmissores e receptores), ou seja, antes de liberar os recursos da conexão existente, estabelece-se uma nova conexão (momentaneamente redundante) e, então, desfaz-se a conexão inicial da conexão. Esta estratégia é abordada, por exemplo, em TAKAGI et al. (2011). É importante notar que o uso de *buffers* no transmissor pode permitir a transferência do tráfego sem interrupção do serviço.

O processo de realocação também pode ser realizado de forma a transferir o tráfego para a nova posição e liberar os recursos na posição inicial, em

tempo hábil sem a interrupção do serviço. Esse processo necessita de transmissores com capacidade de *buffer* suficiente para suportar o tráfego no período de transição da posição da conexão. Em PROIETTI et al. (2012), considerou-se o uso do transmissor óptico Nyquist WDM com capacidade de reconfiguração rápida (menor de 1 μ s) para alterar a frequência das portadoras ópticas para outra região espectral sem a interrupção do serviço.

3.6. Estratégia de Desfragmentação Proposta

Neste trabalho é proposta uma nova estratégia de desfragmentação para EONs. A estratégia proposta visa, de forma geral, manter índices baixos de fragmentação em toda a EON com a seleção de regiões diferentes para cada processo de desfragmentação. Mas de forma específica, a estratégia proposta seleciona a cada instante de desfragmentação a região mais afetada pela fragmentação. Ou seja, a cada processo de desfragmentação é identificado uma nova região para desfragmentação e essa região representa a região mais fragmentada da rede.

A estratégia de desfragmentação proposta utiliza como método de escolha da região a ser desfragmentada, a seleção das conexões que utilizam o enlace de maior índice de fragmentação. A cada processo de desfragmentação, o enlace com maior índice de fragmentação naquele momento é selecionado. Para isso, o sistema de gerenciamento da EON monitora e mantém atualizado o índice de fragmentação de cada enlace da rede.

O índice de fragmentação f , adotado pela estratégia de desfragmentação proposta para definir o enlace mais fragmentado, é calculado por

$$f = N_{cf} / N_f \quad (1),$$

na qual N_f representa o número de FSUs livres no enlace e N_{cf} o número de FSUs consecutivos livres no enlace avaliado. Desta forma, quanto maior o valor de f , maior é a consecutividade de FSUs livres e menor é o nível de fragmentação do enlace. Além do mais, se o número de FSUs consecutivos livres for igual a 0 (zero) e/ou o número de FSUs livres for igual a 0 (zero), assume-se f igual a 0 (zero). A Figura 5 apresenta alguns exemplos para $N = 10$.

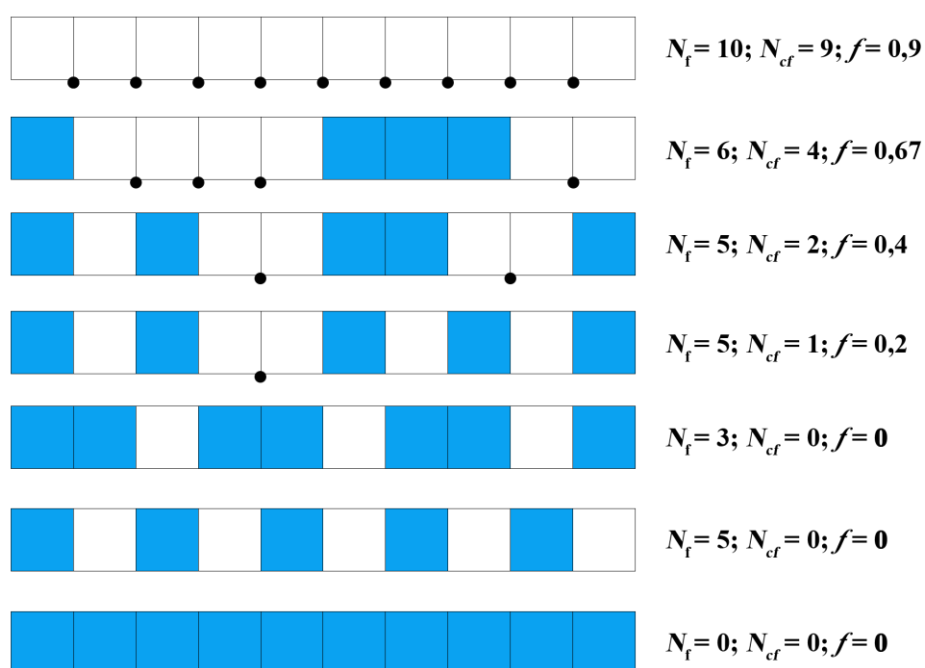


Figura 5. Exemplos do índice de fragmentação f

A estratégia de desfragmentação proposta permite variar o gatilho e a frequência das desfragmentações. Foram implementados dois métodos de gatilho para avaliação da estratégia.

O primeiro método baseia-se, como gatilho para início da desfragmentação, no número de conexões liberadas. O número de conexões liberadas pode ser variado pela gerencia da rede, de forma a representar um intervalo adequado entre desfragmentações, a manter níveis toleráveis de fragmentação, e ainda

complexidade adequada na operação da rede. Esta complexidade está associada com a capacidade de reconfiguração das conexões estabelecidas sem perder a qualidade dos serviços contratados.

O segundo método, já com uma abordagem mais crítica, baseia sua decisão na iminência de um possível bloqueio de solicitação de conexão, para início do processo de desfragmentação. A fim de disponibilizar recursos na EON e evitar o bloqueio da nova solicitação de conexão e assim minimizar a probabilidade de bloqueio, agindo no instante mais crítico da operação da EON.

A estratégia proposta utiliza como método de reorganização das conexões selecionadas a desfragmentação baseada em RSA (DF-RSA) (ZHANG et al., 2013). Ou seja, o EFN da rede atua com um RSA para estabelecer novas solicitações de conexões e no ED é utilizado também um RSA para determinar a realocação da conexão selecionada. Essa abordagem permite combinar RSAs diferentes para alocação de novas conexões e realocação de conexões existentes.

Para evitar possíveis interrupções no processo de migração do tráfego, a estratégia de desfragmentação proposta aborda o uso de transmissores e receptores adicionais. A realocação da conexão é realizada com a reserva dos recursos, com o estabelecimento do serviço e com a migração do tráfego da conexão para a nova posição, antes de liberar os recursos da posição inicial da conexão.

O fluxograma da Figura 6 detalha a sequência de execução da estratégia de desfragmentação proposta e é muito similar ao apresentado em FÁVERO et al. (2015).

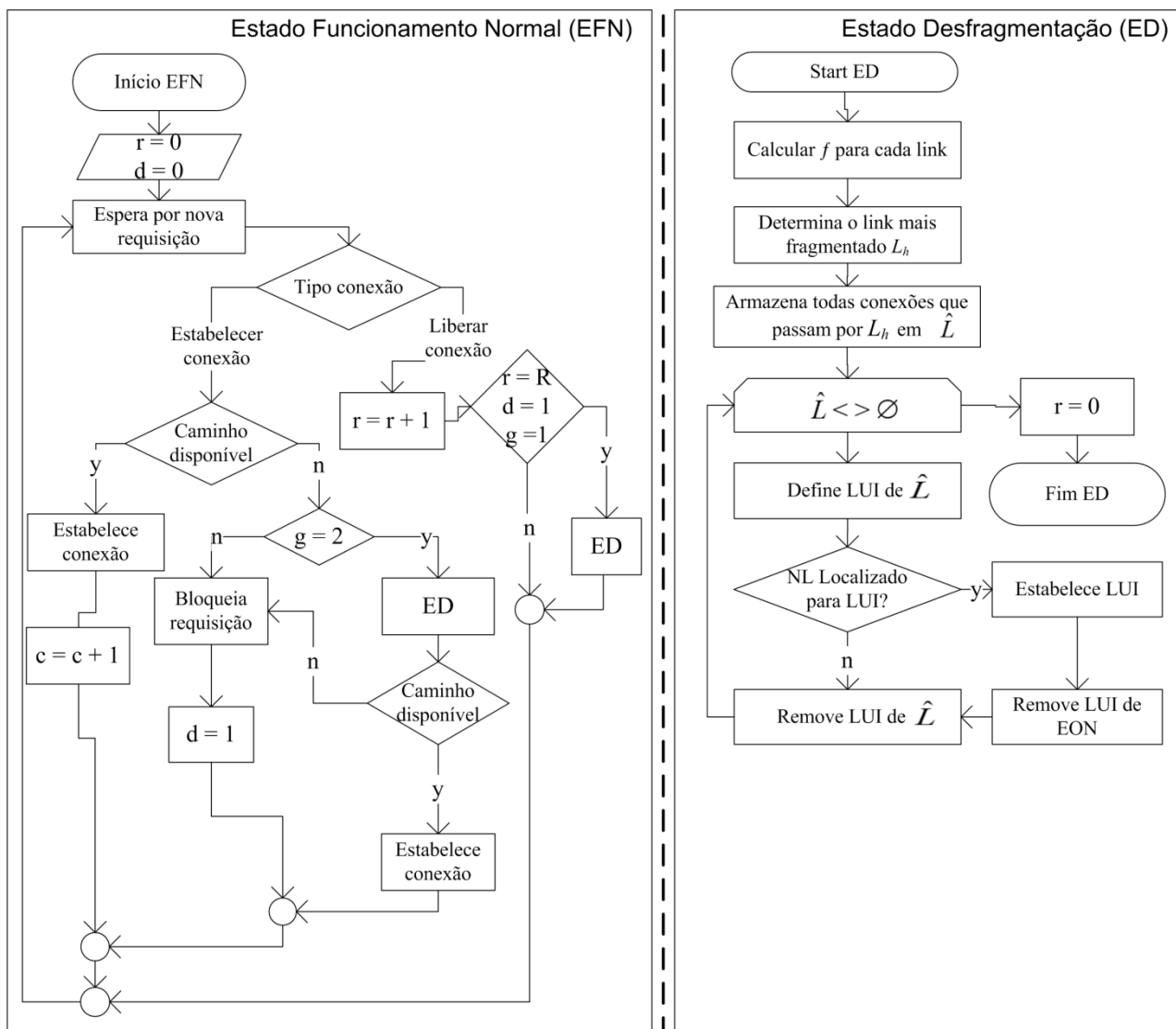


Figura 6. Fluxograma da nova estratégia de desfragmentação proposta

A variável d representa o estado de operação da rede. A EON inicia sua operação no estado de funcionamento normal (EFN), ou seja, aguardando novas solicitações ou encerramento de conexões de clientes, d é iniciado em 0. Para uma nova solicitação de conexão, a EON implementa o algoritmo RSA, previamente definido, para estabelecer a nova conexão. Quando há solicitação de término de serviço de conexão, a EON libera os recursos para futuras solicitações de conexões. O sistema de gerenciamento (SG) da EON armazena na variável r o número de conexões finalizadas. O EFN da rede permanece

enquanto todas as solicitações de novas conexões são atendidas pelo RSA. No entanto, com o aumento do tráfego e conseqüentemente a diminuição de recursos disponíveis na rede, o algoritmo RSA pode não ser capaz de estabelecer uma conexão. Quando esse evento ocorre pela primeira vez, o SG atribui a d o valor 1 e a EON passa para o estado de desfragmentação (ED). O ED é demonstrado nos seguintes passos:

Passo 1: O índice de fragmentação f é calculado por (1) para todos os enlaces;

Passo 2: O enlace com maior valor de f é definido como L_h ;

Passo 3: Todas as conexões que utilizam o enlace L_h são selecionadas e armazenadas numericamente no vetor \hat{L} ;

Passo 4: A conexão em \hat{L} que ocupa os FSUs de maior frequência óptica se torna a conexão em análise (CEA);

Passo 5: O algoritmo RSA previamente definido para realocação é utilizado para localizar uma nova posição para o CEA.

Passo 6: Se for encontrada uma nova posição para a CEA, então a conexão é estabelecida fisicamente e a CEA é removida de \hat{L} e fisicamente da EON. Dessa forma, não há interrupção de serviço, assumindo a necessidade de transmissores e receptor adicionais. É importante ressaltar que a nova posição assumida pela conexão pode estar no mesmo caminho óptico, mas em diferente posição espectral ou até mesmo em um caminho óptico diferente.

Passo 7: Se não é encontrada uma nova posição, CEA é removido numericamente de \hat{L} .

Passo 8: Os passos 4, 5, 6 e 7 são repetidos até que \hat{L} não tenha mais CEA, $\hat{L} = \emptyset$.

Passo 9: A variável r recebe o valor 0;

Passo 10: A EON retorna para o EFN.

O parâmetro g identifica o gatilho utilizado pela estratégia. Se g é igual a 1, as desfragmentações ocorrem em intervalos de conexões liberadas, nas quais um novo processo de desfragmentação ocorrerá quando r atingir um determinado valor limite R . Se g for igual a 2, o processo de desfragmentação ocorre quando não há recursos disponíveis para uma nova solicitação de conexão.

A primeira estratégia de gatilho, quando $g = 1$, baseado em conexões liberadas tem como condição inicial a possibilidade de uma conexão ser bloqueada, devido à falta de recursos na EON. Após a primeira desfragmentação o SG controla o intervalo entre desfragmentações com o contador de conexões liberadas r . Assume-se que o processo de desfragmentação será iniciado quando r for igual a R , no qual R representa um número de conexões liberadas, previamente definido para o intervalo entre desfragmentações. As conexões liberadas liberam FSUs na EON. Os FSUs são liberados formando fragmentos que podem não ser preenchidos por novas conexões. Esse fato pode ser considerado uma possível questão para o aumento do índice de fragmentação. Desta forma, o número de conexões liberadas foi considerado como gatilho para essa primeira estratégia de gatilho.

A escolha de um bom valor para R , pelo administrador, é uma questão importante para o equilíbrio da rede, entre operar com índices baixos de

fragmentação nos enlaces e realizar procedimentos que envolvem operações com *hardware* e que podem aumentar a complexidade de gerenciamento e, por exemplo, aumentar o consumo de energia da rede e aumentar a possibilidade de interrupção dos serviços.

Essa estratégia de desfragmentação com gatilho baseado em conexões liberadas foi submetida pelo Grupo de Sistemas Fotônicos e Internet Avançada (GSFIA) da Puc-Campinas e aceita para apresentação e publicação nos anais do *Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2015 SBMO/IEEE MTT-S *International IEEE* (FÁVERO et al., 2015).

A segunda estratégia de gatilho proposta, quando $g = 2$, inicia o processo de desfragmentação quando há a possibilidade de bloqueio, ou seja, quando não há recursos suficientes disponíveis para a solicitação de conexão em andamento. Essa estratégia de desfragmentação tende a aumentar o número de FSUs consecutivos livres no enlace L_h e até mesmo pode liberar recursos espectrais para a solicitação de conexão que havia disparado o processo de desfragmentação ED.

É importante ressaltar que, no melhor do nosso conhecimento, é a primeira vez que essa estratégia de desfragmentação baseada em realocação por RSA que atua na realocação das conexões do enlace com maior índice de fragmentação é proposta com a possibilidade de diferentes gatilhos de início das desfragmentações.

4. AMBIENTE DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Esse capítulo descreve os aspectos do ambiente de simulação computacional baseado em *software*, desenvolvido para produzir os resultados desse trabalho. Inicialmente, a Seção 4.1 apresenta o simulador de redes ópticas elásticas EONSim. A Seção 4.2 descreve as etapas do processo de desenvolvimento da nova versão do EONSim. A Seção 4.3 apresenta as reproduções de resultados de outros trabalhos para validação da nova versão do EONSim. Por fim, a Seção 4.4 mostra os parâmetros utilizados para as simulações dos cenários com o uso de desfragmentação proposto nesse trabalho.

4.1. Simulador de Redes Ópticas Elásticas EONSim

As simulações cujos resultados são apresentados no próximo capítulo foram realizadas com o simulador EONSim (SILVA, 2013). O EONSim é um simulador de redes ópticas elásticas desenvolvido em linguagem de programação Java pelo grupo de pesquisa de Sistemas Fotônicos e Internet Avançada da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

A 2ª versão do EONSim, EONSim v2, desenvolvido por Paulo César Barreto da Silva sob a orientação do Prof. Marcelo L. F. Abbade, permite a simulação de redes ópticas elásticas com diferentes topologias de redes, cargas de tráfego, taxas de transmissão, formatos de modulação e algoritmos RSAs. O EONSim v2 produz informações do comportamento da EON e de seus componentes durante o processo de simulação, com diferentes

distribuições e intensidade de carga de tráfego. Essas informações são utilizadas na análise do desempenho dos algoritmos RSAs.

O EONSim v2 não suporta simulação de EON com o uso de estratégias de desfragmentação. Para a análise do comportamento e obtenção dos resultados de desempenho da EON, em um ambiente de operação com o uso de estratégias de desfragmentação, foi desenvolvida pelo autor dessa dissertação em conjunto com Juliano Silva Marçal (aluno do Mestrado Profissional em Gestão de Redes da PUC-Campinas) a 3ª versão e a 4ª versão do EONSim, sob a orientação do Prof. Marcelo L. F. Abbade. Na próxima seção são detalhados as etapas de desenvolvimento do EONSim v3 e EONSim v4 .

4.2. Etapas de Desenvolvimento

O desenvolvimento do EONSim v3 consistiu inicialmente em um processo de modularização da versão anterior. O objetivo inicial foi organizar o código do EONSim para facilitar a adição de novas funcionalidades. Esse processo de modularização consistiu em separar os algoritmos RSA da versão anterior para compor a nova versão. No EONSim v3 foi desenvolvida uma nova interface, um novo ambiente de simulação de rede com suporte à adição de novas funcionalidades.

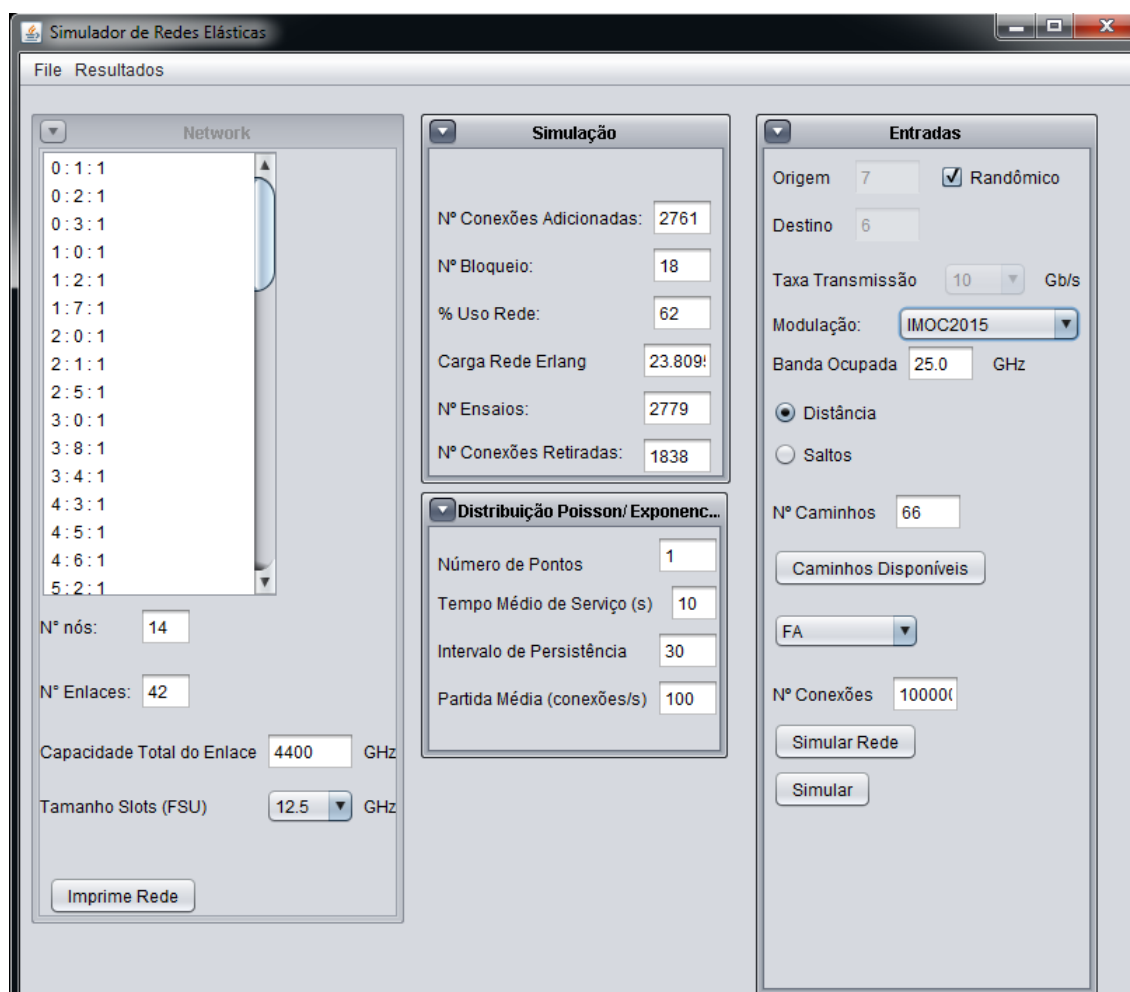


Figura 7. Interface do EONSim v3.0

A nova interface do EONSim v3.0 (Figura 7) possibilita escolher e carregar a topologia de rede desejada para a simulação, definir a carga de tráfego que será submetida a rede no processo de simulação, definir taxas de transmissão e formatos de modulação e ainda selecionar o algoritmo RSA que será utilizado na simulação.

Na interface do EONSim v3 foi adicionada uma janela chamada "Simulação" (Figura 7) que apresenta em tempo de execução o comportamento do processo de simulação. A janela "Simulação" contém as seguintes informações: número de conexões adicionadas na rede, número de conexões bloqueadas, percentual de uso da rede, número de solicitações de conexões realizadas e número de

conexões liberadas da rede. O acompanhamento em tempo real da simulação auxilia na observação e análise dos eventos na operação normal da EON e nos eventos de desfragmentação.

No EONSim v3 o ambiente de simulação da rede foi desenvolvido para permitir, além de simular o comportamento da EON, também monitorar o seu comportamento. O EONSim v3 possibilita facilmente adicionar e retirar índices de monitoramento da rede. Foram adicionados, para atender a estratégia de desfragmentação proposta, índices para monitorar a fragmentação nos enlaces da rede, percentual de uso da rede e controles de gatilhos para determinar o início e a periodicidade das desfragmentações.

```
public synchronized boolean adicionarConexao(List<Path> caminhos, double
public synchronized FSU FA(List<Path> caminhos) {...73 linhas }
public synchronized FSU FACA(List<Path> caminhos) {...73 linhas }
public synchronized FSU MTLSC(List<Path> caminhos) {...42 linhas }
public synchronized FSU MPSC(List<Path> caminhos) {...28 linhas }
public synchronized FSU FirstFit(List<Path> caminhos) {...39 linhas }
```

Figura 8. Trecho de código contendo exemplos de interfaces de RSA

Para facilitar a adição de novas RSAs no EONSim v3.0, foi padronizada a interface do método computacional destes algoritmos. Na Figura 8 são demonstrados alguns exemplos de interface de RSA. O código fonte dos métodos RSAs tem como parâmetro de entrada uma abstração da lista de caminhos ópticos e como parâmetro de saída uma abstração FSU que representa o caminho óptico e a posição de FSU que será atribuída para a nova conexão.

A nova versão do EONSim foi validada com a reprodução de resultados de trabalhos existentes na literatura. Alguns desses trabalhos já haviam sido

reproduzidos na versão anterior do EONSim. A próxima seção apresenta as reproduções de resultados realizadas no EONSim v3.

4.3. Reprodução de Resultados

A validação do EONSim v3 foi realizada com a reprodução de resultados de três trabalhos. A primeira reprodução foi dos resultados do algoritmo RSA MTLSC proposta por ZHANG, ZHAO e WANG (2012), anteriormente também reproduzidos no EONSim v2 em SILVA (2013). A segunda reprodução foi dos resultados do cenário G apresentado em SILVA (2013), gerados inicialmente com o EONSim v2. E por fim a terceira foi a reprodução dos resultados do algoritmo FA em YIN et al. (2013).

Para as três reproduções adotaram-se a topologia de rede NFSNet com 14 nós e 21 enlaces e o mesmo tamanho de FSU de 12,5 GHz. Os resultados obtidos, mostrados a seguir, relacionam a probabilidade de bloqueio (eixo y) com a carga (tráfego) da rede (eixo x).

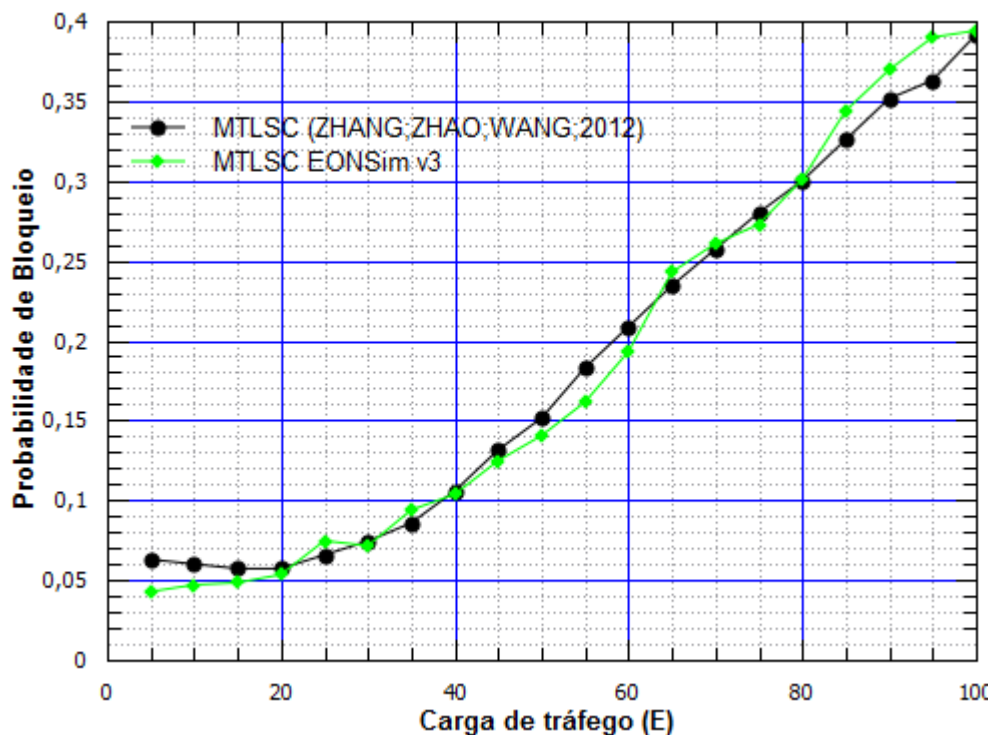


Figura 9. Gráfico com resultados de simulação do cenário presente em ZHANG, ZHAO e WANG (2012) do RSA MTLSC

A reprodução dos resultados do algoritmo MTLSC (ZHANG; ZHAO; WANG, 2012) seguiu os mesmos parâmetros de entrada do cenário apresentado em ZHANG, ZHAO e WANG (2012). A capacidade total da NFSNet por enlace foi de 4,4 THz. A carga de tráfego foi distribuída em 33% para taxas de transmissão de 40 Gb/s com ocupação de 4 FSU, 33% para taxas de transmissão de 100 Gb/s com ocupação de 4 FSU e 34% para taxas de transmissão de 400 Gb/s com ocupação de 6 FSU. A Figura 9 mostra a reprodução dos resultados de ZHANG, ZHAO e WANG (2012) obtidos pela simulação no EONSim v3. Os resultados relacionam a probabilidade de bloqueio das cargas de tráfego entre 10 e 100 E. Foi reproduzida a curva do algoritmo RSA MTLSC de ZHANG, ZHAO e WANG (2012) com precisão aproximada de 2% pelo EONSim v3.

Adotaram-se os mesmos parâmetros de entrada do trabalho de SILVA (2013) para a reprodução dos resultados do cenário G. As simulações foram realizadas para a topologia NFSNet com capacidade de 4,4 THz por enlace. A carga de tráfego foi distribuída em 10%, 40% e 50% para as respectivas taxas de transmissão de 100 Gb/s (4 FSU), 400 Gb/s (6 FSU) e 1 Tb/s (12 FSU). A Figura 10 mostra os resultados da reprodução de SILVA (2013) realizados no EONSim v3. Como antes, o gráfico mostra a reprodução das curvas dos algoritmos RSA FF, RF, SBD-FF, SBD-RF, SPMFF (SILVA, 2013) e MTLSC (ZHANG; ZHAO; WANG, 2012), novamente, com precisão em torno de 1% pelo EONSim v3.

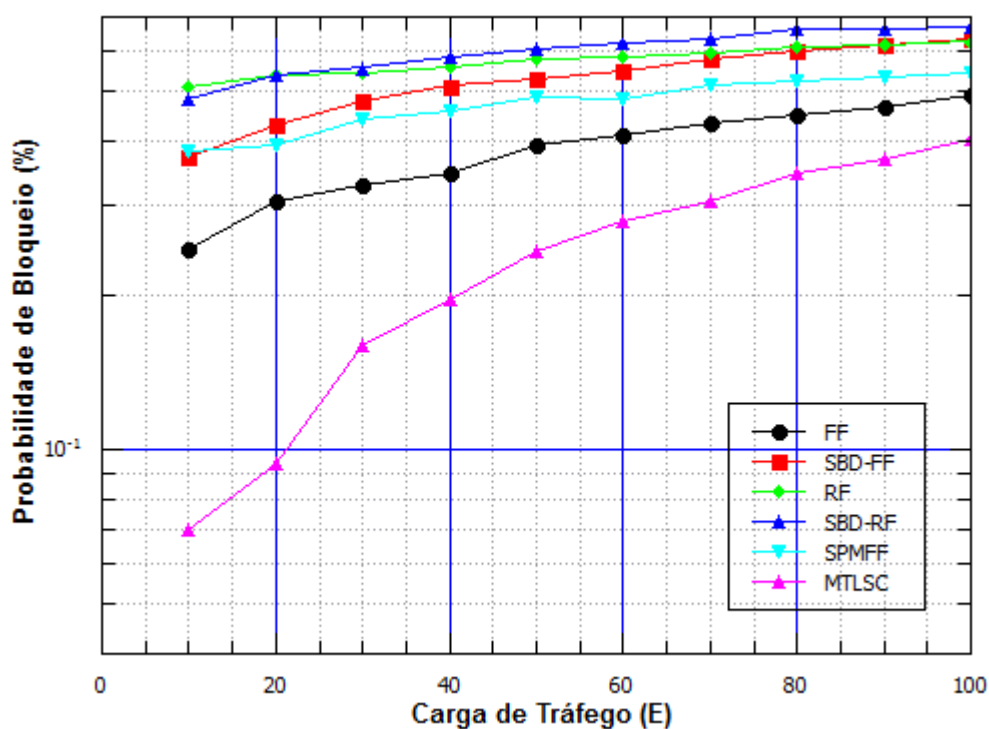


Figura 10. Gráfico com resultados de simulação do cenário presente em SILVA (2013)

Por fim, foram reproduzidos os resultados do algoritmo FA de YIN et al. (2013). Nesse caso, YIN et al. (2013) utilizaram como cenário a topologia de rede NFSNet com capacidade de 5 THz por enlace, totalizando 400 FSUs de

12,5 GHz. A carga de tráfego foi distribuída de forma uniforme de conexões com ocupação espectral de 1 a 10 FSUs. O gráfico da Figura 11 apresenta as curvas da reprodução dos algoritmos RSA FF e FA (YIN et al., 2013) com cargas de tráfego entre 100 a 720 erlang. A reprodução obteve aproximadamente 1% de precisão em relação ao trabalho de origem.

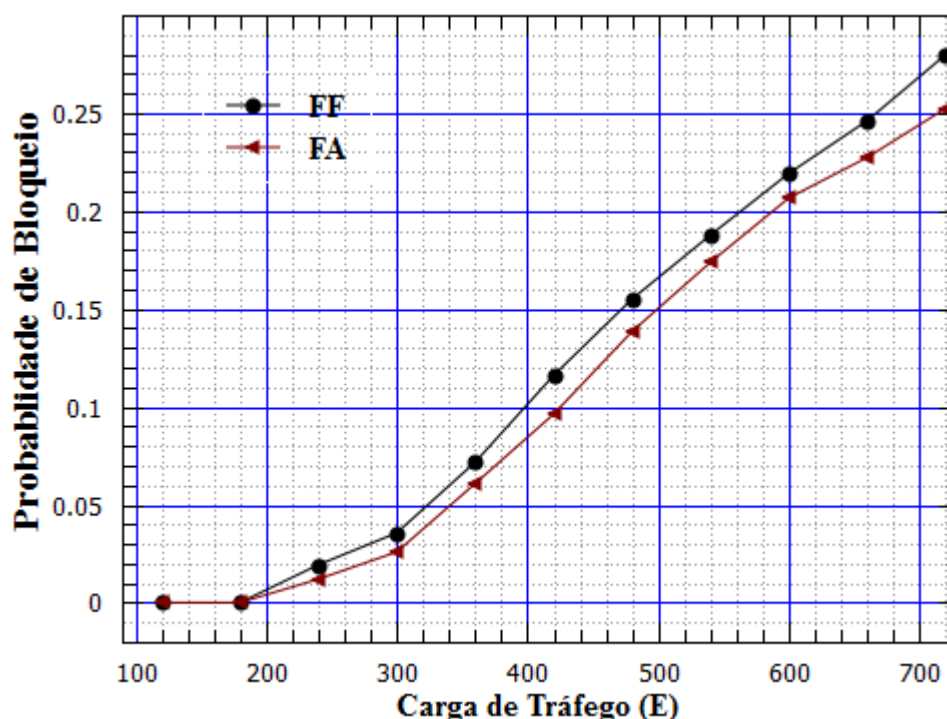


Figura 11. Resultados de simulação do cenário presente em YIN et al. (2013) dos RSA FF e FA

A reprodução dos resultados dos trabalhos citados confirmam que o ambiente de simulação do EOSim v3 reproduz resultados da literatura com o mesmo nível de precisão da versão anterior e de outros simuladores.

Após a validação do EOSim v3 com essas reproduções, foram desenvolvidas as funcionalidades necessárias para suportar as operações de desfragmentação de EON contidas nesse trabalho (seção 3.6), assim dando

origem ao EONSim v4. Na próxima seção serão apresentados os cenários e os parâmetros de entrada das simulações realizadas neste trabalho.

4.4. Configuração para Simulação dos novos cenários

Nos cenários de simulação considerou a topologia de rede NFSNet com 14 nós e 21 enlaces em ambas as direções (Figura 12), sendo que cada enlace disponibiliza 4,4 THz de largura de banda e é dividido em FSU com largura de banda de 12,5 GHz, totalizando 356 FSU por enlace. A carga de tráfego foi distribuída aleatoriamente e uniforme entre os clientes com conexões de ocupação de banda de 2, 3, 4 (taxas já demandas pelo mercado), 6 e 7 (futuras demandas) FSUs. Adotou-se a distribuição de Poisson para chegada de novas solicitações de conexão, sendo que a média de chegadas, λ , por ponto de simulação variou entre 69 a 157 chamadas por unidade de tempo. Para o tempo de serviço das conexões atribuiu-se a distribuição exponencial negativa, sendo μ a média igual a 10 unidades de tempo. As simulações foram realizadas com 10^5 conexões por ponto simulado.

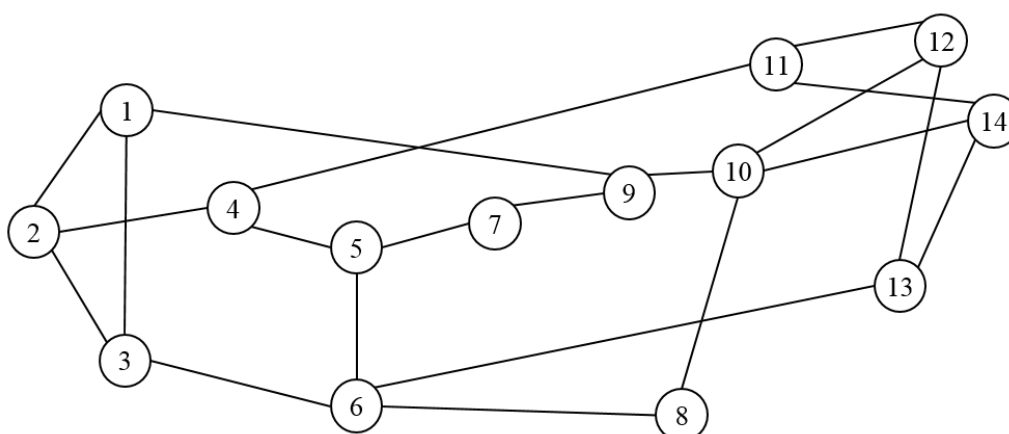


Figura 12. Topologia de rede NSFnet com 14 nós e 21 enlace

Não foram considerados impedimentos físicos, o que equivale a considerar que a EON implementa todos os regeneradores de sinal óptico necessários para estabelecer as conexões com os níveis adequados de qualidade. Também admitiu-se que não há conversores de comprimento de onda.

O próximo capítulo apresentará os resultados obtidos nas simulações dos cenários discutidos nesta seção.

5. RESULTADOS

Esse capítulo descreve e analisa os resultados obtidos com a estratégia de desfragmentação proposta. Inicialmente, a Seção 5.1 introduz os aspectos gerais sobre os resultados obtidos no EONSim v4. A Seção 5.2 apresenta e analisa os resultados obtidos da estratégia de desfragmentação com frequência de desfragmentação por conexões liberadas. Finalizando, a Seção 5.3 mostra e analisa os resultados obtidos com a estratégia de desfragmentação com frequência por eventual conexão bloqueada.

5.1. Aspectos Gerais sobre os Resultados

Os resultados obtidos no EONSim v4 têm como principal objetivo avaliar o comportamento das EONs em um ambiente de simulação computacional. Os principais parâmetros analisados foram a probabilidade de bloqueio e o índice de fragmentação f .

O bloqueio de uma solicitação de conexão do cliente ocorre quando não existem recursos suficientes de rede em pelo menos um dos caminhos ópticos entre os nós de origem e destino. Os FSUs livres, em quantidade adequada à solicitação de conexão do cliente, devem estar consecutivos e na mesma região espectral em todos os enlaces adjacentes pertencentes ao caminho óptico candidato. Então, quando esta condição não é atendida, o RSA não é capaz de estabelecer a nova conexão, ocorrendo o bloqueio. A probabilidade de bloqueio é obtida dividindo-se o número de solicitações de conexão bloqueadas pelo número total de solicitações de conexão, em um determinado

tempo de simulação. As seções seguintes apresentam os resultados obtidos com os dois cenários propostos.

5.2. Resultados da Estratégia de Desfragmentação com frequência por conexões liberadas

As primeiras simulações realizadas no EONSim v4 tiveram como objetivo avaliar o desempenho da estratégia de desfragmentação proposta com o RSA *First-Fit*, para alocação e também para realocação. O objetivo foi avaliar o desempenho da estratégia com diferentes intervalos entre as operações de desfragmentação. Este intervalo foi determinado a partir do número de conexões, R , finalizadas na rede.

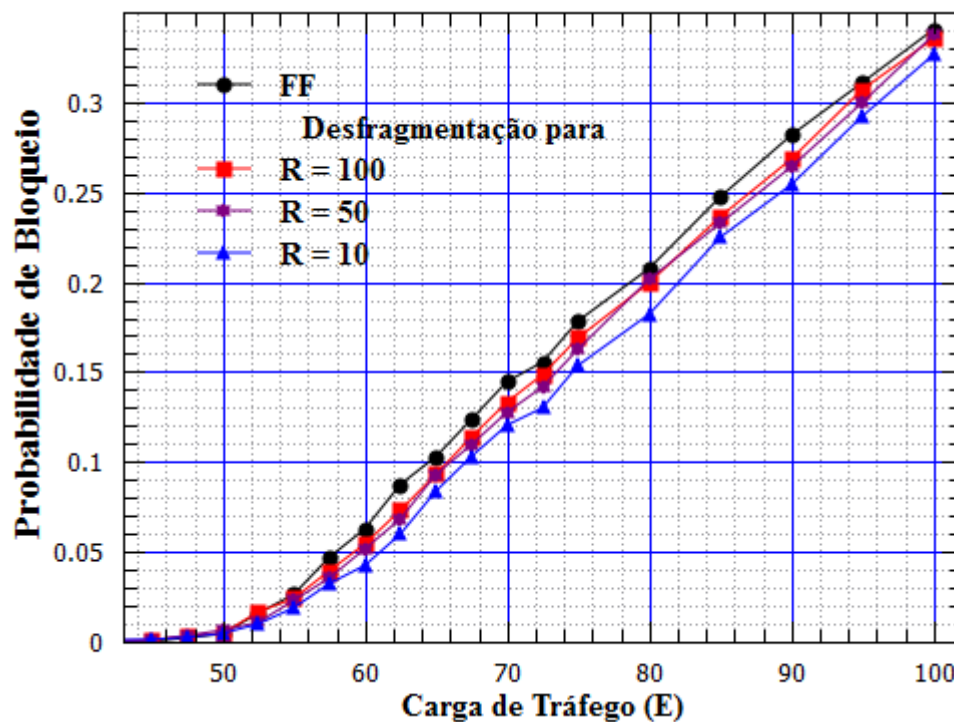


Figura 13. Resultados da probabilidade de bloqueio com *First-Fit* e aplicação da estratégia de desfragmentação proposta com $R = 100$, $R = 50$ e $R = 10$ (FÁVERO et al., 2015)

A Figura 13 mostra os resultados de probabilidade de bloqueio para as curvas com o algoritmo *First-Fit*, inicialmente sem desfragmentação, e depois com o uso da estratégia de desfragmentação proposta, com os intervalos entre desfragmentação em $R=100$, $R=50$ e $R=10$. O menor valor de R obteve a menor probabilidade de bloqueio. No entanto, a utilização deste valor aumenta a complexidade na operação da rede, exigindo maior número de desfragmentações.

Para avaliar melhor os benefícios obtidos pela estratégia de desfragmentação, foi definido o ganho na probabilidade de bloqueio, G_B , em relação ao uso do RSA FF sem a desfragmentação, como:

$$G_B = (P_B - P_{Bd}) / P_B \quad (2),$$

em que P_B e P_{Bd} são, respectivamente, a probabilidade de bloqueio quando não há desfragmentação e a probabilidade de bloqueio com o uso da estratégia de desfragmentação proposta.

A Figura 14 mostra que G_B inicialmente aumenta e alcança um pico por volta de 60 E. Após esse valor, este ganho é reduzido com o aumento da carga de tráfego na rede. Esse comportamento é esperado devido à baixa carga de tráfego permitir, ao processo de desfragmentação, que seja mais eficiente na realocação das conexões. À medida que a carga de tráfego aumenta, a disponibilidade de FSUs na EON é reduzida, diminuindo assim também as possibilidades de realocação de canais. Conseqüentemente, o ganho no processo de desfragmentação é reduzido. O melhor resultado foi atingido com a carga de tráfego em 60 E e com a maior intensidade de desfragmentação em $R = 10$, que obteve-se 48% de ganho G_B .

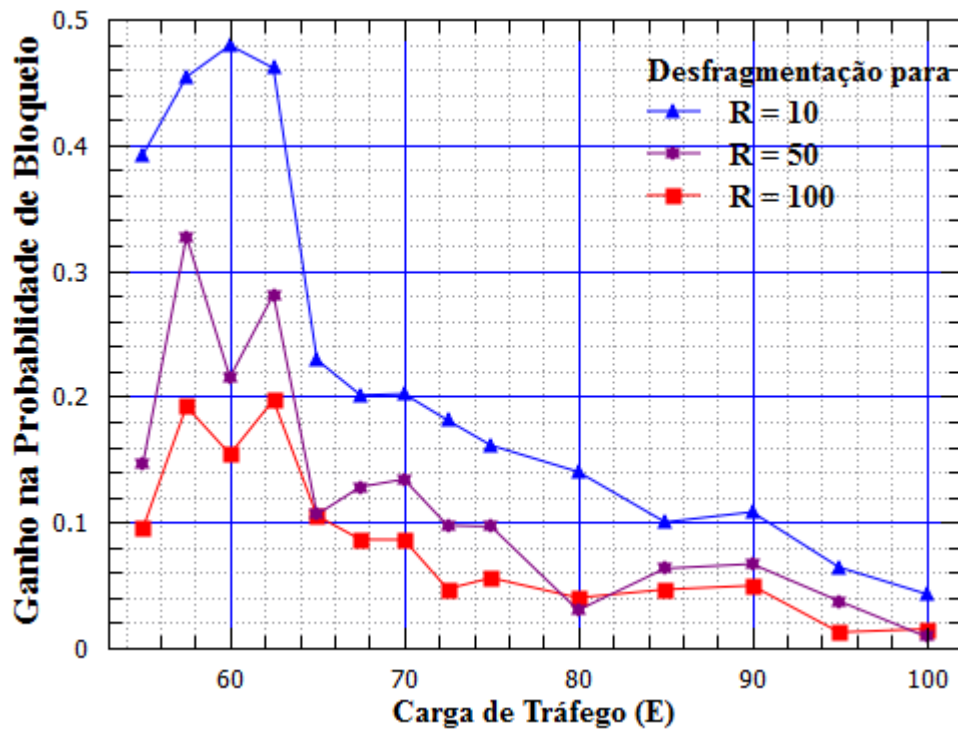
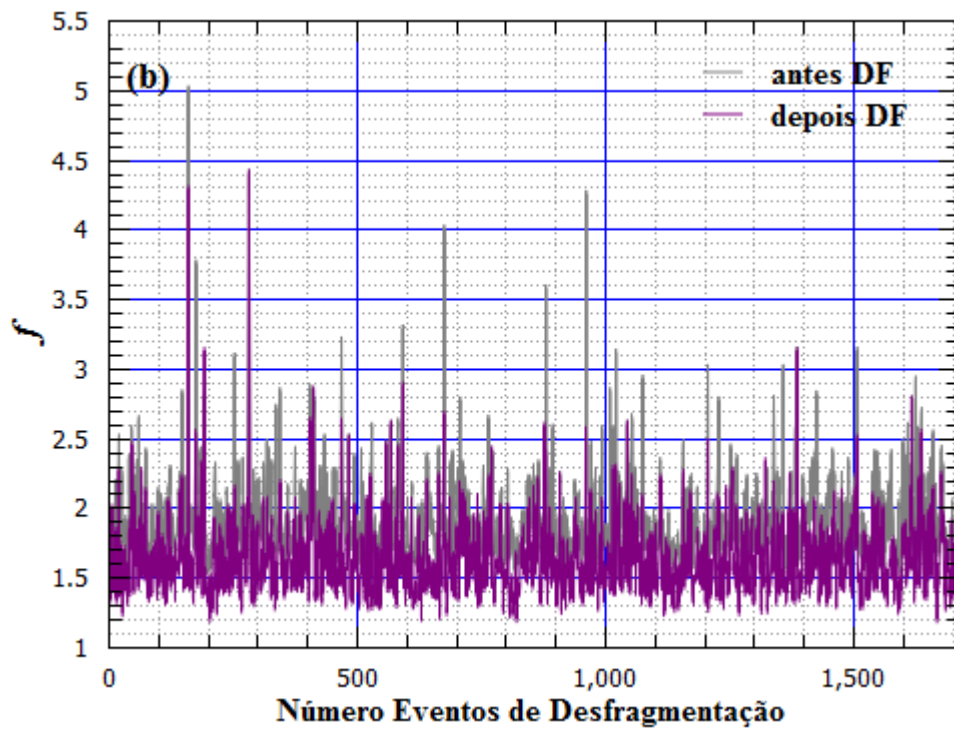
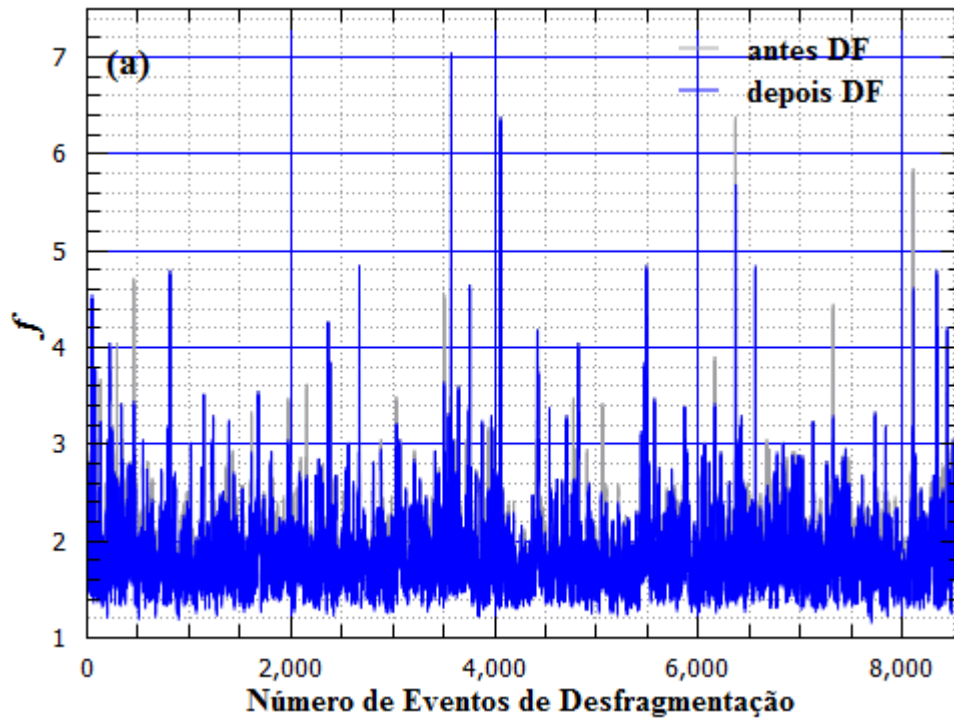


Figura 14. Ganho na Probabilidade de Bloqueio com a estratégia de desfragmentação proposta com $R = 10$, $R = 50$ e $R = 100$ em relação ao RSA FF (FÁVERO et al., 2015)

É importante observar o quanto o enlace é afetado pelo processo de desfragmentação, levando em consideração que a estratégia de desfragmentação proposta por este trabalho, tenta realocar todas as conexões que passam pelo enlace de maior índice de fragmentação.

A Figura 15 mostra a relação entre o índice de fragmentação f do enlace mais fragmentado antes do processo de desfragmentação (antes DF) e depois do processo de desfragmentação (depois DF), para uma carga de tráfego de 70 E.



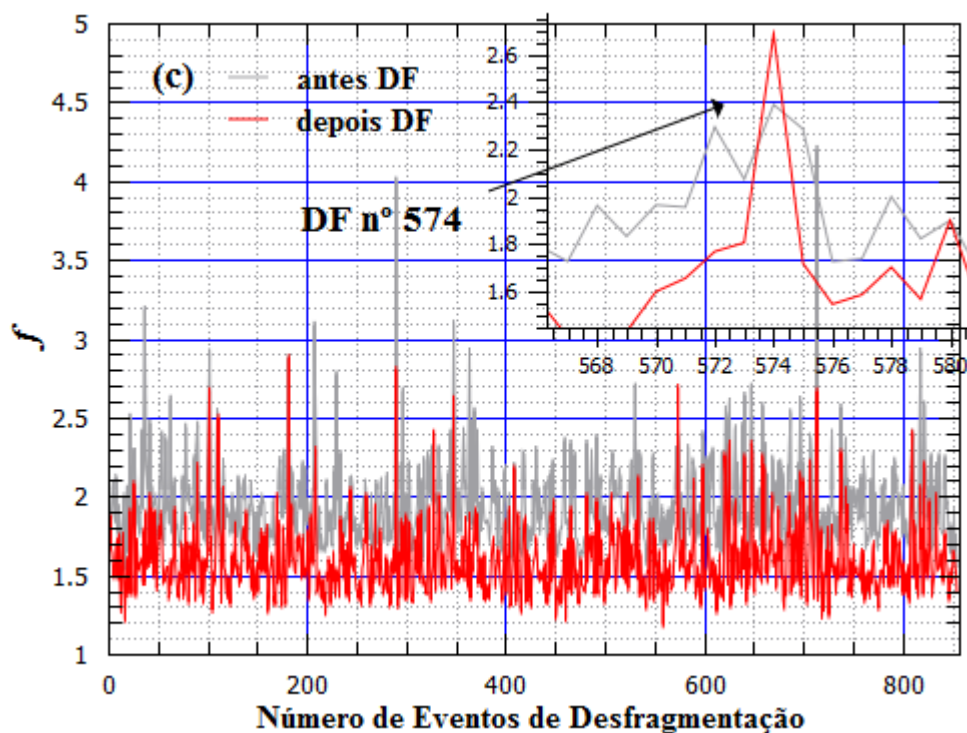


Figura 15. Índice de fragmentação f antes da desfragmentação e depois da desfragmentação para $R = 10$ (a), $R = 50$ (b) e $R = 100$ (c) (FÁVERO et al., 2015)

Estes resultados apresentam uma características importante da implementação do processo de desfragmentação. Observa-se que o processo de realocação de canais não faz nenhuma restrição em relação ao resultado do índice f após a desfragmentação. A vantagem desta estratégia é manter a simplicidade do processo de desfragmentação. Assim, é possível que o processo de realocação de canais cause um aumento no índice f de determinado enlace. Mesmo assim, o índice f apresentou melhora em 62, 92 e 97% dos eventos para um tráfego de 70 E e R de, respectivamente, 10, 50 e 100. Como exemplo, pode-se observar na Figura 15 (c), no evento 574, que o índice f piorou o seu resultado após a desfragmentação.

A Figura 16 mostra o número de ocorrências relativas de desfragmentação D_R (número de eventos de desfragmentação bem sucedidos dividido pelo número de eventos de desfragmentação), em que o índice de fragmentação f

obteve melhoria após o processo de desfragmentação para $R = 10$, $R = 50$ e $R = 100$. De forma geral, D_R cresce quando a carga é intensificada até um limiar de aproximadamente 60 E, a partir do qual há uma estabilização no valor de D_R . Este comportamento pode ser interpretado como, em cargas de tráfego amenas, a fragmentação da rede é pequena, conseqüentemente o efeito do processo de desfragmentação é baixo.

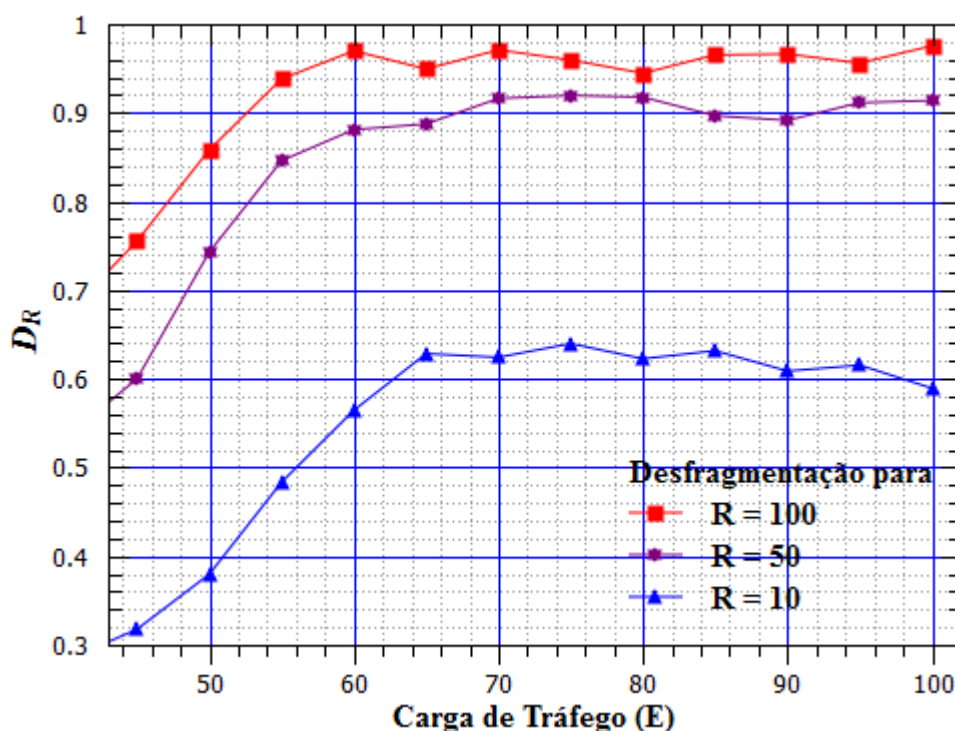


Figura 16. Número de eventos relativos de desfragmentação com resultados melhores em f (FÁVERO et al., 2015)

Outro fator importante que deve ser ressaltado é o melhor desempenho quando R é maior. Como R representa o intervalo entre as desfragmentações, tende-se a obter mais eficiência quando o intervalo é maior, devido ao aumento da fragmentação nos enlaces da EON. Mas mesmo com menos eficiência para o índice f com intervalos menores, o desempenho da EON melhora devido ao aumento do número de desfragmentação.

Por fim, é interessante analisar a média do ganho do índice de desfragmentação f , representado pelo parâmetro G_f , definido por

$$G_f = (1/N) \sum_{i=1}^N (f_{b,i} - f_{a,i}) / f_{b,i} \quad (3),$$

em que $f_{b,i}$ e $f_{a,i}$ são respectivamente os valores de f antes e depois da i -ésima desfragmentação e N o número total de eventos de desfragmentações, apresentado na Figura 17.

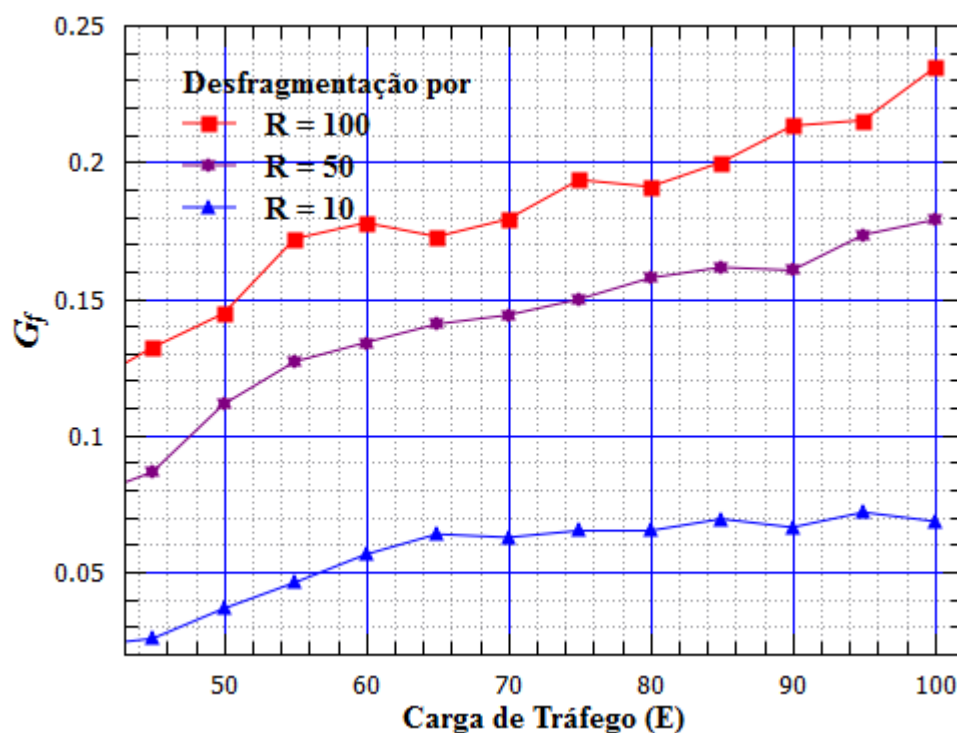


Figura 17. Melhoria em f para o enlace mais fragmentado (FÁVERO et al., 2015)

Da mesma forma que D_R , G_f aumenta com a ampliação da carga de tráfego. Este fator indica que quanto maior a carga de tráfego, maior a incidência de fragmentação, maior é a atuação do processo de desfragmentação e conseqüentemente, maior a melhora do índice f .

5.3. Resultados da Estratégia de Desfragmentação com frequência por conexão bloqueada

O segundo cenário de simulação foi elaborado para avaliar o desempenho da estratégia de desfragmentação proposta com diferentes RSAs. Para comparar o desempenho da nova estratégia de desfragmentação, foram utilizados os RSAs *First-Fit* (FF), *Fragmentation Aware* (FA) (YIN et al., 2013) e *Maximize Path Spectrum Consecutiveness* (MPSC) (ZHANG; ZHAO; WANG, 2012). O FA e o MPSC implementam estratégias para minimizar a fragmentação por meio da escolha de caminhos ópticos candidatos a manter maior disponibilidade de recursos na EON, para futuras solicitações de conexões.

O FA e o MPSC permitem avaliar a estratégia de desfragmentação proposta em um cenário que tanto o processo de alocação quanto o processo de realocação são feitos de forma a minimizar a fragmentação espectral, assim obtendo-se a maior eficiência na utilização espectral da EON.

Adicionalmente, foi definido como gatilho para início das desfragmentações o eventual bloqueio de conexão, ou seja, a cada falta de recursos suficientes para estabelecer uma nova solicitação de conexão, é iniciado o processo de desfragmentação. Desta forma, o processo de desfragmentação atua exatamente no momento mais crítico da operação da EON, quando não há recursos de FSUs suficientes.

A Figura 18 exibe os resultados da probabilidade de bloqueio, com cargas de tráfego de 45 a 100 E. Inicialmente com o RSA FF sem desfragmentação e, em seguida, as curvas com os RSAs FF, MPSC e FA com o processo de desfragmentação da estratégia proposta.

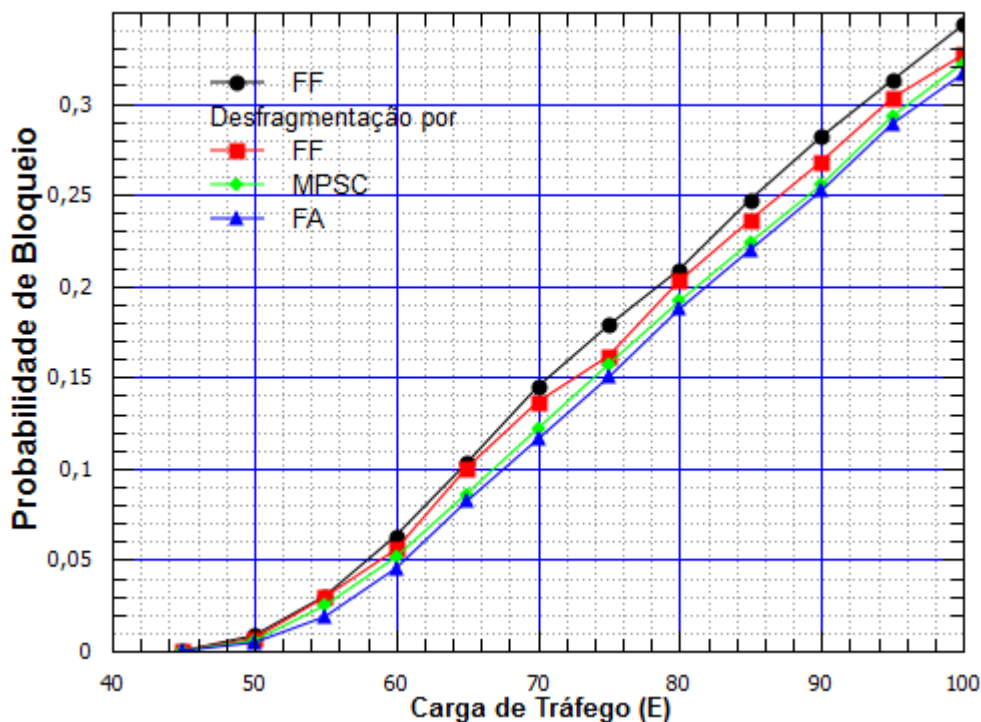


Figura 18. Probabilidade de Bloqueio dos RSAs FF sem desfragmentação e FF, MPSC e FA com desfragmentação

Nota-se que, na Figura 18, em todos os pontos de carga de tráfego simulados, o uso da estratégia de desfragmentação melhora os resultados de probabilidade de bloqueio com todos os RSAs avaliados em relação ao RSA FF sem o uso de desfragmentação. O RSA de maior desempenho com a estratégia proposta foi o FA, seguidos do MPSC e FF.

Para avaliar melhor os resultados obtidos, foi gerada a Figura 19, com o ganho da probabilidade de bloqueio G_B representado por (2) em relação ao RSA FF, quando não há o processo de desfragmentação com a estratégia proposta.

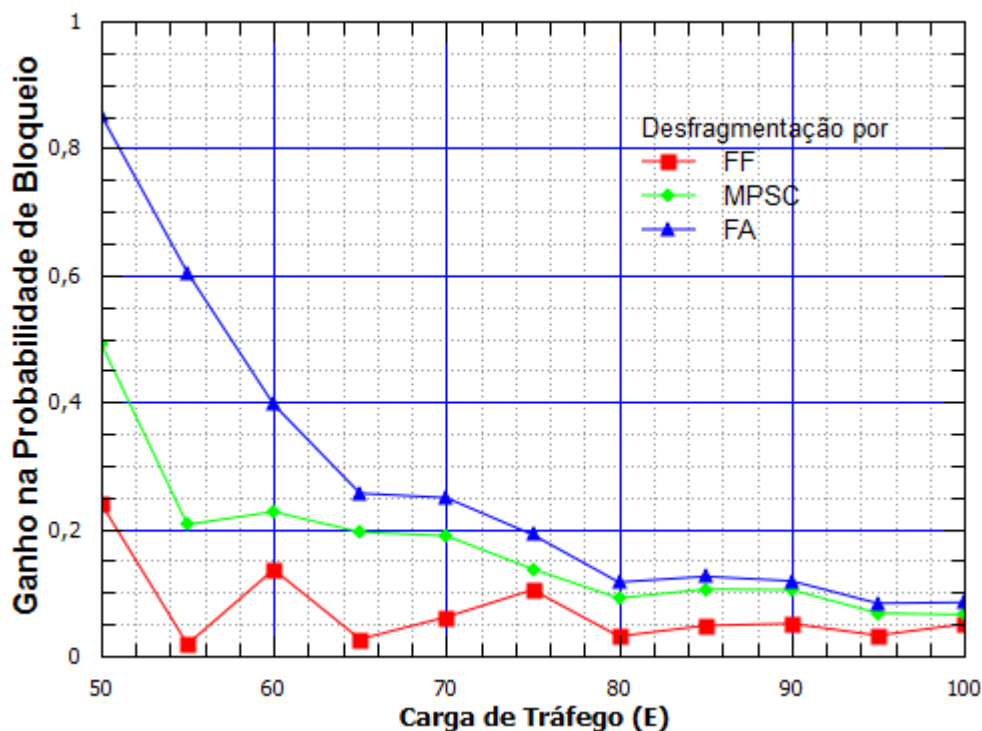


Figura 19. Ganho na Probabilidade de Bloqueio com a estratégia de desfragmentação proposta com os RSAs para realocação FF, MPSC e FA em relação ao RSA FF sem desfragmentação

Os resultados de G_B evidenciam a maior eficiência da estratégia de desfragmentação proposta com o RSA FA, com resultados de ganho acima de 80% para carga de tráfego de 50 E. Ainda mantém resultados expressivos até 75 E, em torno de 20% de ganho. Outro fator importante, que deve ser ressaltado é o ganho significativo do uso da estratégia de desfragmentação proposta com RSAs, que já tem como estratégia minimizar a fragmentação. Os resultados de ganho da estratégia de desfragmentação proposta com os RSAs FA e MPSC são, respectivamente, melhores do que com o RSA FF.

Como no cenário anterior (item 5.2), este cenário resulta em ganhos menores na probabilidade de bloqueio com o aumento da carga de tráfego. Este aspecto está relacionado com o aumento do uso da EON e, conseqüentemente, a menor possibilidade de realocação das conexões no processo de desfragmentação.

A Figura 20 mostra o número de eventos relativos de desfragmentação em que o índice f foi melhorado. Em baixas cargas de tráfego, D_R obteve resultados significativos, entre 0,9 e 1.0. Até mesmo com o RSA FA, f foi bem sucedido em 100% dos eventos de desfragmentação em 45 E. Além disso, ocorreram melhores resultados da estratégia de desfragmentação proposta com o RSA FA em relação aos outros RSAs avaliados.

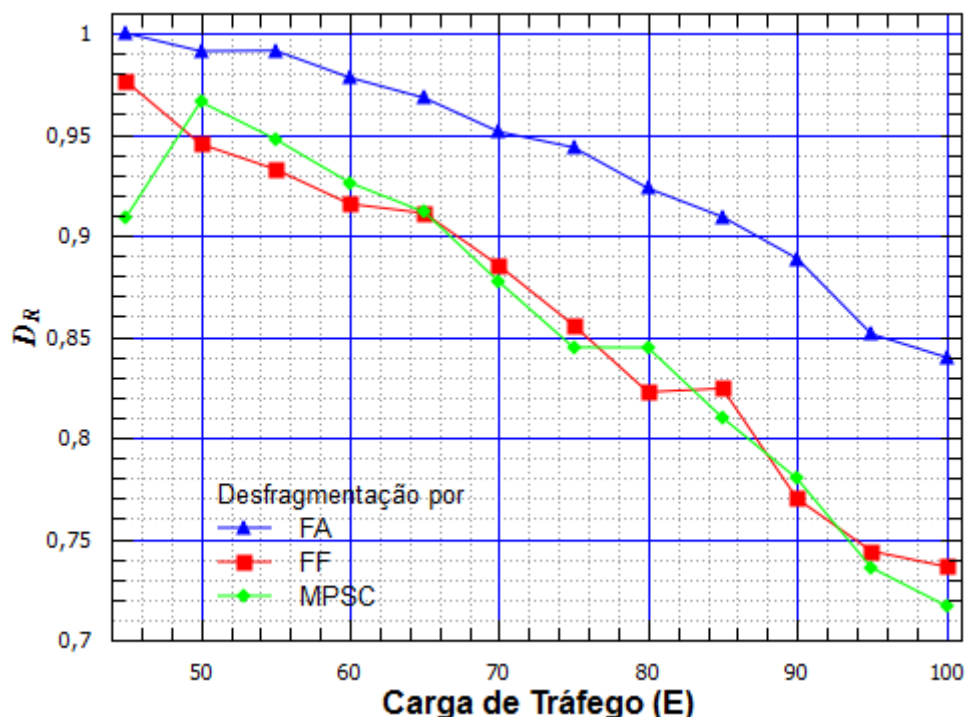


Figura 20 Número de eventos relativos de desfragmentação com resultados melhores em f

Também é importante analisar a média de ganho do índice f , representado por G_f (Figura 21). Da mesma forma que D_R , G_f tem resultados expressivos com cargas de tráfegos menores e perde eficiência com o aumento do tráfego na EON.

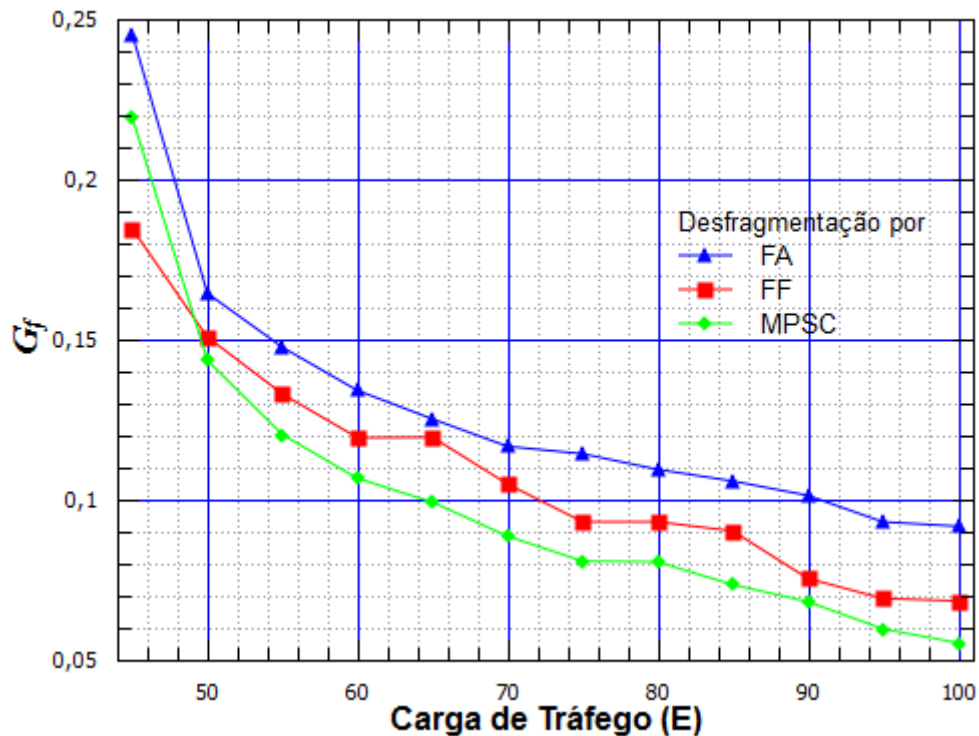


Figura 21 Melhoria em f para o enlace mais fragmentado

A análise do número de eventos de desfragmentação é um fator importante a ser considerado. O número de eventos de desfragmentação implica diretamente na complexidade da operação da EON. Quanto maior o número de eventos, maior o número de conexões que devem ser realocadas.

A Figura 22(a) mostra o número de eventos de desfragmentação por ponto de carga de tráfego (45 a 100 E). De forma geral, o RSA FA obteve o menor número de eventos de desfragmentação para todas as cargas de tráfego simuladas. Para exemplificar, na Figura 22 (b), em 70 E, as simulações com os RSAs FF e FA obtiveram respectivamente 13.631 e 11.578 eventos de desfragmentação, 2.053 eventos a menos com o FA em relação ao FF.

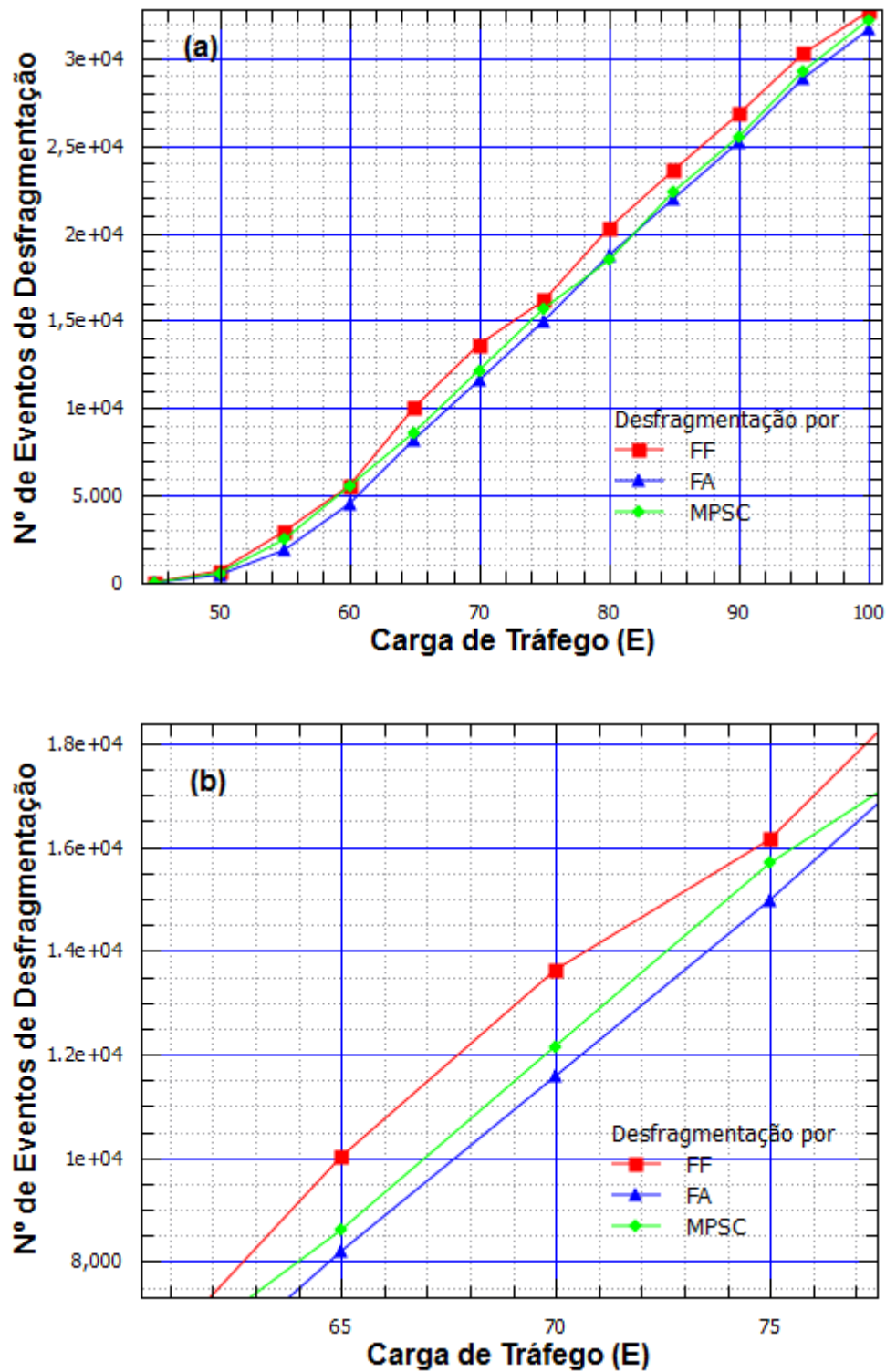


Figura 22 (a) Número de eventos de desfragmentação com os RSAs FF, FA e MPSC (b) Ampliação do número de eventos de desfragmentação de 65 e 75 E.

Estes resultados mostram que o uso de RSA mais eficiente na minimização da fragmentação espectral, alivia a complexidade de operação da EON, com

menor número de desfragmentações e conseqüentemente menor número de realocações. Além disso, obteve-se as melhores reduções na probabilidade de bloqueio.

6. CONCLUSÃO

Esta dissertação atende aos objetivos delineados e dá as seguintes contribuições ao estudo de redes elásticas: a) o desenvolvimento de duas versões do simulador de redes ópticas elásticas, o EONSim v3 e EONSim v4, respectivamente, com modularização do código fonte e adição de novas funcionalidades; b) a proposta de uma nova estratégia de desfragmentação espectral baseada em realocação de conexões por RSA; c) simulações de EONs com execução da estratégia de desfragmentação no EONSim v4; d) obtenção dos resultados e avaliação do desempenho da estratégia de desfragmentação proposta em dois cenários de simulação.

A estratégia de desfragmentação proposta obteve, de forma geral, melhores resultados em todas as simulações realizadas. Os resultados foram comparados com o RSA FF sem desfragmentação nos dois cenários avaliados.

No primeiro cenário, foi avaliado o RSA FF com a estratégia de desfragmentação proposta. Nesse cenário foi analisado o gatilho por número de conexões liberadas da EON, sendo $R = 10$, $R = 50$ e $R = 100$ os valores de conexões liberadas. O melhor resultado obtido foi 48% de ganho relativo se comparado ao RSA FF sem desfragmentação, com $R = 10$ e carga de tráfego em 60 E.

No segundo cenário, foi avaliado o desempenho da estratégia de desfragmentação proposta com RSAs diferentes, nesse caso, o FF, o FA e o MPSC. Para analisar o ponto mais crítico da operação da EON, foi adotado o gatilho por eventual bloqueio de conexão. O RSA FA obteve os melhores resultados, sendo que, comparado com o RSA FF sem desfragmentação, obteve em torno de 80% de ganho de probabilidade de bloqueio em 50 E.

A modularização do simulador EONSim permite a adição de novas funcionalidades para trabalhos futuros. Entre elas podemos citar novos RSAs, novas estratégias de desfragmentação, restrições de impedimentos físicos e simulação do comportamento de equipamentos ópticos existentes no mercado. O EONSim está disponível para toda a comunidade no endereço [<http://sourceforge.net/eonsim/wiki/Home/>](http://sourceforge.net/eonsim/wiki/Home/).

E para finalizar, conclui-se que a nova estratégia de desfragmentação para EONs, oferece ganhos consideráveis na utilização espectral e, conseqüentemente, redução na probabilidade de bloqueio.

7. TRABALHO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO

FÁVERO, R. V.; MARÇAL, J. S.; SILVA, P. C. B.; ABBADE, M. L. F.; BONANI, L. H., " *A New Elastic Optical Network Defragmentation Strategy based on the Reallocation of Lightpaths Sharing the Most Fragmented Link.*" *Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International.* IEEE, 3-6 Nov. 2015.

8. SOFTWARE DESENVOLVIDO

FÁVERO, R. V.; MARÇAL, J. S.; SILVA, P. C. B.; ABBADE, M. L. F., *Elastic Optical Networks Simulator version 3.0 (EONSIM 3.0)*, 2014.

FÁVERO, R. V.; MARÇAL, J. S.; SILVA, P. C. B.; ABBADE, M. L. F., *Elastic Optical Networks Simulator version 4.0 (EONSIM 4.0)*, 2015.

9. REFERÊNCIAS

BOSCO, G. et al. "On the performance of nyquist-WDM terabit superchannels based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM subcarriers.", *Journal of Lightwave Technology*, v. 29, n. 1, p. 53–61, 2011.

DIJKSTRA, E. W. "A Note on Two Probles in Connexion with Graphs *Numerische Mathematik*." *Numerische Mathematik* 1, 269-271, 1959.

FÁVERO, R. V et al. "A New Elastic Optical Network Defragmentation Strategy based on the Reallocation of Lightpaths Sharing the Most Fragmented Link.", IMOC 2015. Anais, 2015.

HECHT, J. "City of Light: The Story of Fiber Optics (review)." Oxford University Press, New York, 2004.

GEISLER, D. J. et al. "Bandwidth scalable, coherent transmitter based on the parallel synthesis of multiple spectral slices using optical arbitrary waveform generation.", *Optics express*, v. 19, n. 9, p. 8242–8253, 2011.

GERSTEL, O. et al. "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?", *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 2, p. 12–20, 2012.

JINNO, M. et al. "Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network.", *IEEE Communications Magazine*, v. 48, n. 8, p. 138–145, 2010.

PROIETTI, R. et al. "Rapid and complete hitless defragmentation method using a coherent RX LO with fast wavelength tracking in elastic optical networks.", *Optics express*, v. 20, n. 24, p. 26958–68, 2012.

RAHN, J. T. et al. "250Gb/s Real-time PIC-based Super-Channel Transmission over a Gridless 6000km Terrestrial Link.", *Ofc*, p. PDP5D.5, 2012.

RAMASWAMI, R.; SIVARAJAN, K. N.; SASAKI, G. H. "Optical Networks: A Practical Perspective.", 3ª edition, Morgan Kaufmann, 2010.

SILVA, P. C. B. "Novos Algoritmos para Alocação Eficiente de Canais em Redes Ópticas Elásticas." Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2013.

STRASSER, T. A.; WAGENER, J. L. "Wavelength-selective switches for ROADM applications.", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 16, n. 5, p. 1150–1157, 2010.

TAKAGI, T. et al. "Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation." 2011 37th

European Conference and Exhibition on Optical Communication, v. i, p. 1–3, 2011.

YEN, J. Y. “*Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network.*”, *Management Science*, v. 17, n. 11, p. 712–716, 1971.

YIN, Y. et al. “*Spectral and Spatial 2D Fragmentation - Aware Routing and Spectrum Assignment Algorithms in Elastic Optical Networks [Invited].*” v. 5, n. 10, p. 100–106, 2013.

ZHANG, J.; ZHAO, Y.; WANG, Y. “*Spectrum consecutiveness based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks*”. v. 10, p. 1–4, 2012.

ZHANG, M. et al. “*Bandwidth defragmentation in dynamic elastic optical networks with minimum traffic disruptions.*”, *IEEE International Conference on Communications*, p. 3894–3898, 2013.

ZHANG, M. et al. “*Dynamic and Adaptive Bandwidth Defragmentation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Networks With Time-Varying Traffic.*”, *Lightwave Technology, Journal of*, v. 32, n. 5, p. 1014–1023, 2014.