

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE  
CAMPINAS**

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

**JULIANO SILVA MARÇAL**

**COMPARAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE  
ACOMODAÇÃO ESPECTRAL E  
DEFRAGMENTAÇÃO EM REDES ÓPTICAS  
ELÁSTICAS**

**CAMPINAS  
2016**

**JULIANO SILVA MARÇAL**

**COMPARAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE  
ACOMODAÇÃO ESPECTRAL E  
DESFRAGMENTAÇÃO EM 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. Marcius Fabius Henrique de Carvalho após este período.

**PUC-CAMPINAS  
2016**

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

t621.3  
M299c

Marçal, Juliano Silva.

Comparação de estratégias de acomodação espectral e desfragmentação em redes ópticas elásticas / Juliano Silva Marçal. – Campinas: PUC-Campinas, 2016.

96p.

Orientador: Marcius Fabius Henrique de Carvalho.

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

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. 2. Comunicação ótica. 3. Redes de computadores. 4. Algoritmos de computador. 5. Sistema de telecomunicação. I. Carvalho, Marcius Fabius Henrique de. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

22.ed. CDD – t621.3

**JULIANO SILVA MARÇAL**

**COMPARAÇÃO DE ESTRATÉGIA DE ACOMODAÇÃO  
ESPECTRAL E DESFRAGMENTAÇÃO EM 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. Orientadora: Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho

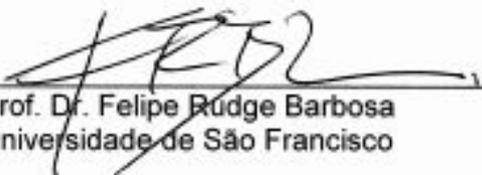
Dissertação defendida e aprovada em 27 de junho de 2016 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho  
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. Felipe Rudge Barbosa  
Universidade de São Francisco

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha mãe que durante toda a minha infância e adolescência me conduziu com sabedoria apesar de todas as dificuldades apresentadas na época por ser mãe solteira e com dois filhos pequenos.

Ao Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade, pela dedicação, compreensão, incentivo e principalmente disponibilidade em atender seus orientados sem medir esforços. Graças a orientação do mesmo, foi possível a publicação de um artigo científico nos anais do *Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2015 SBMO/IEEE MTT-S *International IEEE*.

Ao Prof. Dr. Marcius Fabius Henrique de Carvalho, por dar sequência as orientações necessárias com eximia paciência e dedicação possibilitando assim a conclusão deste trabalho de dissertação.

Ao Prof. Dr. Luiz Bonani do Nascimento da UFABC por fazer parte de inúmeras reuniões para avaliação de resultados, definições de caminhos a seguir e também pelos ótimos pitacos no processo de desenvolvimento do simulador.

Aos colegas de trabalho Paulo Cesar Barreto da Silva responsável pelo desenvolvimento da primeira versão do simulador e por estar sempre prestativo na transmissão de conhecimento possibilitando assim a continuidade do trabalho de pesquisa e ao aluno e grande amigo Ricardo Vicente Fávero, que durante os dois anos sempre se mostrou parceiro e companheiro no desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa junto ao desenvolvimento das novas versões do simulador EONSim v3 e v4.

Ao Centro Universitário Padre Anchieta (UNIANCHIETA) de Jundiaí, por conceder os laboratórios de informática para a realização das simulações que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-CAMPINAS) pela concessão da bolsa de estudos e pelos excelentes docentes que fazem parte do curso Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica.

## NOTA DO ORIENTADOR

O Prof. Dr. Marcelo Abbade fazia parte do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC Campinas até julho de 2015 e, junto com o seu grupo de pesquisa, formou a base de uma plataforma para desenvolvimentos de pesquisas em redes ópticas elásticas. Foi neste contexto que se iniciou o tema desta dissertação.

Com a transferência do Prof. Dr. Marcelo Abbade para outra Instituição de Ensino Superior recebi do programa de Pós-Graduação a incumbência de continuar o trabalho já iniciado. Neste sentido minha orientação foi na formação do texto e na de sugestões de cenários de simulação que viessem a consolidar as estratégias implementadas. Ressalto a independência do discente Juliano Silva Marçal no desenvolvimento do seu trabalho em especial na proposição de novos recursos para o Simulador e na realização de inúmeras simulações necessárias a comprovações das proposições.

Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho

*“As dificuldades encontradas no processo são o tempero que apura o resultado final”.*

Marçal, J. S., 2015.

## RESUMO

MARÇAL, Juliano Silva. **Comparação de Estratégias de Acomodação Espectral e Desfragmentação em Redes Ópticas Elásticas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2016.

Na atual conjuntura tecnológica do ponto de vista de transmissões ópticas, as tecnologias de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing - WDM*) que trabalham com grade fixa de 50 GHz não irão comportar a demanda existente para os próximos 10 anos. Esta escassez ocorre por vários motivos: canais com largura fixa de 50 GHz, limitação de 80 canais ópticos por enlace, capacidade máxima de transmissão de 100 Gb/s por canal. Em busca de soluções viáveis frente a este paradigma que se apresenta, surge a proposta da tecnologia conhecida como Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Network – EON*), uma tecnologia que permite canais ópticos com larguras de banda de 3.125, 6.250, 12.500, 25 e 50 GHz, capacidade de transmissão das taxas suportadas pela tecnologia WDM e ainda taxas de 200 Gb/s, 400 Gb/s e 1 Tb/s, e podem ser implantadas sobre a mesma infraestrutura óptica WDM já existente correspondendo assim a um custo altamente inferior se comparado a implantação de novas redes. A eficiência desta nova proposta de tecnologia está principalmente nos algoritmos de roteamento e atribuição espectral (*Routing and Spectrum Assignment - RSA*) que visam a maximização dos recursos de disponibilidade da rede através da diminuição da probabilidade de bloqueio. O uso do RSA resulta na geração de fragmentação diminuindo a disponibilidade de recursos da rede. Dentro deste cenário, o presente trabalho estuda a viabilidade do uso de desfragmentação baseada na realocação sobre o enlace que apresentar maior índice de fragmentação e analisa a adoção de dois índices: índice de consecutividade e índice de maior número de FSUs ocupados, para a seleção do enlace a ser desfragmentado. Os resultados deste estudo foram obtidos a partir do desenvolvimento da versão 5 do simulador *Elastic Optical Network Simulator* (EONSim). Para a obtenção dos resultados, diferentes taxas de transmissão foram distribuídas uniformemente para cada uma carga de tráfego entre 45 e 100 erlang (E), o RSA *First-Fit* (FF) foi adotado para todas as simulações, para diminuir o processamento as desfragmentações foram executadas a partir de um número  $R$  de conexões liberadas ( $R= 10$ ,  $R= 50$  e  $R= 100$ ). Para o cenário utilizando o índice de consecutividade, foi aferido ganho de até 44% para 55 E e ganho médio de 15% quando comparado aos resultados do cenário sem desfragmentação, para o uso do índice de maior número de FSUs ocupados, foi observado ganho de 26% para 55 E com ganho médio de 10%. A partir dos resultados obtidos é possível concluir que a adoção de estratégias de desfragmentação para redes EONs são passíveis de serem utilizadas pois apresentam diminuição da probabilidade de bloqueio e aumento da disponibilidade dos recursos da rede.

**Palavras-chave:** Redes ópticas elásticas, estratégias de desfragmentação ópticas, algoritmo de roteamento e atribuição espectral, simulador de redes ópticas

elásticas, índices de fragmentação de enlaces ópticos, desfragmentação baseada na realocação de conexões.

## ABSTRACT

MARÇAL, Juliano Silva. **Accommodation Strategies Comparison Spectral and Defragmentation in Elastic Optical Networks**. 2016. *Dissertation (Master in Telecommunications Management Network) – Graduate in Eletrical Enginnering, Center for Science, Technology and Environmental, Pontificia Universidade Católica de Campinas, Campinas 2015.*

*In the current technological environment from the point of view of optical transmission, multiplexing technologies for wavelength division (Wavelength Division Multiplexing - WDM) working with fixed 50 GHz grid will not support the existing demand for the next 10 years. This scarcity occurs due to several reasons: channels with fixed width of 50 GHz, limitation of 80 optical channels per link, maximum transmission capacity of 100 Gb / s per channel. In search of viable forward solutions to this paradigm that presents technology proposal comes known as Optical Networks Elastic (Elastic Optical Network - EON), a technology that enables optical channels with bandwidths of 3,125, 6,250, 12,500, 25 and 50 GHz transmission capability of rates supported by the WDM yet rates of 200 Gb / s, 400 Gb / s and 1 Tb / s, and can be implemented on the same optical infrastructure WDM already existing thus corresponding to a highly cost less if compared to deployment of new networks. The efficiency of this proposed new technology is mainly in routing algorithms and spectral assignment (Routing and Spectrum Assignment - RSA) aimed at maximizing network availability of resources by reducing the likelihood of blocking. The use of RSAs on the EONS networks fragmentation results in the generation of reducing the availability of network resources. Within this scenario, the present work-studies the feasibility of defragmentation use based on the relocation of the link to submit further fragmentation index. This paper studies the adoption of two indices: consecutiveness index and more FSUs index busy, both indexes allow the selection of the link to be defragmented. The results of this study were obtained from the development of version 5 of the simulator Elastic Optical Network Simulator (EONSim). To obtain the results, different transmission rates were evenly distributed for each traffic load between 45 and 100 Erlang (E), the First-Fit RSA (FF) was adopted for all the simulations to reduce the defragmentation processing were performed from an R number of released connections (R = 10, R = 50 and R = 100). For the scenario using the consecutiveness index gain of up to 44% was measured to 55 E and average gain of 15% compared to results without defragmentation scenario for the use of higher index number of occupied FSUs, gain was observed 26% to 55 E and average gain of 10%. From the results it can be concluded that the adoption of defragmentation strategies for eons networks are likely to be used since they have decreased blocking probability and increase the availability of network resources.*

**Key-words:** *Elastic optical networks, optical defragmentation strategies, routing and spectrum allocation algorithm of elastic optical network simulator, index fragmentation of optical links, defragmentation based on reallocating connections.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Previsão de tráfego mensal global (CISCO VNI, 2016). .....	1
Figura 2 Vista em corte longitudinal e em corte transversal de uma fibra óptica, apresentando o núcleo e a casca sem as camadas de proteção, adaptada de RIBEIRO (1999). .....	10
Figura 3. Fibra observada com corte transversal (medias em micrometros), figura adaptada de RIBEIRO (1999). .....	10
Figura 4. Elementos básicos utilizados em uma comunicação óptica. ....	13
Figura 5– Exemplo de transmissão em redes WDM. ....	16
Figura 6. Economia de banda em redes EON sobre redes WDM. ....	21
Figura 7. Fluxograma englobando os processos de Estabelecimento, Bloqueio e Liberação de conexões em redes EONs. ....	22
Figura 8. Topologia ABNet 5. ....	23
Figura 9. Simulação de operações realizadas sobre redes EONs. ....	28
Figura 10. Gráfico de simulação dos resultados ZHANZG, ZHAO, WANG (2012), algoritmo RSA MTLSC. ....	37
Figura 11. Gráfico de simulação dos resultados apresentados por SILVA (2013)	38
Figura 12. Gráfico de resultados da simulação para o cenário apresentado por YIN et al. (2013) para os RSAs FF e FA .....	39
Figura 13. Ferramenta NetBeans IDE versão 8.0.2 utilizada no desenvolvimento EONSim v5. ....	40
Figura 14. Versão da linguagem de programação Java utilizada no desenvolvimento do simulador EONSim v5. ....	42
Figura 15. Interface gráfica simulador EONSim v5. ....	43

Figura 16. Topologia de rede NFSNet 14. ....	44
Figura 17. Simulação operações em redes EON considerando desfragmentação. .....	51
Figura 18. Cálculo do índice de fragmentação $f$ baseado na consecutividade .....	55
Figura 19. Cálculo do índice de fragmentação $f$ baseado o maior número de FSUs ocupados. ....	56
Figura 20. Fluxograma de funcionamento da rede EON em EFN e ED. ....	58
Figura 21. Topologia de rede NFSNet contendo 14 nós e 21 enlaces. ....	61
Figura 22. Resultado da probabilidade de bloqueio com FF e estratégia de desfragmentação baseada no índice de consecutividade para $R = 50$ e $R = 10$ . .	65
Figura 23. Resultado da probabilidade de bloqueio com FF e estratégia de desfragmentação baseada no índice de consecutividade para $R = 50$ e $R = 10$ . ....	66
Figura 24. Resultado da probabilidade de bloqueio com FF e aplicação da estratégia de desfragmentação baseada na consecutividade para $R = 50$ e $R = 10$ . .....	67
Figura 25. Resultado da probabilidade de bloqueio com $FF$ e aplicação da estratégia de desfragmentação baseada no índice de consecutividade para $R = 100$ , $R = 50$ e $R = 10$ . ....	69
Figura 26. Resultado da probabilidade de bloqueio com $FF$ , aplicação da estratégia de desfragmentação baseada enlace com maior número de FSUs ocupados para $R = 100$ , $50$ e $10$ . ....	71
Figura 27. Comparativo da probabilidade de bloqueio para índices de desfragmentação baseados na consecutividade e maior número de FSUs ocupados para $R = 10$ . ....	72
Figura 28. Ganho na probabilidade de bloqueio com a estratégia de desfragmentação proposta para $R = 10$ utilizando-se o índice de consecutividade e maior número de FSUs ocupados em relação ao RSA FF. ....	73



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Eficiência redes EONs versus redes WDM. Adaptado de GERSTEL, et al., (2012).....	20
Tabela 2. Caminhos entre os nós A e D ordenados pelo custo. ....	24
Tabela 3. Principais recursos em cada versão do simulador EONSim .....	48

## LISTA DE ACRÔNIMOS

ABNet	Rede Abbade Bonani
CDDL	Licença Comum de Desenvolvimento e Distribuição
DFB	Retorno Distribuído ( <i>Distributed Feedback</i> )
DFFB	Desfragmentação a Partir do Primeiro Bloqueio
DFFB-BE	Desfragmentação a Partir do Primeiro Bloqueio Baseado nas Entradas
DFDI	Desfragmentação Desde o Início
DP-16QAM	<i>Dual Polarization 16 Quadrature Amplitude Modulation</i>
DP-QPSK	Chaveamento por Deslocamento de Fase Diferencial em Quadratura ( <i>Dual Polarization and Quadrature Phase-Shift-Keying</i> )
DSF	<i>Dispersion-shifted Fiber</i>
DWDM	Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de Onda ( <i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> )
ED	Estado de Desfragmentação
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>
EFN	Estado Normal de Funcionamento
EON	Redes Ópticas Elásticas ( <i>Elastic Optical Network</i> )
EONSim	Simulador de Redes Ópticas Elásticas ( <i>Elastic Optical Network Simulator</i> )
FA	<i>Fragmentation Aware</i>
FF	<i>First-Fit</i>
FSU	Unidade de Intervalo de Frequência ( <i>Frequency Slot Unit</i> )
Gbps	Gigabit por Segundo
GHz	Gigahertz
GUI	Interface Gráfica do Usuário ( <i>Graphical User Interface</i> )
IP	Protocolo de Internet (Internet Protocol)
ITU	União Internacional de Telecomunicações ( <i>International Telecommunication Union</i> )
JVM	<i>Java Virtual Machine</i>
KSP	<i>K-Th Shortest Path</i>
DIJKSTRA	<i>Dijkstra</i>
MAN	Redes Metropolitanas de Longa Distância ( <i>Metropolitan Area Network</i> )
MTLSC	<i>Maximize Total Link Spectrum Consecutiveness</i>
NTSNet	<i>National Science Foundation Network</i>
OEO	Opto-Eleto-Ópticos
OOK	Modulação Binária de Luz ( <i>On-off Keying</i> )
QPSK	Quadratura de Deslocamento de Fase ( <i>Quadrature Phase-Shift Keying</i> )

RSA	Roteamento e Atribuição Espectral ( <i>Routing and Spectral Assignment</i> )
RWA	Algoritmo de Roteamento e Atribuição de Comprimento de Onda ( <i>Routing and Wavelength Assignment</i> )
TON	Redes Ópticas Transparentes ( <i>Transparent Optical Networks</i> )
WDM	Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda ( <i>Wavelength Division Multiplexing</i> )

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Motivação .....	4
1.2	Objetivo .....	5
1.3	Organização da Dissertação .....	5
2	REVISÃO DA LITERATURA .....	7
2.1	Fibras Ópticas .....	7
2.2	Transmissão Ópticas .....	11
2.3	Redes Ópticas TDM .....	14
2.4	Redes Ópticas WDM .....	15
3	REDES ÓPTICAS EON .....	18
3.1	Redes Ópticas WDM x EON .....	20
3.2	Requisição de Conexão, Estabelecimento de Conexão, Bloqueio de Requisição e Liberação de Conexões em Redes EONs .....	21
3.3	Simulação: Requisição de Conexão, Estabelecimento de Conexão, Bloqueio de Requisição e Liberação de Conexões em Redes EONs .....	27
3.4	Mensuração de Eficiência de Redes EONs .....	30
4	SIMULADOR EONSIM .....	33
4.1	Desenvolvimento .....	33
4.2	Validação .....	35
4.3	Informações Técnicas .....	39
4.3.1	Ambiente de desenvolvimento .....	40
4.3.2	Linguagem de programação .....	41
4.3.3	Interface gráfica EONSim v5 .....	42
4.3.4	Tabela versões simulador EONSim .....	48
5	DEFRAGMENTAÇÃO DE REDES ÓPTICAS EON .....	49
5.1	Condições para Desfragmentação de Redes .....	52

5.1.1	Primeira Rejeição de Requisição (Bloqueio).....	53
5.1.2	Periodicidade para Desfragmentação.....	53
5.2	Índices para Desfragmentação.....	53
5.2.1	Índice de Consecutividade.....	54
5.2.2	Índice Maior Número de FSUs Ocupados .....	55
5.3	Estratégia de Desfragmentação Baseada na Realocação .....	56
5.4	Processo de Desfragmentação realizado pelo Simulador EONSim ..	57
6	CONFIGURAÇÕES, PÂRAMETROS E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	61
6.1	Cenário para Simulação .....	61
6.2	Limites .....	62
6.3	Resultados das Simulações .....	62
6.3.1	Influência do Número de Requisições na Convergência das Simulações. 63	
6.3.2	Estratégia de Desfragmentação e Gatilho de Conexões Liberadas com Índice de Consecutividade .....	67
6.3.3	Estratégia de Desfragmentação e Gatilho de Conexões Liberadas com Índice de Maior Número de FSUs Ocupados .....	70
6.3.4	Comparativo entre Índice de Consecutividade e Índice do Maior Número de FSUs Ocupados .....	72
7	CONCLUSÃO.....	74
8	PUBLICAÇÕES .....	76
9	SOFTWARE DESENVOLVIDO .....	77
10	REFERÊNCIAS .....	78

# 1 INTRODUÇÃO

Avanços tecnológicos permitiram o aumento do poder de processamento e minituralização dos mais variados dispositivos computacionais existentes, desde computadores tradicionais, a notebooks, tablets, smartphones e mais recentemente os gadgets vestíveis. Com o aumento do poder de processamento, e a necessidade cada vez maior de integração de dados, as tecnologias relacionadas à transmissão de dados foram obrigadas a se desenvolver para acompanhar esta evolução e atender à demanda por altas taxas de transmissão que se elevou significativamente desde o surgimento da internet em 1990 (GERSTEL, et al., 2012).

A CISCO (2016) uma das mais renomadas empresas de Telecom atualiza anualmente o relatório *Cisco Visual Networking Index* (VNI) que contém informações relacionadas a projeções do tráfego de dados mensal futuros, os dados publicados pelo relatório VNI apresentados na Figura 1 demonstram uma projeção de consumo mensal global em exabytes (EB), essa projeção de consumo implica diretamente nas redes ópticas, responsáveis pelo maior tráfego de dados.

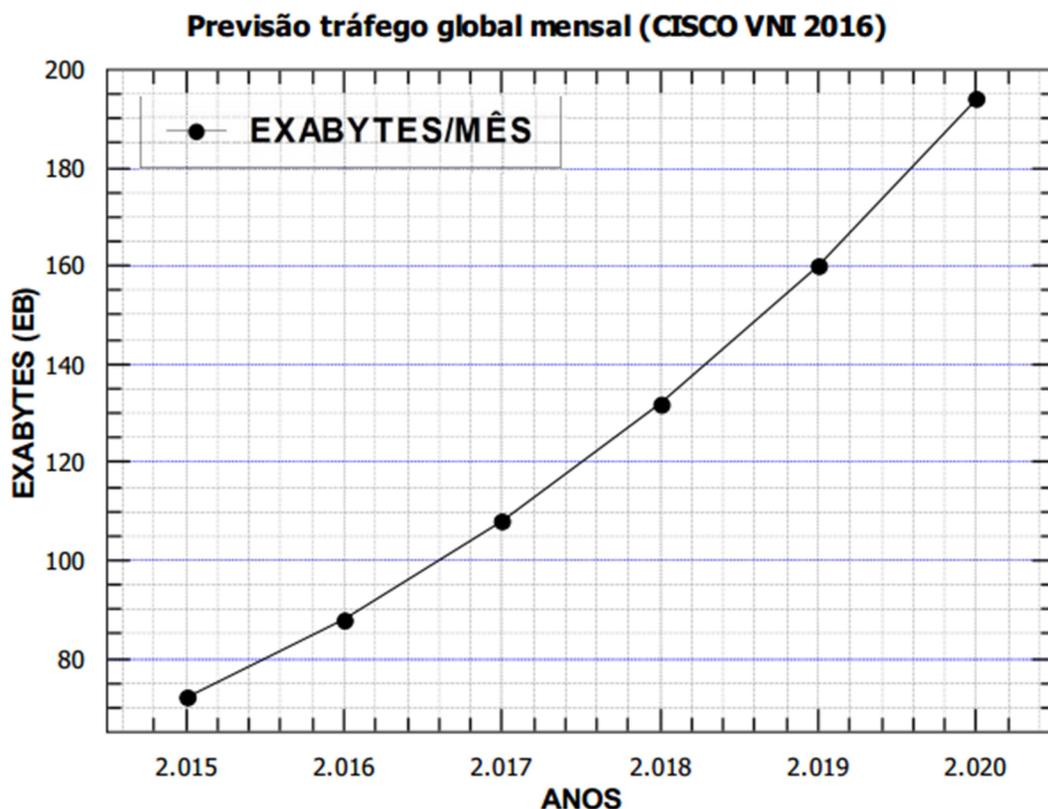


Figura 1. Previsão de tráfego mensal global (CISCO VNI, 2016).

A internet permitiu o surgimento de inúmeras tecnologias, como a transmissão de conteúdos multimídia, computação em nuvem, rede de transmissão de dados (DANTE, 2005), transmissão de voz sobre *Internet Protocol* (IP) e mais, recentemente, a transmissão de dados via dispositivos móveis que, por sua vez, tem sido a grande vilã na demanda por maiores taxas de transmissão (FAVERO et al., 2015).

No campo das telecomunicações, até o presente momento, as redes ópticas têm sido a melhor opção para transmissão de dados dentro do núcleo da rede, e esta tecnologia é a única que provê maior banda de transmissão de dados capaz de atender a demandas cada vez maiores. As demais tecnologias existentes tais como: redes sem fio (*wireless*), redes de telefonia (fixa e móvel), redes via satélite e redes metálicas, são utilizadas apenas para levar as conexões aos usuários finais, pois as limitações das mesmas não permitem que sejam implantadas no núcleo das redes.

Apesar das redes ópticas serem a melhor opção até o momento, as mesmas ainda são subutilizadas em função da tecnologia adotada (GERSTEL et al., 2012). A tecnologia Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM) não utiliza parte do espectro de sua capacidade total, diminuindo assim sua eficiência. Tendo em vista o alto custo para implantação de novas redes ópticas, inúmeras pesquisas estão sendo desenvolvidas no campo das transmissões ópticas, com a finalidade de aumentar a eficiência espectral e consecutivamente, diminuir o desperdício dos recursos alocados (MOREA, 2011).

Por exemplo, melhores tecnologias na área de transmissão óptica, permitiram o avanço nos estudos relacionados ao uso de diferentes modulações que resultaram no aumento da eficiência espectral correspondendo assim a possibilidade de transmissão de um número maior de bits por unidade de frequência. No entanto, para transmissões com taxas acima de 200 Gb/s existia a necessidade de aumentar a largura da banda além de 50 GHz, limitação imposta pelas redes WDM.

Desde algum tempo, vê-se a necessidade de transmissões de 400 Gb/s e 1 Tb/s os chamados supercanais, que utilizam respectivamente, as modulações *Dual*

*Polarization and Quadrature Phase-Shift-Keying* (DP-QPSK) correspondente a 85 GHz de banda espectral e *Dual Polarization 16 Quadrature Amplitude Modulation* (DP-16QAM) correspondente a 200 GHz de banda espectral. Ambas taxas de transmissão não são comportadas nas redes WDM devido a utilização de grade fixa de 50 GHz (GERSTEL et al., 2012).

Por outro lado, em busca de melhorar a eficiência das redes WDM inúmeras pesquisas acadêmicas (DANTE, 2005) (GERSTEL et al., 2012) (FAVERO et al., 2015) (SILVA, 2013) (YIN et al., 2013) estão propondo modelos de simulação para demonstrar a eficiência das diferentes técnicas adotadas. O Simulador de Redes Ópticas Transparentes - SimRWA (SOARES et al., 2004), desenvolvido em Java, foi implementado para a realização de testes de eficiência dos algoritmos de roteamento e atribuição de comprimento de onda (*Routing and Wavelength Assignment* - RWA), que aumentam a utilização dos recursos alocados na rede e conseqüentemente, diminuem a probabilidade de solicitações de conexões não atendidas (bloqueio). CHAVES (2008) apresenta também uma nova ferramenta desenvolvida em C++, que permite simular os efeitos da camada física em redes totalmente ópticas, parametrizar o algoritmo de roteamento e ainda configurar vários parâmetros dos dispositivos simulados.

Outros estudos apontam que a tecnologia intitulada Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Network* - EON) é o caminho mais viável e de menor custo para a solução das novas demandas de taxas de transmissão. Dentre os pontos mais vantajosos do ponto de vista físico pode-se destacar: a possibilidade de acomodar diferentes larguras de banda no mesmo sistema de transmissão óptico e o aumento das taxas de transmissão para valores acima de 200 Gbps, é importante mencionar que as redes WDM que atualmente são utilizadas não suportam taxas de transmissão acima de 200 Gbps (JINNO, 2009). Já do ponto de vista tecnológico e financeiro, podem-se apontar as seguintes vantagens: desenvolvimento de novos algoritmos de roteamento e a atribuição de espectro (*Routing and Spectrum Assignment* - RSA) para melhor acomodação espectral (JINNO et al., 2009) (WANG et al., 2012) (SILVA, 2013); desenvolvimento de novos softwares para gerência das transmissões de forma mais eficiente; e diminuição do custo financeiro de

implantação de novas redes ópticas, já que esta nova tecnologia permite sua implantação nas redes já existentes, dando sobrevida à estrutura física do núcleo.

Novos simuladores (SILVA, 2013) estão sendo desenvolvidos para que seja possível a realização de testes de eficiência em redes EON. No processo evolutivo das pesquisas, é perceptível que os algoritmos RSA são eficientes até o momento em que a rede se torna sobrecarregada e, então, passa a recusar novas conexões (bloqueio). Para tornar as redes EON mais eficientes, se faz necessário o aproveitamento das bandas liberadas quando uma conexão é encerrada gerando intervalos de bandas não utilizados, os intervalos não utilizados apresentam uma chance menor de serem novamente realocados dado do dinamismo e diversidade de diferentes requisições, estes intervalos ocorrem em vários enlaces, em redes ópticas elásticas estes intervalos são chamados de intervalos não alocados e/ou fragmentação.

Assim, a fragmentação óptica ocorre quando uma conexão é encerrada e os caminhos espectrais utilizados pelos diferentes canais desta conexão são disponibilizados. Estes canais (caminho) dificilmente serão novamente utilizados, já que as possibilidades de uma nova requisição de conexão com os mesmos parâmetros (origem, destinos, taxa de transmissão) da anterior raramente voltará a ocorrer.

## **1.1 Motivação**

Vários trabalhos experimentais de desfragmentação vêm sendo desenvolvidos (TAKAGI et al., 2011) (YIN et al., 2013) (ZHANG et. al., 2013) (FAVERO, 2015) na tentativa de melhorar a eficiência da acomodação espectral em EON. Portanto, é oportuno o momento para o desenvolvimento de um simulador EON, que permita aplicar diferentes técnicas de desfragmentação óptica para verificação de qual cenário é o mais eficiente.

## **1.2 Objetivo**

Comparar diferentes estratégias de acomodação espectral em redes EON com relação ao aumento do número de conexões estabelecidas e a diminuição da rejeição das requisições de conexão (bloqueio) e identificar o número ideal de solicitações de conexões que possibilitem a estabilização da rede para a mensuração eficiente das diferentes técnicas de desfragmentação durante as simulações utilizando EONSim v4 e adicionando novas funcionalidades para EONSim v5.

## **1.3 Organização da Dissertação**

A presente dissertação está organizada da seguinte maneira: o capítulo 2 apresenta a história da evolução dos dispositivos ópticos, as tecnologias utilizadas nas transmissões ópticas desde o seu início até os dias atuais e, também o embasamento teórico a respeito da tecnologia EON. No capítulo 4, é apresentado o simulador EONSim, a evolução de suas versões e equipes envolvidas, tecnologias utilizadas para o desenvolvimento do simulador e novos desenvolvimentos, bem como o processo de reprodução de resultados que aferem o simulador como ferramenta computacional apta aos estudos de viabilidade das redes EONs. Estes dois últimos itens constituem a contribuição relevante deste trabalho. No capítulo 4, são abordadas questões relacionadas à desfragmentação em redes EONs e as novas técnicas e estratégias utilizadas para desfragmentação óptica. Este capítulo também corrobora com as pesquisas e evoluções na área exploratória a respeito das redes EONs. O capítulo 5 apresenta o processo de desfragmentação em redes ópticas elásticas, os índices utilizados para execução do processo de desfragmentação e as condições necessárias para a desfragmentação. Na sequência, o capítulo 6 apresenta os parâmetros, cenário, limites e os resultados referente aos testes realizados por esta dissertação e um estudo comparativo que permite visualizar qual das técnicas utilizadas apresenta melhor resultado no que se diz respeito a desfragmentação óptica em redes EONs. E por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões acerca dos resultados obtidos e sugestões de trabalhos futuros. O presente trabalho ainda contém os capítulos 8, 9 e 10, que abordam: os

artigos publicados durante os trabalhos de pesquisa, os softwares que foram desenvolvidos e nomes dos colaboradores e por fim as referências bibliográficas que foram utilizadas durante todo o trabalho de pesquisa, até a conclusão desta dissertação.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Meios de transmissão mais eficazes, flexíveis (do ponto de vista estrutural e de implantação) e que apresentem baixo custo, são questões recorrentes no campo das pesquisas e evoluções tecnológicas.

A fibra óptica é atualmente o meio de transmissão mais confiável, que apresenta menor perda e que permite maiores taxas de transmissão. No entanto esta tecnologia não é simples de ser implantada e tão pouco apresenta baixo custo.

O presente trabalho é parte das inúmeras pesquisas que visam melhorar a forma de transmissão ópticas que atualmente utilizam tecnologia de grade fixa conhecida como tecnologia por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM), tecnologia que ainda subutiliza a capacidade máxima de transmissão das fibras ópticas.

Para que seja possível entender a proposta deste trabalho, é fundamental que sejam explanadas as evoluções ocorridas nos meios ópticos até os dias atuais. Este capítulo está organizado da seguinte maneira: A seção 2.1 aborda alguns dos principais marcos da evolução das fibras ópticas até os dias atuais. A seção 2.2 apresenta os conceitos relacionados a forma pela qual um sinal é transmitido. A seção 2.3 e 2.4 descreve duas tecnologias utilizadas no processo de transmissão óptico, ambas tecnologias operam sobre grade fixa.

### 2.1 Fibras Ópticas

As fibras ópticas são pequenos e finos fios que podem ser desenvolvidos a partir da sílica, silicone, vidro, nylon e também a partir de plástico, sua principal função é permitir que um feixe de luz visível e infravermelho emitido a partir de um diodo ou laser possa ser transmitido de uma extremidade a outra com o mínimo de perda possível (DESIGN, 2016).

RIBEIRO (2009), relata de forma muito precisa e clara os principais adventos que influenciaram na evolução das transmissões ópticas através de uma cronologia didática e demonstra que os princípios da utilização óptica são antigos:

- A evolução tecnológica das fibras ópticas antecede o ano de 1945, no entanto as mesmas ganharam importância no campo das telecomunicações a partir de 1950 quando se nota a necessidade de transmissão de grandes volumes de dados em longas distâncias com baixas perdas.
- 1950 a 1975 – Inúmeros experimentos foram realizados na tentativa de utilização da luz como meio de transmissão:
  - 1959 – Surgiu o guia de ondas, construído para uso militar, que utilizava de um sistema de íris com aberturas para um feixe de luz que era propagado em intervalos regulares. Após a estabilização deste feixe era possível obter uma propagação com atenuação em torno de 1dB/km. O grande problema estava na estabilização e também na necessidade de a transmissão necessariamente ter que ocorrer de forma retilínea.
  - 1961 – Foi criado por Goubau e Schwering um guia de ondas a partir de lentes como espelhos, esta invenção permitia curvas. O problema estava na perda de potência em função das reflexões que ocorriam na trajetória.
  - 1958 – Karbowiak desenvolve um tubo metálico oco com diâmetro de 0,5mm altamente polido internamente. Os cálculos preliminares determinavam uma perda de potência em torno de 1,8 db/Km no comprimento de onda de 1 $\mu$ m. No entanto este meio desenvolvido apresentava problemas de atenuação e não era possível garantir que o meio seria altamente polido em toda sua extensão. Apesar deste experimento não ter sido totalmente eficiente, direcionou os estudos para o desenvolvimento de meios no mesmo formato.
  - 1960 – Com o surgimento das guias ópticas recobertas inúmeros pesquisadores começaram a acreditar que os problemas de perda de potência e da perda de reflexões poderiam ser superados, principalmente com o surgimento dos vidros de elevada pureza.
  - 1970 – A empresa Corning Glass Works apresentou a patente de uma fibra com perdas em torno de 20 dB/km, a fibra era fabricada

por uma técnica de oxidação externa a base de vapor, e seu núcleo de sílica e titânio.

- 1971 – Duas empresas apresentaram feitos muito importantes na evolução do desenvolvimento das fibras óptica. A empresa Corning continuou inovando e apresentou uma fibra de núcleo sólido com elevado grau de pureza e com atenuações na ordem de 4 dB/km em comprimentos de onda de 850 nanômetros. Simultaneamente uma fibra com atenuação de 2 db/Km foi desenvolvida nos laboratórios da Bell.
- 1974 – Depois de inúmeros testes realizados com vários tipos de materiais (dopagem com silicato de boro, vidro a base de fosfossilicatos, núcleos dopados com germânio, sílica dopada com alumina e sílica dopada com fluorina), foi desenvolvido o processo de fabricação conhecido com *deposição de vapor químico modificado*. As fibras desenvolvidas a partir desta técnica permitiram o desenvolvimento das fibras multimodo com atenuações inferiores a 3 dB/km.
- 1976 – As empresas japonesas NTT e Fujicura apresentaram a fibra óptica monomodo com perdas inferiores a 0,5 dB/km.

Após os avanços tecnológicos obtidos por inúmeros pesquisadores e um grande investimento financeiro por parte das empresas interessadas, conseguiu-se desenvolver uma fibra óptica com índice de refração menor do que o do meio que deseja-se propagar a luz, esta fibra passou a ser constituída por um *núcleo* com índice de refração  $N1$  uma *casca* com índice de refração  $N2$  sendo  $N2 < N1$  conforme a Figura 2.

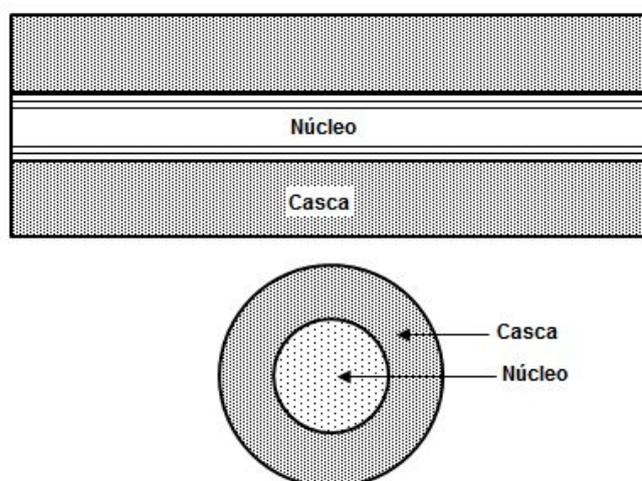


Figura 2 Vista em corte longitudinal e em corte transversal de uma fibra óptica, apresentando o núcleo e a casca sem as camadas de proteção, adaptada de RIBEIRO (1999).

Desde o surgimento das fibras ópticas, sua estrutura básica se mantém a mesma, mas foram necessárias inclusões de proteções extras nas camadas internas para evitar problemas como variações extremas de temperatura, incidência de umidade, pressão, interferência de produtos e partículas externas do ambiente. As estruturas das fibras ópticas modernas podem ser melhores visualizadas na Figura 3.

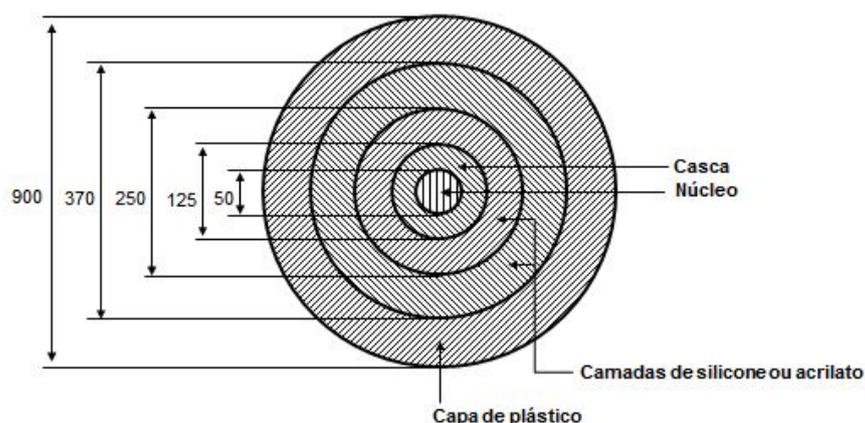


Figura 3. Fibra observada com corte transversal (medias em micrometros), figura adaptada de RIBEIRO (1999).

As transmissões ópticas somente foram possíveis a partir dos avanços no desenvolvimento de uma fonte de luz pura que ocorreu em 1960, Theodore Maiman foi o responsável por tal façanha, em Julho de 1960 o mesmo anuncia o primeiro “*laser*” (*Light Oscillation by Stimulated Emission of Radiation*), que por significar

“perdedor” terminou não sendo interessante comercialmente e foi então substituído por “laser” (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) (RIBEIRO, 2009).

Com o surgimento das fibras ópticas de baixa perda e também do laser, as comunicações ópticas tornaram-se possíveis, e os avanços foram gradativamente ocorrendo na tentativa de aumentar as taxas de transmissão.

- 1975 – É desenvolvido o primeiro laser semiconductor comercial de diodo por Robert N. Hall a partir de pesquisas realizadas pela empresa General Electric. Ele permite a emissão de ondas contínuas para que seja possível a realização de conversações telefônicas.
- 1977 – Empresas de telefonia passam a utilizar as fibras ópticas nas telecomunicações.
- 1980 – A empresa AT&T instala cabos de fibras ópticas ligando as cidades de Nova York e Washington DC.
- 1988 – É lançado o primeiro cabo de fibra óptica no oceano Pacífico com o uso de amplificadores ele é capaz de transmitir mais de 300 mil chamadas telefônicas simultaneamente.
- 1991 – Amplificadores ópticos são incorporados no processo de transmissão tornando o processo mais simples e fácil, permitindo que as fibras ópticas sejam utilizadas em praticamente todo e qualquer processo de transmissão de longa distância.

## 2.2 Transmissão Ópticas

Para que ocorra uma transmissão óptica, atualmente existem duas diferentes formas: a multiplexação por divisão de tempo (*Time Division Multiplexing* – TDM) e multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM), a segunda é a mais utilizada, no entanto cada modelo de transmissão apresenta vantagens e desvantagens que serão comentadas e discutidas nas sessões seguintes.

São recorrentes as discussões de qual sistema de transmissão deve ser utilizado e em qual situação, em testes realizados chegou-se as seguintes conclusões: Para sistemas ópticos de curta distância, onde normalmente regeneradores e amplificadores ópticos não são necessários, o sistema TDM se torna a solução mais viável. Para sistemas que estão entre 120 km e 300 km, ambos sistemas podem ser utilizados e o custo se torna normalmente a variável decisória. Para sistemas ópticos de longa distância (acima de 300 km), o modelo WDM é considerado o mais eficiente, por permitir o aumento na capacidade de transmissão e também por ser mais barato, uma vez que o mesmo regenerador óptico pode ser utilizado por diferentes grupos de canais (PINHEIRO, 2002).

O presente trabalho estuda a eficiência de uma nova tecnologia que opera sobre redes ópticas de longo alcance, redes que são hoje operadas sobre a tecnologia WDM. Assim ao decorrer dos capítulos e sessões que seguem, será comum a menção as WDM.

Os sistemas baseados em WDM permitem que sinais com diferentes comprimentos de onda sejam propagados através de uma mesma fibra óptica resultando em uma maior banda para transmissão.

A utilização de janelas de transmissão é um dos recursos utilizados pelos sistemas WDM. A 1ª (primeira) janela utilizada nas transmissões ópticas utilizaram o comprimento de onda de 850 nm gerando atenuações de 2 dB/km. Mais tarde, com o avanço na fabricação de lasers, principalmente o *InGaAsP* (*Indium, Gallium, Arsenide, Phosphide*) que operam no comprimento de 1310 nm, as atenuações caíram para 0,5 dB/km. Esta região de operação passou a ser conhecida como 2ª (segunda) janela de transmissão. Com a evolução constante, novos experimentos foram realizados na janela de comprimento de 1550 nm, resultando em atenuações ainda menores de 0,2 dB/km, está 3ª (terceira) região foi então batizada terceira janela óptica.

Os sistemas de transmissão ópticos mais comuns utilizam-se de uma série de componentes ópticos-eletrônicos, dentre os componentes mais comuns e importantes, podemos citar: a) uma fonte de luz; b) conectores ópticos na extremidade emissora/receptora; c) um meio de transmissão (geralmente

representado por uma fibra óptica); d) um fotodetector responsável pela conversão da luz em sinais elétricos; e) equipamentos responsáveis pela amplificação do sinal óptico (normalmente utilizado para transmissões de longa distância onde ocorre degradação do sinal). A Figura 4 demonstra dois modelos ópticos bastante utilizados até hoje (RIBEIRO, 2009).

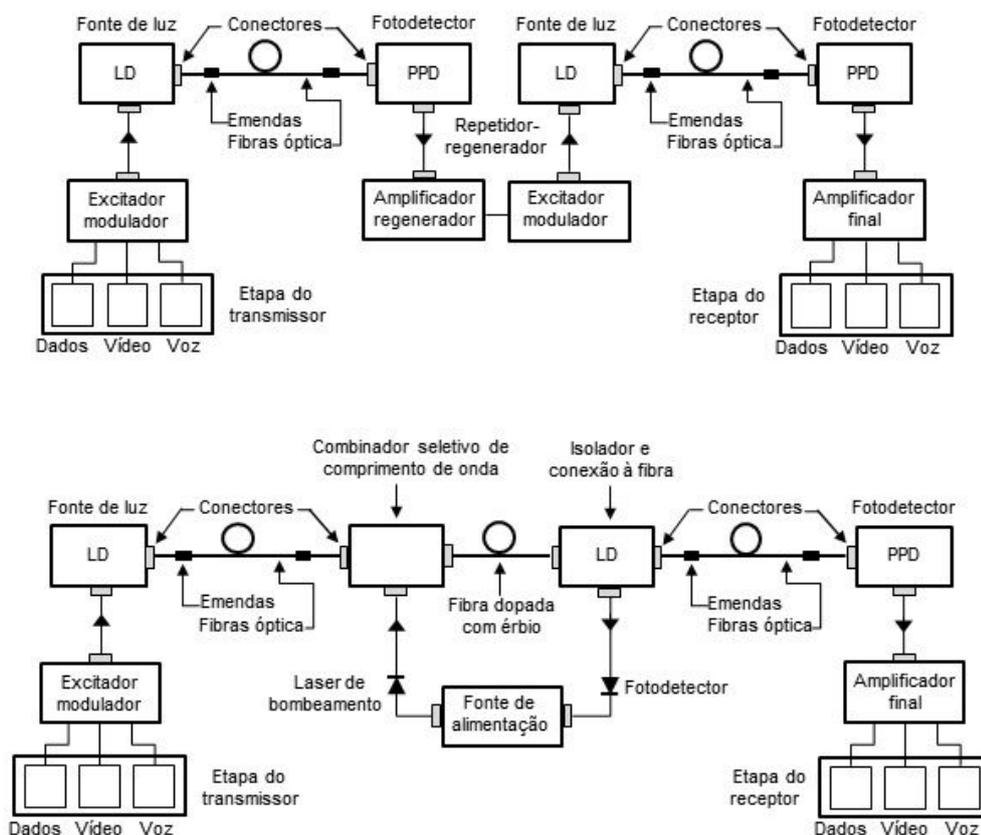


Figura 4. Elementos básicos utilizados em uma comunicação óptica.

Dois outros fatores são também importantes em uma transmissão óptica, a modulação e multiplexação. A modulação do sinal óptico é responsável por fornecer um sinal óptico em formato adequado para a irradiação da luz, que pode ser realizada de forma analógica ou digital (mais utilizada em função das inúmeras vantagens apresentadas). A multiplexação por sua vez é responsável por transmitir várias informações através de um mesmo canal óptico.

## 2.3 Redes Ópticas TDM

A modulação de um sinal óptico pode ocorrer de diferentes formas, uma das formas utilizadas é a multiplexação por divisão de tempo (*Time Division Multiplexing* - TDM). A técnica TDM serve para transmitir várias informações através de uma única linha de transmissão (TELECO, 2016).

A transmissão óptica através da tecnologia TDM é considerada altamente confiável e desde o seu surgimento em 1970 passou por inúmeras evoluções principalmente no que diz respeito às taxas de transmissão. Inicialmente as taxas de transmissão ópticas iniciaram-se por volta de 155 Mb/s, aumentaram para 622 Mb/s, 2,5 Gb/s, 10 Gb/s, 40 Gb/s e até 100 Gb/s, sendo que a última taxa é a mais complicada de se obter na transmissão óptica utilizando TDM (TELECO, 2016).

Entretanto, a TDM apresenta alguns problemas. O primeiro deles é a subutilização da capacidade de transmissão de uma fibra; o segundo e não menos importante é o fator custo, já que a tecnologia TDM apresenta um custo alto se comparado ao custo de outros sistemas de transmissão ópticos mais avançados, principalmente para redes de longa distância; o terceiro motivo resume-se no fato da tecnologia não permitir duas ou mais taxas de transmissão na mesma fibra óptica, nos dias atuais este é um fator altamente limitador (TELECO, 2016).

Apesar das redes TDM apresentarem a possibilidade de aumento da taxa de transmissão em redes já instaladas, o processo não é simples, por exemplo, para aumentar a taxa de transmissão de uma rede TDM que opera a 622 Mb/s para 2,5 Gb/s, é necessário: Desligar e remover os circuitos de transmissão utilizados pelos equipamentos TDM de 622 Mb/s, e então instalar, realizar testes e inicializar os novos equipamentos TDM de 2,5 Gb/s. Para realização desse procedimento o mesmo par de fibras ópticas existentes será utilizado e somente os equipamentos serão substituídos. Este procedimento se torna inviável tendo em vista o tempo que a rede ficará inoperante. Outra forma de aumentar a taxa de transmissão, resume-se em instalar em paralelo, caso exista disponibilidade de outro par de fibras, criando uma nova rede TDM de 2.5 Gb/s, desta maneira não seria necessário interromper a transmissão no equipamento que está em utilização. Esta segunda estratégia apresenta dois importantes problemas, o primeiro está relacionado ao

custo, já que a rede que será implantada em paralelo trata-se de uma nova rede o segundo é o fato de nem sempre existir a possibilidade de instalar a nova rede paralelamente a rede já existente (TELECO, 2016).

Como é possível notar, as redes TDM normalmente são implantadas e utilizadas por anos sem passarem por nenhum tipo de reconfiguração focado no aumento das taxas de transmissão em função dos problemas acima apresentados. Infelizmente toda essa problemática corrobora com o desperdício da capacidade de transmissão dos sistemas ópticos.

## 2.4 Redes Ópticas WDM

O aumento na demanda por maiores taxas de transmissão resultou no avanço dos estudos e aprimoramento das técnicas utilizadas para a realização das transmissões ópticas em redes de longa distância (normalmente redes acima de 120 km), que hoje estão exaurindo as técnicas de modulação de intensidade e detecção direta tornando o processo de renovação da rede inviável de acordo com os problemas apresentados na sessão anterior.

YATES (1989), descreveu uma nova técnica de transmissão, que permite expandir as taxas de transmissão ópticas em uma fibra. Esta técnica ficou conhecida como multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM).

Na década de 1990, surgiram então as redes ópticas WDM que utilizam a 3ª (terceira) janela de transmissão que compreende o espectro entre 1530 nm a 1565 nm.

A tecnologia WDM passou a ser conhecida também como Redes Ópticas Transparentes (*Transparente Optical Networks* – TON), que se utilizava de comutadores ópticos, multiplexadores e demultiplexadores conforme pode ser observado na Figura 5. Este conjunto de equipamentos permitiu a realização do roteamento de sinais no domínio óptico, pois até o momento era realizado o domínio eletrônico (RAWASWANI et al., 2010). A comunicação nas redes TONs

ocorre mediante o estabelecimento de circuitos com o mesmo comprimento de onda entre um ponto de origem até o de destino e para que esta comunicação seja realizada, ao menos um enlace óptico é utilizado. O agrupamento dos enlaces ópticos utilizados para o estabelecimento de uma comunicação é chamado de caminho óptico (*optical lightpath*) (GERSTEL et al., 2015).

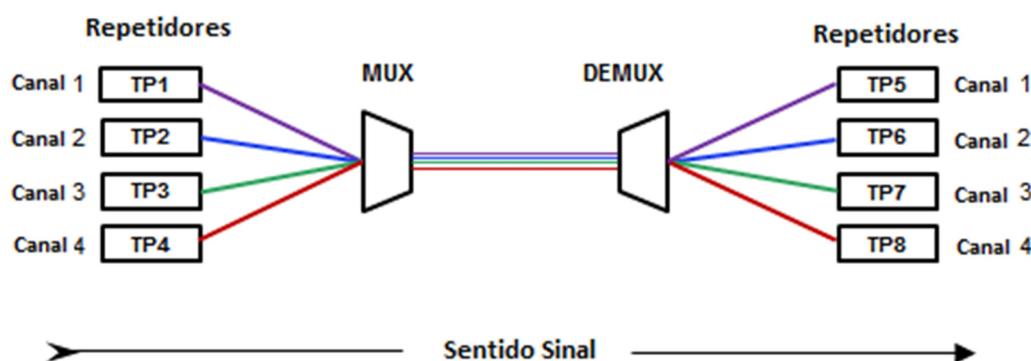


Figura 5– Exemplo de transmissão em redes WDM.

As redes WDM possibilitaram um grande avanço nas transmissões ópticas, pois permitiram que vários sinais sejam transmitidos em diferentes portadoras e multiplexados em uma única fibra óptica. Para que esta tecnologia pudesse realizar tal processo de transmissão, a União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union – ITU*) padronizou, inicialmente, que a grade de frequência fosse espaçada em 100 GHz. Após alguns experimentos, notou-se que a perda por faixa seria grande, em função do cenário apresentado na época, logo em seguida a ITU padronizou novamente a grade de frequência em 50 GHz, esta tecnologia ficou então conhecida como redes de grade fixa e atualmente permitem de 40 a 120 canais (RAMASWAMI, 2002) (QUEIROZ, 2012) (FAVERO, 2015).

Para que ocorra uma conexão óptica nas redes WDM, existe a necessidade de escolha de um caminho entre um ponto de origem e destino, que ocorre a partir de algoritmos de roteamento e atribuição de onda (*Routing and Wavelength Assignment - RWA*). Os RWA podem definir o melhor caminho, baseados no menor número de enlaces (saltos) e/ou na menor distância, o algoritmo também atribui o

mesmo comprimento de onda em cada canal na grade de 50 GHz ao longo de todos enlaces que serão utilizados (GERSTEL et al., 2012).

O modelo de transmissão utilizado nas redes WDM, que permite que múltiplos canais de comunicação sejam utilizados simultaneamente para a transmissão de dados, foi o responsável pelo avanço da tecnologia, esta técnica ficou conhecida como transmissão de canais de cores distintas, a Figura 5 apresenta um exemplo de transmissão utilizado pela tecnologia WDM.

Os investimentos e pesquisas realizados em busca de meios de comunicações mais eficientes que as redes WDM têm ganhado espaço, em função de dois grandes problemas apresentados pelas mesmas:

1. EFICIENCIA ESPECTRAL – A baixa eficiência no aproveitamento do espectro na banda, tem resultado em perdas consideráveis dado o alto custo para implantação de novas redes ópticas WDM (GERSTEL et al., 2012) (SILVA, 2013);
2. LIMITAÇÃO – As redes WDM trabalham sobre grade de frequência de 50 GHz, essa limitação impede que as mesmas possam transmitir taxas acima de 200 Gb/s que necessitam de bandas maiores. E o cenário atual demanda taxas de transmissão de 400 Gb/s e 1Tb/s, os chamados supercanais (FAVERO et al., 2015).

### 3 REDES ÓPTICAS EON

MOREA (2011) propõe um novo modelo de transmissão óptica chamado Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Network* - EON) que permite um melhor aproveitamento na capacidade transmissão de uma fibra óptica que trabalha no formato de grade fixa (WDM).

As redes EON permitem a adoção de diferentes larguras de banda, como por exemplo, bandas com 3,125, 6,25, 12,5, 25 e 50 GHz. Esta subdivisão exige a necessidade de introdução de bandas adjacentes conhecidas como banda de guarda (*guardband*) para impedir que os diferentes sinais ópticos interfiram uns nos outros. A subdivisão do sinal óptico é conhecida como subdivisão de intervalos de frequência (*Frequency Slot Unit* - FSU) (GERSTEL et al., 2012).

O presente trabalho de dissertação realizou experimentos utilizando-se FSUs de 12,5 GHz, a escolha desta largura de banda se dá em função dos inúmeros trabalhos de pesquisa apresentarem resultados promissores frente as redes WDM que utilizam grade fixa de 50 GHz (GERSTEL et al., 2012) (WANG et al., 2012) (YIN, et al., 2012) (SILVA, 2013) (FAVERO et al., 2015).

A eficiência das redes EONs não está somente na possibilidade de diminuição do intervalo de frequência para 12,5 GHz ou outra qualquer, que resulta em uma melhor acomodação espectral. Três outros fatores são altamente relevantes:

1. CAMINHO - A escolha de um caminho óptico disponível para uma conexão é definida a partir do algoritmo de roteamento e atribuição de espectro (*Routing and Spectrum Assignment* - RSA), que pode escolher um caminho óptico candidato dentre os vários disponíveis, a partir do menor número de enlaces percorridos e/ou a partir da menor distância obtida a partir da soma das distâncias dos enlaces dos diferentes caminhos (SILVA, 2013);
2. CONSECUTIVIDADE - O estabelecimento de uma conexão entre um ponto de origem e destino em redes EONs necessita que todos os FSUs estejam lado-a-lado (contínuos) e ocupando a mesma

posição em todos os enlaces ópticos do caminho (FAVERO, 2015);

3. MODULAÇÃO – As redes EONs são capazes de avaliar a situação do caminho óptico e, então, definir a melhor modulação para o estabelecimento da conexão. JINNO (et al., 2010) apresenta em seu trabalho diferentes modulações utilizadas em redes EONs, como a modulação por quadratura de deslocamento de fase (*Quadrature Phase-Shift Keying* - QPSK), que permite a transmissão de duas vezes mais bits por símbolo quando comparada a modulação binária de luz (*On-Off Keying* - OOK) utilizada em redes WDM, modulação por quadratura de amplitude 64 (*64 Quadrature Amplitude Modulation* – 64-QAM) que possibilita a transmissão de uma quantidade três vezes maior que a QPSK, e ainda as modulações, polarização dupla por quadratura de desvio de fase (*Dual Polarization and Quadrature Phase-Shift-Keying* - DP-QPSK) e polarização dupla por quadratura de amplitude 16 (*Dual Polarization 16 Quadrature Amplitude* – DP-16QAM) que possibilitam transmissões de 400 Gb/s e 1 Tb/s respectivamente, ocupando bandas de 85 GHz e 200 GHz.

A Tabela 1 apresentada por GERSTEL (2012) demonstra a eficiência espectral das redes EONs sobre as redes WDM.

Demanda (Gb/s)	Modulação	EON	WDM	Eficiência EON vs. WDM		
		Largura Banda Utilizada (GHz)	Largura Banda (GHz) e Número de Canais	EON (GHz)	WDM (GHz)	Ganho (%)
40	DP-QPSK	25 + 10	1 Canal de 50 GHz	35	50	43%
100	DP-QPSK	37,5 + 10	1 Canal de 50 GHz	47,5	50	5%
100	DP-16QAM	25 + 10	1 Canal de 50 GHz	35	50	43%
400	DP-QPSK	75 + 10	4 Canais de 50 GHz (100 Gb/s por canal)	85	200	135%
400	DP-16QAM	75 + 10	2 Canais de 50 GHz (200 Gb/s por canal)	85	100	17%
1000	DP-QPSK	190 + 10	10 Canais de 50 GHz (100 Gb/s por canal)	200	500	150%
1000	DP-16QAM	190 + 10	5 Canais de 50 GHz (200 Gb/s por canal)	200	250	25%

Tabela 1. Eficiência redes EONs versus redes WDM. Adaptado de GERSTEL, et al., (2012).

### 3.1 Redes Ópticas WDM x EON

A eficiência das redes EONs sobre as redes WDM são promissoras conforme apresentado na Tabela 1 da seção anterior que permite visualizar ganhos de até 150% para uma demanda de 1 Tb/s e ganho médio de 59,71% para o cenário demonstrado.

Para melhor visualizar a eficiência das redes EONs comparadas as redes WDM, é apresentada a Figura 6 que apresenta um ganho espectral de 100 GHz nas redes EONs quando comparadas a redes WDM para as mesmas demandas comercialmente utilizada.

No exemplo que segue Figura 6, para ambas as redes estão sendo requisitadas duas conexões com 10 Gb/s (modulação OOK), duas conexões de 40 Gb/s (modulação DP-QPSK) e duas conexões de 100 Gb/s (modulação DP-QPSK), as demandas de 400 Gb/s e 1 Tb/s não são utilizadas nesta demonstração devido as redes WDM não suportarem tais taxas a partir de um único canal.



Dentre os processos executados em uma rede EON, o processo de estabelecimento de conexão é o mais complexo, sempre que uma requisição de conexão é solicitada, as redes EONs realizam uma série de etapas visando estabelecer a conexão levando em consideração o caminho que ofereça o menor custo. A Figura 7 apresenta os processos realizados pelas redes EONs para realização das três etapas descritas nos parágrafos acima.

Uma rede EON permite que os processos descritos no fluxograma da Figura 7 sejam realizados a cada execução de operação. As operações ocorrem de forma cíclica alternando entre requisição e liberação.

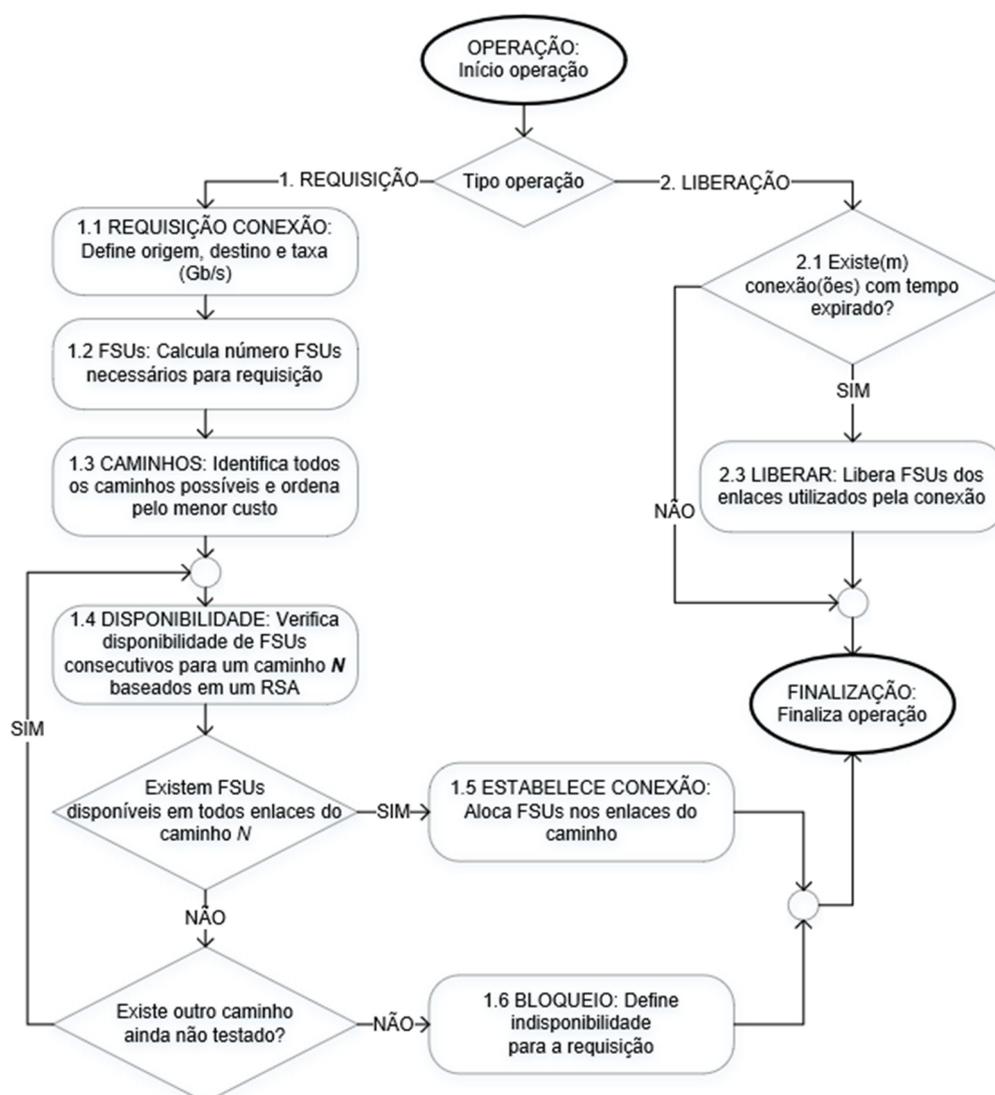


Figura 7. Fluxograma englobando os processos de Estabelecimento, Bloqueio e Liberação de conexões em redes EONs.

Para que seja possível uma melhor compreensão dos processos realizados nas redes EONs, cada processo será melhor descrito levando em consideração a topologia de rede ABNet 5 criada especialmente para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação, composta por 5 nós (A, B, C, D, E), 6 enlaces (E1, E2, E3, E4, E5, E6), sendo que cada enlace é composto de 6 FSUs de 12,5 GHz conforme demonstrado na Figura 8.

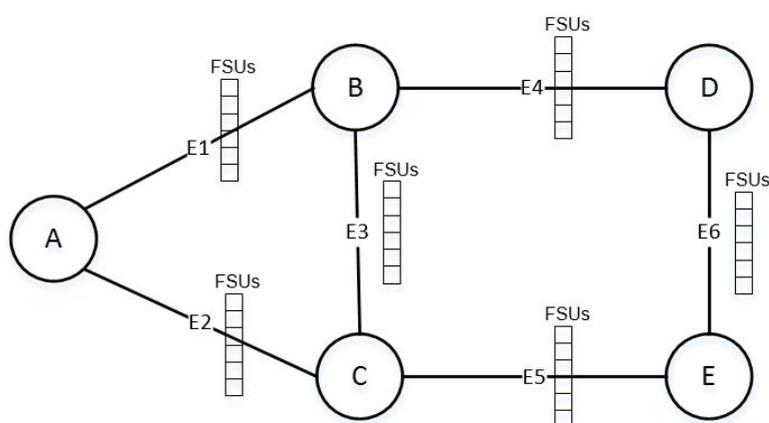


Figura 8. Topologia ABNet 5.

0. OPERAÇÕES – Existem dois tipos de operações que são realizadas em uma rede EON, a *requisição de conexão* e a *liberação de conexões*. Ambas operações são realizadas ciclicamente e de forma alternada durante todo o tempo de execução da rede. Caso exista um número grande de requisições a serem executadas, as mesmas são colocadas em fila, e cada uma é executada segundo a sequência de chegada. Caso não existam requisições para serem realizadas, a operação de liberação continua sendo executada, até que todas as conexões presentes na rede tenham expirado seu tempo e serão então liberadas.

## 1. REQUISICÃO

- 1.1. REQUISICÃO DE CONEXÃO – O processo de requisição corresponde a solicitação de estabelecimento de uma conexão na

rede, uma requisição de conexão contém o nó de origem, o nó de destino e a taxa de transmissão como por exemplo: Requisição 01 [A, D, 40 Gb/s], onde A corresponde ao nó de origem, D nó de destino e 40 Gb/s corresponde a taxa de transmissão. Para a requisição exemplificada foi levado em consideração a topologia apresentada na Figura 8.

1.2. FSUs – Para cada requisição é realizado o cálculo do número de FSUs que serão necessários, por exemplo, para uma requisição com taxa de transmissão de 40 Gb/s, serão utilizados 3 FSUs de 12,5 GHz + 10 GHz de banda de guarda conforme Tabela 1.

1.3. CAMINHOS – Para uma requisição de conexão, são calculados todos os caminhos possíveis entre o nó de origem e destino, os caminhos são ordenados a partir do menor para o maior custo. O custo pode ser definido entre: distância e número de saltos. O presente trabalho leva em consideração o número de saltos para definição do menor custo. Para que seja possível definir todos os caminhos possíveis entre nó de origem e destino, existem algoritmos como *K-Th Shortest Path* (KSP) proposto por YEN (1971) ou *Dijkstra* (DIJKSTRA, 1959); (SILVA, 2013); (FAVERO, 2015). O presente trabalho de dissertação utiliza-se do algoritmo KSP. Levando em consideração a Figura 8, a Tabela 2 demonstra todos os caminhos disponíveis entre os nós A e D ordenados pelo menor custo.

Caminhos	Nós	Enlaces	Custo
C1	A, B, D	E1, E4	2
C2	A, C, B, D	E2, E3, E4	3
C3	A, C, E, D	E2, E5, E6	3
C4	A, B, C, E, D	E1, E3, E5, E6	4

Tabela 2. Caminhos entre os nós A e D ordenados pelo custo.

1.4. DISPONIBILIDADE – A disponibilidade de um caminho está relacionada à estratégia de atribuição espectral do RSA (FAVERO, 2015). O RSA mais simples e também utilizado neste trabalho de

dissertação corresponde ao *First-Fit* (FF) (GERSTEL et al., 2012) que leva em consideração apenas as condições de continuidade e contiguidade de FSUs livres. É importante mencionar que o RSA FF não se importa com a situação do enlace para conexões futuras podendo assim, aumentar a fragmentação dos FSUs disponíveis resultando no aumento do número de bloqueios. Existem outras estratégias de RSAs, como: ZHANG (et al., 2012) define um índice que calcula o número de FSUs consecutivos para cada caminho candidato, os caminhos são então ordenados de tal maneira que o caminho escolhido seja aquele que deixar o maior número de FSUs contínuos após o estabelecimento da conexão; YIN et al. (2013) cria um índice que considera como candidato os caminhos com menor corte nos blocos de FSUs livres, o corte é calculado a partir da divisão de um bloco de FSUs por dois blocos menores após o estabelecimento da conexão.

O presente trabalho de dissertação considera disponível um caminho candidato quando o número de FSUs necessários para o estabelecimento da conexão estão disponíveis, estão na mesma posição, e consecutivos em todos os enlaces do caminho. É importante mencionar que a disponibilidade não está relacionada somente a escolha do caminho com menor custo e com FSUs disponíveis, mas também aos fatores relacionados ao comprimento de onda, portadora e alcance de cada modulação. O presente trabalho considera que os nós presentes no caminho contêm conversores e regeneradores ópticos.

1.5. ESTABELECIMENTO – O estabelecimento ocorre quando um dos caminhos candidatos satisfaz os requisitos de disponibilidade impostos pelo RSA. Quando a condição é satisfeita os FSUs são registrados como ocupados, o caminho óptico é alocado para a requisição e as taxas de transmissão passam a ser transmitidas durante o tempo em que a conexão estiver ativa.

1.6. BLOQUEIO – O bloqueio de uma requisição ocorre quando todos os caminhos candidatos são submetidos às regras de disponibilidade do RSA e nenhum dos caminhos candidatos apresenta condição favorável para o estabelecimento da conexão. Em geral, dois são os principais motivos responsáveis pelo bloqueio de uma requisição: o primeiro, ocorre quando o número de FSUs consecutivos e disponíveis em um dos enlaces dos diferentes caminhos é menor que o número necessário para o estabelecimento da requisição; o segundo, ocorre quando a posição dos FSUs consecutivos e livres em todos os enlaces dos diferentes caminhos candidatos não são os mesmos. Em ambos os casos citados, é comum existir FSUs disponíveis nos inúmeros enlaces dos diferentes caminhos candidatos, no entanto podem não estarem consecutivos e/ou posicionados em diferentes locais.

## 2. LIBERAÇÃO

2.1. VERIFICAÇÃO TEMPO – O processo de liberação das conexões estabelecidas uma rede EON corresponde à verificação do tempo de vida de cada conexão, caso alguma conexão tenha seu tempo excedido, esta conexão é então selecionada para ser liberada da rede.

2.2. LIBERAR – O processo de liberação de uma conexão corresponde a liberação de todos os FSUs utilizados pela conexão em todos os enlaces pertencentes ao caminho utilizado pela conexão, possibilitando assim o estabelecimento de novas conexões pelos elementos do caminho óptico disponibilizado.

### 3.3 Simulação: Requisição de Conexão, Estabelecimento de Conexão, Bloqueio de Requisição e Liberação de Conexões em Redes EONs

O processo de simulação é uma das técnicas que melhor permite a visualização do comportamento e obtenção de resultados das diferentes operações que são realizadas sobre as redes EONs. A Figura 9 apresenta uma simulação simples que permite entender o comportamento das operações descritas na seção anterior sobre a rede EON ABNet 5.

O quadro A da Figura 9 apresenta a topologia ABNet 5, contendo 5 nós e 6 enlaces, é possível também notar a existência de 6 FSUs por enlace.

O Quadro B apresentado na Figura 9 contém uma tabela com as operações que serão realizadas, a distribuição das informações da tabela corresponde a:

- OPERAÇÃO – Contém a identificação de cada uma das operações; a coluna TIPO identifica se a operação será uma requisição de conexão (REQXX) ou uma operação de liberação (LIBERAR);
- ORIG / DEST – Identifica o nó de origem e destino para uma operação do tipo requisição;
- TEMPO – Corresponde ao tempo de duração de cada conexão caso a requisição seja estabelecida;
- TAXA – Diz respeito a taxa de transmissão da requisição em Gb/s;
- FSUs – Contem informação do número de FSUs que serão necessários para comportar a taxa;
- CAMINHOS CANDIDATOS – Exibe todos os enlaces que fazem parte dos caminhos candidatos ordenados a partir do menor custo para o maior;
- CUSTO – Número de enlaces de cada caminho candidato;
- SITUAÇÃO – Informa a situação de cada requisição de conexão, caso a requisição seja estabelecida a situação será “Estabelecida”, se as condições da rede não permitirem que a requisição seja estabelecida, a situação será então “Bloqueada”.

O quadro C demonstra a situação de ocupação dos FSUs por enlace a partir de cada operação realizada.

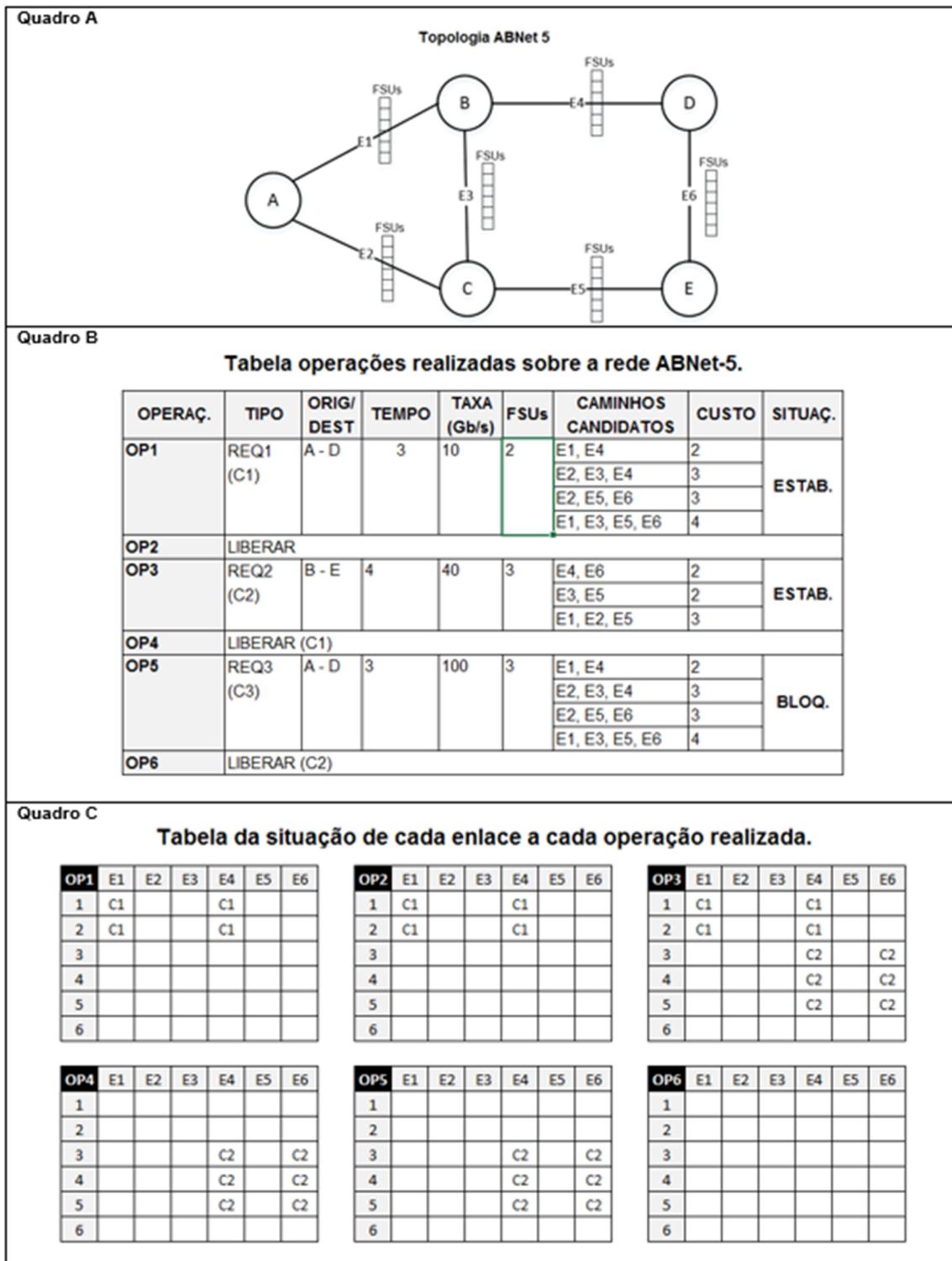


Figura 9. Simulação de operações realizadas sobre redes EONs.

Durante a simulação, podemos notar:

- **OP1** – A primeira operação corresponde uma requisição de conexão do nó A ao D com demanda de taxa de 10 Gb/s correspondente a 2 FSUs. Neste momento a rede se encontra totalmente vazia e por esta razão o primeiro caminho candidato que também é o que tem o menor custo é selecionado, como há disponibilidade a requisição é estabelecida e os FSUs 1 e 2 dos enlaces E1 e E4 são alocados permitindo assim o estabelecimento da conexão.
- **OP2** – A segunda operação é do tipo liberação, neste instante nenhuma conexão estabelecida está com o tempo expirado e por este motivo nenhuma conexão é liberada.
- **OP3** – Assim como a primeira operação, a terceira corresponde a uma requisição de 40 Gb/s entre os nós B e E, 3 é o número de FSUs necessários para a taxa desta operação. O primeiro caminho candidato utiliza-se dos enlaces E4 e E6, ambos apresentam FSUs disponíveis e consecutivos, logo a requisição é estabelecida e os FSUs das posições 3, 4 e 5 são reservados para a conexão C2 referente a requisição 2. Neste ponto é importante visualizar que o enlace 4 está com apenas um FSU livre, este comportamento inviabiliza qualquer outro estabelecimento de conexão que faça uso enlace 4;
- **OP4** – A quarta operação corresponde a uma operação de liberação, neste instante a conexão C1 está com o tempo vencido (expirado) e então a mesma será liberada. A liberação de uma conexão corresponde a desocupação do caminho óptico para que possam ser utilizados por futuras requisições. É possível notar que os FSUs identificados por C1 nos enlaces E1 e E4 que estão presentes na operação 3, não estão mais presentes na operação 4, conforme demonstrado no Quadro C.
- **OP5** – Durante o processo de operação da rede, a operação 5, corresponde a uma requisição com taxa de transmissão de 100 Gb/s correspondente a 3 FSUs, esta requisição tem como origem o nó A e destino o nó D. Nenhum dos 4 caminhos candidatos apresentam disponibilidade de 03 FSUs consecutivos livres e na mesma posição

em todos os enlaces do caminho. Esta situação corresponde a um bloqueio da requisição. Ao observar o Quadro C é possível notar que a situação da rede (enlaces) nas operações OP4 e OP5 se mantem a mesma, isso ocorreu porque a OP5 não foi realizada, portanto não modificou o estado da rede.

- **OP6** – Por fim, a última operação da rede corresponde a uma liberação de conexão, ao verificar as conexões ativas na rede, foi detectado que a conexão 2 (C2) está com o tempo expirado, e a mesma é então liberada.

A simulação apresentada nesta seção permite entender como as operações das redes EON são executadas e consecutivamente se comportam.

Nesta seção é também possível demonstrar que as redes EONs podem apresentar particularidades, por exemplo, a requisição OP5 não foi estabelecida apesar de praticamente todos os enlaces apresentarem disponibilidade igual ou maior que 50%. Uma das propostas deste trabalho de dissertação visa resolver esta situação a partir da realização de desfragmentação conforme descrito o capítulo 4 deste trabalho.

### **3.4 Mensuração de Eficiência de Redes EONs**

As redes EONs são relativamente novas conforme descrito na seção 2.8 deste trabalho de dissertação e ainda se encontram no campo das pesquisas acadêmicas como uma das melhores opções de avanços tecnológicos na área de transmissão óptica em substituição as atuais redes WDM de grade fixa.

Em busca do “estado da arte” no que se diz respeito as redes EONs, inúmeros experimentos e diferentes técnicas estão sendo constantemente exploradas pelos inúmeros centros de pesquisas envolvidos no processo de melhorar a eficiência das redes EONs.

Uma determinada técnica consiste na combinação dos inúmeros parâmetros que são necessários para funcionamento de uma rede EON, e podem levar em

consideração a topologia de rede; a aleatoriedade da demanda de requisição na rede; o algoritmo para escolha dos caminhos candidatos; a largura de banda dos FSUs adotado pela EON; dentre outros.

Para que seja possível mensurar a técnica ou estratégia que apresenta melhores resultados quando aplicadas sobre as redes EONs foram criadas métricas para aferição, como por exemplo:

- **NÚMERO DE BLOQUEIOS** – Consiste em contar o número de requisições bloqueadas (que não conseguiram estabelecer a conexão) durante o processo de operação da rede. Esta métrica tem sido fortemente utilizada pelos inúmeros centros de pesquisa, pois leva em consideração que quanto maior for o número de conexões estabelecidas por unidade de tempo mais eficiente é a rede. Sendo assim, quando duas diferentes estratégias são submetidas a aferição em uma rede EON, a que apresentar menor número de bloqueios é considerada mais eficiente.
- **PROBABILIDADE DE BLOQUEIOS** – A probabilidade de bloqueio é semelhante a métrica apresentada anteriormente. Sua obtenção ocorre a partir da divisão do número de conexões bloqueadas pelo número de conexões estabelecidas, quanto menor for a probabilidade de bloqueio, mais eficiente é a técnica utilizada. Diferente da métrica anterior que permite a aferição somente no final da execução da rede, está apresenta uma conclusão global, a presente métrica permite verificar em qual momento do processo de execução apresenta-se a melhor probabilidade de bloqueio, desta maneira é possível identificar em qual estágio a técnica utilizada apresenta melhor resultado, já que as diferentes técnicas podem apresentar comportamentos diferentes em momentos distintos da operação da rede.
- **OCUPAÇÃO DE REDE** – A métrica de ocupação de rede corresponde a banda ocupadas pelas conexões ativas no instante em que a coleta da informação é realizada, quanto maior for a ocupação da rede melhor é a técnica aplicada sobre a rede EON, pois leva-se em consideração que um número maior de FSUs foi utilizado

correspondendo assim ao estabelecimento de conexão de um maior número de requisições.

- INDICADORES – Diferentes indicadores, como o de contagem do número de FSUs consecutivos livres na rede e/ou índice de FSUs ocupados, permitem a mensuração do comportamento das diferentes técnicas utilizadas nas redes EONs.

O presente trabalho de dissertação, assim como a maioria dos trabalhos de pesquisas estudados até o momento (WANG et al., 2012) (YIN, 2013) (SILVA, 2013) (FAVERO et al., 2015), utilizará a probabilidade de bloqueio como métrica para mensuração da eficiência da técnica utilizada na rede EON.

## 4 SIMULADOR EONSIM

A ferramenta computacional intitulada Simulador de Redes Ópticas Elásticas (EONSim - *Elastic Optical Network Simulator*) foi aprimorada como parte deste trabalho de dissertação acrescentando-se recursos à realização de testes, que permitam a aplicação dos conceitos de desfragmentação em redes EON. Este capítulo está organizado da seguinte maneira: A seção 4.1 aborda assuntos relacionados ao desenvolvimento da ferramenta, cronologia das versões, equipes envolvidas e motivos referente ao desenvolvimento de cada versão. Na seção 4.2 serão abordados os experimentos que foram realizados para validação do simulador e comprovação de eficácia do mesmo como ferramenta computacional. A seção 4.3 apresenta o simulador, seus principais recursos, tecnologia utilizada no desenvolvimento e plataforma.

### 4.1 Desenvolvimento

O simulador EONSim nasceu em 2013, desenvolvido a partir da linguagem de programação Java pelo grupo de pesquisas de Sistemas Fotônicos e Internet Avançada da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, grupo coordenado pelo Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade.

Um dos principais motivadores no desenvolvimento da ferramenta surgiu dos estudos exploratórios de ferramentas similares, tais como: NS-3 (NS-3, 2013), OPNet (OPNET, 2013) e o OMNet++ (OMNETPP, 2013). Ao término do estudo verificou-se que estas ferramentas não atendiam as necessidades que o grupo o grupo gostaria de explorar (SILVA, 2013).

Atualmente a ferramenta EONSim se encontra na versão 5 (EONSim v5), e para que a mesma pudesse evoluir até o ponto atual, vários pesquisadores corroboraram:

Entre os anos de 2013 a 2014, a 2ª versão foi desenvolvida pelo mestrando (na época) Paulo César Barreto da Silva, sob coordenação e orientação do Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade. SILVA (2013) realizou pesquisas no campo do

desenvolvimento de novos algoritmos de alocação de espectro para redes EON. A versão 2 (EONSim v2) nasceu com inúmeros recursos que permitiam uma grande quantidade de combinações de cenários, dentre os principais pode-se destacar: A possibilidade de configurar diferentes topologias de redes (desde as mais conhecidas como NFSNet14 a topologias próprias); viabilidade de configurar diferentes cargas de tráfego; capacidade de configurar diferentes algoritmos RSAs para alocação de espectro. A versão EONSim v2 propositalmente não avaliava o alcance das diferentes modulações e também não permitia a aplicação de técnicas de desfragmentação, a versão em si estava focada no aprimoramento dos RSAs.

Entre 2014 e 2015, sob orientação do Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade, os mestrandos (na época) Juliano Silva Maçal (autor desta dissertação) e Ricardo Vicente Fávero continuaram os trabalhos no simulador, lançando assim as versões EONSim v3 e EONSim v4.

A versão EONSim v3 foi desenvolvida visando atingir dois importantes e principais objetivos:

- O primeiro foi permitir aos novos mestrandos a transmissão de conhecimento da organização do código fonte; os importantes conceitos embarcados na codificação do simulador e também da modularização do código fonte.
- O segundo resumiu-se em uma detalhada análise na tentativa de melhorar o desempenho do simulador, já que o mesmo apresentava lentidão excessiva quando se configurava alguns cenários específicos e com aumento do número de conexões das simulações.

A versão EONSim v4 foi desenvolvida com a finalidade de inserir no simulador diferentes técnicas de desfragmentação em redes EON e avaliar a técnica responsável pela geração dos melhores resultados visando assim a colaboração nas pesquisas para contribuir com o estado da arte. Durante o processo de desenvolvimento da versão EONSim v4, a equipe envolvida desenvolveu um novo índice de desfragmentação e também uma nova estratégia (gatilho) para detecção do momento em que a rede deve ser desfragmentada. Os resultados obtidos no processo foram promissores, possibilitando assim a

submissão e consecutiva aceitação de um artigo no *International Microwave and Optoelectronics Conference 2015* (FAVERO et al., 2015), considerado um dos congressos mais importantes na área de óptica e eletrônica patrocinado por dois importantes institutos da área: *Brasilian Microwave and Optoelectronics Society (SBMO)* e *Microwave and Electronics Engineers (IEEE MTT-S)*.

A versão EONSim v5 é uma proposta de inclusão de novas funcionalidades a versão EONSim v4, contemplada por este trabalho de dissertação, e que tem como objetivos:

- O desenvolvimento de uma nova interface gráfica mais amigável, que permita usuários convencionais realizar testes no simulador, uma vez que as versões anteriores foram propostas para usuários experientes e conhecedores do projeto;
- Geração de arquivos com os resultados das simulações;
- Melhoria nas estratégias de simulação para redução do tempo de processamento;
- Recursos que permitam a simulações para a identificação do número ideal de conexões para realização das simulações;
- Implementação de novo índice de desfragmentação para realização de estudos comparativos entre resultados com diferentes índices.

## **4.2 Validação**

Desde a versão inicial da ferramenta EONSim até a presente versão EONSim v5, a validação do simulador EONSim como uma ferramenta computacional confiável, sempre foi a primeira preocupação das equipes envolvidas. Para comprovação da mesma como tal, a validação foi realizada com base na reprodução dos resultados dos principais pesquisadores internacionais na área de redes EON.

A maioria dos trabalhos de pesquisas internacionais sobre redes EON e também desta dissertação, foram realizados sobre a topologia de rede NFSNet com 14 nós e 21 enlaces, foram considerados também FSU de 12,5 GHz e capacidade

total de 4,4 THz por enlace resultando em 352 FSUs por enlace. Todos os resultados apresentados estão relacionados a probabilidade de bloqueio que se encontra no eixo Y em função da carga (tráfego) que se encontra no eixo X dos gráficos apresentados.

Inicialmente, o trabalho de validação passou pelo uso da versão EONSim v3 (atualmente na versão EONSim v5) com resultados muito bons. Reproduziu o resultado de três importantes trabalhos da literatura internacional e nacional.

A primeira reprodução corresponde aos resultados obtidos pelos pesquisadores internacionais ZHANG, ZHAO e WANG (2012) conforme demonstrado na Figura 10, os autores realizam seus experimentos utilizando-se do algoritmo RSA MTLSC. Os resultados obtidos pelo simulador, apresentam variação de 2% quando comparado com os resultados originais, a pequena variação apresentada nos permite que o simulador seja aceito como ferramenta computacional confiável para o cenário simulado.

Para a reprodução dos resultados apresentados na Figura 10, além das considerações topológicas apresentadas acima, foi também considerada a seguinte distribuição de carga de tráfego: 33% para taxas de transmissão de 40 Gb/s que corresponde ao uso de 4 FSU, 33% para taxas de transmissão de 100 Gb/s correspondente a ocupação de 4 FSU e 34% para taxas de transmissão de 400 Gb/s correspondente a 6 FSU.

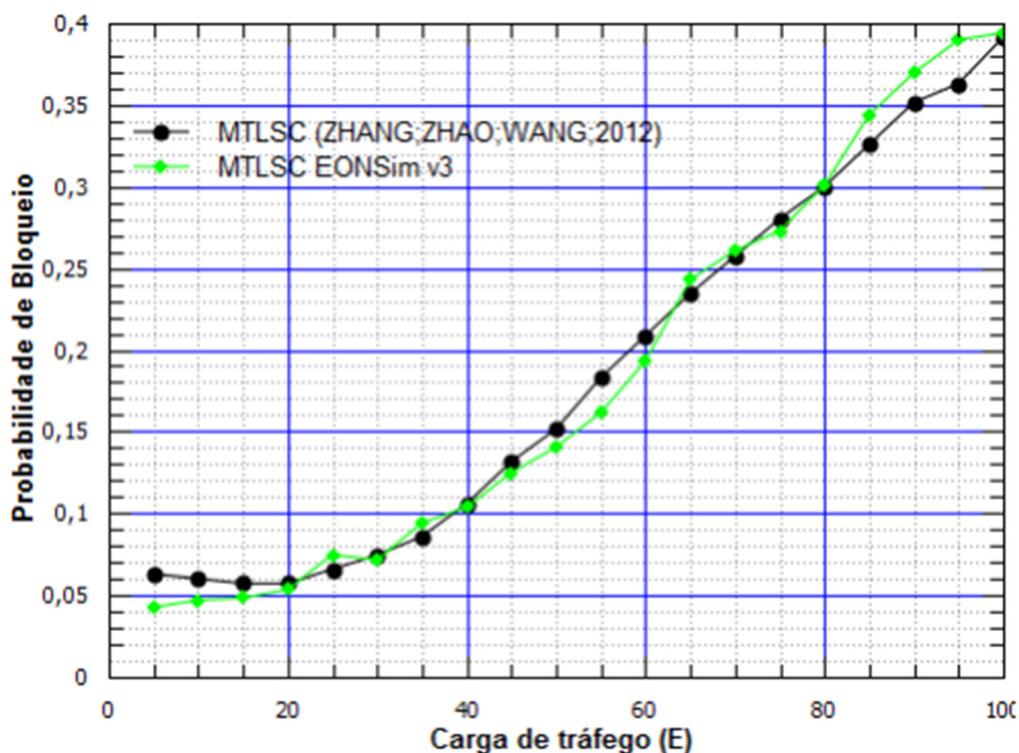


Figura 10. Gráfico de simulação dos resultados ZHANZG, ZHAO, WANG (2012), algoritmo RSA MTLSC.

A segunda reprodução de resultados do simulador, corresponde a reprodução dos resultados do cenário G obtidos por SILVA (2013), conforme demonstrado na Figura 11. A reprodução deste cenário levou em consideração os parâmetros topológicos apresentados no início desta seção, carga de tráfego distribuídas em 10% para taxas de transmissão de 100 Gb/s, 40% para taxas de transmissão de 400 Gb/s e 50% para taxas de transmissão de 1 Tb/s, as taxas de transmissão deste cenário ocuparam 4, 6 e 12 FSU consecutivamente. Seguindo o padrão dos experimentos realizados pelos inúmeros pesquisadores da área EON, o gráfico apresenta no eixo Y a probabilidade de bloqueio e no X as curvas correspondentes aos algoritmos RSA FF, RF, SBD-FF, SBD-RF, SPMFF (SILVA, 2013) e também o RSA MTLSC (ZHANG; ZHAO; WANG, 2012). Os resultados apresentaram variação no máximo de 1% dos resultados originais obtidos por SILVA (2013), esta pequena variação é válida para todas as curvas demonstradas.

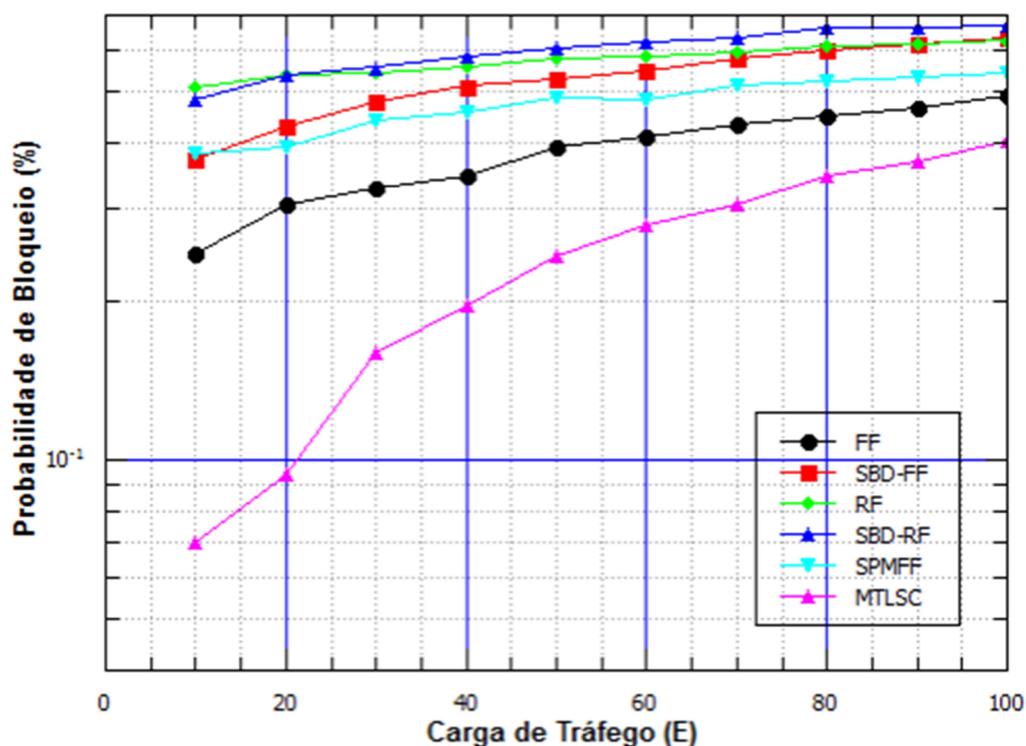


Figura 11. Gráfico de simulação dos resultados apresentados por SILVA (2013)

A terceira reprodução de resultados apresentados na Figura 12, apresenta os resultados obtidos para o algoritmo RSA FA e FF testados por YIN et al. (2013). Os parâmetros topológicos utilizados por YIN et al. (2013) contém algumas diferenças quando comparados aos utilizados nas demais simulações: A capacidade de transmissão de cada enlace é de 5 THz ao invés de 4,4 THz, o tamanho do FSU se mantém o mesmo, ou seja, 12,5 GHz resultando assim em 400 FSUs por enlace e não 352 comumente utilizado até o momento, a topologia de rede se manteve a mesma (NSFNet), já a carga de tráfego utilizada por YIN et al. (2013) tem uma pequena variação se comparada os demais experimentos, ela apresenta uma distribuição uniforme com conexões ocupando de 1 a 10 FSUs, as demais simulações levaram em consideração a taxa de transmissão que corresponde a um número  $N$  de FSUs, já neste experimento o autor levou em consideração os FSUs descartando as taxas de transmissão, em linhas gerais essa alteração não representa nenhum problema para os experimentos. Como esperado as simulações realizadas pelo simulador EONSim v3 apresentaram variação de no máximo 1% dos resultados apresentados por YIN et al. (2013).

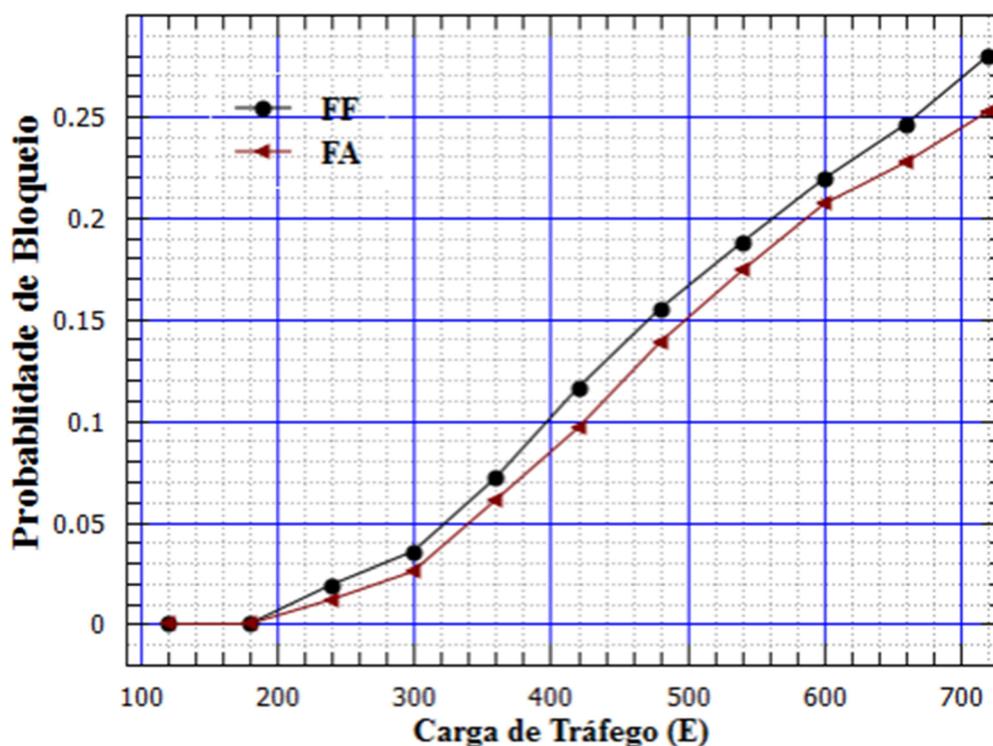


Figura 12. Gráfico de resultados da simulação para o cenário apresentado por YIN et al. (2013) para os RSAs FF e FA

A simulação dos trabalhos de pesquisas apresentados pelo simulador EONSim v3 permitem que o mesmo seja considerado apto como ferramenta de simulação, tendo em vista que as margens de diferenças apresentadas nas simulações não ultrapassam 2% dos resultados originais, uma margem considerada aceitável.

As versões EONSim v4 e EONSim v5, são consecutivamente a sequência dos trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa, são implementadas técnicas de desfragmentação que podem facilmente ativadas e desativadas através da interface do simulador.

### 4.3 Informações Técnicas

O simulador EONSim v5 necessitou da atualização das ferramentas computacionais utilizadas no processo de desenvolvimento. O upgrade foi necessário em função das novas simulações demandarem maior capacidade de

processamento e alocação de memória, que não suportavam as novas cargas utilizadas.

### 4.3.1 Ambiente de desenvolvimento

O ambiente de desenvolvimento utilizado para o desenvolvimento do simulador foi o NetBeans IDE 8.0.2 conforme demonstrado na Figura 13 (destaque em vermelho).

O NetBeans é um ambiente de desenvolvimento de código fonte aberto da SUN, sobre a Licença Comum de Desenvolvimento e Distribuição (CDDL), pode ser baixada e instalada a partir do link <https://netbeans.org/downloads/>.

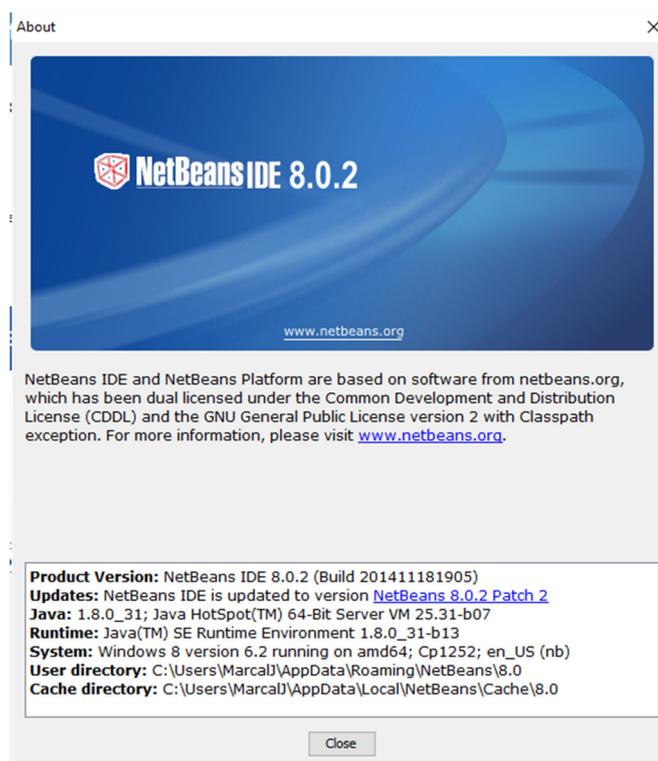


Figura 13. Ferramenta NetBeans IDE versão 8.0.2 utilizada no desenvolvimento EONSim v5.

A escolha do NetBeans IDE 8.0.2 como ferramenta de desenvolvimento, se deu em função da necessidade de utilização de uma ferramenta que apresentasse maior desempenho na criação de interfaces gráficas, já que a ferramenta ECLIPSE utilizada na versão EONSim v2 por SILVA (2013), demandava muito esforço e tempo no desenvolvimento da interface que por sua vez não era o foco principal

deste trabalho. Outro fator também mensurado, foi o tempo de simulação, inicialmente acreditava-se que iria sofrer algum impacto, após a realização dos testes iniciais o tempo de simulação não se alterou em função da troca do ambiente de desenvolvimento.

#### 4.3.2 Linguagem de programação

A linguagem de programação Java foi utilizada no desenvolvimento do simulador EONSim desde a primeira versão, trata-se de uma linguagem de programação livre, e pode ser baixada a partir do link <https://java.com/en/download/>.

Dentre as inúmeras linguagens de programação existentes, a linguagem Java foi escolhida devido a vários fatores: O primeiro por ser uma linguagem livre e que pode ser utilizada por qualquer programador que deseje dar sequência nos trabalhos de pesquisa realizados até o momento não necessitando ao mesmo a necessidade de aquisição de nenhum tipo de licença; o segundo por ser uma linguagem que pode ser utilizada em qualquer sistema operacional que suporte *Java Virtual Machine*(JVM) e que possua suporte gráfico, desta maneira o simulador se torna multiplataforma e, terceiro, por ser uma das linguagens de programação mais utilizados no mundo e também por ser uma das linguagens mais antigas. Para o desenvolvimento da versão EONSim v5 a versão 8 da linguagem Java foi utilizada conforme a Figura 14 demonstra.

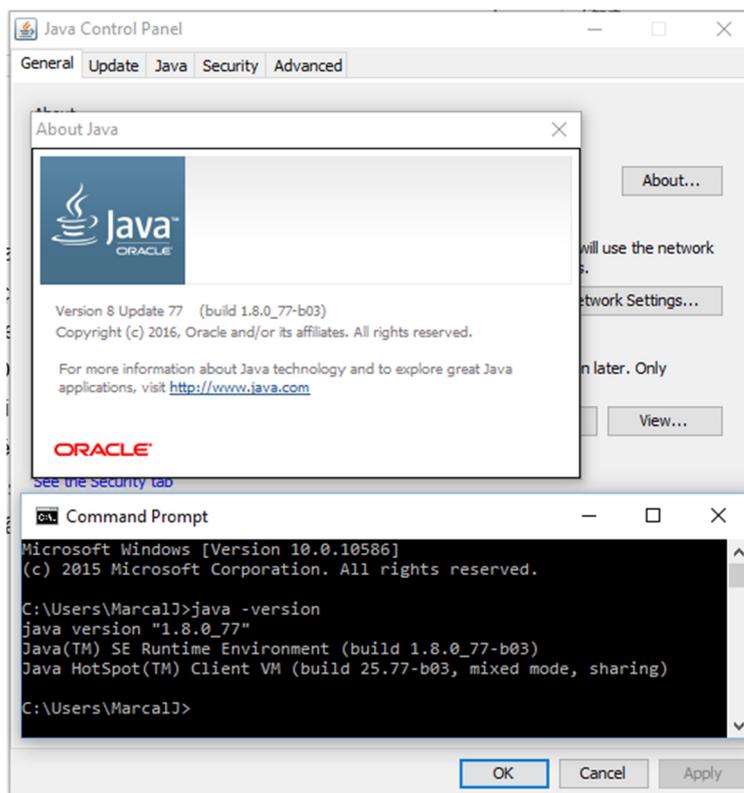


Figura 14. Versão da linguagem de programação Java utilizada no desenvolvimento do simulador EONSim v5.

### 4.3.3 Interface gráfica EONSim v5

O simulador EONSim sofreu várias alterações ao longo de seus 04 anos, até a presente versão que pode ser observada a partir da Figura 15, o uso do mesmo somente era possível a partir da instalação do ambiente de desenvolvimento e por usuários com conhecimentos avançados de desenvolvimento de software ou pelas equipes envolvidas na pesquisa, essa situação ocorria em função da necessidade da realização de configurações específicas diretamente no código fonte para que fosse possível a realização de simulações, como por exemplo ativar e desativar o processo de desfragmentação.

A partir da versão EONSim v5, desenvolvida por este trabalho de dissertação, todas as configurações foram adicionadas diretamente na interface gráfica, desta forma o processo de simulação se tornou altamente simples e prático, permitindo assim que qualquer interessado possa realizar testes sem a

necessidade instalação do ambiente de desenvolvimento e/ou tenha que alterar o código fonte para conseguir realizar simulações.

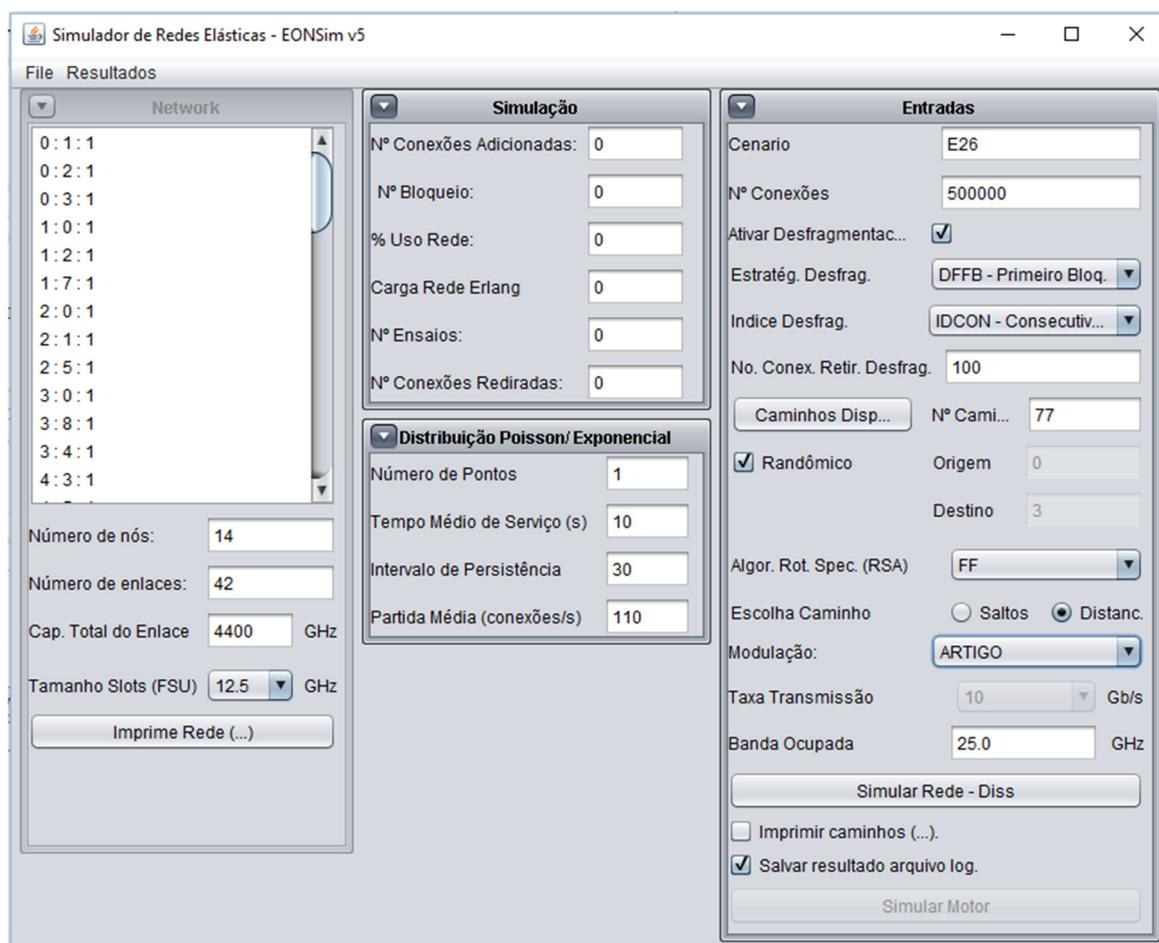


Figura 15. Interface gráfica simulador EONSim v5.

O simulador EONSim v5 permite a geração de uma grande quantidade de diferentes cenários para a realização de simulações conforme demonstrado Figura 15, para que seja possível entender cada um dos diferentes parâmetros o simulador é subdividido em grupos de configurações, onde:

- **NETWORK** – Contém informações a respeito da rede que será utilizada durante as simulações:
  - **Network:** O primeiro quadro demonstra a relação entre os diferentes enlaces de rede, por exemplo, a relação **0:1:1** define que o nó 0 está conectado ao nó 1 (**0:1:1**) e último parâmetro (**0:1:1**) corresponde ao número de fibras ópticas que conecta os nós. Seguindo este raciocínio é possível observar que o nó 0

(zero) está conectado aos nós 1, 2 e 7 conforme representado através da parametrização 0:1:1, 0:2:1, 0:7:1 e que melhor pode ser visualizado através da Figura 16.

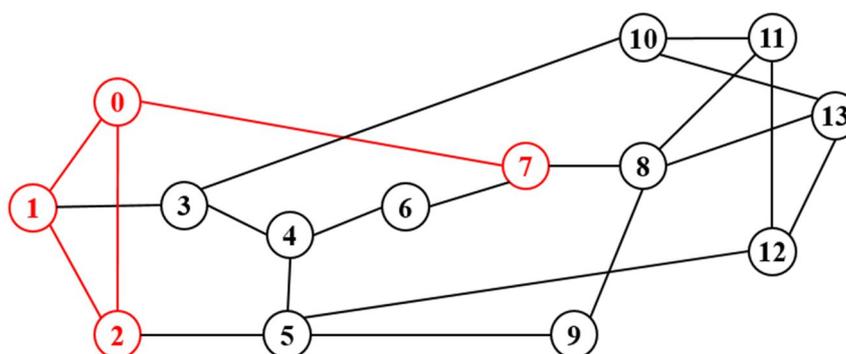


Figura 16. Topologia de rede NFSNet 14.

- **Número de nós:** Demonstra o número de nós contidos na rede e que serão utilizados durante a simulação;
- **Número de enlaces:** Corresponde ao número de enlaces da topologia utilizada na simulação (parâmetro  $N_e$ ), um enlace é definido a partir de uma fibra óptica (parâmetro  $N_f$ ) que conecta dois nós, o simulador considera que existe uma fibra óptica de ida e outra de volta em cada enlace entre dois nós distintos, sendo assim notem que o nó 0 está conectado ao nó 2 (0:2:1) através de uma fibra, e o nó 2 também está conectado ao nó 0 (2:0:1) através de uma outra fibra;
- **Capacidade Total do Enlace:** Define a capacidade máxima de transmissão da fibra óptica do enlace (parâmetro  $B_f$ ), durante as simulações desta dissertação assumimos que cada fibra óptica tem a capacidade de transmissão de 4400 GHz, o valor utilizado também é o mesmo da grande maioria dos trabalhos de pesquisa avaliados até o momento. É importante mencionar a banda total da rede (parâmetro  $B_t$ ), que é calculada a partir da equação  $B_t = N_e N_f B_f$ ;
- **Tamanho Slots (FSU):** Corresponde ao tamanho de banda das faixas espectrais de uma fibra óptica (parâmetro  $F$ ), atualmente

os trabalhos de pesquisas realizados consideram FSUs de 3,025, 6,125 e 12,5 (GESTEL et al., 2012).

- **Imprime a rede:** Permite visualizar a matriz de alocação dos slots de FSU da rede, recurso somente funcional em modo desenvolvimento.

- **SIMULAÇÃO**

O agrupamento “Simulação” permite ao usuário acompanhar em tempo de execução os valores processados pelo simulador durante as simulações, permitindo ao usuário identificar comportamentos importantes durante as simulações.

- **Nº Conexões Adicionadas:** Computa o número de conexões que foram estabelecidas com sucesso durante a simulação.
- **Nº Bloqueios:** Calcula o número de conexões bloqueadas durante o processo de simulação.
- **% Uso Rede:** Corresponde ao número de FSUs utilizados durante a simulação dividido pelo número de FSUs total da rede, este valor é constantemente atualizado durante a simulação, pois muitas conexões são inseridas e retiradas.
- **Carga Rede Erlang:** Define a intensidade de tráfego da rede por unidade de tempo (SILVA, 2012).
- **No. Ensaios:** Corresponde a um contador de número de conexões processadas pelo simulador (valor absoluto), variando de 0 (zero) ao valor definido no parâmetro “No. Conexões”;
- **No. Conexões Retiradas:** Contador responsável por contabilizar o número de conexões removidas da rede assim que o tempo das mesmas expira;

- **DISTRIBUIÇÃO POISSON/EXPONENCIAL**

- **Número de Pontos:** Parâmetro fixo 1, será utilizado em projeto futuro para permitir a configuração de vários cenários de simulação que serão executados automaticamente a partir da variação do número de partidas, é dado por  $N_{ev}$ ;

- **Tempo Médio de Serviços (s):** Duração média em segundos de cada conexão estabelecida (parâmetro  $T_s$ ), adotado pelo simulador EONSim a partir de uma distribuição exponencial negativa durante a simulação (SILVA, 2013);
  - **Intervalo de Persistência:** Tempo médio entre as chegadas de conexões, parâmetro calculado a partir de  $N_s = \frac{1}{\lambda}$
  - **Partida Média (conexões/s):** Representado por  $\lambda$ (lambda), corresponde ao número de conexões lançadas na rede por unidade de tempo (segundo), também considerada a taxa de chegada de conexões;
- **ENTRADAS**
    - **Cenário:** O parâmetro Cenário permite informar um valor textual que irá identificar o arquivo texto que será gerado;
    - **Nº Conexões:** Corresponde ao número de ensaios/conexões que serão simulados;
    - **Ativar Desfragmentação:** Quando ativo, a simulação executa o processo de desfragmentação de rede baseado nos parâmetros abaixo descritos, maiores informações sobre desfragmentação em redes EON serão abordadas na seção 4.
      - **Estratégia Desfragmentação:** Permite configurar quando as desfragmentações irão ser iniciadas, até o presente momento é possível parametrizar Desfragmentação a Partir do Primeiro Bloqueio (DFFB), Desfragmentação desde o Início (DFDI), Desfragmentação a Partir do Primeiro Bloqueio Baseado nas Entradas (DFFB-BE);
      - **Nº Conexões Retiradas para Desfragmentação:** Determina a partir de quantas conexões será executada uma desfragmentação baseado no parâmetro Estratégia de Desfragmentação. O número 50 apresentado na Figura 15, determina que será executada uma desfragmentação a cada 50 conexões retiradas da rede a partir da ocorrência do primeiro bloqueio (DFFB);

- **Caminhos Disponíveis:** Permite a configuração da escolha de um caminho único entre dois nós e/ou a parametrização de escolha do caminho de origem e destino de forma randômica;
  - **Número Caminhos:** Exibe a informação do número de caminhos entre o nó de origem e destino;
  - **Aleatório:** Quando selecionado, permite que o simulador sorteie aleatoriamente o nó de origem e destino para cada uma das conexões que serão simuladas;
  - **Origem:** Quando o parâmetro Randômico não está selecionado, permite a parametrização de um nó de origem;
  - **Destino:** Quando o parâmetro Randômico não está selecionado, permite a parametrização de um nó de destino;
- **Algoritmo Roteamento Espectral (RSA):** Permite a seleção do algoritmo que será utilizado para a escolha dos diferentes caminhos para cada uma das conexões que serão realizadas, para a maioria das simulações o algoritmo RSA *First Fit* é o que apresenta melhores resultados;
- **Escolha Caminho:** A escolha do melhor caminho para uma conexão é realizada a partir dos inúmeros caminhos entre o nó de origem e destino e também a partir do número de saltos e/ou distância;
- **Simular Rede:** Permite iniciar a simulação após a seleção dos parâmetros;
- **Imprimir Caminhos:** Quando selecionado, permite visualizar durante a simulação os caminhos que são calculados para cada conexão que será submetida a simulação, este procedimento pode causar lentidão no processo de simulação;
- **Salvar resultados em arquivo log:** Quando selecionado gera um arquivo de texto contendo o resultado da simulação o arquivo importante, pois a partir do mesmo é possível realizar a coleta de dados de cada simulação para geração das estatísticas.

#### 4.3.4 Tabela versões simulador EONSim

O simulador EONSim recebeu a cada nova versão uma série de novos recursos, comportamentos e funcionalidades que podem melhor serem visualizados a partir da Tabela 3.

VERSÕES EONSim				
RECURSOS	SILVA (2013) ver. 2	FÁVERO, MARÇAL (2014) ver. 3	FÁVERO (2015) ver. 4	MARÇAL (2016) ver. 5
IDE de desenvolvimento Eclipse	•			
IDE de desenvolvimento NetBeans		•	•	•
Programação orientada a objetos		•	•	•
RSA First Fit	•	•	•	•
Multi-plataforma (Linux, Windows, Mac-OS)	•	•	•	•
Capac. de simular até 10 mil conexões	•	•	•	•
Possibilidade de parametrizar topologia na GUI		•	•	•
Capac. de simular até 100 mil conexões			•	•
Possibilidade de desfragmentação da rede			•	•
Índice de desfragmentação de consecutividade			•	•
Desfragmentação DFFB			•	•
Desfragmentação DFDI				•
Desfragmentação DFFB-BE				•
Ativar/Desativar desfragmentação GUI				•
Ativar/Desativar salvar log GUI				•
Capac. de simular até 500 mil conexões				•

Tabela 3. Principais recursos em cada versão do simulador EONSim

O simulador EONSim e todas suas versões são públicas e podem ser baixadas e utilizadas a partir do endereço <<https://sourceforge.net/projects/eonsim/>>.

## 5 DESFRAGMENTAÇÃO DE REDES ÓPTICAS EON

A fragmentação das redes EONs diminui a eficiência espectral e consecutivamente o desempenho das mesmas. Por ser um comportamento peculiar e exclusivo das redes EONs, a busca de uma solução para a fragmentação é de grande interesse dos diferentes grupos de pesquisa desta área, e também será explorado neste trabalho de dissertação.

O presente trabalho aborda diferentes técnicas de desfragmentação em redes EONs, e aproveitando que a disponibilidade do simulador a realização de inúmeros experimentos que permitem a avaliação de desempenho e o aprimoramento das diferentes técnicas de desfragmentação que venham a contribuir para o aumento da eficiência das redes EONs.

O interesse principal da aplicação de uma técnica de desfragmentação corresponde ao aumento do número de FSUs livres e consecutivos em todos os enlaces ópticos, resultado assim no aumento do número de conexões estabelecidas que corresponde a maximização do uso espectral e eficiência da rede.

É importante mencionar que esta fragmentação não ocorre nas redes de grade fixa conhecidas como redes WDM, o que torna este problema uma particularidade das redes EONs.

Para que uma rede EON possa realizar o processo de desfragmentação, se faz necessário: avaliação da condição da rede para a execução da desfragmentação; uma métrica (índice) para definição de qual região da rede será necessária desfragmentar; uma estratégia para realização da desfragmentação; e a descrição do processo de desfragmentação realizado pelo simulador. Todos os itens mencionados acima serão abordados nas sessões 5.1, 5.1.1, 5.1.2, 5.2, 5.2.1, 5.2.2, 5.3 e 5.4 respectivamente.

As redes EONs operam a partir de execuções sucessivas requisições de conexão, cada requisição é submetida a aplicação do RSA que verificará a existência de disponibilidade para o estabelecimento da conexão, esse estágio é considerado estado de funcionamento normal da rede (EFN).

Durante o período de execução da rede, as conexões com o tempo de vida expirado são retiradas e todos os recursos por elas utilizados (FSUs) são liberados para alocação de futuras conexões.

O processo constante de estabelecimento e liberação de conexões durante a operação de uma rede EON gera a fragmentação espectral. A fragmentação ocorre em duas circunstâncias:

- a) quando os FSUs livres dos caminhos candidatos para uma requisição, estão em diferentes regiões espectrais;
- b) quando o número de FSUs livres e consecutivos nos diferentes enlaces dos caminhos candidatos são menores que o necessário para o estabelecimento da conexão. Ao observar os FSUs em ambas situações mencionadas, é possível observar que novas conexões poderiam ser estabelecidas caso os mesmos estivessem dispostos nas mesmas regiões espectrais e de forma consecutiva.

A Figura 17 expande o processo de alocação de solicitações de conexão proposto na Figura 9 (apresentada na seção 2.8), para demonstrar o funcionamento de uma rede EON com desfragmentação através de um processo de simulação.

Quadro A

**Tabela operações realizadas sobre a rede ABNet-5.**

OPERAÇ.	TIPO	ORIG/ DEST	TEMPO	TAXA (Gb/s)	FSUs	CAMINHOS CANDIDATOS	CUSTO	SITUAÇ.
OP1	REQ1 (C1)	A - D	3	10	2	E1, E4	2	ESTAB. (OK)
						E2, E3, E4	3	
						E2, E5, E6	3	
						E1, E3, E5, E6	4	
OP2	LIBERAR							
OP3	REQ2 (C2)	B - E	4	40	3	E4, E6	2	ESTAB. (OK)
						E3, E5	2	
						E1, E2, E5	3	
OP4	LIBERAR (C1)							
OP5	REQ3 (C3)	A - D	3	100	3	E1, E4	2	BLOQ.
						E2, E3, E4	3	
						E2, E5, E6	3	
						E1, E3, E5, E6	4	
OP6	DESFRAGMENTAÇÃO							
OP7	REQ4 (C4)	A - D	3	100	3	E1, E4	2	ESTAB. (OK)
						E2, E3, E4	3	
						E2, E5, E6	3	
						E1, E3, E5, E6	4	

Quadro B

**Tabela da situação de cada enlace a cada operação realizada.**

OP1	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	C1			C1		
2	C1			C1		
3						
4						
5						
6						

OP2	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	C1			C1		
2	C1			C1		
3						
4						
5						
6						

OP3	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	C1			C1		
2	C1			C1		
3				C2	C2	
4				C2	C2	
5				C2	C2	
6						

OP4	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1						
2						
3				C2	C2	
4				C2	C2	
5				C2	C2	
6						

OP5	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1						
2						
3				C2	C2	
4				C2	C2	
5				C2	C2	
6						

OP6	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1				C2	C2	
2				C2	C2	
3				C2	C2	
4						
5						
6						

OP7	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1				C2	C2	
2				C2	C2	
3				C2	C2	
4	C4			C4		
5	C4			C4		
6	C4			C4		

Figura 17. Simulação operações em redes EON considerando desfragmentação.

A diferença entre os dois procedimentos, está na realização da desfragmentação que ocorre na operação 06 (OP6 do Quadro A) da Figura 17. Ao analisar o cenário, mais precisamente as operações OP5, OP6 e OP7 do Quadro A, conclui-se que:

- **OP5** – Corresponde uma requisição de conexão bloqueada de 100 Gb/s correspondente a 3 FSUs. Ao analisar a situação da rede no momento da requisição, é possível observar através do Quadro B na OP5, que o bloqueio ocorre por dois fatores: a) primeiro por que todos os caminhos candidatos têm em sua roda os enlaces E4 e E6 que

estão 50% ocupados; b) ambos os enlaces E4 e E6 apesar de conterem 03 FSUs livres, que corresponde ao mesmo número de FSUs necessários para o estabelecimento da requisição, estes por sua vez não estão alocados de forma consecutiva;

- **OP6** – A OP6 demonstra um processo de desfragmentação que movimenta os FSUs ocupados dos enlaces E4 e E6 os FSUs livres e iniciais de ambos enlaces, esta movimentação resulta na liberação dos FSUs anteriormente ocupados resultando assim em um número maior de FSUs consecutivos em ambos enlaces.
- **OP7** – A OP7 corresponde a uma nova requisição de conexão com as mesmas características da requisição bloqueada da OP5, esta requisição por sua vez pode ser estabelecida nos enlaces E1 e E4 conforme pode ser observado no Quadro B. Com isso é possível perceber a eficiência do processo de desfragmentação nas redes EONs.

## 5.1 Condições para Desfragmentação de Redes

O processo de desfragmentação em redes EONs deve ser considerado para o aumento da eficiência das mesmas.

Para se desfragmentar uma rede, se faz necessário uma parada momentânea para colocá-la em estado de desfragmentação (ED), as paradas não podem ser realizadas com uma alta frequência pois implica na indisponibilidade da rede e deve-se estar atento que cada pausa não pode levar muito tempo. Levando em consideração os dois pontos mencionados, é possível deduzir que o melhor processo de desfragmentação é aquele que realizar menos paradas na rede e que permitir o aumento de sua eficiência da rede. A eficiência da rede é medida a partir da probabilidade de bloqueio, quando menor a probabilidade, maior será sua eficiência, a seção 2.9 aborda esse assunto com maior riqueza de detalhes.

Levando em consideração o cenário acima mencionado, o presente trabalho de dissertação considera as seguintes condições para a execução do processo de desfragmentação:

### 5.1.1 Primeira Rejeição de Requisição (Bloqueio)

Normalmente, o primeiro questionamento é “*Quando deve-se iniciar o processo de desfragmentação?* ” O presente trabalho de dissertação inicia o processo de desfragmentação a partir da primeira ocorrência de rejeição (bloqueio) de uma requisição de conexão na rede. Foi observado durante as pesquisas e simulações realizadas, que até a ocorrência da primeira rejeição, o RSA *First-Fit* não apresenta fragmentação considerável, que justifique a aplicação do processo de desfragmentação e até a ocorrência da primeira rejeição a rede ainda não se encontra ocupada o suficiente.

### 5.1.2 Periodicidade para Desfragmentação

Como toda e qualquer rede de transmissão, a todo instante novas requisições de conexões estão sendo realizadas como também estão deixando a rede em função de seu tempo ter encerrado, este cenário gera a fragmentação da rede e por esse motivo a desfragmentação deve ser realizada periodicamente. A periodicidade deste trabalho de dissertação, é definida levando-se em consideração a contagem de um número  $r$  de conexões retiradas, quando esse contador for igual ao parâmetro  $R$  o processo de desfragmentação é realizado. O presente trabalho de dissertação leva em consideração  $R = 10, 50$  e  $100$ .

## 5.2 Índices para Desfragmentação

Tão importante quanto saber o momento correto para executar o processo de desfragmentação abordado na seção 4.1 é conseguir identificar a região correta que necessita ser desfragmentada, pois não é possível realizar a desfragmentação em toda a rede a cada execução do processo em função do tempo que levaria para tal bem como corre-se o risco de desperdiçar tempo e processamento desfragmentando regiões que não necessitam serem desfragmentadas.

O desenvolvimento de técnicas que permitam a identificação da região que necessita ser desfragmentada é o foco de inúmeros pesquisadores da área e também deste trabalho de dissertação.

Esta dissertação leva em consideração dois diferentes índices que permitem identificar o enlace óptico que necessita ser desfragmentado. Um enlace óptico com alta fragmentação ou altamente ocupado, não permite que nenhuma requisição de conexão que o levem em consideração sejam estabelecidas. Desfragmentar um enlace resulta em liberar FSUs permitindo que futuras requisições de conexão possam ser estabelecidas através deste enlace.

### 5.2.1 Índice de Consecutividade

O índice de fragmentação  $f$  abordado por esta dissertação tem a finalidade de detectar o enlace com maior fragmentação baseado na consecutividade de FSUs livres. O índice  $f$  é calculado por

$$f = N_f / N_{cf}$$

onde:  $N_f$  corresponde ao número de FSUs livres no enlace;  $N_{cf}$ , o número de FSUs consecutivos livres do enlace que estiver sendo verificado. Este índice permite definir que, quanto maior for o valor para  $f$ , maior é o número de FSUs livres consecutivos resultando em uma maior possibilidade de estabelecimento de conexão, essa análise permite também afirmar que quanto maior for o valor de  $f$ , menor é o nível de fragmentação do enlace. O índice considera também, que caso o número de FSUs consecutivos ou o número de FSUs livres seja 0 (zero), o  $f$  também será 0 (zero), a Figura 18 apresenta exemplos de cálculo do índice para enlaces com 10 FSUs ( $N = 10$ ).

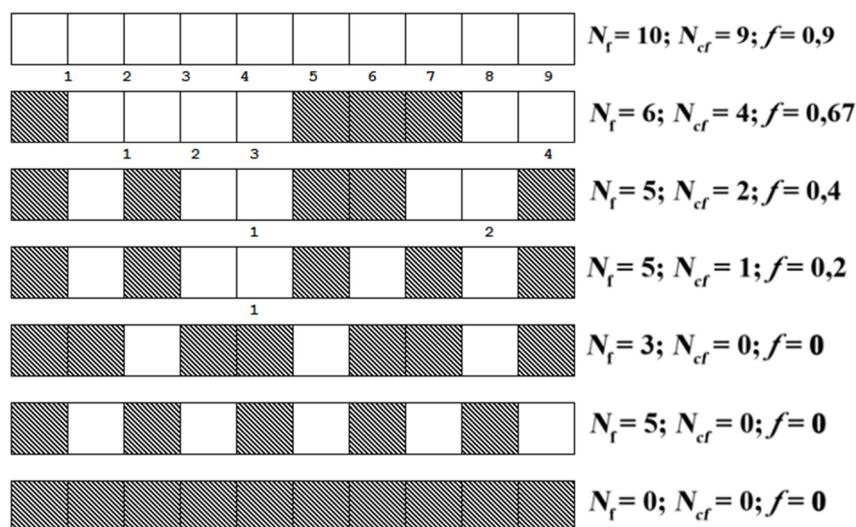


Figura 18. Cálculo do índice de fragmentação  $f$  baseado na consecutividade

### 5.2.2 Índice Maior Número de FSUs Ocupados

É sabido que quanto maior for a fragmentação de um enlace e/ou indisponibilidade do mesmo em função de sua alta ocupação, menor é a eficiência da rede.

A partir da premissa acima e também para efeito de comparação em busca de um índice que permita o aumento da eficiência das redes EONs, foi criado o índice de fragmentação  $f$  baseado no enlace que apresentar o maior número de FSUs ocupados. Um enlace óptico dificilmente atinge 100% de ocupação espectral em função da aleatoriedade das conexões que entram e saem da rede durante sua operação. Desfragmentar o enlace que está com alto índice de ocupação resulta em aumentar o número de FSUs livres e consecutivos, aumentando assim a possibilidade de estabelecimento de novas conexões no enlace em questão. O cálculo do índice  $f$  é dado a partir da equação

$$f = N_f$$

sendo  $N_f$  o número de FSUs ocupados do enlace. Para efeitos de desempate, caso mais de um enlace apresente o mesmo valor para  $f$ , o primeiro enlace do grupo será o escolhido para ser desfragmentado. Este critério evita que um novo

processamento para avaliação de desempate seja realizado consumindo assim mais recurso da rede.

A Figura 19 apresenta alguns exemplos de cálculo do índice  $f$  para enlaces com 10 FSUs ( $N = 10$ ).

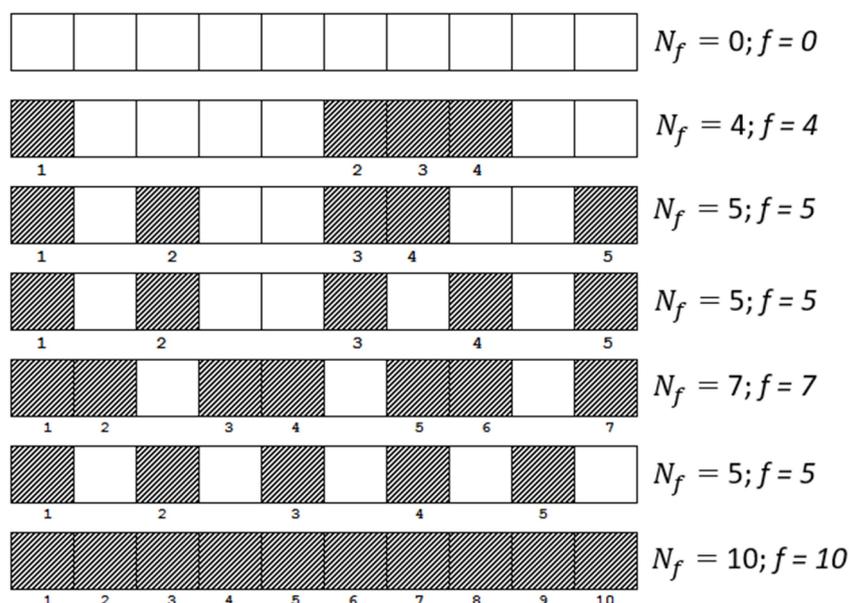


Figura 19. Cálculo do índice de fragmentação  $f$  baseado o maior número de FSUs ocupados.

### 5.3 Estratégia de Desfragmentação Baseada na Realocação

O processo de desfragmentação utilizado por esta dissertação leva em consideração a reorganização das conexões do enlace que apresentar maior índice de fragmentação, esta estratégia é também abordada por ZHANG et al. (2013). Cada conexão ativa do enlace eleito é submetida a uma nova tentativa de conexão, caso exista um caminho para esta conexão que apresente menor custo que o atual, a conexão é então migrada para o novo caminho e liberada de sua posição original. Esta abordagem prevê algumas vantagens:

- Aumento da disponibilidade – A realocação de uma conexão em um caminho de menor custo implica na liberação de um número de FSUs maior em diferentes enlaces, resultando assim no aumento da disponibilidade dos enlaces para futuras requisições de conexão.

- b) Combinação de diferentes RSAs – Essa técnica de desfragmentação permite que diferentes RSAs possam ser utilizados em momentos distintos. Pode ser utilizado um RSA que permita maior eficiência no processo de operação normal da rede e outro específico para o processo de desfragmentação.

O presente trabalho de dissertação utiliza-se do mesmo RSA tanto para o estado EFN quanto para o ED de operação da rede, experimentos futuros serão realizados utilizando-se combinações de diferentes RSAs e seus resultados serão comparados aos demais resultados apresentados neste trabalho.

A realocação de uma conexão estabelecida para um novo caminho é a essência da estratégia de desfragmentação e não deve impactar de forma prejudicial no funcionamento da rede. TAKAGI et al. (2011) propõe a utilização de transmissores e receptores adicionais como responsáveis por estabelecer paralelamente a conexão a ser migrada, após o estabelecimento da conexão no novo caminho a conexão original é então liberada, esta técnica permite que a conexão seja migrada sem que nenhuma interrupção seja realizada na rede. PROIETTI et al. (2012) provê uma técnica diferente da abordada por TAKAGI, ele explora a possibilidade de migração da conexão dentro de um tempo hábil que não influencie no funcionamento da rede, em sua abordagem foi considerado o uso de transmissor óptico Nyquist WDM capaz de ser reconfigurado com tempo inferior a 1  $\mu$ s não interferindo assim no EFN.

O presente trabalho de dissertação considera a utilização da técnica proposta por TAKAGI et al. (2011) para o processo de realocação das conexões durante o ED da rede.

#### **5.4 Processo de Desfragmentação realizado pelo Simulador EONSim**

O simulador EONSim permite a simulação do processo de desfragmentação para verificação da eficiência do mesmo visando assim colaborar com o avanço nos estudos relacionados a eficiência das redes EONs.

O fluxograma apresentado na Figura 20 permite visualizar de forma detalhada o funcionamento do simulador durante o EFN e ED de uma rede EON.

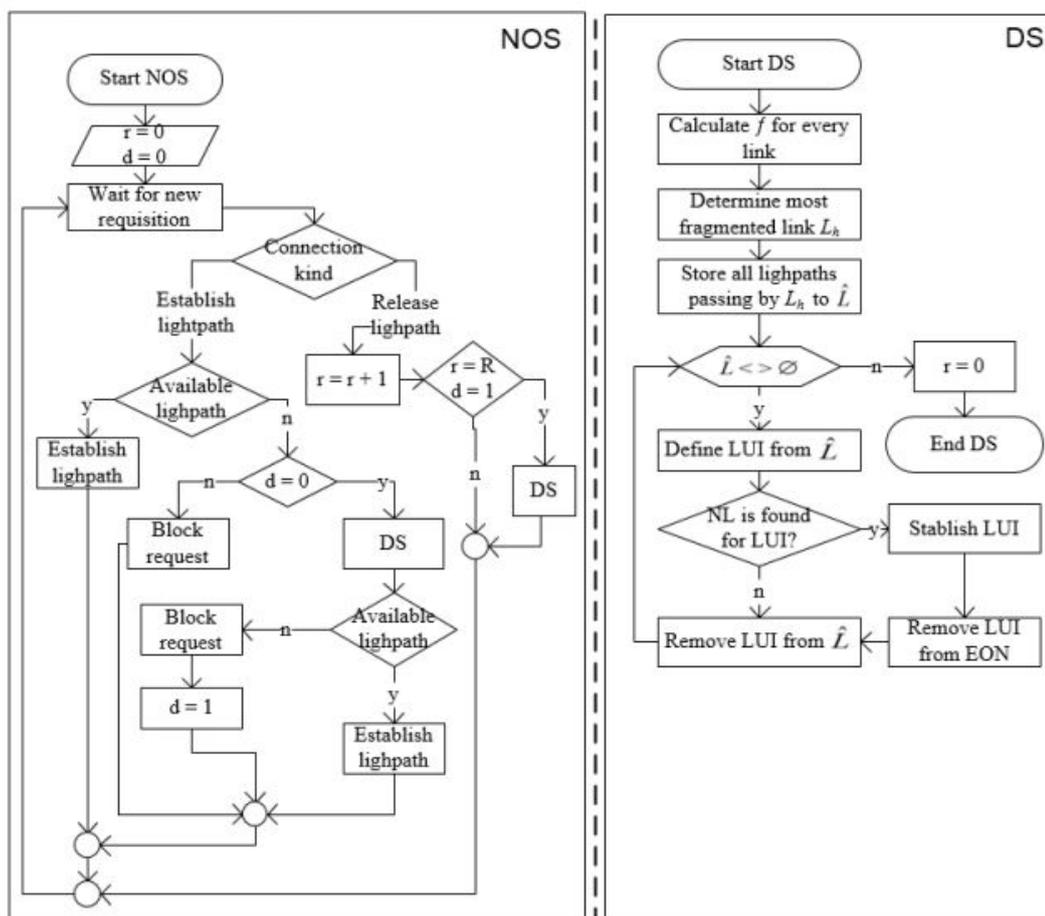


Figura 20. Fluxograma de funcionamento da rede EON em EFN e ED.

Ao iniciar o funcionamento da rede EON, a variável  $d$  é responsável por controlar a ocorrência da primeira rejeição de requisição na rede, ela é iniciada com o valor 0 (zero) indicando que não existe ainda nenhuma rejeição de requisição, a variável  $r$  também é iniciada com o valor 0 (zero) e sua função é armazenar o número de conexões liberadas. Durante EFN a rede se mantém aguardando uma determinada instrução, que pode ser uma nova requisição de conexão ou liberação de conexões já estabelecidas. Quando a instrução corresponde a uma requisição de conexão, a EON aplica o algoritmo de RSA previamente configurado para a requisição em uma tentativa de estabelecimento de conexão. Caso a instrução corresponda a liberação de conexões, a EON então verifica se existe conexões com tempo expirado e então libera os recursos alocados pela mesma e incrementa a variável  $r$ . Durante o estado EFN da rede EON, com o aumento do número de

requisições de conexão que são estabelecidas, a rede se torna carregada e também fragmentada em função das conexões que são liberadas, este comportamento gera a diminuição dos recursos da EON. Com a diminuição dos recursos da EON o algoritmo RSA pode não encontrar disponibilidade de recursos para o estabelecimento de uma requisição de conexão, quando essa situação ocorre pela primeira vez, a variável  $d$  recebe então o valor 1 (um) e a partir deste momento a EON passa a considerar a possibilidade de desfragmentação (ED) para cada instrução de liberação de conexões. A EON é colocada em ED sempre que  $r = R$  e  $d = 1$ , onde  $R$  corresponde a um número de conexões liberadas previamente parametrizado conforme descrito na seção 5.1.2. que aborda a periodicidade do processo de desfragmentação.

O processo de ED da rede EON é composto por várias etapas que são descritas logo abaixo:

- Etapa 1: O índice de fragmentação  $f$  é calculado para todos os enlaces da EON;
- Etapa 2: O enlace que apresentar maior valor para o índice  $f$  é eleito e então será submetido ao processo de desfragmentação, este enlace passa a ser considerado  $L_h$ ;
- Etapa 3: Todas as conexões presentes no enlace  $L_h$  são colocadas em um buffer  $\hat{L}$ ;
- Etapa 4: Um processo de repetição (etapas, 4, 5, 6 e 7) é executado enquanto o buffer  $\hat{L}$  contiver alguma conexão, ou seja, enquanto  $\hat{L} \neq 0$ ;
- Etapa 5: Uma a uma as conexões presentes no buffer são selecionadas (CS) e então cada conexão do buffer  $\hat{L}$  é submetida ao RSA definido na tentativa de encontrar um novo caminho que apresente “menor custo” que o atual;
- Etapa 6: Caso seja localizado um caminho com menor custo para a CS, esta conexão é então estabelecida no novo caminho na rede EON, é removida de  $\hat{L}$  diminuindo assim o número de conexões do buffer que tende a 0 (zero) e é também removida de sua posição

inicial na rede EON, com isso a migração da conexão para uma nova região espectral de menor custo é realizada;

- Etapa 7: Caso não seja localizado um novo caminho para CS, esta é então removida do buffer  $\hat{L}$  que tende à 0 (zero).
- Etapa 8: Ao termino do processo de repetição é atribuído o valor 0 (zero) a variável  $r$  que então iniciará o processo de contagem de conexões liberadas em EFN;
- Etapa 9: O processo de execução da rede EON deixa então de executar o estado de ED e passa a operar no estado EFN.

É válido a menção de que, no melhor de nosso conhecimento, o simulador EONSim é a primeira ferramenta computacional livre para redes EON que possibilita a combinação de diferentes técnicas de RSA, aplicação de diferentes índices para detecção da região espectral que necessita ser desfragmentada e ainda a possibilidade de configurar um gatilho para o disparo das desfragmentações baseado no número de conexões liberadas.

## 6 CONFIGURAÇÕES, PÂRAMETROS E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A seguir será apresentado o cenário utilizado durante as simulações, parâmetros e resultados obtidos.

### 6.1 Cenário para Simulação

Para a realização das simulações, foram considerados os parâmetros:

- Topologia de rede NSFNet 14 que contém 14 nós e 21 enlaces conforme mostrado na Figura 21;

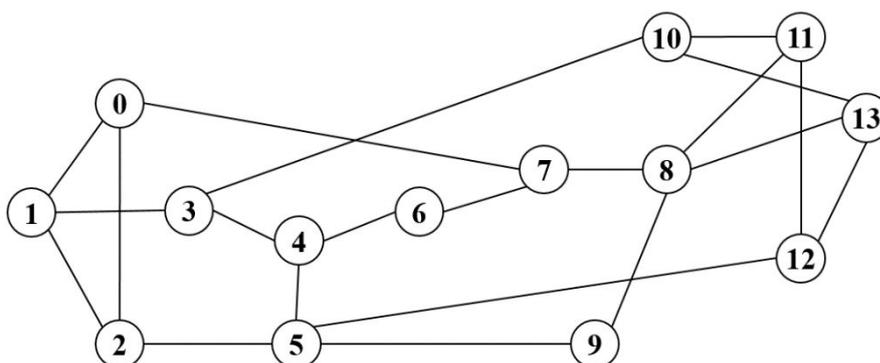


Figura 21. Topologia de rede NFSNet contendo 14 nós e 21 enlaces.

- Capacidade de transmissão (largura de banda) de 4,4 THz por enlace da rede EON;
- FSUs com capacidade de transmissão de 12,5 GHz correspondente a 352 FSUs por enlace;
- Carga de rede (tráfego) distribuída uniformemente entre conexões com taxas que ocupam 2, 3, 4, 6 e 7 FSUs;
- Para a chegada das novas requisições de conexão foi utilizado por ponto de simulação a distribuição de Poisson com chegadas de 69, 78, 86, 94, 102, 110, 117, 125, 133, 141, 149 e 157 requisições por unidade de tempo;

- Para definição do tempo de serviço das requisições de conexão estabelecidas foi utilizada a distribuição de Exponencial Negativa com média de tempo de 10 unidades de tempo;
- Foram utilizadas 500 mil requisições de conexão por ponto de simulação;
- Foi considerado a utilização de uma das técnicas (TAKAGI et al., 2011) (PROIETTI et al., 2012) descritas na seção 5.3 para realocação das conexões durante o processo de desfragmentação da rede;
- Foi considerado a existência de regeneradores ópticos nos enlaces responsáveis por garantir que o sinal óptico possa ser transmitido sem que o simulador tenha que considerar o alcance do comprimento da onda.

## **6.2 Limites**

Para futuros experimentos e evolução do simulador EONSim, pretende-se adicionar a possibilidade de configuração da distância de cada enlace; alcance da modulação; experimentos que possibilitem a mensuração da eficiência da rede EON quando configurada para trabalhar com FSUs com capacidade de 3,025, 6,125 e 25 GHz.

## **6.3 Resultados das Simulações**

Os resultados foram obtidos a partir de mais de 630 horas de simulações utilizando o simulador EONSim 5. A grande quantidade horas simuladas somente foram possíveis graças a concessão dos laboratórios de informática do Centro Universitário Padre Anchieta (UNIANCHIETA, Jundiaí).

Os resultados obtidos a partir das simulações visam avaliar o comportamento do processo de desfragmentação para redes EONs a partir do índice de fragmentação  $f$  apresentado na seção 5.2 deste trabalho de dissertação. A mensuração de eficiência do índice  $f$  se dá a partir da probabilidade de bloqueio gerada após o término de cada simulação, a mensuração de eficiência de uma rede

EON está descrita na seção 3.4. As simulações realizadas visam o aumento da disponibilidade de recursos da rede EON a partir de técnicas de desfragmentação, o presente capítulo está organizado da seguinte maneira:

A seção 6.3.1 apresenta os resultados para a aplicação do mesmo processo de desfragmentação alterando-se o número de requisições de cada simulação em 10, 100 e 500 mil requisições. A seção 6.3.2 apresenta os resultados da probabilidade de bloqueio para a aplicação da técnica de desfragmentação por conexões liberadas e utilização do índice de consecutividade. A seção 6.3.3 apresenta os resultados da probabilidade de bloqueio para o processo de desfragmentação baseado no índice de maior número de FSUs ocupados com a estratégia de ativação da desfragmentação baseada na liberação de conexões. Por fim, a seção 6.3.4 apresenta os resultados da probabilidade de bloqueio levando em consideração os resultados obtidos do índice de consecutividade e maior número de FSUs ocupados.

### 6.3.1 Influência do Número de Requisições na Convergência das Simulações.

A definição do cenário ideal para a execução dos processos de simulação em redes EON com aplicação de técnicas de desfragmentação é apresentada pela primeira vez por este trabalho de dissertação no melhor de nosso conhecimento.

Após a obtenção dos primeiros resultados em trabalhos de pesquisa anteriores (FAVERO et al., 2015) e também a partir do estudo dos resultados das bibliografias correlacionadas (SILVA, 2013) foi notada a existência de uma variação de comportamento muito elevada entre as diferentes cargas simuladas (10 000 e 100 000) conforme é possível visualizar nas figuras Figura 23 e Figura 24. A falta de uniformidade apresentada nas curvas de resultados passou a ser então um dos objetivos desta pesquisa.

Durante as primeiras pesquisas, foi observado que quando maior o número de requisições simuladas maior é a estabilidade da rede e convergência para obtenção dos resultados. Devido a limitações das primeiras versões do simulador

EONSim, não era possível simulação com um número superior de 10 mil requisições de conexões, entretanto a partir das melhorias implementadas (FAVERO et al., 2015) foi possível aumentar o número até 100 mil requisições. A partir das melhorias implementadas durante o desenvolvimento deste trabalho de dissertação, que resultou na versão do simulador EONSim 5 descrita na seção 4.3.4 tornou-se possível simulações entre 100 mil e 500 mil requisições.

Os resultados apresentados na Figura 22, Figura 23 e Figura 24 foram obtidos a partir da simulação utilizando o algoritmo RSA *First-Fit* sem desfragmentação, RSA *First-Fit* com desfragmentação baseada na consecutividade para  $R = 10$  e  $R = 50$ , todos estes cenários de simulação realizados para números de requisições igual a 10, 100 e 500 mil consecutivamente. A partir dos resultados obtidos é possível notar que quando maior o número de requisições simuladas, maior é a suavidade das curvas apresentadas nos gráficos e consecutivamente mais os resultados se aproximam da convergência.

Baseado nos resultados obtidos é possível afirmar que simulações de desempenho para redes EONs não devem ser inferiores a 500 mil requisições para se garantir resultados precisos.

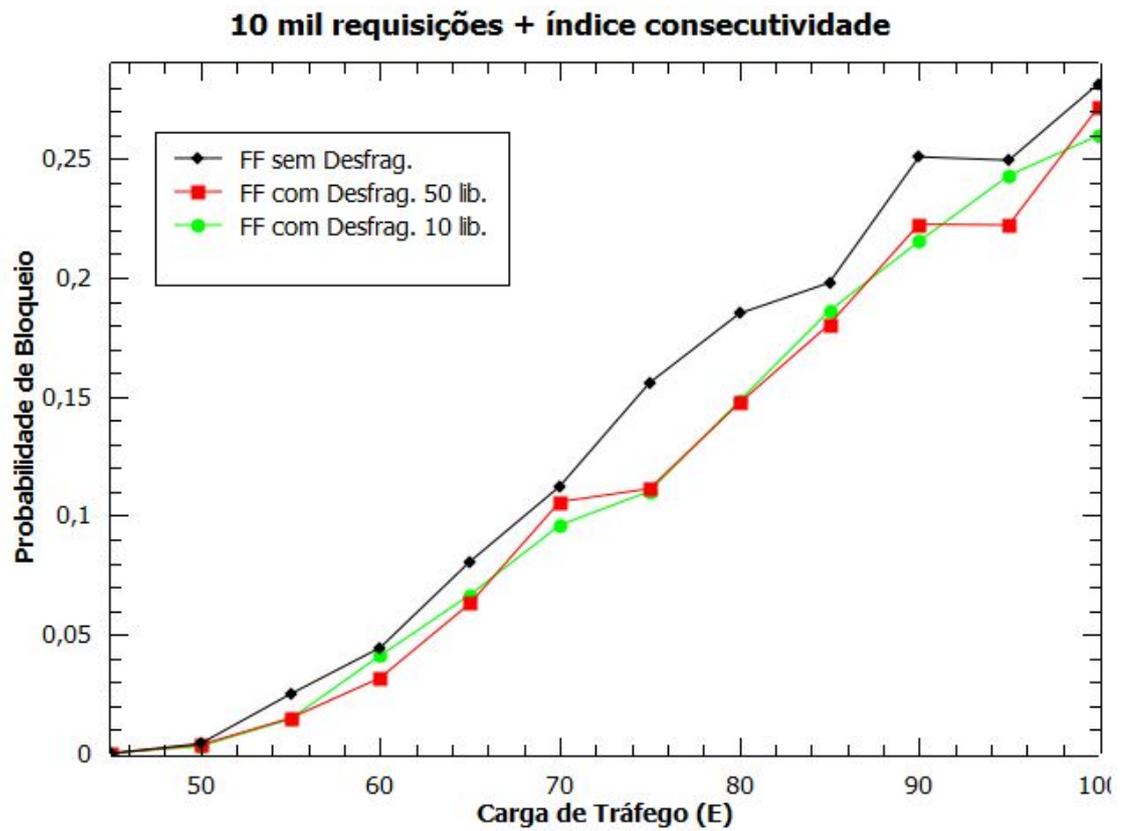


Figura 22. Resultado da probabilidade de bloqueio com FF e estratégia de desfragmentação baseada no índice de consecutividade para  $R = 50$  e  $R = 10$ .

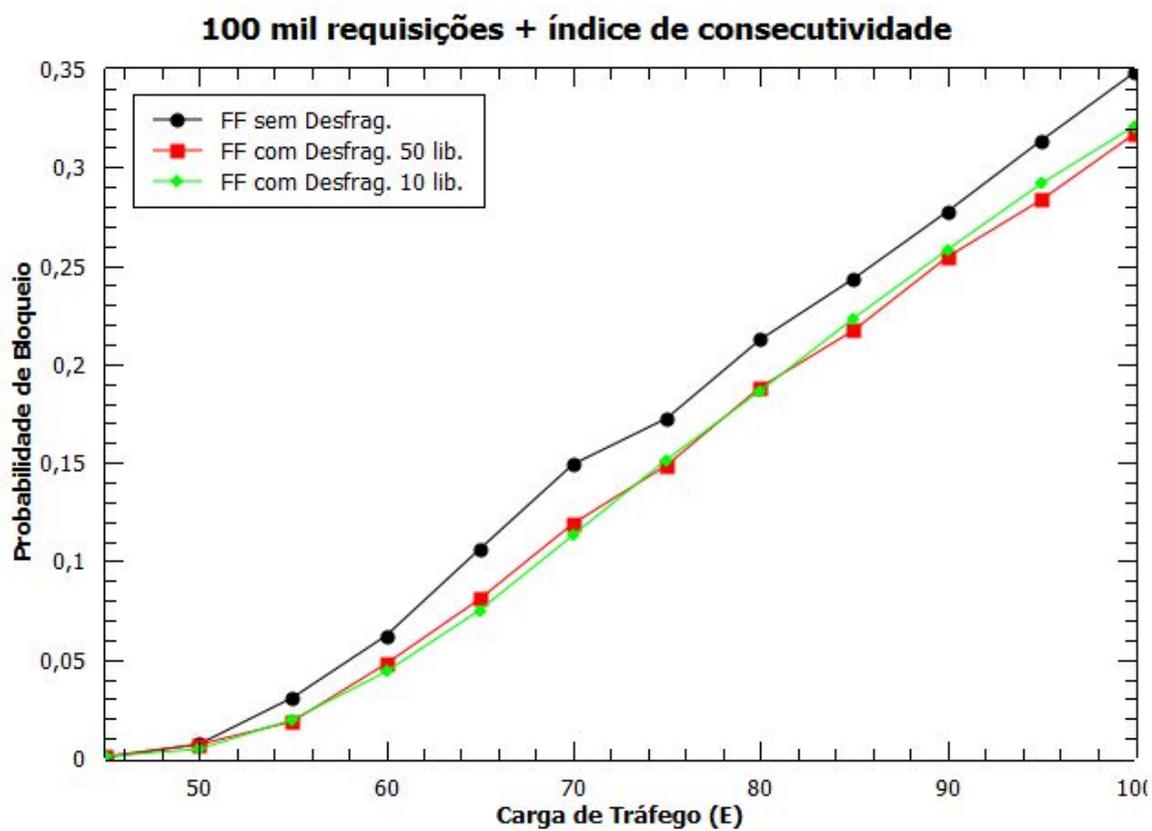


Figura 23. Resultado da probabilidade de bloqueio com FF e estratégia de desfragmentação baseada no índice de consecutividade para R 50 e R = 10.

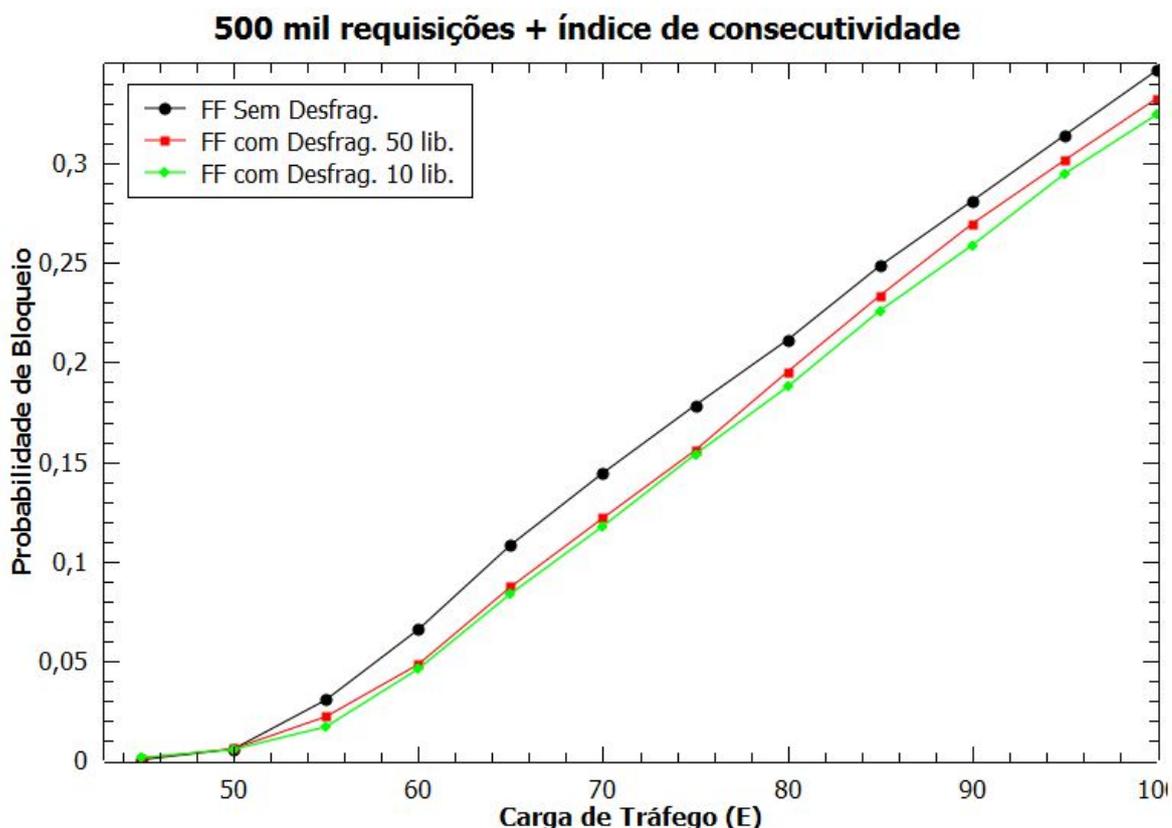


Figura 24. Resultado da probabilidade de bloqueio com FF e aplicação da estratégia de desfragmentação baseada na consecutividade para  $R = 50$  e  $R = 10$ .

Simulações com um número superior de requisições podem ser realizadas através do simulador EONSim 5, no entanto é válido ressaltar que as simulações para  $R = 10$  apresentadas na Figura 24 para carga superior a 85 E levou mais que 7 horas em média para serem executadas em um computador com processador i5 de 2ª Geração.

Para a geração dos resultados apresentados, cada ponto de simulação foi gerado a partir de 500 mil requisições de conexão.

### 6.3.2 Estratégia de Desfragmentação e Gatilho de Conexões Liberadas com Índice de Consecutividade

O segundo resultado obtido e explorado por este trabalho de dissertação, visa a verificação da eficiência do processo de desfragmentação baseado no índice

de consecutividade, com desfragmentação disparada a partir de um número  $R$  de conexões liberadas.

A Figura 25 apresenta os resultados baseados na probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego em erlang ( $E$ ). São apresentados os resultados para 4 diferentes cenários, o primeiro, leva em consideração apenas o uso do RSA *First-Fit*, a partir do segundo cenário é adicionado o processo de desfragmentação baseado no enlace que apresentar o maior índice de consecutividade (seção 5.2.1), a diferença entre o segundo, terceiro e quarto cenários corresponde a variação de  $R$  em 100, 50 e 10 consecutivamente.

O índice de consecutividade para  $R = 10$  apresenta melhor resultado quando comparado aos resultados obtidos para  $R = 50$  e  $R = 100$ . Esse comportamento ocorre em função do número de execuções de desfragmentação ser maior, ressaltando-se que quanto maior for o número de execuções do processo de desfragmentação maior será o consumo de processamento da rede podendo resultar em altos consumos de energia.

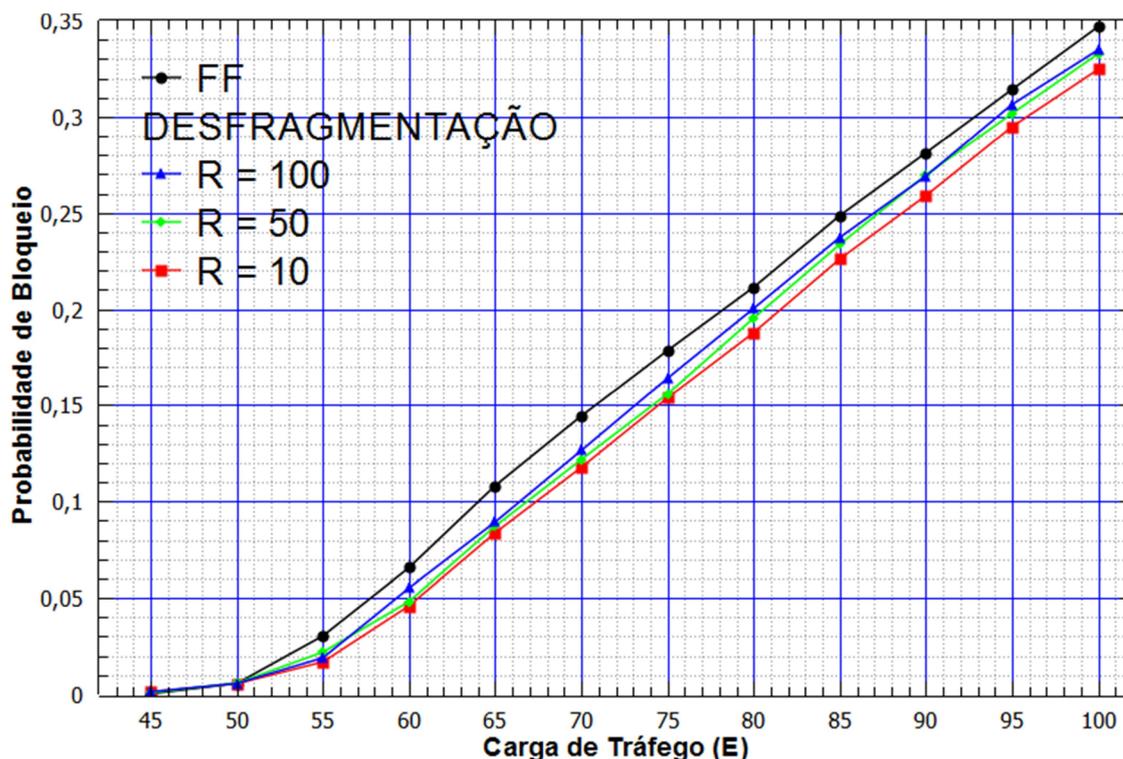


Figura 25. Resultado da probabilidade de bloqueio com *FF* e aplicação da estratégia de desfragmentação baseada no índice de consecutividade para  $R = 100$ ,  $R = 50$  e  $R = 10$ .

A aplicação do processo de desfragmentação baseado na consecutividade permitem ganhos na probabilidade de bloqueio de 44%, 30% e 22% para 55, 60 e 65 Erlangs respectivamente. O alto ganho apresentado corresponde a fato da rede já apresentar rejeição de requisições de conexão (bloqueios) mas ainda não estar totalmente carregada, permitindo assim uma alta eficiência na estratégia de desfragmentação baseada na realocação de conexões.

A partir de 65 Erlangs, o ganho médio utilizando-se da estratégia de desfragmentação passa a ser de 10%, permitindo ainda sim a exploração da estratégia de desfragmentação baseada na consecutividade em redes EONs. É altamente importante mencionar que o processo de desfragmentação para  $R = 10$  corresponde a um maior processamento da gerencia da rede podendo resultar em consumo de energia elevado.

Os resultados para  $R = 100$  e  $R = 50$  são semelhantes na maior parte dos resultados obtidos, esse comportamento é natural já que o número de menor desfragmentações não surte efeito satisfatório na rede que já está carregada.

### 6.3.3 Estratégia de Desfragmentação e Gatilho de Conexões Liberadas com Índice de Maior Número de FSUs Ocupados

O terceiro ponto analisado por essa dissertação verifica a eficiência do processo de desfragmentação quando combinado o índice de maior número de FSUs ocupados por enlace óptico com as desfragmentações realizadas para  $R = 10$ , 50 e 100 conexões liberadas para cada carga de rede pesquisada.

A Figura 26 apresenta os resultados das probabilidades de bloqueio em função da carga de rede medida em erlang (E). Todos os 04 (quatro) cenários avaliados utilizam-se do RSA *First-Fit* e 500.000 (quinhentas mil) requisições de conexão por ponto de simulação e cargas que ocupam 2, 3, 4, 6 e 7 FSUs distribuídas uniformemente. O primeiro cenário identificado no gráfico como *FF* não contém nenhum processo de desfragmentação, os demais cenários simulados contêm a aplicação do processo de desfragmentação, onde o enlace selecionado para ser desfragmentado é aquele que contiver o maior número de FSUs ocupados (índice apresentado na seção 5.2.2). A diferença entre cada um dos demais cenários está na realização da desfragmentação a partir do número  $R = 10$ ,  $R = 50$  e  $R = 100$ , onde R corresponde ao número de conexões liberadas na rede.

Ao observar a plotagem dos resultados apresentada na Figura 26 é possível observar que para todos os cenários onde foi aplicada a estratégia de desfragmentação foram obtidos resultados que correspondem ao ganho na eficiência da rede, ou seja, diminuição da probabilidade de bloqueio. Apesar de todas as estratégias de desfragmentações apresentarem ganho,  $R = 10$  apresenta melhor resultado quando comparada as demais estratégias, esse comportamento é justificado função da execução do maior número de desfragmentações ocorridas durante a operação da rede EON.

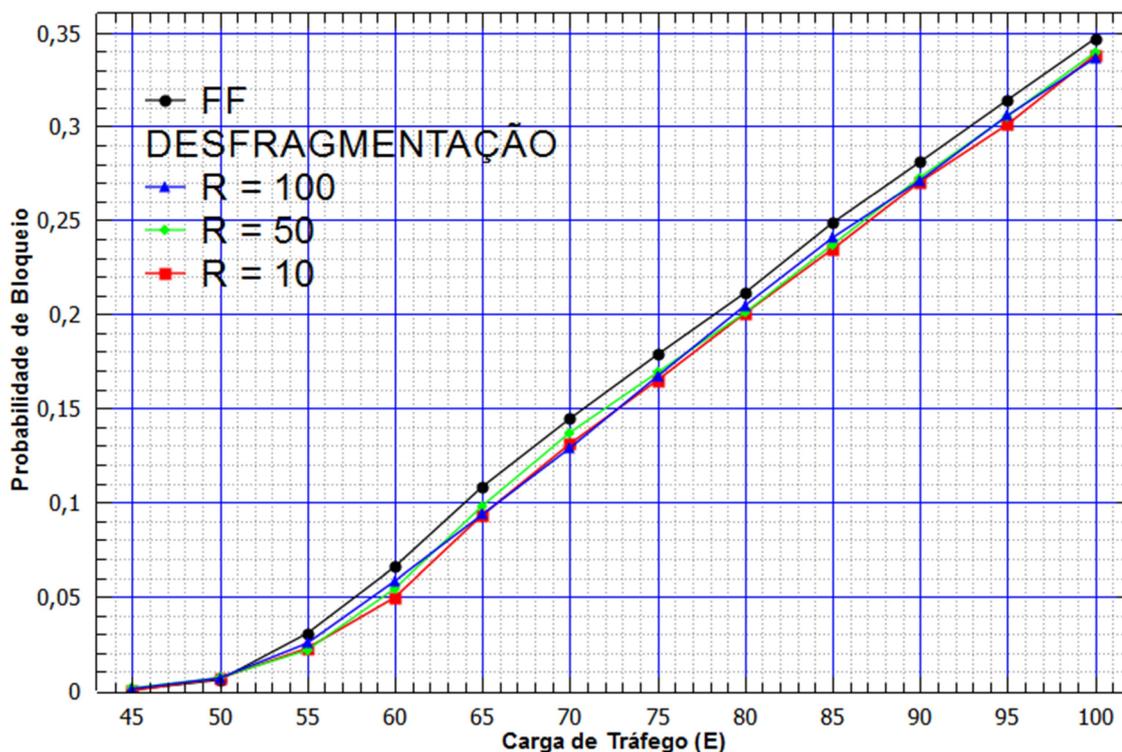


Figura 26. Resultado da probabilidade de bloqueio com *FF*, aplicação da estratégia de desfragmentação baseada enlace com maior número de FSUs ocupados para  $R = 100$ , 50 e 10.

Os ganhos para  $R = 50$  e  $R = 100$  são inferiores aos ganhos obtidos para  $R = 10$  e em muitos pontos não chegam a ganhos superiores a 5% tornando-as estratégias que não oferecem representatividade para serem melhores exploradas a menos de se considerar a perda de energia para realizá-las. Para o cenário  $R = 10$ , os ganhos mais expressivos são de 26%, 24% e 13% para as cargas 55, 60 e 65 erlangs respectivamente, os ganhos médios ocorridos entre 70 erlang e 100 erlang giram em torno de 5,5%, no entanto se avaliados cuidadosamente é possível notar que à medida que a rede se torna mais carregada os ganhos diminuem. Este comportamento é comum para qualquer cenário EON, ou seja, quanto maior a carga da rede, menor será a eficácia dos procedimentos que visem aumentar o ganho em termos de menor bloqueio nas mesmas. A partir das análises obtidas para a desfragmentação baseada no índice de maior número de FSUs ocupados, é possível afirmar que o índice somente tem representatividade para  $R = 10$ .

### 6.3.4 Comparativo entre Índice de Consecutividade e Índice do Maior Número de FSUs Ocupados

Por fim, o gráfico da Figura 27 apresenta um comparativo entre os melhores resultados obtidos a partir da aplicação de desfragmentação utilizando-se do índice de consecutividade (CONSEC) e do índice de maior número de FSUs ocupados (MNFSU) em ambos os casos para  $R = 10$ . Quando comparado os resultados obtidos de ambos índices com o os resultados do RSA *First-Fit* sem nenhuma técnica de desfragmentação, é possível notar claramente que ambos índices apresentam resultados positivos, ou seja, diminuição da probabilidade de bloqueio, podendo assim confirmar a viabilidade do uso das técnicas de desfragmentação em redes EON.

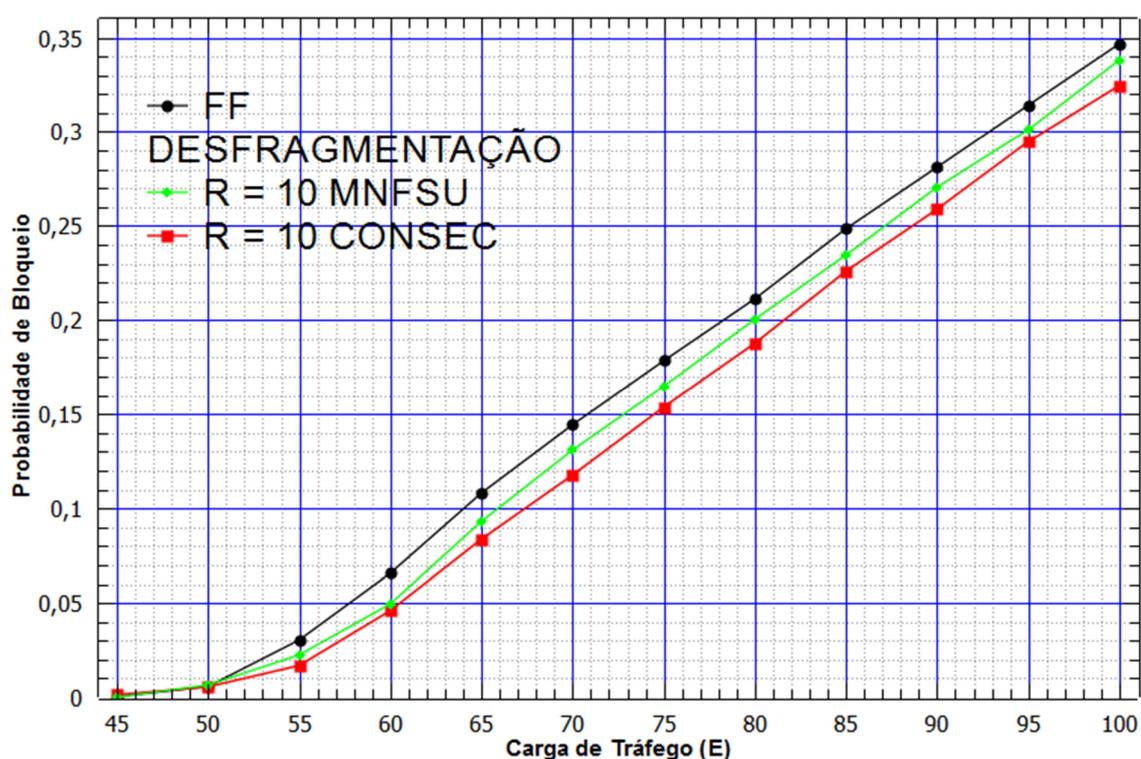


Figura 27. Comparativo da probabilidade de bloqueio para índices de desfragmentação baseados na consecutividade e maior número de FSUs ocupados para  $R = 10$ .

Ao analisar os resultados obtidos através do gráfico apresentado na Figura 28 é possível notar o ganho em percentual para cada carga em erlang após a aplicação das duas técnicas de desfragmentação. O ganho médio apresentado para o índice de consecutividade corresponde a 15,70% e o ganho médio para o índice de maior número de FSUs ocupados corresponde a 10,64 %, ambos ganhos

apresentam melhores resultados para cargas de tráfego mais baixas e tendem a diminuir o ganho a medida que a carga de tráfego aumenta.

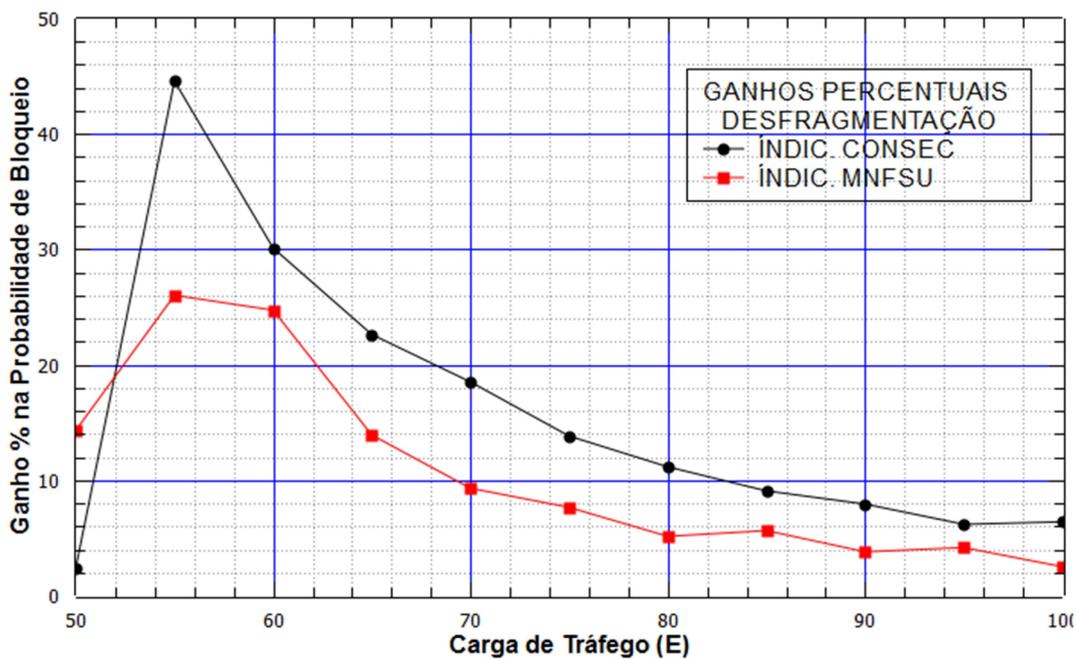


Figura 28. Ganho na probabilidade de bloqueio com a estratégia de desfragmentação proposta para  $R = 10$  utilizando-se o índice de consecutividade e maior número de FSUs ocupados em relação ao RSA FF.

Ao realizar uma análise direta, os resultados obtidos a partir do índice de consecutividade aferem melhores resultados demonstrando assim que seu desempenho é superior em média 5% que o segundo índice estudado.

Os resultados obtidos apresentam ganhos acima de 10% o que permite afirmar que a técnica é eficiente ao ponto de colaborar com os estudos na área.

## 7 CONCLUSÃO

A presente dissertação e estudos por ela realizados atendem os objetivos iniciais e permitem afirmar que colabora com os estudos na área de Redes Ópticas Elásticas pelas seguintes contribuições:

- a) Desenvolvimento de uma nova versão do simulador intitulada de EONSim 5 com capacidade de simular até 500 mil requisições de conexão permitindo assim a aferição baseada dos resultados com maior precisão e convergência;
- b) Remodelagem da interface gráfica do simulador EONSim 5 permitindo que usuários convencionais e interessados possam realizar simulações sem a necessidade de conhecimento programação de computadores e/ou fazerem parte das equipes envolvidas no projeto;
- c) Adição de um novo índice de desfragmentação intitulado de Índice de Maior Número de FSUs Ocupados no Enlace;
- d) Inclusão da estratégia de desfragmentação baseada na realocação de conexões em caminhos com menor custo;
- e) Inclusão do parâmetro “Estratég. Desfrag. ”, que permite configurar o simulador para iniciar as desfragmentações desde o início do processo da simulação e/ou somente após a ocorrência do primeiro bloqueio. Esta nova facilidade foi desenvolvida por último e em função do tempo de simulação não foi possível ainda coletar os resultados para averiguação e estudos comparativos;

Os estudos apresentados neste trabalho de dissertação demonstram a eficiência da aplicação do processo de desfragmentação sobre as redes EONs, quando analisados os resultados obtidos com o uso de desfragmentação para dois cenários, ambos se utilizando dos parâmetros de 500 mil requisições de conexão, RSA *First-Fit* para o estabelecimento da requisição de conexão e para a realocação da conexão em um novo caminho óptico durante o processo de desfragmentação. Ambos cenários se utilizaram das mesmas cargas, topologia de rede e destruição de banda, a diferença entre os cenários baseou-se no índice utilizado para identificação do enlace óptico a ser desfragmentado. Todas as simulações levaram

também em consideração o número de conexões liberadas, ou seja,  $R = 10$ ,  $R = 50$  e  $R = 100$

Os resultados obtidos de ambos cenários foram comparados aos resultados de cenário que se utilizou de 500 mil requisições de conexão e algoritmo RSA *First-Fit* sem nenhum processo de desfragmentação, realizado com as mesmas cargas de tráfego e distribuições. Os resultados demonstram que  $R = 10$  oferece os melhores ganhos em ambos cenários, e em especial o índice de consecutividade chega a apresentar diminuição da probabilidade de bloqueio de até 44% para 55 E e ganho médio de 15%, contra o ganho máximo de 26% para 55 E e ganho médio de 10% para o índice de maior número de FSUs ocupados apontando que o índice de consecutividade apresenta melhor resultado em processo de desfragmentação em EON.

E para concluir, podemos afirmar que as estratégias de desfragmentações apresentadas nesta dissertação são passíveis de serem consideradas etapas importantes nos estudos que corroboram com os avanços nos estudos de redes EONs e que o simulador é uma excelente ferramenta com enorme potencial de crescimento que permitirá novos experimentos capazes de auxiliar no caminho que determine o estado da arte no que se diz respeito a EONs.

## 8 PUBLICAÇÕES

FÁVERO, R. V.; MARÇAL, J. S.; SILVA, P. C. B.; ABBADE, M. L. F.; BONANI, L. H., "A New 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.

## 9 SOFTWARE DESENVOLVIDO

Neste trabalho foi desenvolvido o simulador EONSim nas seguintes versões e datas:

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.

Idem, *(EONSim 4.0)*, 2015.

Idem, *(EONSim 5.0)*, 2016.

## 10 REFERÊNCIAS

BHATT, U. R.; SOKEKAR, S., "Routing and wavelength assignment algorithms for multiclass WDM optical Networks". *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 122.16, 2010: 1466-1469.

CHAVES, D. A. R.; BASTOS-FILHO, C.J. A.; MARTINS-FILHO, J. F., "Ferramenta Computacional para Simulação de Redes Ópticas Transparentes". *Anais do MOMAG 2008*. v.1. pp.908-913. Florianópolis: SBMO, 2008.

CISCO® VNI 2015 - Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2015 – 2020 White Paper. Em <<http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>>. Acesso em: 03 de maio de 2016.

DANTE, R. G., "Algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda para as redes ópticas inteligentes e transparentes". Campinas: Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 2005.

DESIGNS LABORATÓRIOS. Fibra Óptica, Em: <[http://www.designslaboratorio.com.br/htmls/pesquisa/ciencia\\_tecnologia/fibra\\_optica.htm#historico](http://www.designslaboratorio.com.br/htmls/pesquisa/ciencia_tecnologia/fibra_optica.htm#historico)> Acesso em: 2 de abril de 2016.

FÁVERO, R. V et al. "A New Elastic Optical Network Defragmentation Strategy based on the Reallocation of Lightpaths Sharing the Most Fragmented Link.", in: *International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015, Porto de Galinhas. 2015 SBMO/IEEE MTT-S. Anais, 2015.*

GERSTEL, O.; JINNO, M.; LORD, A; YOO, S. J B, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?". *Communications Magazine, IEEE*, vol.50, no.2, pp.12-20, February 2012.

JINNO, M., TAKATA, H., KOZICKI, B., TSUKISHIMA, Y., SONE, Y. and MATSUOKA, S., "Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies". *IEEE Comm. Mag.*, vol.47, pp.66-73, 2009.

MOREA, A.; RIVAL, O., "Efficiency gain from elastic optical networks". *Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2011. ACP. Asia*, vol., pp1-7, 13-16, November, 2011.

QUEIROZ, I.; ASSIS, K. D. R., "Redes Ópticas Elásticas: Planejamento e Otimização". *XI Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação (WPerformance)*, Anais do XXXII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (CSBC), 2012.

RAMASWAMI, R., SIVARAJAN, K. N. (1998). "Optical Network - A Practical Perspective". Morgan Kaufmann Publishers.

RIBEIRO, J. A. J. Comunicações Ópticas. 4. ed. São Paulo: Érica Ltda., 2009. 453p.

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

SOARES, A. C. B.; GIOZZA, W. F., "Avaliação de Desempenho de Algoritmos para Alocação Dinâmica de Comprimento de Onda em Redes Ópticas Transparentes". XXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores – Gramado – RS, Brasil, 2004.

TAKAGI, T. et al., "*Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation.*" 2011 37<sup>th</sup> European Conference and Exhibition on Optical Communication, v. i, p. 1-3, 2011.

TELECO, Tutoriais Redes Ópticas: WDM – TDM x WDM, Em: <[http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwdm/pagina\\_5.asp](http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwdm/pagina_5.asp)>. Acesso em: 20 de março de 2016.

WANG, Y.; ZHANG, J.; ZHAO, Y. I; LIU, J.; GU, W., "*Spectrum consecutiveness based Routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks*". Chin. Opt. Lett., 2012, 10(s1): S10606, 2012.

YEATES, J. M.; RUMSEWICZ, M. P.; LACEY, J. P. R., "*Wavelength converters in dynamically-reconfigurable WDM networks*". Communications Surveys & Tutorials, IEEE, vol.2, no.2, pp.2-15, Second Quarter, 1999.

Yin, et al., "*Spectral and Spatial 2D Fragmentation-Aware Routing and Spectrum Assignment Algorithms in Elastic Optical Networks [Invited]*". J. Opt. Commun. Network, vol.5 no. 10, October 2013.