



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANDRÉ CUNHA DE SOUSA DONZA

**POLÍTICAS DE ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM ROTEAMENTO
BASEADO EM BALANCEAMENTO DE CARGAS E
FRAGMENTAÇÃO PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**

DM: 02/2015

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

ANDRÉ CUNHA DE SOUSA DONZA

**POLÍTICAS DE ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM ROTEAMENTO
BASEADO EM BALANCEAMENTO DE CARGAS E
FRAGMENTAÇÃO PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, com ênfase em Computação Aplicada.

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Donza, André Cunha de Sousa, 1987-
Políticas de alocação de espectro em roteamento
baseado em balanceamento de cargas e fragmentação para
redes ópticas elásticas / André Cunha de Sousa Donza. -
2015.

Orientador: Carlos Renato Lisboa Francês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade
Federal do Pará, Instituto de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, Belém, 2015.

1. Comunicações óticas - testes. 2.
Criptografia de dados (computação). 3. Simulação
por computador. 4. Redes computadores - medidas
de segurança. I. Título.

CDD 22. ed. 621.3827



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**POLÍTICAS DE ALOCAÇÃO DE ESPECTRO EM ROTEAMENTO
BASEADO EM BALANCEAMENTO DE CARGAS E
FRAGMENTAÇÃO PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**

AUTOR: ANDRÉ CUNHA DE SOUSA DONZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM 05/02/2015

Professor. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês - UFPA

ORIENTADOR

Professor Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

MEMBRO PPGE/UFPA

Professor Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar - Membro Externo - LAC/INPE

MEMBRO-EXTERNO LAC/INPE

Visto:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes

COORDENADOR DO PPGE/ITEC/UFPA

A Deus e a minha família

com todo carinho

Agradecimentos

A Deus, meu Amigo e Salvador, em quem me movo e existo, por caminhar comigo.

Ao meu pai, Elias Donza, pelo esforço em me mostrar coragem, inteligência e desprendimento. Você me ensinou a ser forte.

A minha mãe, Cleonice Cunha, pela sensibilidade, alegria e carinho. Você coloca meus pés no chão e mostra com clareza o que é amor.

Ao meu irmão, Filipe Donza, pela lealdade de uma vida compartilhada. Nossos momentos são inesquecíveis; e a minha cunhada Rebeca, pela forte amizade.

A minha namorada, Caroline Buarque. Sua presença e suas palavras transformam meus dias, você me faz sorrir.

Aos meus primos, Rodrigo e Arthur, irmãos, amigos leais e parceiros em todos os momentos.

Aos meus familiares, por todo apoio.

Aos grandes amigos antigos: Diego Fonseca, André Dinely, Filipe Matos, Karla Pantoja, Nelma Dias, F. Carlos Jr, Saulo Suzuki, Antônio Bessa, Diego Leão, Hugo Soares, Adelina Sobral, Rodrigo Moura, Héverton Kikuchi, Lucas Catarina, Allan Jhonny, Filipe Freitas, João, Tiago Freitas, Leonardo Christino, Stefan Schmidt, Phellype Baltazar, Rachan Ribas e Luann Guarany, pelas demonstrações de amizade sincera e lealdade em tantas histórias vividas e divididas.

Ao meu orientador, Professor Dr. Carlos Renato Lisboa Francês, pelo compromisso inspirador com a pesquisa. Obrigado por tantas ideias e pelo interesse genuíno no desenvolvimento da UFPA e dos alunos. Sua forte habilidade e disposição para motivar, observar e extrair o melhor de cada um me impulsionaram.

Ao Professor Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque, por todo suporte e auxílio ao meu desenvolvimento acadêmico. Obrigado pelo apoio certo nos trabalhos publicados e pelas suas contribuições, cheias de conteúdo, que me estimulam a buscar o aperfeiçoamento de forma contínua.

Ao amigo Paulo Thomaz, pelas demonstrações de amizade, parceria e grande competência em tudo.

Aos amigos Dércio Shanganna, Priscila Siqueira Aranha e Márcia Fontes Pinheiro, pelo carinho especial.

Ao casal de amigos Fernando e Jaqueline Abrunhosa, por todo acolhimento, amizade e simpatia demonstrados por mim.

A todos os amigos de LPRAD e LEA, pelo companheirismo e profissionalismo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal do Pará, pelo investimento em meu crescimento acadêmico e profissional.

“Mas os que esperam no Senhor renovarão as suas forças e subirão com asas como águias; correrão e não se cansarão; caminharão e não se fatigarão.”

Isaías 40:31

Resumo

A natureza rígida de redes de multiplexação por divisão de comprimentos de onda (WDM) provoca exploração ineficiente de capacidade espectral. Dessa forma, redes flexíveis são um possível avanço para a tecnologia óptica por viabilizarem melhor aproveitamento dos recursos espectrais disponíveis. Com o intuito de aferir a possível aplicabilidade de redes flexíveis, este trabalho propõe uma estratégia de avaliação de desempenho baseada em simulações e comparações entre resultados obtidos. Para tanto, várias simulações a tempo discreto foram implementadas em dois simuladores desenvolvidos em Matlab a fim de analisar diferentes políticas de alocação de espectro (First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit e Random-Fit) em três algoritmos de roteamento por caminhos ópticos não híbridos: o roteamento por fragmentação externa (FA), por caminhos mais curtos com máxima eficiência de reuso espectral (SPSR) e por balanceamento de cargas (BLSA). Duas topologias de rede foram utilizadas: um pequeno subconjunto de 6 nós da Cost239 e uma topologia aleatória de 7 nós. Admitindo-se que efeitos de camada física não foram configurados como restrições, foram realizadas comparações entre as diversas técnicas estudadas, objetivando-se apontar, baseado nas especificidades dos cenários propostos, qual o método mais adequado de alocação espectral em termos de frequência de bloqueio entre as quatro políticas de alocação de espectro consideradas.

Palavras - Chave: Roteamento, Alocação de Espectro, Redes Ópticas Elásticas, Simulação.

Abstract

The rigid nature of wavelength division multiplexing (WDM) routed networks leads to inefficient capacity utilization. Thus, flexible networks are a possible breakthrough for optical technology, as long as they provide higher spectrum efficiency use. In order to assess the possible applicability of flexible networks, this work proposes a performance evaluation strategy based on simulations and comparisons between obtained results. Several discrete-time simulations were carried out in two simulators developed in Matlab in order to analyze different spectrum allocation policies (First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit and Random-Fit) in some algorithms for single path routing: The External Fragmentation Aware Assignment (FA), the Shortest Path with Maximum Spectrum Reuse (SPSR) and the Balanced Load Score Spectrum Assignment (BLSA). Two network topologies were used: a small 6-node subset of Cost239 and a 7-node random topology. With no physical layer effects as restrictions, comparisons were made between the different techniques studied, aiming to point out, based on the specific features of the proposed scenarios, the most appropriate method of spectral allocation in terms of blocking frequency between the four considered spectrum allocation policies.

Keywords: Routing, Spectrum Allocation, Elastic Optical Networks, Simulation

Lista de Figuras

Figura 2.1. Escopo das três principais arquiteturas de redes ópticas elásticas.....	21
Figura 2.2. Arquitetura de uma rede óptica elástica.....	23
Figura 2.3. Comparação entre caminho óptico elástico e convencional.....	24
Figura 2.4. Esquemas de especificação de recursos espectrais.....	25
Figura 4.1. O subconjunto de 6 nós da rede Cost239 usado para obtenção de resultados numéricos.....	37
Figura 4.2. A topologia aleatória de 7 nós usada para obtenção de resultados numéricos.....	38
Figura 5.1. Comparação entre frequências de bloqueio associadas ao SPSR, BLSA e FA na topologia de 6 nós.....	42
Figura 5.2. Comparação entre frequências de bloqueio associadas ao SPSR, BLSA e FA na topologia de 7 nós.....	42
Figura 5.3. Comparação de performance entre as estratégias de alocação de espectro (FF, SF, EF e RF) no roteamento por caminhos mais curtos para a topologia de 6 nós.....	43
Figura 5.4. Comparação de performance entre as estratégias de alocação de espectro (FF, SF, EF e RF) no roteamento por caminhos mais curtos para a topologia de 7 nós.....	44
Figura 5.5. Comparação de performance entre as estratégias de alocação de espectro (FF, SF, EF e RF) no roteamento por balanceamento de cargas para a topologia de 6 nós.....	45
Figura 5.6. Comparação de performance entre as estratégias de alocação de espectro (FF, SF, EF e RF) no roteamento por balanceamento de cargas para a topologia de 7 nós.....	45
Figura 5.7. Comparação de performance entre as estratégias de alocação de espectro (FF, SF, EF e RF) no roteamento por fragmentação externa para a topologia de 6 nós.....	46
Figura 5.8. Comparação de performance entre as estratégias de alocação de espectro (FF, SF, EF e RF) no roteamento por fragmentação externa para a topologia de 7 nós.....	47

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Comparação entre redes WDM e redes ópticas elásticas.....	22
Tabela 5.1. Médias de frequência de bloqueio associadas ao BLSA, FA e SPSR para o subconjunto de 6 nós da Cost239.....	41
Tabela 5.2. Médias de frequência de bloqueio associadas ao BLSA, FA e SPSR para a topologia de 7 nós.....	41
Tabela 5.3. Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro utilizando SPSR na topologia de 6 nós.....	43
Tabela 5.4. Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro utilizando SPSR na topologia de 7 nós.....	43
Tabela 5.5. Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro utilizando BLSA na topologia de 6 nós.....	44
Tabela 5.6. Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro utilizando BLSA na topologia de 7 nós.....	44
Tabela 5.7. Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro utilizando FA na topologia de 6 nós.....	46
Tabela 5.8. Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro utilizando FA na topologia de 7 nós.....	46

Lista de Abreviaturas e Siglas

BLSA	Balanced Load Score Spectrum Assignment
CSA	Constant Spectrum Allocation
DAD	Dynamic Alternate Direction
DHL	Dynamic High Expansion - Low Contraction
EF	Exact-Fit
FA	External Fragmentation Aware Routing
FF	First-Fit
FWDM	Flexible Optical Wavelength Division Multiplexing
HSMR	Hybrid Single/Multi-Path Routing
IPTV	Internet Protocol Television
ITU	International Telecommunications Union
HOPS	Hitless Optical Path Shift
MSP	Modified Dijkstra's Shortest Path
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
O-OFDM	Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSPF	Open Shortest Path First
PLI	Programação Linear Inteira
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RF	Random-Fit
RIP	Routing Information Protocol
RMLSA	Routing and Modulation Level Spectrum Assignment
RSA	Routing and Spectrum Assignment
SCPVS	Spectrum-Constraint Path Vector Searching
SF	Smallest-Fit
SLICE	Spectrum Sliced Optical Path Network
SONET/SDH	Synchronous Optical Networking/Synchronous Digital Hierarchy
SPSR	Shortest Path with Maximum Spectrum Reuse
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WXC	Wavelength Cross-Connect

Sumário

Capítulo 1 – Introdução.....	16
1.1. Contextualização.....	16
1.2. Definição do Problema.....	17
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. Objetivo Geral.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos.....	18
1.4. Organização do Documento.....	18
Capítulo 2 – Redes Ópticas Elásticas.....	20
2.1. Definição.....	20
2.2. Características.....	21
2.3. Arquitetura de Redes Ópticas Elásticas Baseadas em OFDM.....	22
2.4. Tecnologias a Nível de Rede.....	24
2.4.1. Especificação de Grades Flexíveis.....	25
2.4.2. Algoritmos de Roteamento e Alocação de Espectro.....	26
2.4.2.1. RSA Estático com PLI.....	27
2.4.2.2. Algoritmos Heurísticos para RSA Estático e Dinâmico.....	27
2.4.2.3. RSA para Redes Persistentes.....	29
2.4.2.4. RSA Adaptativo Conforme Distâncias.....	29
Capítulo 3 – Trabalhos Correlatos.....	31
3.1. RSA Dinâmico e Estático.....	31
3.2. Alocação Elástica de Espectro para Demandas Variantes no Tempo.....	32
3.3. Roteamento Híbrido de Múltiplos Percursos.....	34
3.4. Desfragmentação Não-Disruptiva para Redes Ópticas Elásticas.....	35
Capítulo 4 – Simulação.....	37
4.1. Cenário.....	37
4.2. Restrições.....	38
4.3. Técnicas de Roteamento Utilizadas.....	39
4.3.1 Caminhos mais Curtos com Máximo Reuso Espectral.....	39
4.3.2 Atribuição Espectral Baseada em Balanceamento de Cargas.....	39
4.3.3 Atribuição Espectral Baseada em Fragmentação Externa.....	40
Capítulo 5 – Resultados Obtidos.....	41
5.1. Comparação entre as Técnicas de Roteamento Implementadas.....	41
5.2. Comparação entre as Políticas de Alocação de Espectro.....	42
Capítulo 6 – Conclusão.....	48
6.1. Considerações Finais.....	48
6.2. Principais Contribuições.....	48
6.3. Trabalhos Futuros.....	49
Referências.....	50

1. INTRODUÇÃO

Para satisfazer requisições futuras de tráfego na Internet, torna-se desejável uma nova arquitetura para redes ópticas, que apresente taxas de dados e alocação de espectro flexíveis, baixo custo, pequeno consumo energético e alta eficiência espectral.

1.1 Contextualização

O crescimento exponencial de tráfego experimentado recentemente na Internet, provocado especialmente por aplicações emergentes, como as de alta definição ou as de vídeo em tempo real, exige sistemas de transmissão por fibra óptica mais baratos e de maior capacidade. A tendência de rápido aumento do volume de dados intensifica a pressão sobre operadores de redes por redução de consumo energético e por diminuição de custos unitários de banda.

Há alguns anos, sistemas WDM de até 40Gbps por canal foram implementados em backbones de redes ópticas, com interfaces de 100Gbps comercialmente disponíveis. No entanto, em um futuro próximo, redes ópticas necessitarão suportar classes de transmissão na ordem de Tbps. De fato, aplicações em nuvem e em grade, bem como aplicações IPTV e de vídeo sob demanda demonstram mudanças antes dificilmente previstas nos padrões de largura de banda e nos padrões de tráfego geográfico de dados [Sato et al., 2009].

Em contrapartida, a atual natureza rígida da operação das redes ópticas baseadas em roteamento de comprimentos de onda, acaba por ser um fator limitante para o aumento da eficiência de utilização do espectro disponível. Uma limitação clara vem do descasamento de granularidades entre a camada de aplicação, que apresenta larga faixa de possíveis demandas por capacidade (com requisições variando de alguns Gbps até 100 ou mais Gbps) e a camada física, que apresenta rígida e larga granularidade para cada comprimento de onda.

Assim, quando o tráfego fim a fim de um cliente não é suficiente para preencher a capacidade total de um comprimento de onda, ocorre desperdício de banda residual. Por outro lado, se a capacidade fim a fim requisitada é maior que a de um comprimento de onda, muitos comprimentos de onda são agrupados e alocados, de acordo com a requisição, o que gera baixa eficiência espectral já que, nesses grupos, comprimentos de onda adjacentes precisam estar separados por bandas de guarda no domínio espectral [JINNO et al., 2010].

1.2 Definição do Problema

Como mencionado anteriormente, em razão do rápido crescimento de serviços de banda larga na Internet e de aplicações como IPTV, vídeo sob demanda e computação em nuvem, espera-se que demandas variadas de banda emergirão na operação de redes ópticas futuras, com velocidades variando de Gbps a Tbps. Os padrões temporais e geográficos no tráfego futuro da Internet mudarão ainda mais dinamicamente.

Assim, mesmo que arquiteturas atuais de redes ópticas WDM ofereçam vantagens relacionadas à alta capacidade de transmissão e à comutação reconfigurável de comprimentos de onda, existem ainda desvantagens ligadas à alta granularidade e à natureza rígida de banda.

Isso pode levar à utilização ineficiente de espectro e a uma acomodação não flexível de tipos variados de tráfego, já que cada canal WDM ocupa a mesma largura de espectro, não importando qual seja a taxa de transmissão de dados, e cada taxa de dados possui a necessidade de um transponder separado que, uma vez implementado, não pode ser reconfigurado, apesar de existirem, já há algum tempo, transponders de taxa adaptativa de dados para altas velocidades (100Gbps, por exemplo) [Klekamp et al., 2010].

Alguns tipos de comutadores elétricos de transporte para redes ópticas poderiam eventualmente suportar serviços em sub-comprimentos de onda. No entanto, o alto custo e a baixa eficiência energética, problemas que se tornam ainda mais significantes em sistemas de transmissão operando em velocidades maiores (a partir de 100Gbps), inviabilizam a utilização desses comutadores elétricos.

Ao mesmo tempo, quando as velocidades aumentam para além de 100Gbps, não é adequada a adoção em sistemas WDM dos tradicionais 50 GHz de espaçamento de canal para transmissões de longa distância, já que taxas de dados mais elevadas necessitam de mais espectro, existindo a necessidade de relações sinal-ruído maiores para formatos de modulação de ordem mais elevada [Nag et al., 2010].

Dessa forma, redes ópticas necessitam dar suporte a uma provisão flexível de largura de banda espectral, a fim de acomodar o padrão futuro de tráfego de alta velocidade. Diante disso e verificada a escassez de análises relacionadas a técnicas de alocação de espectro em redes ópticas elásticas, optou-se por direcionar o projeto desta dissertação a esse problema.

1.3 Objetivos

Visando ao atendimento de requisições futuras de tráfego na Internet, o objetivo deste trabalho se atém à análise de um conjunto possível de políticas de decisão a respeito do uso do espectro em redes ópticas elásticas, a fim de otimizar a utilização dos recursos espectrais disponíveis.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é propor uma estratégia de análise da eficiência de operação de Redes Ópticas Elásticas, diante da aplicação de políticas de roteamento e alocação de espectro diferentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a. Caracterização de cenários reais em aspectos relacionados a conexões, espectro e topologia para estudo do comportamento de políticas de decisão a serem possivelmente aplicadas às redes ópticas elásticas;
- b. Desenvolvimento de simuladores em Matlab para roteamento e alocação de espectro utilizando critérios de balanceamento de carga e minimização de fragmentação;
- c. Validação das heurísticas de roteamento e alocação de espectro desenvolvidas por meio de simulação em algumas topologias de rede escolhidas;
- d. Avaliação do impacto do balanceamento de carga na otimização de eficiência do roteamento em redes ópticas elásticas;
- e. Avaliação de desempenho das políticas de alocação de espectro propostas, utilizando fundamentalmente a probabilidade de bloqueio como métrica de análise e comparação.

1.4 Organização do Documento

O documento está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2, uma revisão dos principais fundamentos teóricos acerca das Redes Ópticas Elásticas é apresentada.

Na Capítulo 3, são apresentados alguns artigos científicos que guardam relação com o foco deste trabalho, como forma de embasamento às investigações propostas neste documento.

O conteúdo do Capítulo 4 é constituído pelo detalhamento das simulações implementadas, com especificação de cenários e tecnologias de roteamento utilizadas.

O Capítulo 5 é composto pela apresentação dos resultados obtidos em todas as diferentes técnicas de roteamento e alocação de espectro programadas.

No Capítulo 6, conclusões, perspectivas e possíveis desdobramentos para este trabalho.

2. REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS

O conteúdo apresentado nesta seção é destinado à apresentação das características e das arquiteturas mais relevantes relacionadas às redes ópticas elásticas. O enfoque da abordagem é voltado aos detalhes das dinâmicas diferenciadas de alocação de espectro.

2.1 Definição

Como descritas em [Zhang et al., 2013], as três principais arquiteturas de Redes Ópticas Elásticas são:

- Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network (SLICE)
- Flexible Optical WDM (FWDM)
- Data-Rate Elastic Optical Network

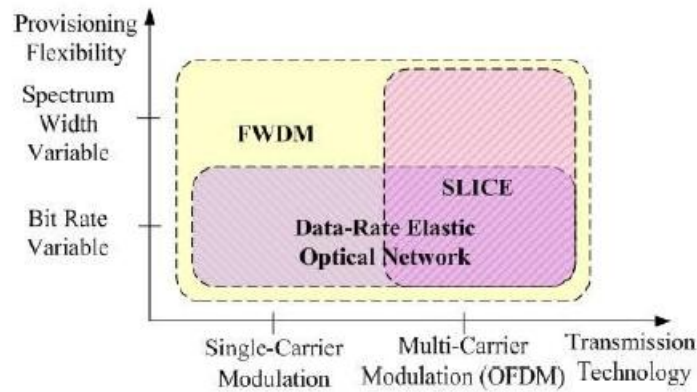
Arquiteturas do primeiro tipo (SLICE), baseadas em OFDM, foram propostas inicialmente por [Jinno et al., 2009]. A partir de características de multiplexação de sub-portadora e de alocação flexível de espectro, típicas da tecnologia O-OFDM, esse primeiro grupo de redes ópticas elásticas tem a capacidade de fazer com que um caminho óptico utilize não mais que o conjunto estritamente necessário de sub-portadoras para satisfazer a taxa de transmissão de dados. Dessa forma, por acabar com a limitação de alocação de comprimento de onda através de grades de tamanho fixo, alta eficiência espectral é alcançada.

Arquiteturas do segundo tipo (FWDM) foram sugeridas inicialmente por [Patel et al., 2010]. Esse segundo grupo de redes ópticas elásticas é capaz de realizar alocação dinâmica de recursos, oferecendo eficiência espectral otimizada por intermédio da utilização de grades elásticas e da alocação flexível de espectro para diferentes taxas de dados. Sistemas FWDM consistem em uma evolução da arquitetura WDM, permitindo tanto esquemas de modulação de portadora única como de modulação multi-portadora baseada em OFDM.

Arquiteturas do terceiro tipo foram propostas em [Rival et al., 2010]. Elas possuem um tipo único de transponder de taxa sintonizável que pode operar em várias taxas de dados para lidar com todos os tipos de tráfego. Essa arquitetura de rede óptica elástica oferece

soluções similares às oferecidas por redes WDM tradicionais, com flexibilidade aumentada no entanto, através da simplificação do design da rede e do compartilhamento de recursos para diferentes taxas de dados de serviços.

Figura 2.1 - Escopo das três principais arquiteturas de redes ópticas elásticas



Fonte: Adaptada de [Zhang et al., 2013]

A secção 2.2 detalha algumas características apontadas na Figura 2.1, que ilustra a relação entre as tecnologias de redes ópticas elásticas apresentadas e o grau de flexibilidade oferecido por cada uma.

2.2 Características

Arquiteturas SLICE suportam com eficiência caminhos ópticos que carregam tráfego em taxas de dados que podem estar situadas além ou aquém da capacidade de um único comprimento de onda. Isso ocorre através da introdução, nas bordas da rede, de transponders de taxa e largura de banda variáveis, bem como pela implantação, no núcleo da rede, de wavelength cross-connects (WXC) de largura de banda variável [Zhang et al., 2013].

Um único tipo de transponder de banda variável pode ser utilizado para todos os tipos de serviço em redes ópticas elásticas baseadas em OFDM [Zhang et al., 2012], o que pode não ser eficiente em termos de custo, especialmente para serviços de sub-comprimentos de onda, já que a alta capacidade do transponder não poderá ser inteiramente utilizada. Além disso, para comutar cada caminho óptico de sub-comprimento de onda, é necessário que bandas de guarda estejam presentes entre caminhos ópticos adjacentes, o que pode resultar em overhead espectral significativo [Morea et al., 2011].

A Tabela 2.1 descreve as diferenças principais entre redes ópticas WDM tradicionais e redes ópticas elásticas no que se refere à provisão de serviço.

Tabela 2.1 – Comparação entre WDM e Redes Ópticas Elásticas [Zhang et al., 2012]

	Rede WDM	Rede Óptica Elástica
Serviço em sub-comprimento de onda	Espectro fixo alocado mesmo que não exista tráfego grande o suficiente para preencher o canal. Necessário agrupamento de tráfego	Espectro elástico alocado de acordo com a taxa de dados requisitada. Serviço de sub-comprimento de onda é tratado diretamente no domínio óptico
Serviço em super-comprimento de onda	Multiplexação inversa, múltiplos canais WDM independentes alocados	Integra vários canais OFDM em um único super-canal, mantendo ortogonalidade de espectro entre os canais para aumentar a eficiência espectral
Transponder	Um tipo de transponder para cada taxa de dados	Um único transponder é utilizado para todos os tipos de serviço

WXC de espectro variável também estão presentes na arquitetura FWDM. No entanto, podem existir diferenças no transponder de largura de banda variável em razão da possibilidade de utilização tanto de esquemas de modulação mono-portadora como de esquemas multi-portadora. No geral, as tecnologias de planejamento de redes são equivalentes para arquiteturas SLICE e FWDM.

Assim como na arquitetura FWDM, redes ópticas elásticas baseadas em taxas de dados (Data-Rate Elastic Optical Network) permitem esquemas de modulação mono e multi-portadora, oferecendo taxas variáveis de bits e inteira compatibilidade com a atual arquitetura WDM. No entanto, a alocação de espectro através da utilização de grades de tamanho fixo prejudica tanto a acomodação quanto a eficiência espectral.

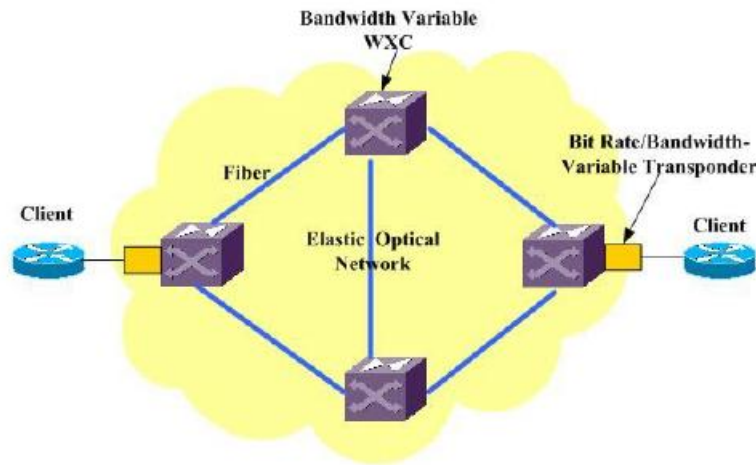
2.3 Arquiteturas de Redes Ópticas Elásticas Baseadas em OFDM

Em arquiteturas de redes ópticas elásticas baseadas em OFDM, caminhos de sub-comprimentos de onda ou de super-comprimentos de onda, com taxas múltiplas de dados, são viabilizados através de comutação e de agregação granular flexível no domínio espectral. Em operação, o transponder de taxa de dados/largura de banda variáveis deve alocar não mais que o número necessário de sub-portadoras para servir tráfegos de sub-comprimentos de onda. Além disso, cada nó de conector cruzado de comprimento de onda (WXC) deve garantir a largura de banda espectral correta para criar um caminho óptico fim-a-fim de tamanho apropriado para cada conexão [Zhang et al., 2013].

Se uma demanda é grande demais para ser tratada por um único canal óptico, super canais são construídos. Eles são compostos por múltiplos canais ligeiramente espaçados que atravessam a rede como uma entidade única. Esse conceito não deve ser confundido com o

de concatenação virtual, que permite que uma demanda em particular seja espalhada em vários canais independentes, caso em que bandas de guarda seriam ainda necessárias [Gerstel et al., 2012]. A Figura 2.2 ilustra a arquitetura de uma rede óptica elástica.

Figura 2.2 - Arquitetura de uma rede óptica elástica



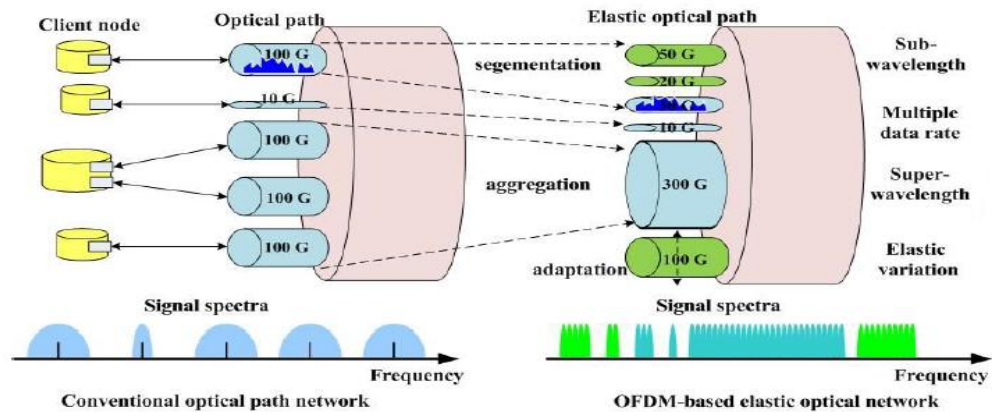
Fonte: Adaptada de [Jinno et al., 2009]

Alguns benefícios derivados do uso da tecnologia OFDM em arquiteturas de redes ópticas elásticas são, segundo [Zhang et al., 2013]:

- Acomodação flexível de tráfegos de taxas múltiplas de dados, bem como de sub ou super-comprimentos de onda;
- Alta eficiência espectral em decorrência da alocação flexível de espectro, ajustada à taxa de transmissão de dados;
- Taxas de linha alcançáveis adaptativas, bem como expansão e contração dinâmicas da largura de banda. Isso provém da possibilidade de ajuste dos formatos de modulação e do número de subportadoras;
- Possibilidade de virtualização da rede óptica através da ligação virtual viabilizada pelas subportadoras OFDM;
- Suporte para operações mais eficientes em termos energéticos;

A Figura 2.3 ilustra uma comparação entre caminhos ópticos elásticos e tradicionais.

Figura 2.3 - Comparação entre caminho óptico elástico e convencional



Fonte: [Jinno et al., 2009]

No âmbito de nó, novos transponders e conectores de banda variável precisam ser desenvolvidos para aplicação em redes ópticas elásticas. De forma semelhante, no âmbito de rede, os desafios consistem na abordagem de agrupamento de tráfego (traffic grooming), nas estratégias de sobrevivência, nos algoritmos de roteamento e alocação flexível de espectro, na virtualização de rede, na eficiência energética e nas tecnologias de plano de controle.

2.4 Tecnologias no Âmbito de Rede

Para habilitar a operação das redes ópticas elásticas, é necessário satisfazer de antemão algumas exigências:

- Especificação padrão de granularidade espectral (grid) para alocação flexível de espectro e comutação, a fim de reforçar conformidade entre diversas implementações.
- Novos algoritmos de roteamento e alocação flexível de espectro para planejamento de rede e alocação dinâmica de recursos.
- Estratégias de sobrevivência para geração de alta resiliência contra falhas de rede.
- Outras exigências incluiriam novos esquemas de gerenciamento e controle de rede, estratégias de otimização de eficiência energética e virtualização de rede, a fim de facilitar a operação e a manutenção da rede óptica elástica.

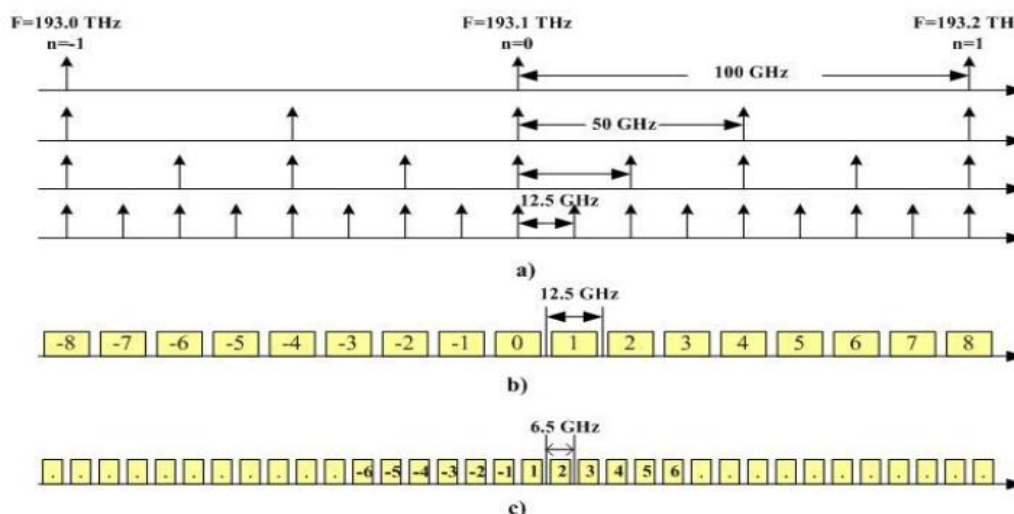
2.4.1 Especificação de Grades Flexíveis

Em redes ópticas WDM convencionais, as grades de frequência seguem o padrão ITU-T (Setor de Padronização de Telecomunicações do ITU) [ITU-T G.694.1, 2002]. O uso de grades rígidas, no entanto, é inconveniente em termos de uso de banda espectral, principalmente quando o volume de tráfego de dados origem-destino não é suficiente para preencher a capacidade de um comprimento de onda.

Assim, para viabilizar operações com taxas de dados variáveis e com uso flexível de banda, é necessário eleger um padrão de especificação flexível de espectro que permita tratar tipos variados de tráfego.

Em [Jinno et al., 2010], a proposta é que o espectro seja dividido em um número constante de slots de frequência, para os quais a largura espectral corresponderia àquela de uma subportadora OFDM. É possível que essa divisão seja realizada através de abordagens de grade de slot único ou de slot dividido com lateral dupla, conforme ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Esquemas de especificação de recursos espectrais: a) Padrão WDM ITU-T atual b) Slot único c) Slot dividido com lateral dupla



Fonte: [Jinno et al., 2010]

A abordagem de slot único garante compatibilidade com o padrão atual de grade do ITU-T. Portanto, o plano de numeração para os slots espectrais não muda nessa especificação. Cada grade possui granularidade de 12,5 GHz e a frequência central é utilizada.

Em contrapartida, a abordagem de slot dividido com lateral dupla reparte uma grade ITU-T de frequências em dois slots espectrais de 6,25 GHz, exigindo assim um sistema de numeração completamente diferente. Apesar de conferir granularidade mais fina e maior flexibilidade para a alocação de largura de banda, não existe compatibilidade desse esquema com o padrão ITU-T [Zhang et al., 2013].

Atualmente, trabalhos de padronização relacionados à especificação de grades flexíveis estão em andamento no ITU-T, onde ajustes de granularidade espectral mínima de 12,5 GHz para um slot e de comprimento de onda central alinhado para a frequência de 6,25 GHz estão sob discussão [ITU-T C1284, 2011] [ITU-T C1288, 2011].

2.4.2 Algoritmos de Roteamento e Alocação de Espectro

Algoritmos tradicionais para roteamento e atribuição de comprimento de onda em redes WDM não podem ser diretamente aplicados às redes ópticas elásticas. Novos algoritmos de roteamento e alocação de espectro (RSA) devem ser implementados para essa nova tecnologia.

Em RSA, a restrição de continuidade de comprimentos de onda de redes WDM convencionais é transformada em uma restrição de continuidade de espectro. Assim, uma requisição de conexão é satisfeita pela atribuição de algum número de subportadoras (slots) adjacentes [Christodoulopoulos et al., 2010]. Além disso, a característica de modulação adaptativa da tecnologia O-OFDM confere flexibilidade na escolha de formatos de modulação, permitindo a adaptação da largura espectral de um sinal conforme a distância de transmissão.

Para que a qualidade de sinal no receptor seja aceitável após o encaminhamento de várias sub-portadoras através de diversos WXC's, canais OFDM adjacentes devem ser separados por bandas de guarda, que normalmente ocupam um número inteiro de sub-portadoras.

Um número crescente de trabalhos de pesquisa têm investigado soluções para o problema de roteamento e alocação dinâmica de espectro em redes ópticas elásticas, com estudos também eventualmente relacionados à tecnologia de modulação adaptativa de acordo com as distâncias de transmissão.

Em razão da forte fragmentação espectral em links OFDM, decorrente do uso não-uniforme de recursos espectrais, políticas de alocação para minimização de fragmentação

[Takagi et al., 2011] e algoritmos de desfragmentação para reconfiguração de rede [Patel et al., 2011] têm sido propostos recentemente.

2.4.2.1 RSA Estático com Programação Linear Inteira

A solução do RSA estático lida com roteamento e alocação de recursos durante o estágio de planejamento de rede, em que uma matriz de tráfegos é conhecida *a priori* e dada em termos de capacidade espectral necessária. Para redução de complexidade, é possível decompor o problema de RSA em sub-problemas de roteamento e alocação de espectro, endereçando-os separadamente e sequencialmente. A solução sequencial, no entanto, mesmo que baseada em programação linear inteira, não garante o ótimo. Em RSA estático, as operações de roteamento e alocação de espectro são realizadas offline.

O RSA estático foi formulado como um problema de programação linear inteira que retorna a solução ótima através de alocação de espectro e roteamento combinados. O objetivo é minimizar o total de recursos espectrais utilizados, respeitando as restrições de continuidade de espectro e de atribuição de sub-portadoras adjacentes para cada conexão, em cada caminho óptico. Formulações ILP, apesar de garantirem soluções ótimas (ou quase-ótimas) para redes pequenas, perdem escalabilidade para redes maiores [Zhang et al., 2013].

2.4.2.2 Algoritmos Heurísticos para RSA Estático e Dinâmico

Alguns algoritmos heurísticos foram propostos recentemente a fim de servir requisições de conexão sequencialmente, a partir de abordagens realizadas em um ou dois passos, em cenários estáticos ou dinâmicos.

Na abordagem de dois passos, k caminhos mais curtos são pré-calculados para o problema de roteamento [Christodoulopoulos et al., 2010] [Wan et al., 2011]. Em [Jinno et al., 2010], um algoritmo de balanceamento de carga é utilizado para potencialmente otimizar a utilização dos recursos espectrais. Depois de concluído o roteamento, alguma política de alocação de espectro é utilizada para alocar a conexão que estiver sendo tratada. Algumas possibilidades são:

- First-Fit: Nesse esquema, com k caminhos mais curtos pré-calculados e a partir da menor rota candidata, realiza-se a busca em ordem ascendente de numeração de slots, a fim de encontrar a quantidade necessária de sub-portadoras

consecutivas para servir a conexão a ser encaminhada pela rede. Esse algoritmo é similar à política de first-fit utilizada para atribuição de comprimento de onda em redes WDM [Zhang et al., 2000].

- **Lowest Starting Slot:** Proposto por [Christodoulopoulos et al., 2010], esse algoritmo busca, para cada rota candidata, o primeiro conjunto disponível de slots consecutivos necessários para a requisição a ser encaminhada. Essa procura acontece em ordem ascendente de numeração de sub-portadoras. O caminho óptico escolhido é aquele cujo primeiro slot do conjunto de sub-portadoras a ser utilizado é o de menor numeração. Esse algoritmo favorece o preenchimento de vazios.
- **Smallest-Fit:** Essa política consiste na escolha do menor bloco de sub-portadoras livres, a fim de preencher vazios e reduzir a fragmentação espectral.
- **Exact-Fit:** Proposto por [Rosa et al., 2012], essa política busca pelo bloco com o número exato de slots necessários para cada conexão. Caso esse bloco não exista, o primeiro bloco grande o suficiente e disponível é utilizado para a alocação de espectro.
- **Random-Fit:** As conexões que chegam são alocadas em qualquer bloco espectral disponível e largo o suficiente para satisfazer a largura de banda requisitada. Essa política é utilizada para fins de comparação.

Antes de tratar matrizes estáticas de requisição durante o estágio de planejamento de rede, é extremamente importante considerar, no que se refere ao uso de recursos espectrais, o impacto da ordem pela qual os algoritmos heurísticos utilizados servem cada demanda das matrizes de tráfego. Algumas políticas de ordenação são propostas por [Christodoulopoulos et al., 2010]:

- **Ordenação por tamanho de requisição:** As demandas são organizadas em ordem decrescente de banda requisitada. Dessa forma, a prioridade de serviço é dada àquelas de maior largura de banda requisitada.

- Ordenação por caminho óptico mais longo: As demandas são organizadas em ordem decrescente de número de enlaces que seus caminhos mais curtos utilizam. Assim, a prioridade de tratamento pertence às conexões que utilizam os maiores caminhos.
- Ordenação por Simulated Annealing: Uma organização quase ótima é definida com base nessa meta-heurística.

Em relação à abordagem de um passo apenas, dois algoritmos foram propostos em [Wan et al., 2011]: MSP (Modified Dijkstra's Shortest Path) e SCPVS (Spectrum-Constraint Path Vector Searching). Ambos encontram a rota e o espectro contíguo disponível simultaneamente. O MSP é implementado pela verificação de espectro disponível no algoritmo de caminho mais curto de Dijkstra, enquanto o SCPVS constrói uma árvore vetorial de caminhos com restrições espectrais, a fim de encontrar a rota com o ótimo global.

2.4.2.3 RSA para Redes Persistentes

O ajuste de um caminho de proteção baseado em enlaces ou nós disjuntos é muito pertinente na configuração de caminhos ópticos em redes ópticas [Zhang et al., 2013]. Para maiores detalhes, [Patel et al., 2011] apresenta um algoritmo que efetua roteamento e alocação de espectro com proteção dedicada, com aproveitamento da mesma faixa espectral para proteção.

2.4.2.4 RSA Adaptativo Conforme Distâncias

O conceito de alocação adaptativa de espectro consiste na adaptação de formatos de modulação de níveis mais baixos (maior largura espectral) para caminhos longos e de formatos de modulação de níveis mais altos (largura espectral mais estreita) para caminhos mais curtos [Jinno et al., 2010].

A título de exemplo, em comparação com QPSK, 16-QAM carrega o dobro do número de bits por símbolo para a mesma taxa de dados, necessitando de apenas metade da largura de banda espectral. Em contrapartida, a tolerância sinal-ruído é menor, o que implica alcance mais curto. Assim, esquemas de alocação espectral adaptativa aumentam a eficiência espectral, já que a largura de banda atribuída para caminhos mais curtos é menor,

em decorrência da quantidade mais elevada de número de bits modulados por símbolo [Zhang et al., 2013].

Verificou-se que, com alocação espectral adaptativa conforme distâncias, a taxa de recursos espectrais utilizados reduz de 9 a 60%, comparativamente à operação de redes ópticas elásticas não-adaptativas em relação a distâncias. Essa economia de espectro depende da topologia de rede, do padrão de tráfego e da relação entre distância e largura espectral para diferentes formatos de modulação [Takagi et al., 2010] [Takagi et al., 2011]. Além do mais, os ganhos reais de eficiência espectral em redes ópticas elásticas também dependem de diversos outros elementos, entre eles dos valores de banda de guarda e de restrições de roteamento, como descrito em [Morea et al., 2011].

O problema de roteamento e alocação de espectro com modulação adaptativa conforme distâncias é o RSA com algumas exigências adicionais, que visam à seleção do formato de modulação e da largura espectral mais apropriados para determinada distância de transmissão. A distância que uma sub-portadora com um formato específico de modulação pode alcançar é determinada com base nos parâmetros de transporte de um caminho óptico, o que inclui distância de transmissão (degradação sinal-ruído), número de nós (conectores cruzados de comprimento de onda que são atravessados) e o formato do filtro óptico. A Figura 5 ilustra a relação entre a largura espectral de diferentes níveis de modulação e o alcance do caminho óptico [Zhang et al., 2013].

[Takara et al., 2010] e [Kozicki et al., 2010] abordam esquemas de alocação espectral adaptativa conforme distâncias utilizando tecnologias de transmissão mono e multi-portadoras.

3. TRABALHOS CORRELATOS

O objetivo desta seção é indicar as últimas e, no escopo deste trabalho, principais publicações acerca do problema de roteamento e alocação dinâmica de espectro em redes ópticas elásticas, apresentando os desafios e a progressão das pesquisas sobre o assunto.

3.1 RSA Dinâmico e Estático

Em [Christodoulopoulos et al., 2011], [Wang et al., 2011] e [Wei et al., 2010], uma abordagem estática para o problema de roteamento e atribuição de espectro foi utilizada para analisar um conjunto de propostas de heurísticas e de soluções exatas baseadas em programação linear inteira. O problema RSA estático de camada óptica foi estudado em [Christodoulopoulos et al., 2011], [Wang et al., 2011] e [Patel et al., 2011]. Em [Jinno et al., 2010], um esquema de alocação de recursos espectrais de forma adaptativa conforme distâncias foi proposto a fim de alocar conteúdo espectral mínimo para um caminho óptico, de acordo com as condições físicas de um canal (distância e número de nós). Em [Wan et al., 2011], muitos algoritmos RSA dinâmicos foram testados a fim de alcançar utilização espectral mais eficiente.

Nenhum dos artigos mencionados no parágrafo anterior consideram o problema de agregação de tráfego (traffic grooming). [Zhang et al., 2013] aborda esse problema e o define como segue: Uma topologia de rede pode ser representada por um grafo $G = (N, L)$, onde N é um conjunto de nós de rede com capacidade de realizar "traffic grooming" e L é um conjunto de links bidirecionais (com duas fibras unidirecionais). São definidos, para as mini-grades, o número total T (como $T = 200$ ou $T = 400$) e uma certa granularidade g ($g = 5\text{GHz}$, por exemplo). Também deve ser definido o número B de mini-grades consumidas por uma banda de guarda. Em "traffic grooming" dinâmico, as requisições de conexão chegam uma por vez e permanecem alocadas por certo período de tempo. Quando uma conexão chega, o plano de controle busca imediatamente alocá-la, executando roteamento e alocação de espectro.

[Beyranvand et al., 2014] investiga cenários variados de operação de redes ópticas elásticas, sob as perspectivas de nó e de rede. Inicialmente, os padrões de ocupação do espectro óptico em um nó particular são modelados por meio da utilização de uma cadeia de Markov contínua. Na perspectiva de nó, quatro cenários de operação são investigados, caracterizados por diferentes métodos de alocação de espectro. O procedimento para extração das equações de balanço global para as cadeias de Markov correspondentes a cada cenário de operação é também apresentado.

Além disso, em âmbito de rede, a operação é analisada através da análise da probabilidade de bloqueio fim a fim para dois modos de operação, caracterizados por presença ou ausência de capacidade de conversão de espectro nos nós intermediários.

Como a complexidade computacional do modelo exato aumenta exponencialmente em função do número de slots, algumas alternativas aproximadas foram propostas. Os resultados dos modelos exatos, das aproximações e das simulações foram comparados para problemas de pequena escala. As comparações demonstraram que simulações e modelo exato correspondem muito bem e que as aproximações são aceitáveis. Finalmente, as soluções aproximadas foram examinadas em cenários de maior escala, utilizando resultados de simulação como referência para comparação.

3.2 Políticas de Alocação Elástica de Espectro para Demandas de Tráfego Variantes no Tempo

[Christodoulopoulos et al., 2013] considera o problema de alocação de tráfego em uma rede óptica com flexibilidade espectral, em que o espectro alocado para uma conexão fim a fim pode mudar com o objetivo de se adaptar às taxas requisitadas de transmissão, variantes no tempo. Na estrutura de trabalho proposta, uma rota é atribuída a cada conexão e, sobre a rota determinada, uma frequência de referência é alocada através da utilização de um algoritmo RSA apropriado. Permite-se que o espectro utilizado em torno da frequência de referência sofra expansão ou contração para adaptação a flutuações de taxa de fonte.

Foram analisadas três políticas de expansão e contração para modificação do espectro alocado para cada conexão. Na primeira política, denominada Alocação Constante de Espectro (CSA - Constant Spectrum Allocation), um número particular de slots espectrais é determinado para uso exclusivo por cada conexão.

Já na segunda política, designada Alta Expansão e Baixa Contração Dinâmicas (DHL - Dynamic High Expansion - Low Contraction), o compartilhamento de espectro entre as conexões é permitido. Com DHL, se o aumento da taxa de transmissão é necessário para determinada conexão de um caminho óptico, o limite superior dos slots espectrais é incrementado até que seja alcançado um slot já ocupado por uma conexão que pertença ao espectro adjacente superior, em algum dos enlaces que perfazem o caminho óptico. Se ainda banda adicional é necessária, o limite inferior dos slots espectrais é aumentado até que, em algum enlace, uma conexão adjacente seja alcançada. Ocorre bloqueio para casos de taxas excessivas, em que não mais existem slots superiores ou inferiores livres para satisfazer taxas maiores para determinada conexão.

A terceira política, denominada Direção Alternada Dinâmica (DAD - Dynamic Alternate Direction), também viabiliza o compartilhamento do espectro entre conexões. No entanto, a busca dessa técnica é pelo uso simétrico do espectro em torno das frequências de referência. Assim, com DAD, uma conexão que necessite de um aumento na taxa de transmissão alterna entre incrementos dos limites superiores e inferiores dos slots espectrais, começando do extremo superior. Os incrementos continuam até que um slot já ocupado por outra conexão adjacente no espectro seja alcançado. A partir desse ponto, se slots adicionais ainda forem necessários, a expansão continua somente na direção possível, caso em que a simetria é perdida.

Durante a expansão de espectro de uma conexão, a política DAD sempre examina se é possível expandir na direção que utiliza menos slots espectrais. Dessa forma, slots que anteriormente limitavam a expansão em uma direção, quando liberados em determinado instante, possuem prioridade e são logo usados se necessário. Assim, vazios são preenchidos e a desfragmentação espectral é indiretamente realizada, como na política DHL. Ocorre bloqueio de taxa extra requisitada no caso de ausência de disponibilidade superior e inferior quando a conexão ainda necessita de mais slots. Quando uma conexão reduz seu número de slots em razão de uma redução em suas taxas de transmissão, os primeiros slots liberados são aqueles pertencentes à direção com maior número de slots utilizados. Assim, tanto expansão como contração produzem utilização simétrica do espectro para que a frequência central das conexões não mude frequentemente e permaneça próxima da frequência de referência quando o tráfego é baixo.

Fórmulas exatas foram dadas para cálculo de probabilidade de bloqueio para uma conexão e para a rede inteira tratada para a política CSA. Análises aproximadas correspondentes foram mostradas para as políticas DHL e DAD. Por fim, foi apresentado um algoritmo iterativo RSA que usa os modelos de bloqueio desenvolvidos a fim de minimizar o bloqueio médio da rede.

[Klinkowski et al., 2013] estuda a adaptação do caminho de slots espectrais ocupados sob condição de demandas variadas de tráfego em redes ópticas elásticas com grades flexíveis. A capacidade de alocação elástica de espectro é explorada através do estudo da eficiência de três esquemas alternativos de alocação espectral. Para tal finalidade, um problema especial de roteamento e alocação de espectro foi formulado e resolvido tanto por Programação Linear Inteira (PLI) como por heurísticas eficientes. Na alocação de espectro dependente do tempo, as taxas requisitadas por cada conexão variam temporalmente. Foram três os esquemas gerais estudados.

No primeiro, denominado Fixo, tanto a frequência central atribuída quanto a largura espectral são invariantes no tempo. Em cada período, as demandas podem utilizar tanto o espectro inteiro alocado, como apenas uma fração dele, de acordo com a taxa de bits requisitada para aquele período. No segundo esquema, designado Semi-Elástico, a frequência central atribuída é fixa, no entanto o espectro alocado pode variar. Assim, em cada intervalo de tempo, a porção espectral alocada corresponde à fração de espectro efetivamente utilizada.

O terceiro esquema, denominado Elástico, foi dividido em dois casos. Nesse esquema, tanto a frequência central atribuída, quanto a largura espectral são sujeitos a mudanças em cada intervalo de tempo. Os dois casos dessa última forma de alocação diferem quanto ao grau de flexibilidade dos movimentos da frequência central. No primeiro caso, denominado Expansão/Redução Espectral, estudado por [Christodoulopoulos et al., 2013] e mencionado anteriormente, a intersecção de duas alocações espectrais de uma conexão consecutivas no tempo é igual a menor delas. Assim, o movimento da frequência central é pequeno e limitado à faixa da maior das alocações. Já no segundo caso, bem menos restritivo e designado Realocação Espectral, qualquer parte do espectro pode ser posteriormente alocada para uma conexão que ocupe qualquer faixa de slots. Assim, os movimentos da frequência central não são limitados.

Os resultados mostraram que a alocação elástica de espectro com esquema de Expansão/Redução é uma alternativa muito forte para explorar com eficiência a elasticidade em redes de grades flexíveis.

3.3 Roteamento Híbrido de Múltiplos Percursos (Hybrid Single-/Multi-Path Routing)

Quase todos os trabalhos em redes O-OFDM são baseados em roteamento de caminho único. No entanto, sabe-se que roteamento baseado em múltiplos caminhos produz vazão aumentada, com uso mais eficiente dos recursos de rede [Mukherjee., 2006] [Bertsekas et al., 1992]. Muitos protocolos de roteamento padronizados, como OSPF (Open Shortest Path First) [Moy et al., 1998] e RIP (Routing Information Protocol) [Thaler et al., 2000], utilizam roteamento de múltiplos caminhos. A possibilidade de inclusão desse tipo de roteamento para suporte a sistemas de transmissão SONET/SDH também já havia sido considerada por alguns pesquisadores [Cavendish et al., 2002] [Huang et al., 2011].

Recentemente, uma abordagem de múltiplos caminhos foi proposta por [Dahlfort et al., 2012]. A proposta consistia na divisão de cada requisição em vários sub-fluxos para

transmissão em porções não contíguas do espectro. No entanto, por ainda limitar o roteamento de todos os sub-fluxos de uma requisição ao mesmo caminho óptico, esse tipo de abordagem não explora todos os benefícios que a alocação de conexões em múltiplos caminhos pode trazer.

[Zhu et al., 2013] propõe vários algoritmos que incorporam uma abordagem de roteamento híbrido (caminhos únicos e múltiplos) para provisão dinâmica de serviço. Nas simulações realizadas, os esquemas HSMR propostos (Hybrid Single/Multi-Path Routing) reduziram a probabilidade de bloqueio do problema de roteamento, modulação e atribuição de espectro (RMLSA), relativamente a outros dois algoritmos: Roteamento com caminho único (Single-Path Routing) e com espectro dividido ao longo do mesmo caminho (Split Spectrum Routing). O algoritmo foi também avaliado em função de outras métricas como vazão da rede e taxa de fragmentação. O fornecimento de serviço em múltiplos caminhos, no entanto, introduz atrasos diferenciais entre rotas, o que pode levar à necessidade de buffers adicionais nos nós de destino. Os autores não abordam a maneira de tratar esse problema.

3.4 Desfragmentação Não-Disruptiva para Redes Ópticas Elásticas

Alguns estudos têm explorado fortemente alguns esquemas de desfragmentação. Em [Patel et al., 2011], modelos proativos são estudados com o objetivo de consolidar o uso de espectro de caminhos ópticos existentes através de um número mínimo de reconfigurações. As soluções heurísticas exploram tanto re-roteamento como realocação de espectro.

Em [Takagi et al., 2011], esquemas de desfragmentação reativa são considerados. Nessa abordagem, apenas caminhos ópticos que conflitem com a rota candidata para a requisição bloqueada são submetidos à re-roteamento e à realocação de espectro. Em [Castro et al., 2012], para diminuir o impacto de disrupções, o re-roteamento não é realizado.

[Wang et al., 2013] propõe uma tecnologia de desfragmentação não disruptiva denominada Hitless Spectrum Reallocation [Gerstel et al., 2012] [Gerstel et al., 2010], Push-Pull Technique ou Hitless Optical Path Shift (HOPS), para aumento de ganhos de provisionamento através da redução dos índices fragmentação da rede. HOPS permite que caminhos ópticos estabelecidos sejam deslocados sobre porções espectrais livres e contíguas, sem nenhum tipo de superposição. Para qualquer caminho óptico, não há mudança de rota nem interferência em caminhos estabelecidos. Assim, uma série de

algoritmos HOPS foram desenvolvidos baseados em estratégias reativas e proativas para redução das frequências de bloqueio de banda.

Desfragmentações proativas são executadas periodicamente para limpar fragmentos espectrais na rede. Um algoritmo guloso simples é capaz de alcançar o estado em que nenhum caminho óptico pode ser levado a um espectro menor (estado delta). O procedimento consiste em, inicialmente, colocar os caminhos ópticos em ordem crescente de ocupação espectral e então deslocar cada caminho nessa ordem até o menor bloco espectral possível utilizando HOPS. Uma alternativa contra a realização de um número excessivo de desfragmentações, indesejável e desnecessário, é a definição de um período para elas, em função do número de requisições por exemplo.

Outra alternativa para a quantidade excessiva de desfragmentações é o uso de HOPS reativo, que garante minimização de custos e alocação de conexão se existirem recursos espectrais suficientes que possam ser aproveitados via HOPS, além de ocorrência de atuação apenas quando absolutamente indispensável.

As análises e os resultados de simulação mostraram que, para backbones típicos operando com baixas cargas, o uso do esquema ótimo de desfragmentação reativa proposto faz com que 98% do espectro que de outra forma seria bloqueado seja aproveitado. Os custos de desfragmentação em termos de atraso e impacto em conexões existentes foram pequenos. Verificou-se também que maior eficiência espectral não implica necessariamente mais operações de desfragmentação. De fato, é possível melhorar a eficiência em termos de bloqueio de banda mantendo mínimos os custos dessa operação.

4. SIMULAÇÃO

Algumas simulações foram realizadas em Matlab para comparação de diferentes algoritmos para roteamento e alocação de espectro. A escolha por tal ferramenta se baseia no *know-how* já existente no grupo de pesquisadores do LPRAD/PPGEE/UFPA. Entretanto, tais simulações poderiam ser realizadas em diversas outras ferramentas equivalentes, sem prejuízo dos resultados obtidos. Esta seção apresenta os principais detalhes a respeito das implementações realizadas.

4.1 Cenário

Os eventos dinâmicos foram implementados em duas topologias: Um subconjunto de 6 nós da Cost239 e um subconjunto aleatório de 7 nós, como ilustrado nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente. Como o principal propósito das simulações era o de comparar diferentes políticas de alocação de espectro em roteamentos baseados em critérios de carga e de fragmentação externa, nenhuma forma de seleção adaptativa de níveis de modulação conforme distâncias foi configurada para operação.

Figura 4.1 - O subconjunto de 6 nós da topologia da rede Cost239 usado para obtenção dos resultados numéricos

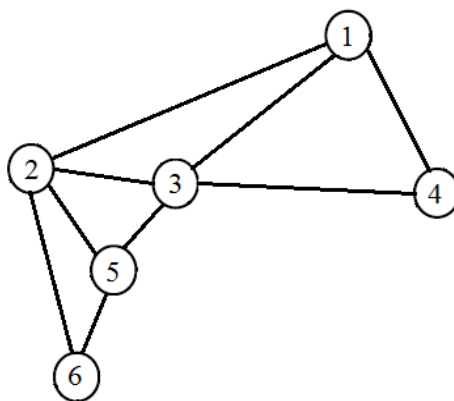
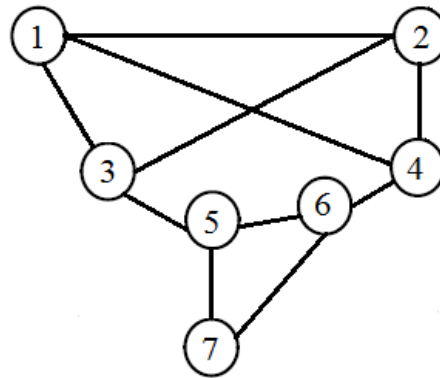


Figura 4.2 - A topologia aleatória de 7 nós usado para obtenção dos resultados numéricos



Para cada requisição origem-destino, os algoritmos selecionam uma rota conforme algum critério e, então, a conexão que chega é alocada em um dos conjuntos disponíveis de slots contíguos de frequência, conforme a técnica de alocação de espectro escolhida e em obediência a todas as restrições. Para cada par nó-origem, nó-destino, as rotas são escolhidas a partir de uma lista criada pelo algoritmo de k caminhos mais curtos de Yen.

A separação entre caminhos espectrais adjacentes, ou seja, o número de slots (B) que compõem a banda de guarda foi fixado em uma unidade ($B = 1$). Cada um dos oito tipos de conexões foi representado por um dos valores do conjunto $C = \{4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16\}$. Os elementos do conjunto C são o número de slots adjacentes necessários para satisfazer requisições de banda. Para cada um dos tipos de requisição, configurou-se um padrão de chegada que obedece a uma distribuição de Poisson.

Em cada um dos instantes de tempo das simulações, todos os tipos de requisições que chegavam eram associados a um par origem-destino conforme uma distribuição uniforme. Além disso, quatrocentos (400) slots espectrais foram definidos para cada link de fibra óptica e o tempo de serviço de cada conexão seguiu funções exponenciais de Poisson.

4.2 Restrições

Existem muitas restrições a serem observadas em problemas de roteamento e alocação de espectro em redes ópticas elásticas, conforme listado abaixo:

- As demandas de tráfego para um par origem-destino devem ser exatamente adicionadas na fonte e entregues no destino.
- Um slot em uma fibra pode ser usado no máximo para servir um caminho espectral.

- Cada caminho óptico deve utilizar os mesmos slots ao longo de todo o percurso.
- Caminhos espectrais adjacentes devem ser separados por uma banda de guarda, especificada por um número inteiro de slots.
- Os slots empregados no mesmo caminho óptico devem ser consecutivos no domínio da frequência.

4.3 Técnicas de Roteamento Utilizadas

A comparação entre as políticas de roteamento foi realizada em três técnicas de roteamento diferentes, conforme especificado nas subsecções que seguem.

4.3.1 Caminhos Mais Curtos com Máximo Reuso Espectral (SPSR - Shortest Path with Maximum Spectrum Reuse)

Para determinado conjunto de pares de requisições de caminhos ópticos, o reuso de slots pode ser incrementado pela redução dos máximos índices das subportadoras. O algoritmo SPSR, proposto em [Wang et al., 2011], combina roteamento de caminhos mais curtos com um algoritmo de máximo reuso espectral. Assim, requisições simultâneas de caminho espectral são primeiro ordenadas de acordo com o tamanho da demanda de tráfego, de forma que demandas maiores tenham prioridade de alocação.

4.3.2 Atribuição Espectral Baseada em Balanceamento de Cargas (BLSA - Balanced Load Spectrum Assignment)

Proposto em [Wang et al., 2011], a técnica BLSA determina a rota através de um balanceamento de cargas, a fim de diminuir o máximo índice de subportadora numa fibra. Inicialmente, um algoritmo de k-caminhos mais curtos é utilizado para gerar k caminhos para cada par de nós origem-destino. Depois, a análise de carga das fibras determina o caminho. Assim, a máxima carga da fibra (MFL) de cada caminho óptico é tomada e a rota escolhida é aquela que apresenta a menor MFL.

Finalmente, depois da definição de rota, uma das possíveis estratégias de alocação de espectro é aplicada (First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit, Random-Fit, ...). Em caso de requisições simultâneas, demandas maiores de tráfego possuem maior prioridade de alocação.

Conforme mostrado na Equação (1), é possível estimar a carga (FL) de determinada fibra utilizando o número de caminhos ópticos (I), o tamanho da banda de guarda (GC) e a soma do tamanho de todas as requisições (SUM).

$$FL = SUM + GC \times (I-1) \quad (1)$$

4.3.3 Atribuição Espectral Baseada em Fragmentação Externa (FA - Fragmentation Aware Assignment)

Apesar de não estar diretamente relacionada à utilização espectral, a fragmentação pode ser utilizada como um parâmetro decisivo para roteamento. O processo de iniciar e terminar conexões em um padrão não-uniforme de atribuição de banda gera um perfil espectral de vazios intercalados. Obviamente, a fragmentação do espectro torna-se um problema quando recursos livres são quebrados em porções menores que as requisições de banda que chegam.

No algoritmo FA desenvolvido, a formulação de fragmentação externa F_{ext} , mostrada na Equação (2), foi utilizada para selecionar um dos k caminhos mais curtos gerados pelo algoritmo de Yen. Um caminho é selecionado pela estimativa da fragmentação de cada fibra ao longo de uma rota.

Na Equação (2), LFB é o número de slots do maior bloco espectral não ocupado e TF é a soma de todos os slots livres.

$$F_{ext} = 1 - (LFB/TF) \quad (2)$$

Assim, a máxima fragmentação de fibra (MFF) de cada possível caminho deve ser tomada e o caminho escolhido é aquele que apresenta a menor MFF. Depois da definição da rota, alguma estratégia de alocação espectral é utilizada (First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit, Random-Fit, ...). Para o caso de requisições simultâneas, demandas maiores de tráfego possuem maior prioridade de alocação.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção, são apresentados os resultados das comparações realizadas entre diversas políticas de roteamento e alocação de espectro para Redes Ópticas Elásticas, obtidos a partir dos dois simuladores desenvolvidos para essas finalidades.

5.1 Comparação Entre As Técnicas de Roteamento Implementadas

Nas Tabelas 5.1 e 5.2, em cada técnica de roteamento especificada nas colunas, cada valor associado às cargas de requisição (IRL - Incoming Requests Load) representa a média de frequência de bloqueio para cinco simulações. A IRL foi definida como o produto entre o tempo médio de serviço, o número de requisições de conexão e a taxa média de chegada de requisições. Em cada linha das tabelas apresentadas, essa carga é mostrada normalizada em relação à IRL de uma das linhas.

A Tabela 5.1 é referente ao subconjunto de 6 nós da topologia da rede Cost239, enquanto a Tabela 5.2 refere-se à topologia aleatória de 7 nós. A alocação de espectro, nos dois casos, foi realizada através da técnica First-Fit. As últimas linhas apresentam médias gerais para 60 simulações implementadas. As Figuras 5.1 e 5.2 ilustram os dados apresentados na Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente, a fim de comparar o desempenho de técnicas de roteamento baseadas em balanceamento de cargas, fragmentação externa e caminhos mais curtos.

Tabela 5.1 – Médias de frequência de bloqueio associadas a técnicas de roteamento baseadas em balanceamento de cargas (BLSA), fragmentação externa (FA) e caminhos mais curtos (SPSR) para a topologia de 6 nós.

IRL Normalizada	SPSR	BLSA	FA
1	0.0751	0	0.0121
1.5	0.1214	0.0110	0.0563
2.5	0.1302	0.0155	0.0673
4	0.1501	0.0254	0.0905
Média Geral	0.1192	0.0130	0.0565

Tabela 5.2 – Médias de frequência de bloqueio associadas a técnicas de roteamento baseadas em balanceamento de cargas (BLSA), fragmentação externa (FA) e caminhos mais curtos (SPSR) para a topologia de 7 nós

IRL Normalizada	SPSR	BLSA	FA
0.2	0.0413	0	0.0052
0.4	0.1731	0.0116	0.0775
1	0.1774	0.0426	0.1214
2	0.1899	0.0504	0.1331
Média Geral	0.1454	0.0261	0.0843

Figura 5.1 - Comparação entre frequências de bloqueio associadas a técnicas de roteamento baseadas em balanceamento de cargas (BLSA), fragmentação externa (FA) e caminhos mais curtos (SPSR) para a topologia de 6 nós.

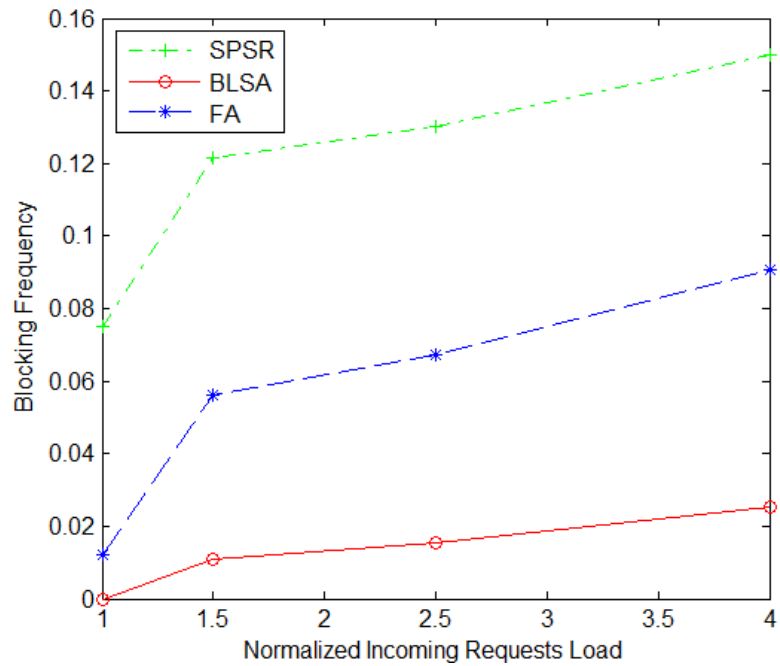
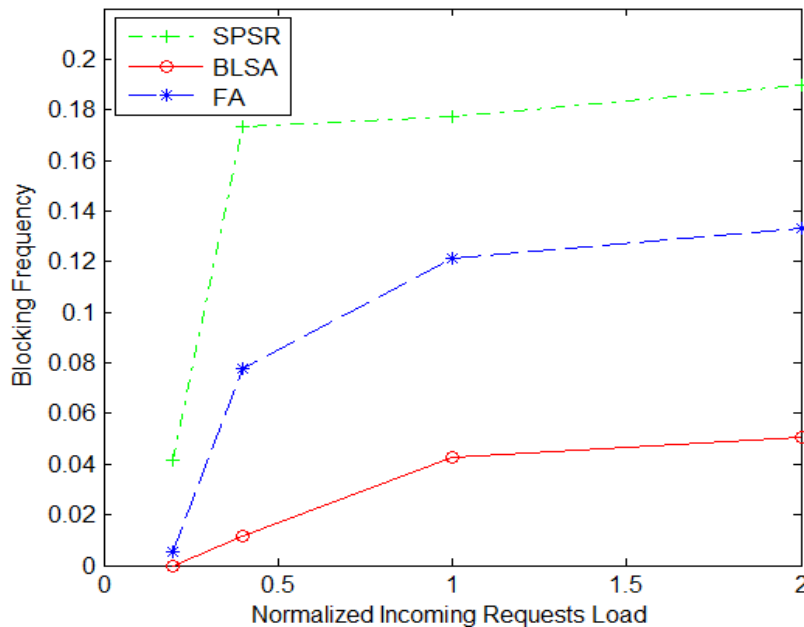


Figura 5.2 - Comparação entre frequências de bloqueio associadas a técnicas de roteamento baseadas em balanceamento de cargas (BLSA), fragmentação externa (FA) e caminhos mais curtos (SPSR) para a topologia de 7 nós.



5.2 Comparação Entre As Políticas de Alocação de Espectro

As tabelas 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam frequências médias de bloqueio para simulações implementadas em cada uma das três técnicas de roteamento, para cada

uma das topologias utilizadas para as avaliações numéricas. Cada valor associado a uma IRL, em qualquer uma das tabelas, representa a média de cinco simulações realizadas para a política de alocação de espectro especificada em coluna, a fim de comparar as performances das estratégias First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit e Random-Fit. As últimas linhas correspondem a médias gerais.

Tabela 5.3 – Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro para roteamento por caminhos mais curtos na topologia de 6 nós.

IRL Normalizada	SPSR			
	First-Fit	Smallest-Fit	Exact-Fit	Random-Fit
1	0.0623	0.0636	0.0623	0.0609
1.6	0.1272	0.1272	0.1272	0.1285
4	0.1497	0.1483	0.1483	0.1510
12	0.1550	0.1563	0.1550	0.1603
Média Geral	0.1235	0.1238	0.1232	0.1252

Tabela 5.4 – Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro para roteamento por caminhos mais curtos na topologia de 7 nós.

IRL Normalizada	SPSR			
	First-Fit	Smallest-Fit	Exact-Fit	Random-Fit
0.3	0.1364	0.1395	0.1395	0.1519
0.4	0.2124	0.2031	0.2093	0.2078
1	0.2264	0.2279	0.2264	0.2326
1.6	0.2589	0.2543	0.2543	0.2543
Média Geral	0.2085	0.2062	0.2074	0.2116

Figura 5.3 - Comparação de performance entre as estratégias First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit e Random-Fit para roteamento baseado em caminhos mais curtos, no subconjunto de 6 nós da Cost239.

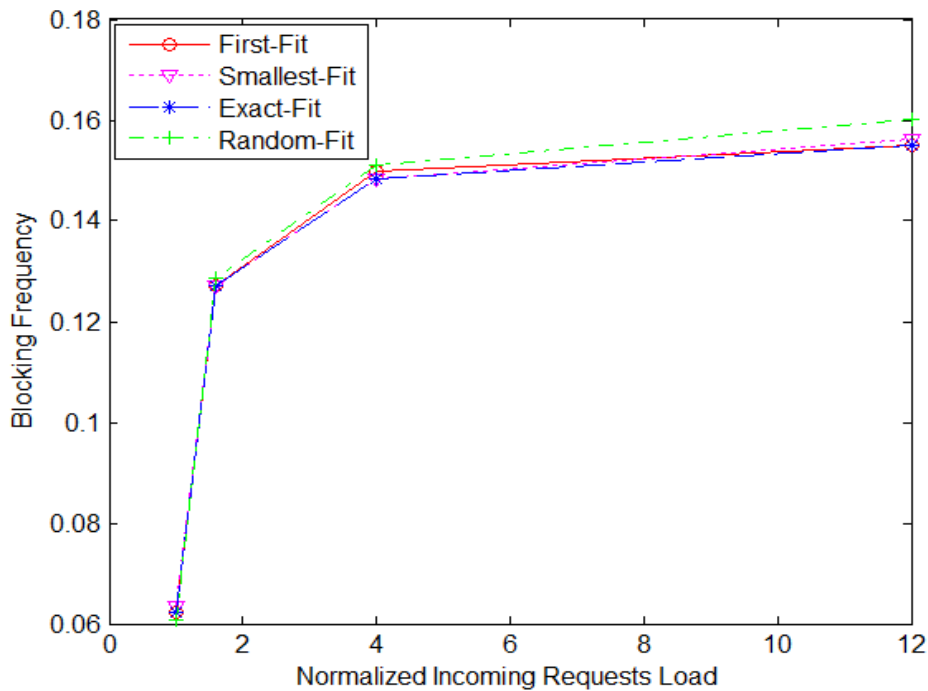


Figura 5.4 - Comparação de performance entre as estratégias First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit e Random-Fit para roteamento baseado em caminhos mais curtos, na topologia de 7 nós.

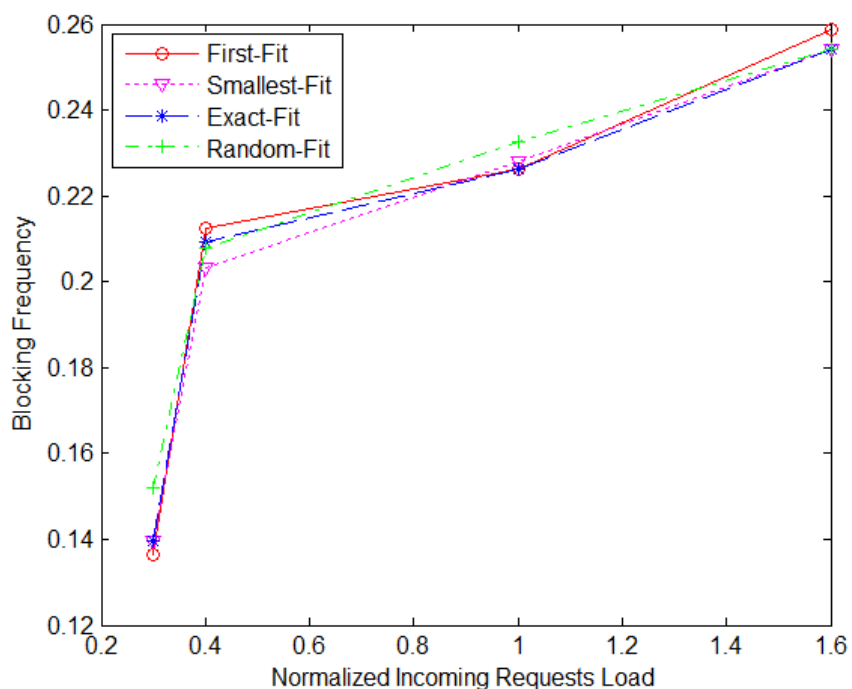


Tabela 5.5 – Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro para roteamento por balanceamento de cargas na topologia de 6 nós.

IRL Normalizada	BLSA			
	First-Fit	Smallest-Fit	Exact-Fit	Random-Fit
1	0	0	0	0.0053
1.6	0.0106	0.0066	0.0093	0.0397
4	0.0344	0.0371	0.0411	0.0689
12	0.0517	0.0543	0.0490	0.0570
Média Geral	0.0242	0.0245	0.0248	0.0427

Tabela 5.6 – Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro para roteamento por balanceamento de cargas na topologia de 7 nós.

IRL Normalizada	BLSA			
	First-Fit	Smallest-Fit	Exact-Fit	Random-Fit
0.3	0.0109	0.0078	0.0078	0.0155
0.4	0.0217	0.0233	0.0171	0.0341
1	0.0372	0.0403	0.0372	0.0450
1.6	0.0434	0.0496	0.0419	0.0620
Média Geral	0.0283	0.0302	0.0260	0.0391

Figura 5.5 - Comparação de performance entre as estratégias First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit e Random-Fit para roteamento baseado em balanceamento de cargas, no subconjunto de 6 nós da Cost239.

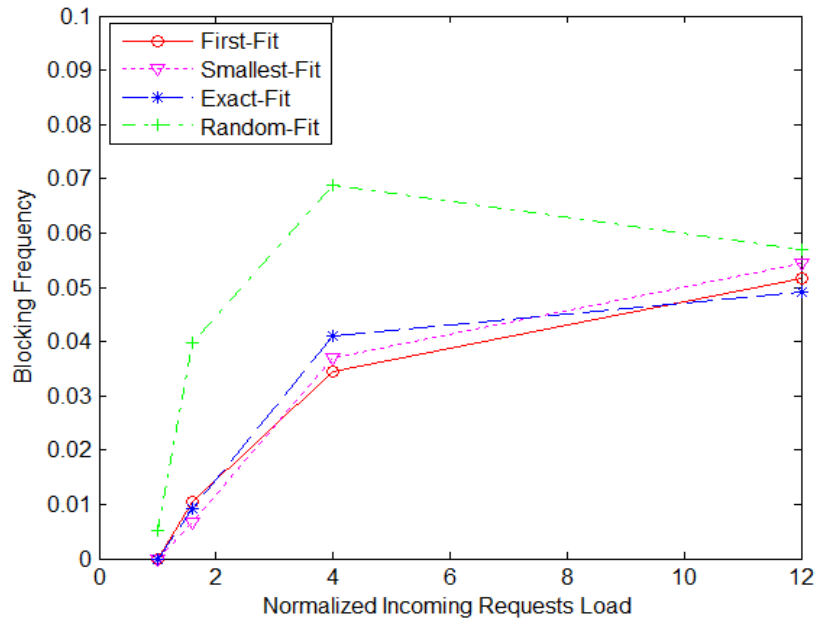


Figura 5.6 - Comparação de performance entre as estratégias First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit e Random-Fit para roteamento baseado em balanceamento de cargas, na topologia de 7 nós.

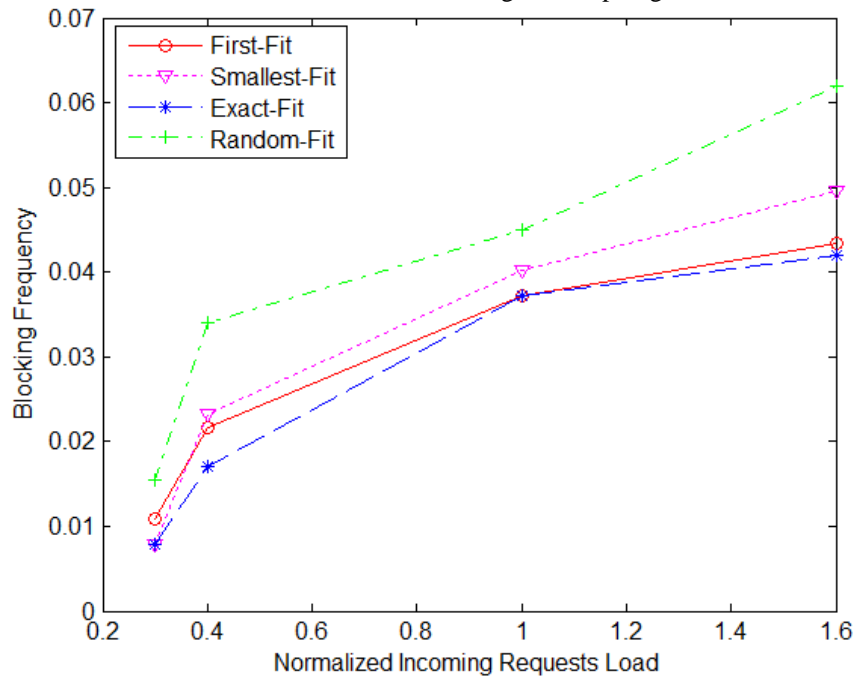


Tabela 5.7 – Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro para roteamento por fragmentação externa na topologia de 6 nós.

IRL Normalizada	FA			
	First- Fit	Smallest-Fit	Exact- Fit	Random-Fit
1	0.0159	0.0172	0.0265	0.0556
1.6	0.0583	0.0993	0.0623	0.1099
4	0.0954	0.0980	0.0848	0.1285
12	0.1060	0.1060	0.1113	0.1192
Média Geral	0.0689	0.0801	0.0712	0.1033

Tabela 5.8 – Médias de frequência de bloqueio para diferentes políticas de alocação de espectro para roteamento por fragmentação externa na topologia de 7 nós.

IRL Normalizada	FA			
	First-Fit	Smallest-Fit	Exact-Fit	Random-Fit
0.3	0	0.0527	0.0465	0.0667
0.4	0.0078	0.1023	0.0992	0.1256
1	0.0248	0.1302	0.1442	0.1442
1.6	0.0667	0.1364	0.1349	0.1643
Média Geral	0.0248	0.1054	0.1062	0.1252

Figura 5.7 - Comparação de performance entre as estratégias First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit e Random-Fit para roteamento baseado em fragmentação externa, no subconjunto de 6 nós da Cost239.

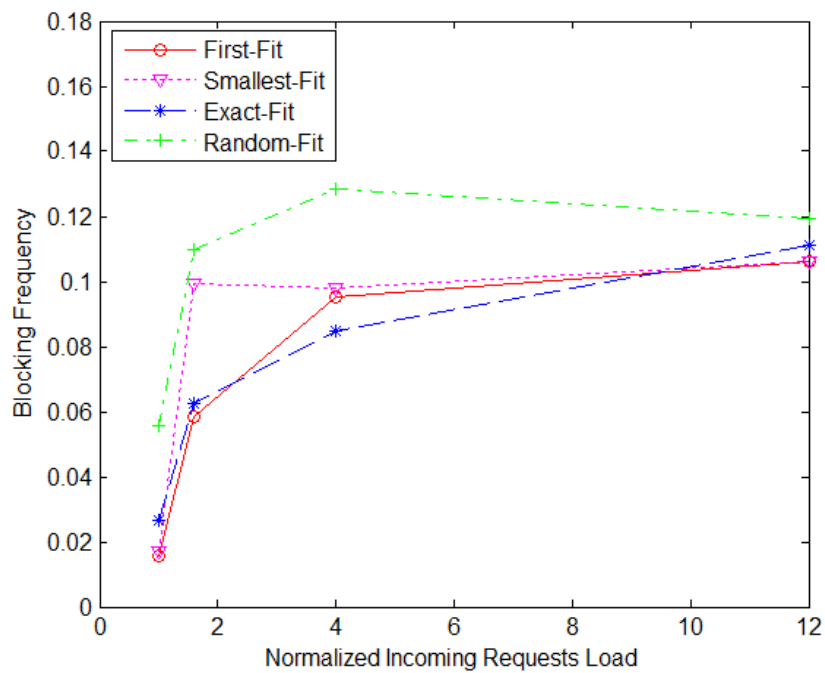
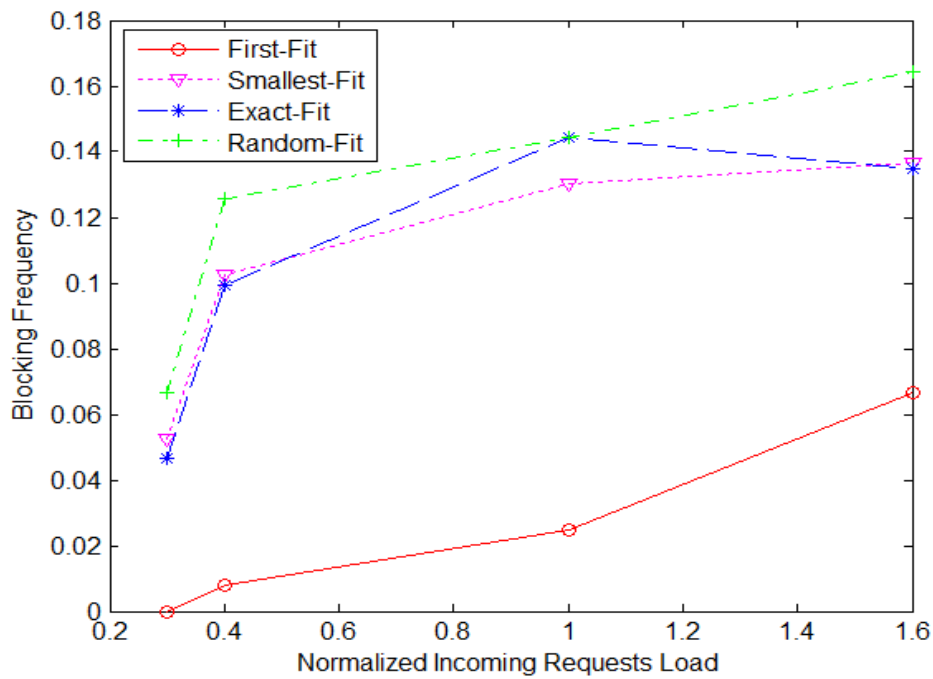


Figura 5.8 - Comparação de performance entre as estratégias First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit e Random-Fit para roteamento baseado em fragmentação externa, na topologia de 7 nós.



As Figuras 5.3, 5.5 e 5.7 ilustram os dados mostrados nas Tabelas 5.3, 5.5 e 5.7, respectivamente, a fim de comparar as performances das políticas de alocação de espectro (First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit e Random-Fit) no subconjunto de 6 nós da Cost239. As Figuras 5.4, 5.6 e 5.8 representam as informações das Tabelas 5.4, 5.6 e 5.8, respectivamente, a fim de comparar as políticas de alocação de espectro na topologia de 7 nós proposta.

6. CONCLUSÃO

Nesta seção, são apresentadas as considerações finais, as principais contribuições, as perspectivas e os possíveis desdobramentos para este trabalho.

6.1 Considerações Finais

Como efeitos não-lineares de camada física não foram incluídos nas simulações de rede implementadas, as técnicas de balanceamento de cargas e de fragmentação externa superaram fortemente a de caminhos mais curtos, com resultados muito melhores para a alocação espectral baseada em balanceamento de cargas.

No entanto, é essencial a busca contínua por melhores formulações para o problema de fragmentação espectral, a fim de otimizar a performance de algoritmos que trabalham com esse parâmetro como fator decisivo de roteamento. Nos algoritmos desenvolvidos, apenas o conceito de fragmentação externa foi explorado.

A separação entre as curvas de performance das políticas First-Fit, Smallest-Fit, Exact-Fit e Random-Fit foi menor no roteamento baseado em caminhos mais curtos (SPSR) que naqueles implementados por balanceamento de cargas ou fragmentação externa.

No geral, a política First-Fit de alocação espectral apresentou os melhores resultados em termos de frequência de bloqueio. No entanto, como isso não aconteceu sempre, um número maior de simulações em outros cenários é ainda necessário para chegar a uma conclusão mais forte a respeito desse assunto.

6.2 Principais Contribuições

- Primeira análise em âmbito de rede de duas políticas de alocação de espectro: "Exact-Fit" e "Smallest-Fit".
- Desenvolvimento de simulador baseado em balanceamento de cargas para suporte a estudos futuros mais completos e precisos acerca da operação de redes ópticas elásticas em cenários e condições variadas.
- Análises realizadas levando em consideração a grande diversidade de requisições de camada de aplicação, em cenários reais, com capacidade espectral consistente e taxas de chegada e tempos de serviço apropriados.

6.3 Trabalhos Futuros

Projetos Futuros devem incluir estudos aprofundados no que se refere à correlação entre fragmentação e probabilidade de bloqueio, assim como à implementação de outros algoritmos de roteamento e alocação de espectro.

Entre os trabalhos futuros previstos, é possível destacar:

- Introdução de adaptação de nível de modulação conforme distâncias às simulações.
- Aplicação periódica de regeneradores de alinhamento espectral em nós de gargalo.
- Implementação de técnicas híbridas de alocação de espectro (Hybrid Single-/Multi Path Routing)
- Implementação de alocação elástica de espectro com esquema de Expansão/Redução, para explorar com maior eficiência a elasticidade em grades flexíveis com demandas de tráfego variantes no tempo.

REFERÊNCIAS

K. Sato and H. Hasegawa, "Optical Networking Technologies That Will Create Future Bandwidth-Abundant Networks [Invited]," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 1, no. 2, pp. 81-93, July 2009.

M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 8, pp. 138-145, August 2010.

A. Klekamp, O. Rival, A. Morea, R. Dischler, and F. Buchali, "Transparent WDM Network with Bitrate Tunable Optical OFDM Transponders," *Proc. OFC/NFOEC 2010*, Paper NTuB5.

A. Nag, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Optical Network Design With Mixed Line Rates and Multiple Modulation Formats," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 466-475, February 2010.

G. Zhang, M. Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking", *IEEE Communications Surveys & Tutorials.*, vol. 15, no.1, pp. 65-86, First Quarter 2013.

M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, "Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies," *IEEE Communications Magazine.*, vol. 47, no. 11, pp. 66-73, November 2009.

M. Jinno, H. Takara, and B. Kozicki, "Concept and Enabling Technologies of Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network (SLICE)", *Proc. Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP)*, November 2009, Paper FO2.

A. N. Patel, P. N. Ji, J. P. Jue, and T. Wang, "Routing, Wavelength Assignment, and Spectrum Allocation in Transparent Flexible Optical WDM (FWDM) Networks," *Photonics in Switching, OSA Technical Digest 2010*, Paper PDPWG1.

O. Rival and A. Morea, "Elastic Optical Networks with 25-100G Format-Versatile WDM Transmission Systems," Proc. OECC2010, Paper 7A2-3.

G. Zhang, M. Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking", IEEE Communications Surveys & Tutorials., vol. 15, no.1, pp. 65-86, First Quarter 2013.

G. Zhang, M. Leenheer, and B. Mukherjee, "Optical Traffic Grooming in OFDM-Based Elastic Optical Networks", J. Opt. Commun. Netw., vol. 4, no.11, pp. B.17-B.25, November 2012.

A. Morea, A. F. Chong, and O. Rival, "Impact of Transparent Network Constraints On Capacity Gain of Elastic Channel Spacing", Proc. OFC/NFOEC, 2011, JWA62.

G. Zhang, M. Leenheer, and B. Mukherjee, "Optical Traffic Grooming in OFDM-Based Elastic Optical Networks", J. Opt. Commun. Netw., vol. 4, no.11, pp. B.17-B.25, November 2012.

G. Zhang, M. Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking", IEEE Communications Surveys & Tutorials., vol. 15, no.1, pp. 65-86, First Quarter 2013.

O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. J. Ben Yoo, "Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?", IEEE Communications Magazine, pp. 12-20, February 2012.

M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, "Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies," IEEE Communications Magazine., vol. 47, no. 11, pp. 66-73, November 2009.

G. Zhang, M. Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking", IEEE Communications Surveys & Tutorials., vol. 15, no.1, pp. 65-86, First Quarter 2013.

ITU-T G.694.1 "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," 2002.

M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 8, pp. 138-145, August 2010.

G. Zhang, M. Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking", *IEEE Communications Surveys & Tutorials.*, vol. 15, no.1, pp. 65-86, First Quarter 2013.

ITU-T C1284, "Proposal of subjects to be discussed regarding flexible grids," January 2011.

ITU-T C1288, "Extension of Rec. G.694.1 by a new clause to address flexible frequency grids," January 2011.

M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 8, pp. 138-145, August 2010.

K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. A. Varvarigos, "Routing and Spectrum Allocation in OFDM-based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation," *Proc. GlobeCom 2010*.

T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Sone, B. Kozicki, A. Hirano, and M. Jinno, "Dynamic Routing and Frequency Slot Assignment for Elastic Optical Path Networks that Adopt Distance Adaptive Modulation," *Proc. OFC/NFOEC 2011*, Paper OTuI7.

A. N. Patel, P. N. Ji, J. P. Jue, and T. Wang, "Survivable Transparent Flexible Optical WDM (FWDM) Networks," *Proc., OFC/NFOEC 2011*, Paper OTuI2.

G. Zhang, M. Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking", *IEEE Communications Surveys & Tutorials.*, vol. 15, no.1, pp. 65-86, First Quarter 2013.

K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. A. Varvarigos, "Routing and Spectrum Allocation in OFDM-based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation," *Proc. GlobeCom 2010*.

X. Wan, L.Wang, N. Hua, H. Zhang, and X. Zheng, "Dynamic Routing and Spectrum Assignment in Flexible Optical Path Networks," *Proc. OFC/NFOEC 2011*, Paper JWA55.

M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 8, pp. 138-145, August 2010.

H. Zhang, J. P. Jue, B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks," *Optical Networks Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 47- 60, January 2000.

K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. A. Varvarigos, "Routing and Spectrum Allocation in OFDM-based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation," *Proc. GlobeCom 2010*.

K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. A. Varvarigos, "Routing and Spectrum Allocation in OFDM-based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation," *Proc. GlobeCom 2010*.

A. Rosa, C.Cavdar, S.Carvalho, J.Costa and L.Wosinska, "Spectrum Allocation Policy Modeling for Elastic Optical Networks".

X. Wan, L.Wang, N. Hua, H. Zhang, and X. Zheng, "Dynamic Routing and Spectrum Assignment in Flexible Optical Path Networks," *Proc. OFC/NFOEC 2011*, Paper JWA55.

G. Zhang, M. Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking", *IEEE Communications Surveys & Tutorials.*, vol. 15, no.1, pp. 65-86, First Quarter 2013.

A. N. Patel, P. N. Ji, J. P. Jue, and T. Wang, "" Survivable Transparent Flexible Optical WDM (FWDM) Networks," *Proc., OFC/NFOEC 2011*, Paper Otul2.

G. Zhang, M. Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking", *IEEE Communications Surveys & Tutorials.*, vol. 15, no.1, pp. 65-86, First Quarter 2013.

M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 8, pp. 138-145, August 2010.

T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, T. Tanaka, B. Kozicki, Y. Sone, and M. Jinno, "Algorithms for Maximizing Spectrum Efficiency in Elastic Optical Path Networks that Adopt Distance Adaptive Modulation," *Proc. ECOC 2010*, Paper. WE.8.D.5.

T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Sone, B. Kozicki, A. Hirano, and M. Jinno, "Dynamic Routing and Frequency Slot Assignment for Elastic Optical Path Networks that Adopt Distance Adaptive Modulation," *Proc. OFC/NFOEC 2011*, Paper OTul7.

A. Morea, A. F. Chong, and O. Rival, "Impact of transparent network constraints on capacity gain of elastic channel spacing," *Proc. OFC/NFOEC 2011*, Paper JWA62.

G. Zhang, M. Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking", *IEEE Communications Surveys & Tutorials.*, vol. 15, no.1, pp. 65-86, First Quarter 2013.

H. Takara, B. Kozicki, Y. Sone, T. Tanaka, A. Watanabe, A. Hirano, K. Yonenaga, and M. Jinno, "Distance-Adaptive Super-Wavelength Routing in Elastic Optical Path Network (SLICE) With Optical OFDM," *Proc. ECOC 2010*, Paper We.8.D.2.

B. Kozicki, H. Takara, Y. Sone, A. Watanabe, and M. Jinno, "Distance-Adaptive Spectrum Allocation in Elastic Optical Path Network (SLICE) with Bit per Symbol Adjustment," Proc. OFC/NFOEC 2010, Paper OMU3.

Y. Wang, X. Cao and Y. Pan, "A Study of the Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks," IEEE Infocom, 2011, pp. 1503-1511.

K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-Based optical networks," J. Lightwave Technology, vol. 29, no. 9, pp. 1354–1366, 2011.

Y. Wang, X. Cao, and Y. Pan, "A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks," in Proc. INFOCOM, 2011, pp. 1503–1511.

W. Wei, C. Wang, and X. Liu, "Adaptive IP/optical OFDM networking design," in Proc. Optical Fiber Communication Conference, 2010.

K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-Based optical networks," J. Lightwave Technology, vol. 29, no. 9, pp. 1354–1366, 2011.

Y. Wang, X. Cao, and Y. Pan, "A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks," in Proc. INFOCOM, 2011, pp. 1503–1511.

A. Patel, P. Ji, J. Jue, and T. Wang, "Survivable transparent flexible optical WDM (FWDM) networks," in Optical Fiber Communication Conference, 2011.

M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, "Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum sliced elastic optical path network," IEEE Commun. Mag., vol. 48, no. 8, pp. 138–145, 2010.

X. Wan, L. Wang, N. Hua, H. Zhang, and X. Zheng, "Dynamic routing and spectrum assignment in flexible optical path networks," in Optical Fiber Communication Conference, 2011.

H. Beyranvand, M. Maier, and J. Salehi, "An Analytical Framework for the Performance Evaluation of Node- and Network-Wise Operation Scenarios in Elastic Optical Networks," in *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 62, No. 5, May 2014.

K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, "Time-Varying Spectrum Allocation Policies and Blocking Analysis in Flexible Optical Networks," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 31, No. 1, January 2013.

M. Klinkowski, M. Ruiz, L. Velasco, D. Careglio, V. Lopez, and J. Comellas, "Elastic Spectrum Allocation for Time-Varying Traffic in FlexGrid Optical Networks," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 31, No. 1, January 2013.

B. Mukherjee, *Optical WDM Networks*. New York: Springer-Verlag, 2006.

D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1992.

J. Moy, 1998, OSPF version 2. Internet RFC2328.

D. Thaler and C. Hopps, Multipath issues in unicast and multicast nexthop selection 2000, Internet RFC2991.

D. Cavendish, K. Murakami, S.-H. Yun, O. Matsuda, and M. Nishihara, "New transport services for next-generation SONET/SDH systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 5, pp. 80–87, May 2002.

S. Huang, C. Martel, and B. Mukherjee, "Survivable multipath provisioning with differential delay constraint in telecom mesh networks," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 19, no. 3, pp. 657–669, Jun. 2011.

S. Dahlfort, M. Xia, R. Proietti, and S. Yoo, "Split spectrum approach to elastic optical networking," in *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.*, Sep. 2012, pp. 1–3.

Z. Zhu, W. Lu, L. Zhang, and N. Ansari, "Dynamic Service Provisioning in Elastic Optical Networks With Hybrid Single-/Multi-Path Routing," in *Journal of Lightwave Technology* Vol. 31, No. 1, January 1, 2013

A. N. Patel, P. N. Ji, J. P. Jue, and T. Wang, "Defragmentation of transparent flexible optical WDM (FWDM) networks," in *Proc. IEEE/OSA OFC'11*, Los Angeles, CA, Mar. 2011, p. OTuI8.

T. Takagi et al., "Disruption minimized spectrum defragmentation in elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation," in *Proc. IEEE/OSA ECOC'11*, Geneva, Sep. 2011, Paper Mo.2.K.3.

A. Castro et al., "Dynamic routing and spectrum (re)allocation in future flexgrid optical networks," *Computer Netw.*, vol. 56, no. 12, pp. 2869–2883, Aug. 2012.

R. Wang, and B. Mukherjee, "Provisioning in Elastic Optical Networks with Non-Disruptive Defragmentation," in *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 31, No. 15, August 1, 2013.

O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. J. B. Yoo, "Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, pp. 12–20, Feb. 2012.

O. Gerstel, "Flexible use of spectrum and photonic grooming," in *Proc. IEEE Photon. Switching'10*, Monterey, CA, Jul. 2010, p. PMD3.