

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE
CAMPINAS**

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

PAULO CÉSAR BARRETO DA SILVA

**NOVOS ALGORITMOS PARA ALOCAÇÃO EFICIENTE DE
CANALIS EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS**

CAMPINAS

2013

PAULO CÉSAR BARRETO DA SILVA

**NOVOS ALGORITMOS PARA ALOCAÇÃO EFICIENTE
DE CANAIS 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.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

CAMPINAS

2013

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

t005.1
S586n

Silva, Paulo César Barreto da.

Novos algoritmos para alocação eficiente de canais em redes ópticas elásticas / Paulo César Barreto da Silva. – Campinas: PUC-Campinas, 2013.

172p.

Orientador: Marcelo Luís Francisco Abbade.

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

Inclui bibliografia.

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

22.ed.CDD – t005.1

PAULO CÉSAR BARRETO DA SILVA

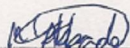
**"NOVOS ALGORITMOS PARA ALOCAÇÃO EFICIENTE
DE CANAIS EM REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS"**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações 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: Gestão de Redes e Serviços.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

Dissertação defendida e aprovada em 05 de fevereiro de 2014 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



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



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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, porque até aqui, ele me vem conduzindo com suas bênçãos e pela oportunidade de ter conquistado este importante marco em minha vida.

Agradeço ao meu irmão Luiz Rodolfo, pelo apoio, incentivo e companheirismo nestes dois anos de viagens semanais. Agradeço a minha esposa Caroline pela paciência, algumas vezes para ouvir minhas lamentações frente a frustrações e alegrias pelas descobertas ao longo de meus dias.

Aos meus pais César e Vera, que nenhuma palavra poderia descrever minha eterna gratidão por tudo que fizeram e fazem por mim.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade, que foi um grande amigo e incentivador do meu trabalho desde o primeiro dia que nos falamos. Sua contribuição para o meu crescimento científico e pessoal impactou diretamente no êxito deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Luiz Henrique Bonani do Nascimento da Universidade Federal do ABC, que contribuiu com sugestões para o simulador adotado na geração dos resultados deste trabalho.

A amiga Dra. Indayara Bertoldi Martins, que pacientemente me ajudou, mesmo quando estava do outro lado do Atlântico, a esclarecer muitos conceitos e ideias.

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

À Faculdade Anhanguera de Santa Bárbara, pelo empréstimo do laboratório de informática para simulação de parte dos resultados deste trabalho.

E a todas as pessoas, a quem eu devo meu eterno agradecimento, que diretamente ou indiretamente contribuíram para minha formação integral como pessoa e profissional.

“Meu Filho, empenhe-se na disciplina desde a juventude, e até na velhice você terá sabedoria”.

(Eclesiástico 6:18)

Bíblia Sagrada

RESUMO

SILVA, Paulo César Barreto. **Novos algoritmos para alocação eficiente de canais em redes ópticas elásticas**. 2013. 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, 2013.

Novas redes ópticas de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM) podem utilizar vários canais com taxas diferentes de bits. Além disso, cada um dos canais individuais pode transportar mais de 200 Gb/s e ocupar uma largura de banda que excede a grade fixa de 50 GHz da rede WDM. Neste cenário, a eficiência espectral torna-se uma questão importante e novos esquemas de alocação de canais precisam ser considerados. Uma solução atrativa para este problema é a utilização de uma rede WDM com espaçamento de canal variável, na abordagem chamada rede óptica elástica (EON). O principal objetivo do presente trabalho é propor algoritmos para resolver a questão da eficiência espectral em redes ópticas WDM emergentes. Tais propostas são divididas em duas classes. A primeira consiste em alocar diferentes blocos de espectro para canais com diferentes taxas de bits, o que é apontado como esquema de divisão de blocos de espectro (*Spectrum Block Division*, SBD). A segunda classe é baseada em esquemas de EON. Neste caso, não só o aperfeiçoamento de um algoritmo previamente descrito por WANG (2012), o algoritmo *Maximize Total Link Spectrum Consecutiveness* (MTLSC), é considerado, mas também um novo algoritmo, o *Shortest Path with Maximum number of Free Frequency Slot Units* (SPMFF) é proposto. Outra contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de um simulador de EON, chamado EONSim, com base na linguagem de programação JAVA. Este simulador foi devidamente testado e foram reproduzidos os resultados de WANG (2012) dentro de uma precisão muito boa. Todos os resultados foram obtidos com a ajuda de EONSim e sugerem que os algoritmos propostos produzem um ganho de ocupação de banda, que varia de 7 a 18% mais elevada do que a fornecida pelo tradicional algoritmo *First Fit* (FF). Tais algoritmos também proporcionam uma probabilidade de bloqueio, que é de 2 a 8% mais baixa do que na estratégia FF. Por outro lado, verifica-se que os algoritmos de melhor ocupação espectral utilizam um número médio de saltos até 16% mais elevado do que os necessários para os algoritmos de menor caminho, que não levam em conta a largura de banda de atribuição de canal.

Palavras-chave: Redes ópticas elásticas, algoritmos de roteamento, redes ópticas transparentes, simulador de redes ópticas elásticas.

ABSTRACT

*SILVA, Paulo César Barreto. **New algorithms for the efficient allocation of channels in elastic optical networks.** 2013. Dissertation (Master in Telecommunications Management Network) - Graduate in Electrical Engineering, Center for Science, Technology and Environmental, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2013.*

New optical wavelength division multiplexing (WDM) networks are expected to utilize multiple bit rate channels. Moreover, each individual channels may carry over 200 Gb/s and occupy a bandwidth that exceeds the 50-GHz WDM fixed grid. In this scenario, spectral efficiency becomes an important issue and new channel allocation schemes need to be considered. An attractive solution for this problem is the utilization of a WDM grid with variable channel spacing, in the so-called elastic optical network (EON) approach. The main goal of this work is to propose algorithms to solve the spectral efficiency issue in emerging optical WDM networks. Such proposals are divided in two classes. The first one consists of allocating different spectral blocks for channels with different bit rates; this is named as the spectrum block division (SBD) scheme. The second class of our proposals is based on EON schemes. In this case, not only the enhancement of a previously reported algorithm, the Maximize Total Link Spectrum Consecutiveness (MTLSC) algorithm, is considered but also a new algorithm, the Shortest Path with Maximum number of Free Frequency Slot Units (SPMFF) is proposed. Another contribution of this work is the development of an EON simulator, called EONSim, based on JAVA programming language. This simulator was properly tested and reproduced the results of literature papers within a very good accuracy. All of our results were obtained with the aid of EONSim and suggest that the proposed algorithms yield a bandwidth occupation gain that varies from 7 to 18% higher than the one provided by traditional first-fit (FF) algorithms. Such algorithms also provide a blocking probability that is 2 to 8% lower than in FF strategy. On the other hand, it is found that algorithms with higher spectral efficiency use an average number of hops that is up to 16% higher than those necessary for algorithms that do not take bandwidth into account in channel allocation.

Key-words: *Elastic optical networks, routing algorithms, transparent optical networks, optical networks simulator elastic.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espaçamento da grade fixa adotando padrão do ITU (ITU, 2002).	10
Figura 2. Topologia de uma rede de dados com oito nós e onze enlaces.	11
Figura 3. Fluxograma de modelagem dos algoritmos RWA.	13
Figura 4. Acomodação dos sinais ópticos na banda de rede adotando a grade fixa.	16
Figura 5. Acomodação da banda de rede (a) grade fixa (b) grade elástica.	19
Figura 6. Ilustração do roteamento de supercanais.	23
Figura 7. Alocação de três supercanais na banda de rede óptica	24
Figura 8. Diagrama de Componentes do EONSim.	27
Figura 9. GUI do simulador EONSim.	29
Figura 10. Fluxograma do processo de início e término de conexões no EONSim.	47
Figura 11. Topologia de Rede NSFNet 14 nós com 21 enlaces.	51
Figura 12. Resultados obtidos na reprodução dos resultados de WANG (2012).	51
Figura 13. Exemplos de ocupação de largura de banda para (a) EON e (b) abordagens SBD (SILVA, 2013).	56
Figura 14. Ilustração do cálculo do custo do enlace adotando o algoritmo MTLSC.	62

Figura 15. Ilustração do cálculo do custo do caminho adotando o algoritmo MPSC.	65
Figura 16. Topologia de rede Brasileira 12 nós com 20 enlaces.	70
Figura 17. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.	78
Figura 18. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.	81
Figura 19. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.	82
Figura 20. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.	84
Figura 21. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.	86
Figura 22. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.	87

Figura 23. Simulações com o Cenário C para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.	88
Figura 24. Simulações com o Cenário C Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.	90
Figura 25. Simulações com o Cenário C Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.	91
Figura 26. Simulações com o Cenário C para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.	93
Figura 27. Simulações com o Cenário C Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.	94
Figura 28. Simulações com o Cenário C Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.	96
Figura 29. Simulações com o Cenário G para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.	98
Figura 30. Simulações com o Cenário G Topologia de Rede NSFNet (a)	99

ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E;
(b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Figura 31. Simulações com o Cenário G Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. 100

Figura 32. Simulações com o Cenário G para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E. 101

Figura 33. Simulações com o Cenário G Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E. 102

Figura 34. Simulações com o Cenário G Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. 103

Figura 35. Número médio de saltos na topologia de rede NSFNet. 105

Figura 36. Número médio de saltos na topologia de rede Brasileira. 107

Figura 37. Simulações com o Cenário B para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E. 125

Figura 38. Simulações com o Cenário B Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E. 126

Figura 39. Simulações com o Cenário B Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.	127
Figura 40. Simulações com o Cenário B para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.	128
Figura 41. Simulações com o Cenário B Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.	129
Figura 42. Simulações com o Cenário B Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.	131
Figura 43. Simulações com o Cenário D para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.	133
Figura 44. Simulações com o Cenário D Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.	134
Figura 45. Simulações com o Cenário D Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.	135
Figura 46. Simulações com o Cenário D para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E;	136

(b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

Figura 47. Simulações com o Cenário D Topologia de Rede Brasileira (a) 138
ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E;
(b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Figura 48. Simulações com o Cenário D Topologia de Rede Brasileira, em 139
relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de
bloqueio

Figura 49. Simulações com o Cenário E para a Topologia de Rede NSFNet 140
(a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E;
(b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100
E.

Figura 50. Simulações com o Cenário E Topologia de Rede NSFNet (a) 141
ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E;
(b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Figura 51. Simulações com o Cenário E Topologia de Rede NSFNet, em 142
relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de
bloqueio.

Figura 52. Simulações com o Cenário E para a Topologia de Rede Brasileira 143
(a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E;
(b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100
E.

Figura 53. Simulações com o Cenário E Topologia de Rede Brasileira (a) 144
ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E;
(b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

- Figura 54. Simulações com o Cenário E Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. 145
- Figura 55. Simulações com o Cenário F para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E. 146
- Figura 56. Simulações com o Cenário F Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E. 147
- Figura 57. Simulações com o Cenário F Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. 148
- Figura 58. Simulações com o Cenário F para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E. 149
- Figura 59. Simulações com o Cenário F Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E. 150
- Figura 60 Simulações com o Cenário F Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. 151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da GUI do Simulador EONSim.	29
Tabela 2 - Estrutura do arquivo de configuração de formato de modulação.	32
Tabela 3 - Estrutura do arquivo de modelagem da topologia de rede.	33
Tabela 4 - Parâmetros do algoritmo de roteamento RSA no EONSim	36
Tabela 5 - Informações armazenadas no arquivo binário <i>SimulacaoMatriz</i> .	39
Tabela 6 - Informações armazenadas no arquivo binário <i>SimulacaoMedidas</i> .	41
Tabela 7 - Informações armazenadas no arquivo binário <i>Simulacao</i> .	43
Tabela 8 - Informações armazenadas no arquivo binário Conexões.	44
Tabela 9 - Exemplo de cálculo do CI adotando o MTLSC original.	67
Tabela 10 - Exemplo de cálculo do CI adotando o MTLSC aperfeiçoado.	68
Tabela 11 - Definição dos cenários de carga de tráfego adotados.	72

LISTA DE ACRÔNIMOS

DP-8QAM	<i>Dual-polarization 8 Quadrature Amplitude Modulation</i>
DP-16QAM	<i>Dual-polarization 16 Quadrature Amplitude Modulation</i>
DP-QPSK	<i>Dual-polarization Quadrature Phase Shift Keying</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
EON	<i>Elastic Optical Network</i>
EONSim	<i>Elastic Optical Networks Simulator</i>
FF	<i>First Fit</i>
FSU	<i>Frequency Slot Unit</i>
GMPLS	<i>Generalized Multi Protocol Label Switching</i>
GUI	<i>Grafic User Interface</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
KSP	<i>K-th Shortest Path</i>
MPSC	<i>Maximize Path Spectrum Consecutiveness</i>
MTLSC	<i>Maximize Total Link Spectrum Consecutiveness</i>
OOK	<i>On-Off-Keying</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RF	<i>Random Fit</i>
RSA	<i>Routing and Spectrum Assignment</i>
RSC	<i>Regiões Espectrais Comuns</i>
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i>
SBD	<i>Sprectrum Block Division</i>

SBD-FF	<i>Sprectrum Block Division First Fit</i>
SBD-RF	<i>Sprectrum Block Division Random Fit</i>
SimROT	Simulador de Redes Ópticas Transparentes
SLICE	<i>Spectrum-sliced Elastic Optical path network</i>
SPMFF	<i>Shortest Path with Maximum number of Free Frequency slot units</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Revisão da literatura.....	2
1.2. Motivação	5
1.3. Objetivo.....	6
1.4. Organização	6
2. REDES ÓPTICAS	8
2.1 Redes Ópticas com Grades Fixas	8
2.1.1 Conceitos.....	8
2.1.2 Algoritmos RWA.....	11
2.1.3 Evolução das redes ópticas com grade fixa.....	15
2.2 Redes Ópticas com Grades Elásticas	18
2.2.1 Conceitos.....	18
2.2.2 Algoritmos RSA.....	21
2.2.3 Evolução das redes ópticas com grade elástica.....	22
3. DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR EONSIM	26
3.1 Desenvolvimento do Simulador.....	26
3.2 Máquina de Estados.....	45
3.3 Validação do Simulador	50
4. HEURÍSTICAS DE ALOCAÇÃO DE CANAL.....	53
4.1 Algoritmos de Menor Caminho.....	54
4.2 Algoritmos de Melhor Ocupação Espectral.....	58

5.	ARRANJOS DAS SIMULAÇÕES	70
5.1	Topologias de Rede adotadas.....	70
5.2	Modelagem dos Cenários.....	71
5.3	Descrição dos Cenários.....	73
6.	RESULTADOS.....	77
6.1	Probabilidade de Bloqueio e Ocupação da Banda de Rede.....	77
6.2	Número Médio de Saltos.....	104
6.3	Vantagens e Desvantagem dos Algoritmos propostos.....	109
7.	CONCLUSÃO	113
7.1	Resultados Obtidos	113
7.2	Contribuições e Trabalhos Futuros.....	114
8.	TRABALHOS PUBLICADOS	116
9.	SOFTWARE DESENVOLVIDO	117
10.	REFERÊNCIAS	118
11.	APÊNDICES.....	125

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda das redes de comunicação associada a altas taxas exigidas pelos conteúdos multimídia e computação em nuvem, as redes de dados utilizadas tornam-se cada vez maiores, complexas e dinâmicas (DANTE, 2005; CHRISTODOULOPOULOS, 2011). A exigência por meios de comunicações eficientes, rápidos e seguros, tornam fundamentais a busca por maior desempenho e longevidade das redes de comunicação. Por esta razão, a complexidade das redes de comunicação, bem como a demanda contínua de crescimento, tem feito com que novas tecnologias sejam desenvolvidas, objetivando o aperfeiçoamento do processo de comunicação de dados.

Dentre as redes de telecomunicações, as redes ópticas provêm a maior banda possível. Mesmo assim, parte do espectro destas redes, atualmente, não é utilizado. Por esta razão, várias pesquisas recentes abordam formas de aumentar a eficiência espectral nesse tipo de rede (MOREA, 2011). A acomodação eficiente de canais em rede ópticas, reduzindo o desperdício de recursos alocados, é oportuna segundo MOREA (2011).

Os tradicionais algoritmos para alocação de canais em redes ópticas possuem limitações para taxas superiores a 200 Gb/s, sendo necessária a elaboração de uma nova família de algoritmos (JINNO, 2009). Além das limitações decorrentes da implementação dos tradicionais algoritmos, há restrições quanto as ferramentas computacionais adotadas na obtenção dos resultados. Portanto, a elaboração de uma ferramenta para simulação de redes ópticas elásticas e a

proposta de novos algoritmos para alocação eficiente de canais em redes ópticas são oportunas.

1.1. REVISÃO DA LITERATURA

A prospecção do crescimento das redes de telecomunicações para as taxas superiores a 200 Gb/s é apresentada como uma restrição para os algoritmos de roteamento e atribuição de comprimentos de onda (*Routing and wavelength assignment, RWA*) (JINNO, 2009). JINNO (2009) apresentam as vantagens e desafios da adoção de fatias de espectro em caminhos de redes ópticas elásticas (*Spectrum-sliced Elastic Optical path network, SLICE*).

A tecnologia de multiplexação densa por divisão de comprimento de onda (*Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM*) adota espaçamento fixo como 50 ou 100 GHz, seguindo o padrão da União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union, ITU*) (ITU, 2002; GERSTEL, 2012; ZHANG, 2013). Em dez anos o gargalo nas redes ópticas, ocasionado pela ampla utilização das redes de telecomunicações, não permitirá taxas superiores a 400 Gb/s (GERSTEL, 2012).

SOARES (2004) avaliam e apresentam os principais algoritmos RWA. As redes com conversores opto-eletro-ópticos destinados a conversão do sinal óptico para elétrico e o sinal elétrico para óptico, possuem inconvenientes como inserção de atraso no processamento e aumento de custo com equipamentos (SOARES, 2004). Neste mesmo trabalho são apresentadas as técnicas de roteamento adotadas nas redes ópticas, descrevendo as vantagens e limitações de cada uma

delas. Uma ferramenta desenvolvida em Java denominada Simulador de Redes Ópticas Transparentes (SimROT) é apresentada para obtenção dos resultados. Os resultados apresentados por SOARES (2004) apontam para a investigação de algoritmos que maximizem a utilização dos recursos disponibilizados e reduzam as probabilidades de bloqueio. São limitantes do trabalho o número de cenários e topologias de redes simuladas.

Uma ferramenta computacional desenvolvida em C++ destinada a simular os efeitos da camada física em redes totalmente ópticas, é apresentada por CHAVES (2008). A ferramenta de CHAVES (2008) considera os efeitos da camada física sendo possível selecionar os algoritmos de roteamento a serem adotados, bem como os parâmetros dos dispositivos simulados. O simulador elaborado por CHAVES (2008) adota apenas algoritmos RWA e suas heurísticas de alocação de canal óptico são baseadas no modelo de algoritmo *First Fit* (FF).

O surgimento de redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Network*, EON) e uma comparação entre redes ópticas de grade fixa em relação à grade elástica são apresentados por MOREA (2011). MOREA (2011) descrevem a eficiência das redes ópticas elásticas em relação às não elásticas. Para MOREA (2011) a EON é superior às redes ópticas de grade fixa por permitirem uma melhor ocupação da banda de rede disponível.

JINNO (2012) apresentam a introdução do comportamento elástico em redes ópticas, com objetivo de alocar os caminhos ópticos disponibilizados de forma eficiente, vislumbrando situações de catástrofe e garantindo a sobrevivência

da rede. Os resultados mostram que os algoritmos de roteamento e atribuição de espectro (*Routing and Spectrum Assignment*, RSA) produzem uma economia de espectro significativa em relação à fragmentação de espectro causada pela introdução da elasticidade na rede. Portanto, para JINNO (2012), a EON proporciona vários benefícios, além de aumentar a sobrevivência da rede em situações de desastre, porém há necessidade de evolução no desenvolvimento dos equipamentos adotados, uma vez que as tecnologias atuais adotam os algoritmos RWA.

Novos algoritmos RSA são apresentados por WANG (2012). Os resultados apresentados por WANG (2012), relativos à probabilidade de bloqueio para os algoritmos *Maximize Path Spectrum Consecutiveness* (MPSC) e *Maximize Total Link Spectrum Consecutiveness* (MTLSC), indicam a consecutividade dos *Frequency Slot Unit* (FSU) em redes ópticas de grade elástica como fator para redução da probabilidade de bloqueio.

Os problemas de implementação de algoritmos RSA são apresentados por KLINKOWSKI (2011-A). De acordo com este trabalho, a proposta dos algoritmos RSA resulta em uma ocupação de banda de rede superior a dos algoritmos RWA. Entretanto, a complexidade de implementação dos algoritmos RSA é superior. Para os autores deste trabalho há poucos trabalhos desenvolvidos em busca do aperfeiçoamento destes algoritmos.

MUÑOZ (2011) apresenta a avaliação de diferentes algoritmos de alocação eficiente de recursos em redes ópticas elásticas adotando *Generalized*

Multi Protocol Label Switching (GMPLS). Os resultados de avaliação de cada posição da grade sugerem o descarte de caminhos que não possuem a disponibilidade de frequência necessária. Para MUÑOZ (2011) a adoção do GMPLS contribui para o aperfeiçoamento dos algoritmos RSA.

YIN (2012) descreve técnicas para desfragmentação e apresenta a proposta de algoritmos objetivando a redução da probabilidade de bloqueio. Segundo YIN (2012), embora no futuro a EON seja um caminho promissor, a fragmentação espectral aumenta a probabilidade de bloqueio e degrada de forma significativa o desempenho da rede. Os resultados apresentados minimizam o impacto da fragmentação e minimizam o número de conexões que deixam de ser atendidas pela falta de recursos.

O consumo de energia elétrica nas redes de telecomunicações tornou-se preocupante (ROUZIC, 2013). Este trabalho, prospecta o crescimento de 20 a 40% do tráfego de Internet ao ano e indica que a adoção da EON resultaria em uma economia de energia elétrica de 11% em um dia de trabalho e 18% em um fim de semana. Portanto a adoção de EON contribui para a economia de energia elétrica nas redes de comunicações.

1.2. MOTIVAÇÃO

A busca por alternativas que aumentem o desempenho da transmissão dos dados em redes totalmente ópticas, tais como JINNO (2009), MOREA (2011) e JINNO (2012), é a principal motivação do presente trabalho. Para o processo de maximização do uso dos recursos, é necessária a elaboração de algoritmos de

roteamento que permitam melhorar a ocupação dos recursos de rede disponibilizados, como apresenta WANG (2012). No que tange à ferramenta computacional, a elaboração de uma ferramenta capaz de simular os comportamentos do processo de roteamento de uma rede óptica elástica, por exemplo, como a ferramenta elaborada por CHAVES (2008).

1.3. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é o desenvolvimento de um novo simulador para redes ópticas elásticas, além da proposta de novos algoritmos e o aperfeiçoamento do algoritmo MTLSC proposto por WANG (2012). Também é objetivo do trabalho avaliar o desempenho dos algoritmos em relação a probabilidade de bloqueio, a ocupação da banda de rede e eficiência dos algoritmos quanto à variação do número médio de saltos.

1.4. ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação está dividida da seguinte forma: no Capítulo 2 aspectos fundamentais das redes ópticas são apresentados, divididos em modelagem de redes ópticas com grades fixas e a modelagem de redes ópticas com grades elásticas. No Capítulo 3 são abordados os conceitos fundamentais da ferramenta desenvolvida para a simulação das redes ópticas, uma das principais contribuições do presente trabalho, bem como sua validação e operação. No Capítulo 4 são abordadas as contribuições de algoritmos de alocação espectral deste trabalho, sendo três propostas inéditas de algoritmo e a contribuição ao algoritmo consolidado por WANG (2012). Em seguida, o Capítulo 5 apresenta o

arranjo dos cenários simulados para obtenção dos resultados do presente trabalho. No Capítulo 6 os resultados da dissertação são apresentados, relativos à probabilidade de bloqueio, ocupação espectral e eficiência dos algoritmos quanto à variação do número médio de saltos. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões desta dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

2. REDES ÓPTICAS

O capítulo anterior apresenta as motivações, os aspectos fundamentais e os objetivos do presente trabalho. Neste capítulo apresentam-se os fundamentos das redes ópticas. A Seção 2.1 apresenta as redes ópticas com grade fixa. Na Subseção 2.1.1., serão apresentados os conceitos das redes ópticas com grade fixa. Na Subseção 2.1.2, os algoritmos adotados nas redes ópticas com grade fixa. Na Subseção 2.1.3, a evolução das redes ópticas com grade fixa.

Na Seção 2.2, as redes ópticas com grade elástica são abordadas. Na subseção 2.2.1. são apresentados os conceitos das redes ópticas com grade elástica e as principais vantagens deste tipo de rede óptica. Na Subseção 2.2.2 são apresentadas as características da família de algoritmos destinados a redes ópticas com grade elástica. Finalmente, a Subseção 2.2.3 aborda as redes ópticas com grade elástica e a proposta de supercanais.

2.1 REDES ÓPTICAS COM GRADES FIXAS

As redes ópticas com grades fixas caracterizam-se pelo espaçamento fixo entre canais. Este tipo de rede é o modelo adotado pela empresas de telecomunicação atualmente (SANTOS, 2012), e o seu modelo de gestão e implementação são conhecidos (GERSTEL, 2012).

2.1.1 CONCEITOS

Com o constante aumento da demanda de tráfego de dados, surgiu a necessidade de aperfeiçoar a capacidade de transmissão das redes ópticas (GERSTEL, 2012;

ZHANG, 2013). O aumento da taxa de transmissão em uma rede óptica pode ser realizado aumentando-se o número de fibras. Tal aumento impacta diretamente no custo financeiro e na complexidade da rede. A partir destas limitações, surgiu o desenvolvimento de técnicas que aumentem a capacidade de transmissão das fibras, evitando a necessidade de investimento em infraestrutura (MORIOKA, 2011).

Uma das técnicas capazes de aumentar a capacidade de transmissão das fibras é descrita por YATES (1999) e é chamada de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM). A tecnologia WDM adota múltiplos canais de comunicação para transmissão simultânea de dados (RAMASWAMI, 2002). Com a adoção desta tecnologia várias conexões podem ser estabelecidas em uma mesma fibra (QUEIROZ, 2012).

Nos primeiros sistemas WDM eram adotados os comprimentos de onda de 1310 nm e 1550 nm. Com o aperfeiçoamento da tecnologia WDM, surgiram os sistemas DWDM que permitem que os canais sejam colocados com espaçamentos de até 25 GHz, aumentando o número de portadoras ópticas para, por exemplo, 80 na mesma fibra. Desta forma, a capacidade de transmissão das fibras foi aumentada consideravelmente.

A Figura 1 apresenta um exemplo de acomodação do sinal em redes ópticas com grade fixa. Neste modelo de rede o espaçamento entre canais é padrão, por exemplo, 50 ou 100 GHz (GERSTEL, 2012; ZHANG, 2013), de acordo

com a recomendação do ITU (ITU-T G.694.1). Nota-se que o sinal não ocupa toda a banda do canal.

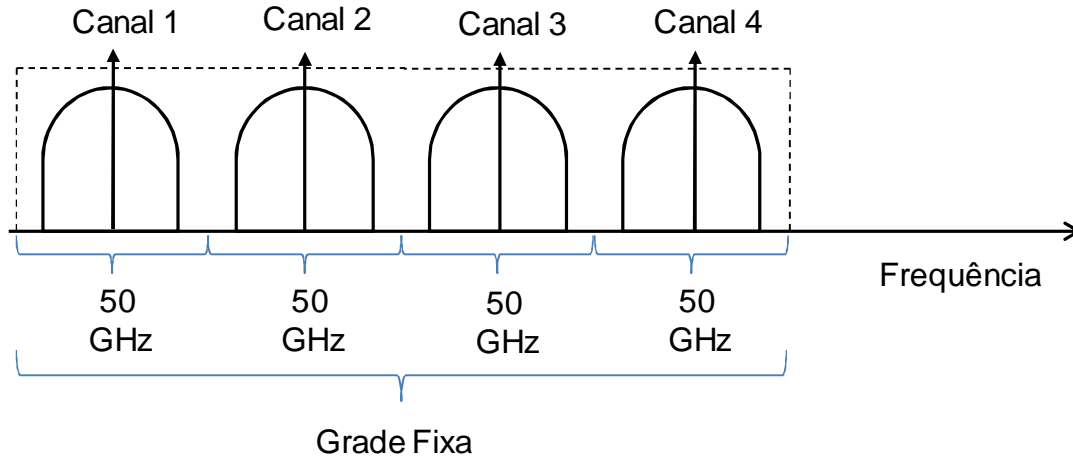


Figura 1. Espaçamento da grade fixa adotando padrão do ITU (ITU, 2002).

A Figura 2 apresenta um exemplo de topologia de rede formada por 8 nós e 11 enlaces. Nesta topologia, a conectividade dos nós é de 2 ou 3 enlaces, o que permite no mínimo duas opções de caminho para recepção e envio de dados. Por exemplo, admite-se que uma requisição de conexão seja solicitada pelo nó 0 com destino ao nó 3. Uma das alternativas de caminho seria partindo do nó 0, passando pelo nó 1, pelo nó 2 e finalmente pelo nó 3, caminho este destacado em pontilhado. Outra alternativa de caminho seria partindo do nó 0, passando pelos nós 6, 4, 5, 7 e finalmente chegando ao nó 3, caminho este destacado na Figura 2 em tracejado. A vantagem do primeiro caminho é o número de enlaces utilizados, que no caso são 3, enquanto que a segunda alternativa de caminho utilizaria 5 enlaces.

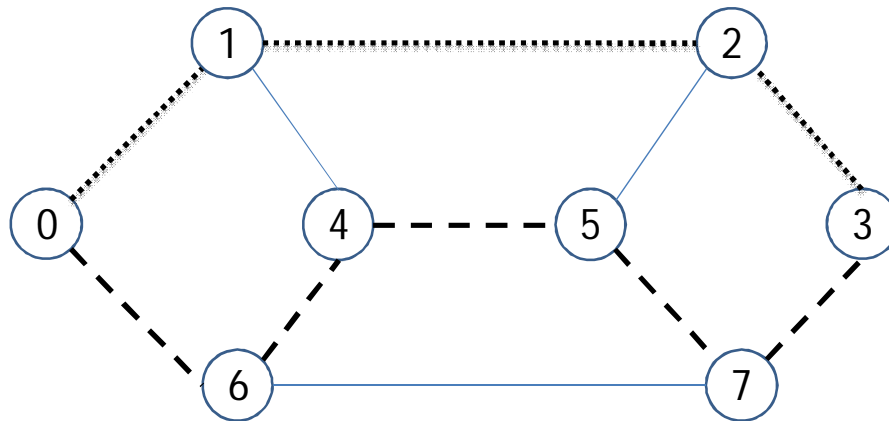


Figura 2. Topologia de uma rede de dados com oito nós e onze enlaces.

Cabe ao algoritmo de roteamento encontrar as alternativas de ligação do nó de origem ao nó destino de acordo com a estrutura da topologia de rede. Também é função delegada ao algoritmo de roteamento determinar qual o canal a ser utilizado pela conexão. Portanto, os algoritmos adotados nas redes de dados são os responsáveis pelo estabelecimento das conexões de rede, que dependendo do algoritmo utilizado, a rede pode apresentar um grau maior ou menor de utilização refletindo no custo da rede.

As redes ópticas com grade fixa adotam os algoritmos RWA (OZDAGLAR, 2003; PATEL, 2012). A seguir são apresentados os algoritmos RWA.

2.1.2 ALGORITMOS RWA

Os algoritmos RWA possuem três tipos de implementação de roteamento: fixo, fixo alternado e adaptativo (ZANG, 2000). No roteamento fixo um par de nós possui um único caminho definido. No roteamento fixo alternado, cada um dos nós mantém uma tabela de roteamento que contém uma lista de caminhos para os

demais nós. No roteamento adaptativo não existe um caminho ou lista de caminhos fixos, o estabelecimento do caminho é realizado de acordo com a disponibilidade de banda no momento do estabelecimento da conexão. No presente trabalho apresentam-se implementações dos algoritmos de roteamento adaptativo.

Duas heurísticas usuais para implementação de algoritmos RWA são FF e RF. A heurística FF é conhecida na literatura por enumerar as posições livres da grade da banda de rede e ordena a lista de canais do menor índice ao maior índice (ZANG, 2000). Ao receber uma requisição de conexão, o algoritmo avalia as posições disponíveis e realiza a alocação da primeira posição da banda de rede disponível (CHLAMTAC, 1989).

A segunda heurística, o algoritmo RF, enumera as posições livres da grade da banda de rede, gerando uma lista de canais disponíveis. Ao receber uma requisição de conexão, o algoritmo escolhe aleatoriamente a posição na qual o canal será alocado (ZANG, 2000).

A Figura 3 apresenta o fluxo de modelagem dos algoritmos RWA. Os passos indicados representam o processo base da heurística de alocação dos canais ópticos, independentemente do método de seleção adotado para escolha da posição da banda para acomodação do sinal.

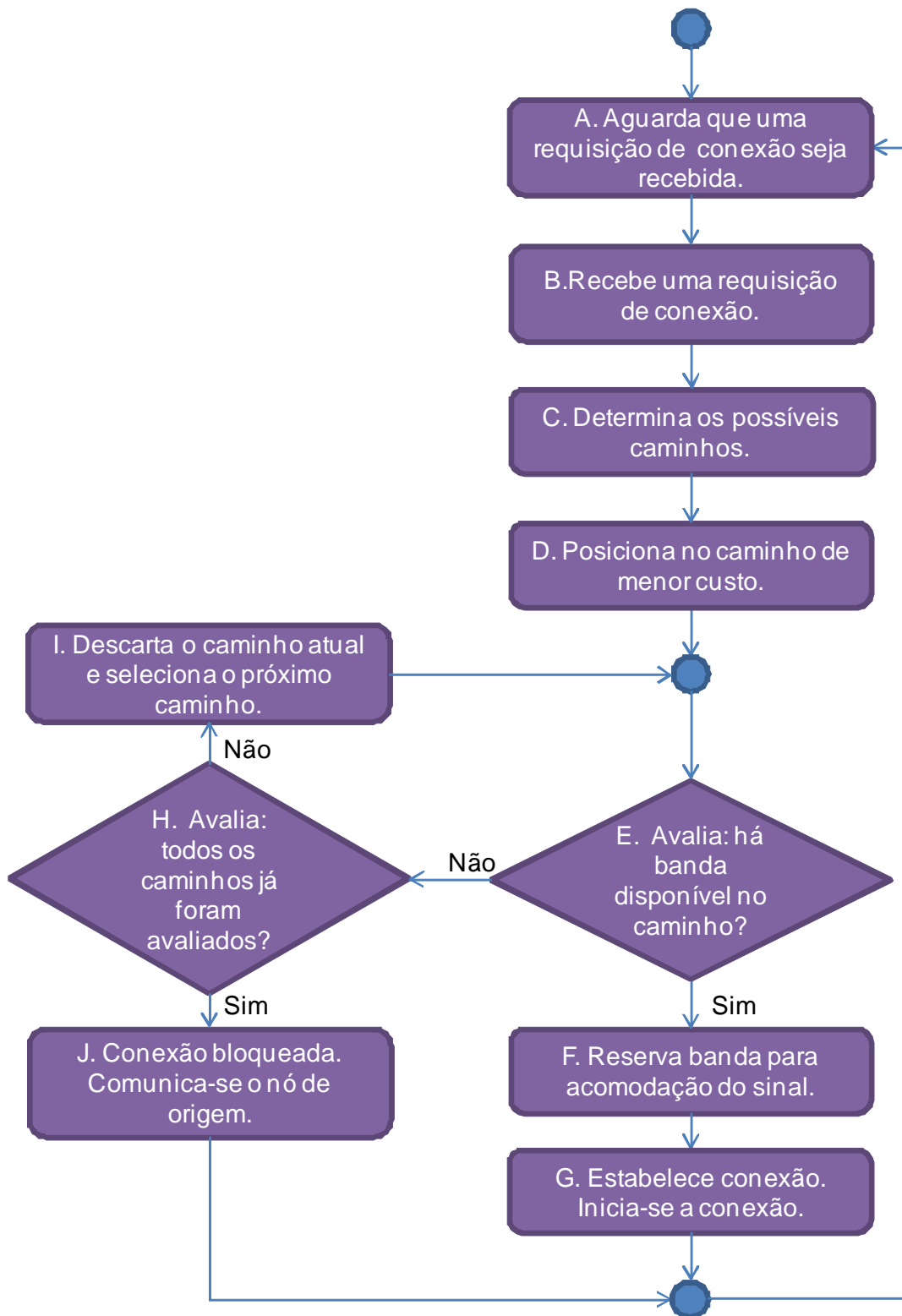


Figura 3. Fluxograma de modelagem dos algoritmos RWA.

O algoritmo RWA apresentando na Figura 3 inicia no Passo A, no qual aguarda-se que uma requisição de conexão seja recebida. No Passo B recebe-se uma requisição de conexão do nó de origem x ao nó de destino y . No Passo C determina os possíveis caminhos entre o nó de origem x ao nó de destino y , tais caminhos são armazenados em uma lista ordenada de forma crescente a partir do custo. Um exemplo de algoritmo para determinar os possíveis caminhos é o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) que encontra o menor caminho entre o nó origem ao nó de destino, ou o algoritmo de Yen, que retorna uma lista de todos os caminhos possíveis entre o nó de origem ao nó de destino (YEN, 1971). No Passo D posiciona no primeiro caminho da lista criada no Passo C. No Passo E avalia-se a disponibilidade de banda em todos os enlaces do caminho selecionado. A ocupação dos enlaces pode ser gerenciada por um sistema centralizado, que contém o estado de todos os enlaces da rede, ou pode ser distribuído, de tal modo que cada enlace gerencia o seu estado de ocupação. Se houver disponibilidade de banda no caminho selecionado, no Passo F reserva-se a banda necessária para a acomodação do sinal, e no Passo F inicia-se a conexão. Se o caminho avaliado no Passo E não possuir recursos disponíveis, no Passo H avalia-se a existência de um próximo caminho na lista. Se houver um próximo caminho na lista, no Passo I descarta-se o caminho atual e seleciona-se o próximo caminho, retornando ao início do Passo E. Se todos os caminhos já foram avaliados e não existe disponibilidade de banda, no Passo J a conexão é bloqueada, comunicando-se ao nó de origem sobre a impossibilidade de estabelecimento da conexão. Após a execução do Passo G ou do Passo J, retorna-se ao Passo A, aguardando uma nova requisição de conexão.

2.1.3 EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS COM GRADE FIXA

Por muitos anos, especialmente durante a década de 2000, predominou-se a utilização de sinais de 10 Gb/s com modulação *on-off keying* (OOK) *non-return-to-zero* (NRZ) (BOBROVS, 2007). No entanto, as redes passaram a adotar outras taxas de transmissão, como por exemplo, 40 Gb/s e 100 Gb/s. Cada uma dessas taxas possui seu próprio formato de modulação. Assim, a acomodação de tráfego em redes ópticas com grade fixa possui limitações quanto à granularidade e flexibilidade (GERSTEL, 2012; SANTOS, 2012). Desse modo, a acomodação de tráfego em uma grade fixa pode gerar um desperdício de banda, uma vez que as conexões com taxas e formatos diferentes não utilizam a totalidade da banda disponibilizada (CAVDAR, 2012).

A Figura 4 apresenta a acomodação dos sinais ópticos na grade fixa de 50 GHz recomendada pelo ITU (ITU, 2002). A ocupação de banda ocasionada por um sinal dependerá do formato de modulação adotado. Por exemplo, para um sinal de 10 Gb/s operando com codificação OOK NRZ, a banda ocupada é de 25 GHz e há um desperdício de 25 GHz. Para um sinal de 40 Gb/s operando com codificação *Dual-polarization Quadrature Phase Shift Keying* (DP-QPSK), a banda ocupada é de 25 GHz, com um desperdício de 25 GHz. Para um sinal de 100 Gb/s operando com codificação DP-QPSK, a banda ocupada é de 47,5 GHz. Para um sinal de 200 Gb/s operando com codificação *Dual-polarization 8 Quadrature Amplitude Modulation* (DP-8QAM), a banda ocupada é de 47,5 GHz. Para um sinal de 400 Gb/s operando com codificação *Dual-polarization 16 Quadrature Amplitude Modulation* (DP-16QAM), a banda ocupada é de 85 GHz e não caberia na grade

de 50 GHz. Para um sinal de 1 Tb/s operando com codificação DP-16QAM, a banda ocupada é de 200 GHz e não caberia na grade de 50 GHz, assim como a taxa de 400 Gb/s (GERSTEL, 2012).

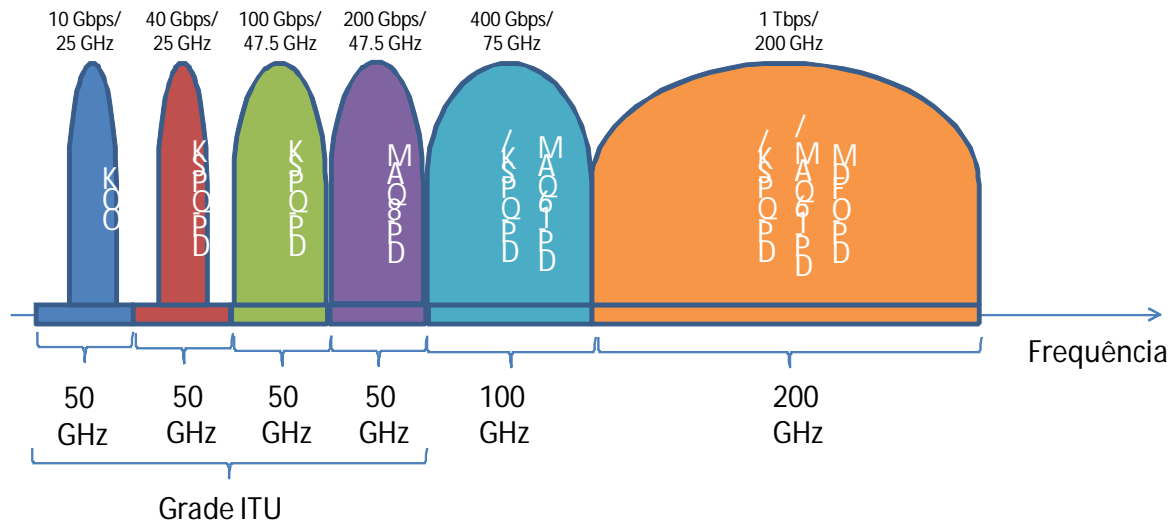


Figura 4. Acomodação dos sinais ópticos na banda de rede adotando a grade fixa.

As limitações da rede óptica com grade fixa para as taxas superiores a 200 Gb/s, podem ser tratadas, por exemplo, adotando o espaçamento entre canais de 75 GHz ou 100 GHz. Outras possíveis alternativas seriam a adoção de fibras ópticas dedicadas para determinadas taxas de transmissão ou mesmo o espaçamento variável entre canais. As implicações e as vantagens de cada uma dessas quatro alternativas propostas são discutidas a seguir.

A primeira alternativa para as taxas superiores a 200 Gb/s, é adotar o espaçamento entre canais de 75 GHz. No entanto, como esse espaçamento não é um múltiplo inteiro de 50 GHz, sua adoção seria incompatível com os padrões atuais do mercado. Portanto, o custo financeiro seria maior, descartando a

reutilização de equipamentos que adotam o espaçamento entre canais de 50 GHz (ITU, 2002). Outra limitação para adoção do espaçamento de 75 GHz entre canais é que as taxas de transmissão de 10, 40, 100 e 200 Gb/s ocupam volumes menores de banda e, portanto, o desperdício de banda seria ainda maior que o experimentado na grade de 50 GHz.

A segunda alternativa é adotar o espaçamento entre canais de 100 GHz, que já está padronizado pelo ITU. O espaçamento entre canais de 100 GHz comporta uma grande quantidade de taxas de transmissão, dentre elas a de 400 Gb/s. No entanto, assim como mencionado anteriormente, uma limitação para a grade de 100 GHz é que as taxas de transmissão de 10, 40, 100, 200 Gb/s e, agora, 400 Gb/s ocupam volumes menores de banda e, portanto, o desperdício de banda seria ainda maior que o experimentado na grade de 75 GHz.

Uma terceira possibilidade para as taxas superiores a 200 Gb/s seria a adoção de fibras ópticas dedicadas às conexões com tais taxas. Esta alternativa permitiria que um balanceamento da carga de tráfego pudesse ser realizado, direcionando as conexões com menor ocupação espectral para outras fibras. No entanto, implantar fibras ópticas dedicadas a uma dada taxa de transmissão aumenta o custo financeiro da rede. Outra limitação desta alternativa seria uma maior alocação dos recursos, uma vez que as fibras dedicadas encontrar-se-iam ocupadas, deixando assim de serem compartilhadas com as demais taxas de transmissão.

A quarta alternativa, considerada no presente trabalho, é a estratégia de espaçamento elástica na qual os canais são separados por diferentes larguras de banda. O conceito de grade elástica é apresentada por JINNO (2009) e as redes que a implementam são denominadas redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks*, EON) ou redes ópticas flexíveis (*Flexible Optical Network*, FON). A proposta EON permite que o espaçamento entre canais possa variar de acordo com a demanda. A seguir, as redes ópticas com grades elásticas são apresentadas.

2.2 REDES ÓPTICAS COM GRADES ELÁSTICAS

As arquiteturas de redes ópticas com alocação de banda elástica são uma abordagem promissora para a futura geração das redes ópticas (KLINKOWSKI, 2011-B). Uma EON caracteriza-se pela alocação de espectro de forma adaptativa à necessidade de alocação para o tráfego de dados (VELASCO, 2012). A banda do canal alocado varia de acordo com a necessidade de tráfego, permitindo a melhor utilização dos recursos disponibilizados (QUEIROZ, 2012).

2.2.1 CONCEITOS

Na EON, a divisão da grade é realizada adotando unidades de espaço de frequência, também chamadas FSU. Uma conexão adota um número necessário de FSUs para acomodar o seu tráfego. Assim, diferentes conexões podem ter mais ou menos banda alocada. A banda do FSU pode ter diferentes valores, como, por exemplo, 12,5 GHz como sugere GERSTEL (2012).

A Figura 5(a) apresenta a acomodação de certo tráfego na grade fixa de 50 GHz. A Figura 5(b) apresenta a acomodação do mesmo tráfego em uma grade elástica com FSU de 12,5 GHz. Pode-se observar que, na grade fixa, a banda alocada não é completamente utilizada, enquanto que na grade elástica a acomodação do tráfego permite uma ocupação maior de regiões da banda de rede, anteriormente desperdiçadas. Na Figura 5(a) são ocupados 300 GHz da banda para seis conexões, enquanto que na Figura 5(b), adotando grade elástica, são ocupados 200 GHz para as mesmas seis conexões, liberando 100 GHz de banda em relação ao caso de grade fixa.

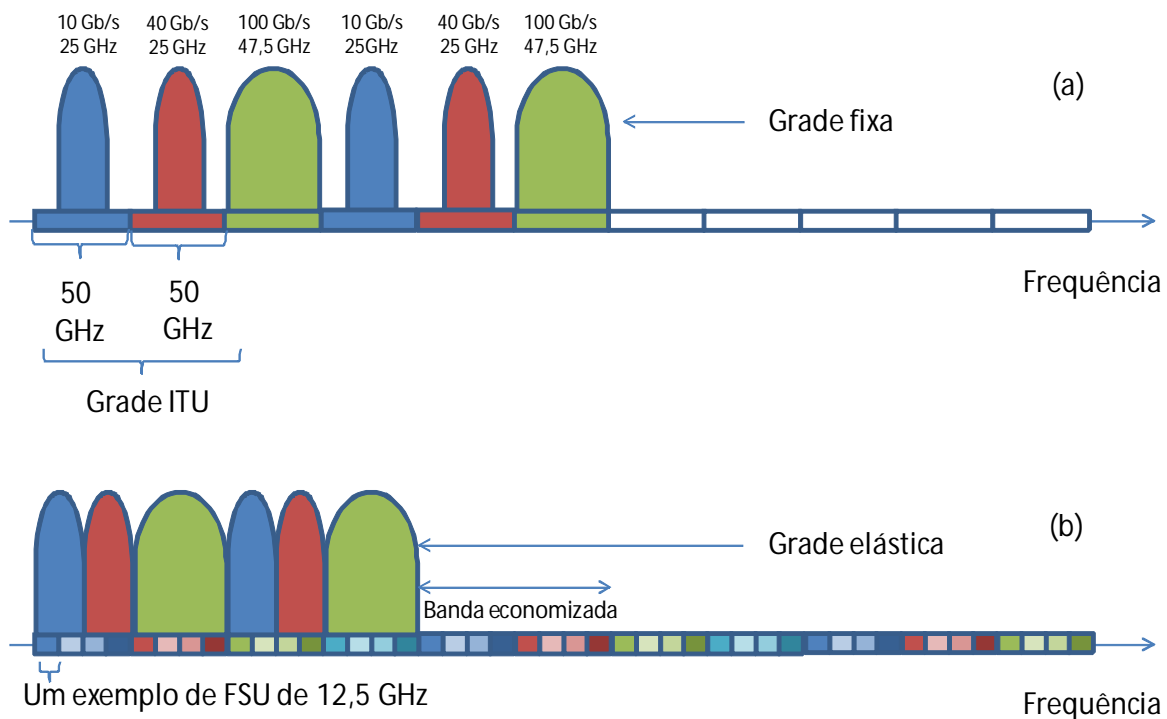


Figura 5. Acomodação da banda de rede (a) grade fixa (b) grade elástica.

A adoção de grade elástica permite uma acomodação de banda mais uniforme em relação à necessidade de acomodação de tráfego. A proposta de

WANG (2012) descreve um método flexível de alocação de banda para redes ópticas, apresentando resultados de eficiência de grades elásticas em relação a grades fixas. A adoção da EON elimina os limites impostos pela grade fixa quanto às taxas de transmissão superiores as 200 Gb/s.

Os algoritmos destinados a EON devem considerar na seleção do caminho a disponibilidade de banda suficiente para acomodação do sinal em todos os enlaces do caminho. Nos algoritmos RWA, a seleção do caminho considera a disponibilidade de uma dada posição da banda, sendo todas as posições da banda tem o mesmo tamanho. Nas EON, o tamanho da banda alocada pode ser variável. Os algoritmos RWA, próprios para redes ópticas com grade fixa, não se enquadram às características da EON, sendo necessária sua substituição. Os algoritmos capazes de lidar com as características das redes ópticas com grade elástica são os RSA (POLITI, 2012).

Os aspectos apresentados por WANG (2012) e QUEIROZ (2012) sobre EON e os resultados dos algoritmos RSA permitem demonstrar a importância da elaboração de novos algoritmos de roteamento e preenchimento de grade elástica. Em JINNO (2009), pode-se observar que a construção de novos algoritmos é uma oportunidade para ampliação da EON. Segundo PASCOAL (2003), algoritmos de otimização possuem fundamental importância na construção de soluções que maximizem a utilização dos recursos de redes. A seguir, a estrutura dos algoritmos RSA é apresentada.

2.2.2 ALGORITMOS RSA

Algoritmos RSA possuem similaridades com os algoritmos RWA, no que tange os objetivos principais de definição do caminho a ser adotado na transmissão e à região espectral que em que será acomodado o espectro óptico. A consecutividade das alocações de banda ao longo de todos os enlaces é essencial. Assim como nas redes com grade fixa, a alocação elástica deve considerar que as mesmas posições de FSU devem ser adotadas em todos os enlaces do caminho. Para estabelecimento da conexão, o algoritmo deve analisar a disponibilidade de banda ao longo de todo caminho antes de definir este caminho como candidato. Portanto, segundo MARIOKA (2011), os algoritmos RSA possuem uma complexidade de implementação superior comparada aos algoritmos RWA. No RWA o espaçamento entre canais é fixo, todas as posições têm o mesmo tamanho e uma posição pode acomodar o sinal. Nos algoritmos RSA, em que o espaçamento é elástico, é necessário antes da acomodação do sinal garantir que os números de FSUs necessários estejam disponíveis e de forma consecutiva na banda nas mesmas regiões em todos os enlaces do caminho selecionado.

Os algoritmos RSA podem ser construídos adotando, usualmente, dois métodos de seleção do caminho. A primeira forma de construção dos algoritmos RSA é selecionar o caminho adotando o menor caminho. Na segunda forma de construção dos algoritmos RSA, selecionar o caminho de acordo com o critério de ocupação espectral. Os dois métodos possuem uma implementação básica, sendo muitos dos passos comuns.

O fluxograma apresentado na Figura 3 indica os blocos necessários para a implementação dos algoritmos RSA do presente trabalho. No Capítulo 4 serão apresentadas as heurísticas de alocação de canais adotadas neste trabalho, bem como detalhamento da implementação de tais algoritmos RSA na ferramenta computacional descrita no Capítulo 3. A seguir, a evolução das redes ópticas com grade elásticas é apresentada.

2.2.3 EVOLUÇÃO DAS REDES ÓPTICAS COM GRADE ELÁSTICA

Uma opção para o constante crescimento das redes ópticas, segundo INFINERA (2013), é a implementação de supercanais. O supercanal é compreendido como uma banda alocada para um conjunto qualquer de canais, desde que suportem esta banda (BOSCO, 2011). Um supercanal é adotado ao longo de um caminho, sendo assim, o roteamento é feito para uma porção de banda reservada. Nesta porção de banda reservada podem ser acomodadas diversas taxas.

Na Figura 6 apresenta um exemplo de roteamento de 2 supercanais e 1 canal convencional, em uma topologia de rede hipotética. O primeiro supercanal, SC1, acomoda três taxas distintas de transmissão sendo roteado do nó de origem 1 ao nó de destino 4. O segundo supercanal, SC2, acomoda duas taxas distintas de transmissão sendo roteado do nó de origem 1 ao nó de destino 5. Nota-se que o SC1 e o SC2 utilizam alguns dos enlaces ao mesmo tempo, cada qual em sua região de banda reservada.

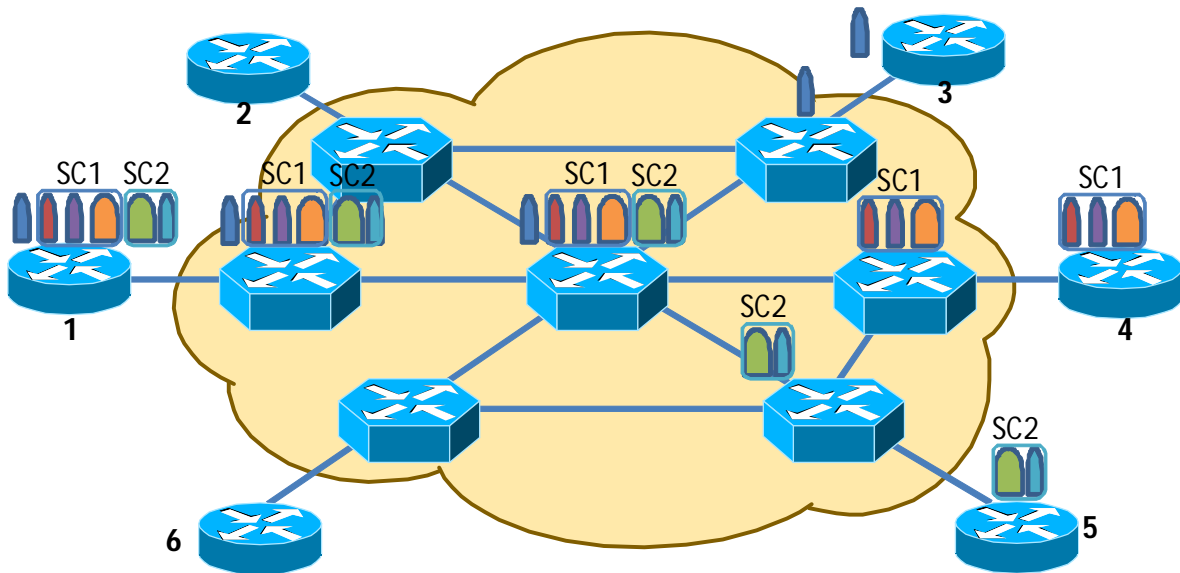


Figura 6. Ilustração do roteamento de supercanais.

Para ilustrar, suponha que se tenha definido um supercanal com 250 GHz. Neste canal pode-se acomodar 10 conexões com utilização de 25 GHz cada, ou 5 conexões com 50 GHz cada. Não existe limite para o tamanho que cada conexão irá utilizar, dentro dos limites da região do supercanal. É possível adotar taxas diversas, sendo permitido mesclar as taxas de transmissão dentro do supercanal, por exemplo, pode-se utilizar 2 conexões de 50 GHz, 1 conexão de 75 GHz e 5 conexões de 25 GHz. Outra possibilidade de acomodação dentro do supercanal poderia considerar apenas uma parte da região do supercanal, por exemplo 2 conexões de 50 GHz, deixando o restante da banda do supercanal disponível para futuras ampliações. A Figura 7 apresenta três exemplos de supercanais definidos na frequência da grade de rede.

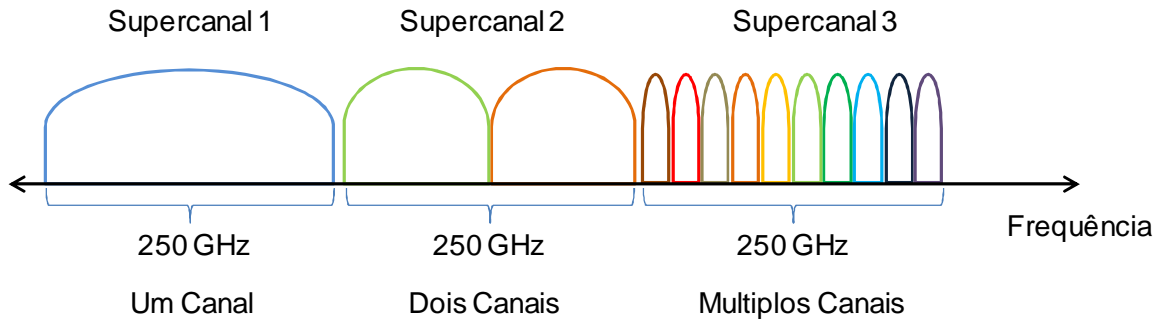


Figura 7. Alocação de três supercanais na banda de rede óptica.

O *Supercanal 1* apresentado na Figura 7 ilustra a acomodação de um único canal na banda de 250 GHz. No *Supercanal 2* são acomodados dois canais na banda desse supercanal, permitindo que duas requisições de conexão possam ser atendidas. Finalmente no *Supercanal 3* há múltiplos canais acomodados no supercanal, permitindo que várias conexões sejam acomodadas nesta região da banda.

A adoção dos supercanais apresentados por CHANDRASEKHAR (2010), BOSCO (2011) e LEUTHOLD (2012), é uma alternativa promissora para a ampliação da utilização dos recursos disponibilizados pelas redes ópticas. A adoção de supercanais contribui para que o tráfego de dados seja mais bem acomodado na grade de rede disponível. Experimentos com a utilização de supercanais são apresentados por ZHU (2010). Em PATACA (2012) são apresentados os primeiros resultados de geração, transmissão e recepção de um supercanal no Brasil.

A vantagem de se trabalhar com taxas menores permite uma flexibilidade maior na acomodação de tráfego. Uma limitação é que a adoção dos supercanais

intensifica o ruído, comparado a um sistema monocanal, quando há apenas um canal alocado. Desta forma, torna-se necessária a investigação de técnicas que permitam a recuperação dos sinais nos supercanais (CHANDRASEKHAR, 2010).

Os supercanais apresentam o comportamento das EON, que é prover a elasticidade da alocação da banda. A EON tem sido amplamente pesquisada e novas propostas de algoritmos têm sido realizadas para aperfeiçoar o desempenho deste tipo de rede. Apesar de a tecnologia EON apresentar-se como uma solução para a crescente demanda de tráfego de rede (SILVA, 2013), ainda é necessário o desenvolvimento de equipamentos que comportem sua elasticidade (GERSTEL, 2012).

As redes ópticas, sejam de grade fixa ou flexível, possuem capacidades elevadas de transmissão. Entretanto, as redes de grade fixa possuem limitações para o crescimento do tráfego das redes de telecomunicações. As redes ópticas de grade elástica mostram-se promissoras para o atendimento da nova demanda de crescimento das redes de telecomunicações. A implementação de supercanais mostra-se capaz de suportar tais demandas, mas impõem limitações quanto à recuperação dos sinais.

A EON apresenta oportunidades de aperfeiçoamento, no que tange à proposta de algoritmos de roteamento e de acomodação do tráfego de dados. No capítulo a seguir é apresentada a ferramenta computacional desenvolvida para implementação da EON e adotada na obtenção dos resultados do presente trabalho.

3. DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR EONSIM

No capítulo anterior abordaram-se os conceitos das redes ópticas de grade fixa e de grade elástica, além das categorias de algoritmos definidas para tais redes. Neste capítulo, apresenta-se o desenvolvimento da ferramenta computacional adotada na obtenção dos resultados desta dissertação. A Seção 3.1 aborda o desenvolvimento e funcionamento da ferramenta. A Seção 3.2 descreve a operação da máquina de estados do simulador. Na Seção 3.3 apresenta-se a validação da ferramenta com base em resultados anteriormente consolidados.

3.1 DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR

Com o objetivo de simular o comportamento de redes totalmente ópticas elásticas houve a implementação de uma ferramenta computacional, o *Elastic Optical Network Simulator* (EONSim), desenvolvido totalmente na linguagem de programação orientada a objetos Java. A elaboração da ferramenta teve como base o estudo de simuladores consolidados e amplamente utilizados, como NS-3 (NS-3, 2013), OPNet (OPNET, 2013) e o OMNet++ (OMNETPP, 2013). O simulador está disponível em <<http://sourceforge.net/p/eonsim/wiki/Home/>> e pode ser utilizado em qualquer sistema operacional que suporte a *Java Virtual Machine* da linguagem Java e que possua suporte gráfico.

O simulador é composto por uma estrutura básica de três componentes. O primeiro componente é a interface gráfica, responsável pela recepção dos parâmetros de início da simulação, adotados pelos demais componentes da ferramenta. O segundo componente é o motor de simulação, responsável pela

geração dos estados durante o processo de simulação do cenário desejado. O terceiro componente é responsável pela persistência das medidas e resultados ao longo da simulação, sendo este processo encerrado após o término do processo do motor. A persistência consiste no armazenamento dos dados por meio de arquivo em um meio físico, por exemplo, no disco rígido do equipamento adotado na execução do EONSim.

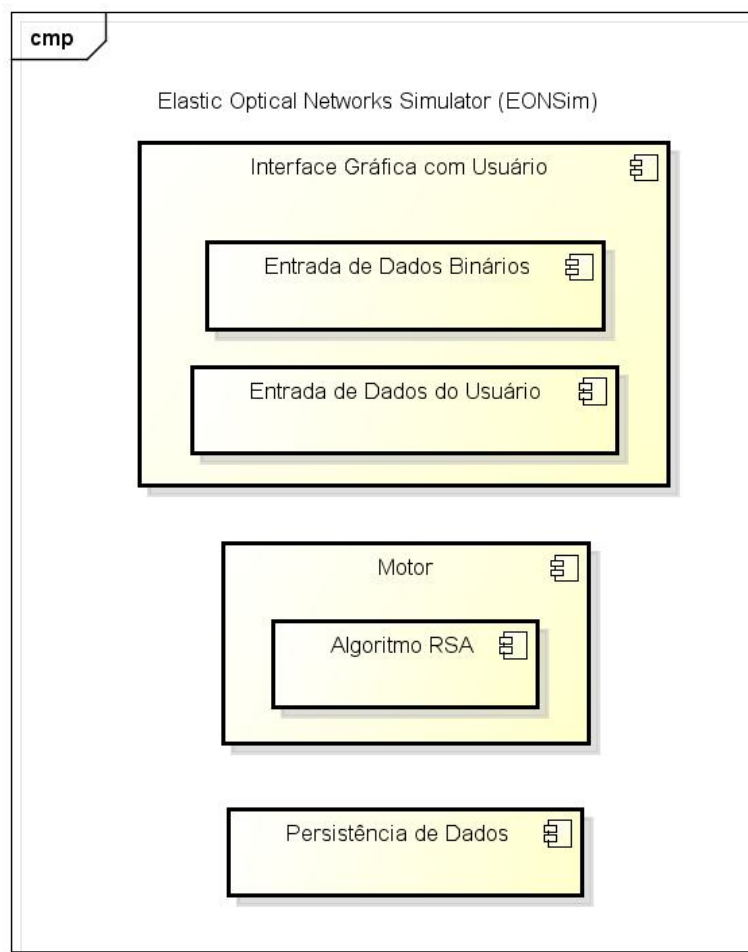


Figura 8. Diagrama de Componentes do EONSim.

O diagrama de componentes apresentado na Figura 8 ilustra a disposição dos componentes e subcomponentes do EONSim. O conceito de modularização é

implementado na ferramenta com o objetivo de aperfeiçoar a manutenibilidade e aproveitamento dos componentes no processo de desenvolvimento da ferramenta. A seguir cada um dos componentes é apresentado e explicado.

3.1.1 Interface Gráfica do Simulador

A interface gráfica com o usuário (*Graphic User Interface, GUI*) é responsável pela interação com o usuário do simulador. Mediante a GUI, é possível definir os parâmetros adotados na simulação, bem como acompanhar a evolução e a coleta das medidas. Tais entradas de dados são informadas ou selecionadas com o auxílio deste componente, sendo esta a principal entrada de dados complementado apenas pela entrada de informações oriundas de arquivos binários de configuração.

A Figura 9 apresenta a GUI responsável por receber e exibir os argumentos de configuração do EONSim. Tais argumentos são parametrizados no início da simulação, sendo posteriormente seus resultados persistidos, armazenados em um arquivo texto. A GUI é dividida em seis conjuntos de parâmetros, sendo informações da rede, distribuição da carga de simulações, heurística de alocação de grade da banda de rede, definição da rota, conexões estabelecidas e botões de ação. Cada um dos conjuntos recebe e exibe um determinado número de argumentos. Os argumentos definidos na Tabela 1 apresentam os respectivos campos da interface gráfica com o usuário, distribuídos ao longo dos conjuntos de componentes do simulador.

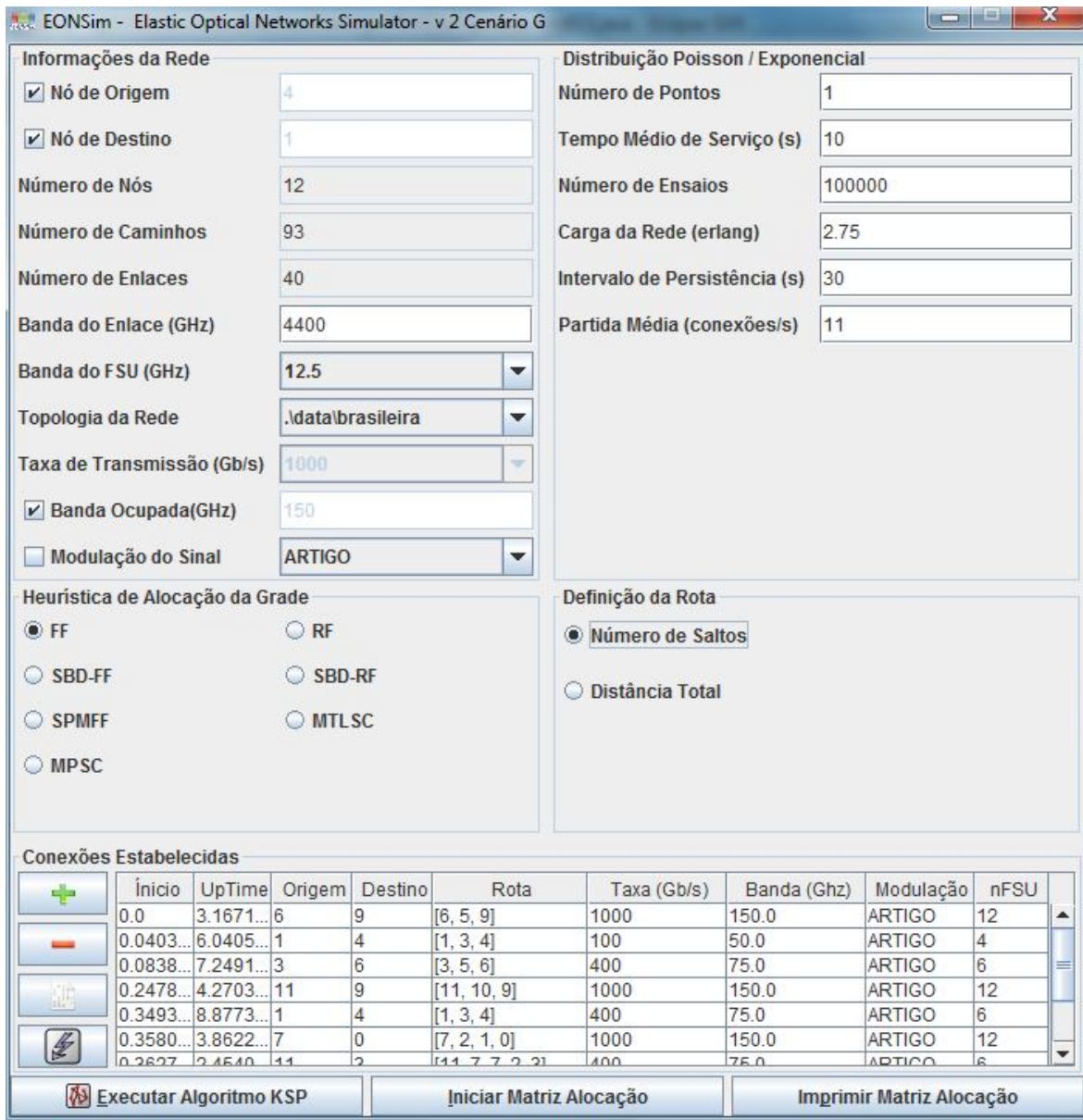


Figura 9. GUI do simulador EONSim.

Tabela 1 - Parâmetros da GUI do Simulador EONSim.

Parâmetro	Descrição	Valor Padrão	Exemplo
Nó de Origem	Nó de origem da conexão. Permite selecionar aleatoriedade.	0	10
Nó de Destino	Nó destino da conexão. Permite selecionar aleatoriedade.	3	6

Tabela 1 - Continuação - Parâmetros da GUI do Simulador EONSim.

Parâmetro	Descrição	Valor Padrão	Exemplo
Número de Nós	Número de Nós da Topologia de rede selecionada para simulação.	0	14
Número de Caminhos	Número de Caminhos para Topologia de rede selecionada para simulação.	0	84
Número de Enlaces	Número de enlaces da Topologia de rede selecionada para simulação.	0	14
Banda do Enlace(GHz)	Largura de banda de rede de cada enlace.	4400	4400
Banda do FSU (GHz)	FSU Selecionado. Opções: 3,125; 6,250; 12,500; 25 e 50.	12,500	50
Topologia da Rede	Seleção da Topologia de rede a ser simulada. Leitura da pasta data do simulador.	NSFNet14	Brasileira
Taxa de Transmissão (Gb/s)	Taxa de transmissão. Opção de randomização do parâmetro Banda Ocupada desabilita sua seleção.	10	1000
Banda Ocupada (GHz)	Banda Ocupada pela Taxa de transmissão selecionada. Permite sortear randomicamente o valor.	25	150
Modulação do Sinal	Modulação do Sinal a ser simulado. Permite sortear randomicamente o valor.	OOK	QPSK
Número de Pontos	Número de pontos a serem simulados. Cada ponto corresponde a uma taxa de partida a ser simulada.	1	10
Tempo Médio de serviço (s)	Duração média em segundos de cada conexão estabelecida.	10	20

Tabela 1 - Continuação - Parâmetros da GUI do Simulador EONSim.

Parâmetro	Descrição	Valor Padrão	Exemplo
Número de Ensaios	Número de conexões solicitadas por ponto e simulação.	100000	100000
Carga de Rede (erlang)	Calculado em tempo de execução.	0	100
Intervalo de persistência (s)	Define a periodicidade com que as medidas serão persistidas pelo EONSim em arquivo binário.	10	20
Partida Média (conexões/s)	Taxa de partida de conexões	0	40
Heurística de Alocação da Grade	Algoritmo selecionado para ocupação da banda.	FF	SBD-FF
Definição da Rota	Método para ordenação dos caminhos da topologia de rede selecionada para simulação.	Número de <i>Hops</i>	Número de <i>Hops</i>

O primeiro conjunto de campos da GUI do EONSim, ilustrado na Figura 9, *Informações da Rede*, é composto pelos campos *Nó de Origem*, *Nó de Destino*, *Banda do Enlace*, *Banda do FSU*, *Topologia da Rede*, Topologia de rede selecionada, *Taxa de Transmissão*, *Banda Ocupada* e *Modulação do Sinal*. Algumas informações apresentadas na Figura 8, tais como número de nós, número de caminhos e número de enlaces são preenchidos pelo EONSim no início da execução da simulação, a partir da leitura do arquivo que descreve a topologia de rede adotada na simulação. A seleção do tamanho da unidade do espaço de frequência (*Frequency Slot Unit*, FSU), determinado pelo usuário do EONSim, é realizada antes do início da simulação e é adotada para todo o cenário simulado.

Os parâmetros de *Nó de Origem*, *Nó de Destino*, *Banda Ocupada* e *Modulação do Sinal* são determinados a partir de caixas de verificação, as quais quando selecionadas na GUI, fazem com que tais parâmetros sejam escolhidos de forma aleatória pelo EONSim, dentro dos parâmetros especificados para estes campos. Quando tais parâmetros não estão selecionados, seguem os valores fornecidos na GUI de acordo com a Figura 9. Portanto, a aleatoriedade dos valores de alguns parâmetros pode ser selecionada no EONSim, permitindo, por exemplo, na Figura 9 sortear o formato de modulação do sinal dentre os formatos disponíveis.

As configurações do formato de modulação, bem como a topologia de rede, são recebidas pelo simulador por meio de arquivos textos. A estrutura do arquivo de configuração de formato de modulação é apresentada na Tabela 2, sendo este arquivo formado pelo formato de modulação, taxa de transmissão, banda ocupada pelo sinal de determinada taxa de transmissão, alcance do sinal e número de bits por símbolo. Apesar do presente trabalho não considerar os formatos de modulação do sinal na obtenção dos resultados, a ferramenta EONSim está preparada para tal, podendo futuramente ser adotada.

Tabela 2 - Estrutura do arquivo de configuração de formato de modulação.

<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>	<i>Exemplo</i>
Modulação	Formato de modulação	QPSK
Taxa (Gb/s)	Taxa de transmissão	100
Banda (GHz)	Banda ocupada pela taxa de transmissão	50
Alcance (km)	Alcance do sinal, distância.	5.000
Bits/Símbolo	Número de bits por símbolo.	2

A estrutura do arquivo de modelagem da topologia de rede é apresentada na Tabela 3, sendo o campo número de enlaces um campo que compõe o cabeçalho do arquivo. No cabeçalho do arquivo estão armazenadas informações gerais, que são utilizadas pelo EONSim para a leitura das demais informações do arquivo. Os demais campos apresentados na Tabela 3 descrevem os enlaces por meio do *Nó de Origem*, *Nó de Destino*, *Custo* e o *Número de Fibras* disponíveis no enlace.

Tabela 3 - Estrutura do arquivo de modelagem da topologia de rede

Parâmetro	Descrição	Exemplo
Número de Enlaces	Número de Enlaces que compõem a rede.	14
Nó de Origem	Nó de origem do enlace	1
Nó de Destino	Nó de destino do enlace	7
Custo	Custo do enlace	1
Número de Fibras	Número de fibras do enlace	1

O segundo conjunto de campos da GUI do EONSim ilustrado na Figura 9, recebe os parâmetros de distribuição da carga de simulações. Neste conjunto de campos são informados os números de pontos a serem simulados, tempo médio de serviço das conexões, número de conexões (ensaios) por ponto simulado, taxa média de partida de conexões, adotada no estabelecimento da carga de rede, e o intervalo de persistência, sendo o intervalo de persistência adotado pelo terceiro componente do simulador, responsável pela persistência de dados e medidas.

O terceiro conjunto de campos da GUI do EONSim, ilustrado na Figura 9, permite a seleção da heurística de alocação de grade da banda de rede. Neste conjunto de campos é possível selecionar um algoritmo que será adotado na

simulação para alocação da grade da banda de rede. A inserção de novos algoritmos é possível por meio da reprogramação da ferramenta, sendo para isso necessário a codificação em linguagem de programação Java.

O quarto componente da GUI do EONSim, ilustrado na Figura 9, permite selecionar como as rotas serão escolhidas pelo algoritmo de alocação da banda de rede. O EONSim permite a seleção de dois métodos de definição da rota. O primeiro método, padrão no EONSim, considera o número de saltos dos caminhos como custo do caminho. O segundo método considera como custo a distância total, ou seja, a soma dos comprimentos dos enlaces que compõem cada caminho. De acordo com a definição de rota selecionada, o simulador realizará a ordenação dos caminhos da topologia de rede selecionada pelo usuário, considerando o custo escolhido pelo usuário na GUI, número de saltos ou distância total. O algoritmo adotado para esta finalidade, investigação dos caminhos, é apresentado no motor do simulador.

O quinto componente da GUI do EONSim ilustrado na Figura 9, *Conexões Estabelecidas*, é formado por quatro botões e uma tabela de informações. Os botões são: inserção de conexão, que permite que manualmente cada uma das conexões seja solicitada, remoção de conexão, que permite que uma a uma as conexões ativas sejam encerradas, listagem de conexões ativas que permite exibir a relação de conexões ativas no console do sistema operacional e o botão principal simular, responsável por iniciar o processo de simulação. Este último botão, quando utilizado, desabilita a execução dos demais botões, utilizados apenas para depurar a execução do processo de simulação do EONSim. A tabela

de informações deste componente apresenta uma listagem das conexões ativas para que o usuário possa visualizar as informações de início, término, nó de origem, nó de destino, rota adotada, taxa de transmissão da conexão, banda ocupada, formato de modulação e número de FSU alocados.

O sexto e último componente da GUI do EONSim, ilustrado na Figura 9, é formado por três botões de ação, que complementam as funcionalidades do simulador, relativos à depuração do processo de funcionamento do simulador. O primeiro botão executa o roteamento da conexão, baseado nas informações de rede informadas. O segundo e o terceiro botão permitem iniciar e apresentar a matriz de alocação das conexões durante o processo de simulação. Por serem componentes de depuração, a utilização destes três botões é inviável quando o botão simular do quinto componente do EONSim é utilizado.

3.1.2 Motor do Simulador

O EONSim adota o algoritmo *K-th Shortest Path* (KSP) (YEN, 1971) no processo de roteamento. O KSP ou algoritmo de Yen é um dos algoritmos de derivação adotados na classificação dos K caminhos mais curtos entre um par de nós (YEN, 1971). O algoritmo procura os caminhos mais curtos em uma pseudo-árvore contendo K caminhos mais curtos. Considerando o custo do enlace em primeiro lugar, é feita a exploração do caminho mais curto, em seguida, do segundo caminho mais curto até explorar todos os caminhos possíveis de serem adotados para estabelecer a conexão entre nó de origem e nó de destino (YEN, 1971).

O EONSim implementa sete algoritmos RSA, que são apresentados no Capítulo 4. Os parâmetros necessários para funcionamento dos algoritmos de roteamento RSA no EONSim são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do algoritmo de roteamento RSA no EONSim

Parâmetro	Descrição
λ	Número de conexões requisitadas por unidade de tempo (por exemplo, segundos). Taxa de chegada de conexões. Seu valor é informado pelo usuário como um parâmetro de sistema, <i>Partida Média</i> na GUI do EONSim.
N_{ev}	Número de pontos de simulação. Seu valor é informado pelo usuário como um parâmetro de sistema, <i>Número de Ensaios</i> na GUI do EONSim;
F	Banda do FSU adotado. Seu valor é selecionado pelo usuário como um parâmetro de sistema, <i>Banda do FSU</i> na GUI do EONSim.
T_s	Tempo médio de serviço da conexão. Seu valor é informado pelo usuário como um parâmetro de sistema, <i>Tempo Médio de Serviço</i> na GUI do EONSim. Adotado posteriormente no EONSim por meio de uma distribuição exponencial negativa durante a simulação, para definição do tempo médio de dada conexão.
N_e	Número de enlaces da topologia de rede adotada na simulação. Seu valor é recebido a partir do arquivo binário que representa a topologia da rede, apresentado na Tabela 3.
N_f	Número de fibras disponível por enlace. Seu valor é recebido a partir do arquivo binário que representa topologia da rede, apresentado na Tabela 3.
B_f	Banda disponível por fibra. Seu valor é informado pelo usuário como um parâmetro de sistema, <i>Banda do Enlace</i> na GUI do EONSim.
B_t	Banda total da rede. Esta variável é calculada em tempo de execução e dada por: <div style="text-align: right;"> $B_t = N_e N_f B_f \quad (1)$ </div>

Tabela 4 - Continuação - Parâmetros do algoritmo de roteamento RSA
no EONSim

Parâmetro	Descrição
N_s	<p>Intervalo de tempo médio entre as chegadas de conexão. Esta variável é calculada em tempo de execução e dada por:</p> $N_s = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$
L	<p>Instante de partida das conexões. Esta variável é calculada em tempo de execução e dada por:</p> $L = (p + 1)N_s \quad (3)$ <p>em que p é o índice da última conexão estabelecida. Inicialmente $p = 0$.</p>
μ	<p>Duração média das conexões. A partir do tempo T_s de duração de dada conexão. Esta variável é calculada em tempo de execução e dada por:</p> $\mu = \frac{1}{T_s} \quad (4)$
T_{it}	<p>Tempo de chegada instantâneo ao longo do ciclo de simulação da carga de tráfego. Adotado para controle da distribuição temporal de Poisson para definição de λ (conexões/s). Esta variável é calculada em tempo de execução e dada por:</p> $T_{it} = \frac{1}{\lambda} \text{RAND}(\text{Poisson}) \quad (5)$
T_{st}	<p>Duração da conexão instantânea ao longo do ciclo de simulação da carga de tráfego. Adotado para controle da duração de cada distribuída exponencialmente com média μ de tempo. Esta variável é calculada em tempo de execução e dada por:</p> $T_{st} = \frac{1}{\mu} \text{RAND}(\text{Exp}) \quad (6)$

Tabela 4 - Continuação - Parâmetros do algoritmo de roteamento RSA
no EONSim

Parâmetro	Descrição
ρ	<p>Carga da rede em erlangs. Segundo (PARKINSON, 2012) ρ é dada por:</p> $\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (7)$

3.1.3 Persistência das Medidas e Resultados

Após a conclusão do processo de simulação, três arquivos binários por padrão e um opcional são gerados na pasta ‘resultados’ no local onde o EONSim está sendo executado. O primeiro arquivo gerado é nomeado como ‘*SimulacaoMatriz [Dia] [Mês] [Ano] [Hora]h[Minuto]m[Segundo]s*’. O segundo arquivo gerado é nomeado como ‘*SimulacaoMedidas [Dia] [Mês] [Ano] [Hora]h[Minuto]m[Segundo]s*’. O terceiro arquivo gerado é nomeado como ‘*Simulacao [Dia] [Mês] [Ano] [Hora]h[Minuto]m[Segundo]s*’. O quarto arquivo, opcional, pode ser habilitado caso seja necessário avaliar todo o processo de início e término das conexões, nomeado como ‘*Conexoes [Dia] [Mês] [Ano] [Hora]h[Minuto]m[Segundo]s*’. Os valores dos parâmetros *Dia*, *Mês*, *Ano*, *Hora*, *Minuto* e *Segundo* são obtidos no instante da persistência dos arquivos binários com base nas informações do relógio do sistema operacional.

Os dados binários do arquivo estão dispostos de forma que permita analisar o número de conexões estabelecidas, números de conexões bloqueadas, duração média das conexões, taxa de partida das conexões, taxa de ocupação da

banda no instante da coleta de dados, cenário simulado e algoritmo de roteamento adotado.

O EONSim possui a capacidade de criar um *log* que permite depurar o simulador e analisar o preenchimento dos FSU durante o processo de simulação. Tal *log* é gerado em um arquivo binário, cuja estrutura pode variar de acordo com a necessidade do processo de obtenção de resultados. Por meio da depuração do sistema é possível realizar medidas de desempenho do algoritmo, relativas à ocupação de banda em determinados momentos da simulação. Portanto, a depuração de sistema é uma funcionalidade que pontualmente pode ser habilitada já que os resultados deste são também extraídos nos arquivos binários de resultados de forma sucinta ao término do processo de simulação. A Tabela 5 apresenta a estrutura das informações persistidas no arquivo binário *SimulacaoMatriz*, responsável pela auditoria de sistema, sendo os 7 primeiros campos, informações de cabeçalho e os demais são campos de detalhe. Os campos de detalhe descrevem as informações de preenchimento da matriz de FSU que representa a banda de rede. Tais campos são enlace, nó de origem, nó de destino, índice do FSU e estado de ocupação.

Tabela 5 - Informações armazenadas no arquivo binário *SimulacaoMatriz*.

Informação	Descrição	Exemplo
Início da Simulação	Data e horário do início da simulação	Sun Aug 25 10:38:48 BRT 2013
Término da Simulação	Data e horário do término da simulação	Sun Aug 25 12:48:38 BRT 2013
Duração da Simulação	Tempo decorrente do início ao término da simulação	02:09:50
Cenário	Cenário adotado na simulação	G

Tabela 5 - Continuação - Informações armazenadas no arquivo binário *SimulacaoMatriz*.

Informação	Descrição	Exemplo
Algoritmo	Heurística de alocação do canal óptico adotada	SBD – FF
Número Médio de Saltos	Número médio de saltos	2.7486
Topologia de rede simulada	Topologia de rede simulada	Brasileira
Enlace	Número do enlace da topologia de rede simulada	29
Origem	Nó de origem da conexão	7
Destino	Nó destino da conexão	11
FSU	Índice do FSU	40
Ocupação	Valor contido no índice do FSU do enlace no término da simulação	0 – Ocupado 1 - Livre

A Tabela 6 apresenta a estrutura das informações armazenadas no arquivo binário *SimulacaoMedidas*, sendo os 11 primeiros campos, informações de cabeçalho e os demais campos de detalhe. Os campos de detalhe são número da medida, instante temporal da medida, número de conexões solicitadas até o momento, número de conexões estabelecidas até o momento, número de conexões bloqueadas, número de conexões ativas, banda ocupada, número de FSU utilizados, informações relacionadas ao estado da rede, tais como, banda disponível, carga de dados atendida, ρ e número médio de saltos.

No arquivo binário *SimulacaoMedidas* são persistidas informações sobre o comportamento do algoritmos, sendo seus dados fundamentais para extração das informações de resultado deste trabalho, relativas à probabilidade de bloqueio e ocupação espectral da banda de rede. Por se tratar de um arquivo com grande número de informações, seu parâmetro de intervalo de geração de coletas, intervalo de tempo em que as medidas são realizadas, é definido de acordo com o

parâmetro *Intervalo de persistência*, fornecido pela GUI do EONSim. Ao término do ponto de simulação, por padrão o EONSim sempre persiste tais medidas.

Tabela 6 - Informações armazenadas no arquivo binário *SimulacaoMedidas*.

Informação	Descrição	Exemplo
Data e Hora	Data e horário do término da simulação	Fri Aug 23 15:35:41 AMT 2013
Algoritmo	Heurística de alocação do canal óptico adotada	MTLSC
Cenário	Cenário adotado	D
Topologia de Rede	Topologia de rede adotada	Brasileira
Alfa ¹	Parâmetro de consecutividade de FSUs livres	2
Beta ²	Parâmetro de número de FSUs livres	1
Posição Seleccionada ²	Posição do bloco selecionado de FSUs selecionados [Primeiro, Maior e Menor]	Maior
Número Total de Conexões Solicitadas	Número de conexões que foram simuladas	100.000
Número Total de Conexões Estabelecidas	Número total de conexões que foram estabelecidas	95.000
Número Total de Conexões Bloqueadas	Número total de conexões que foram bloqueadas	5.000
Probabilidade de Bloqueio (%)	Número de conexões bloqueadas em relação ao Número de conexões que foram simuladas	0,05
Capacidade Total da Rede (GHz)	Capacidade total da rede	176.000
Medida	Número sequencial da medida coletada	685
Instante	Unidade de tempo da coleta da medida	1377717567967
Número de Conexões Solicitadas	Número de conexões solicitadas até o momento da medida	85.600
Número de Conexões Estabelecidas	Número de conexões estabelecidas até o momento da medida	83.200

¹ Parâmetro utilizado apenas nos algoritmos de Melhor Ocupação Espectral que serão abordados no Capítulo 4.

Tabela 6 - Continuação - Informações armazenadas no arquivo binário
SimulacaoMedidas.

Informação	Descrição	Exemplo
Número de Conexões Bloqueadas	Número de conexões bloqueadas até o momento da medida	2.400
Conexões Ativas	Número de conexões ativas no momento da medida	632
Banda Ocupada (GHz)	Banda ocupadas pelas conexões ativas no momento da medida	73.200
FSU Utilizados	Número de FSUs utilizados pelas conexões ativas no momento da medida	5.856
Banda Disponível (GHz)	Banda disponível no momento da medida	102.800
FSU Disponíveis	Número de FSU livres no momento da medida	8224
Banda Ocupada (%)	Banda ocupadas pelas conexões ativas no momento da medida	0,4159
Probabilidade de Bloqueio (%)	Probabilidade de bloqueio até o momento da medida	0,0280
Tempo Médio de Serviço (s)	Duração média das conexões estabelecidas até o momento da medida	10
rho (erlang)	Carga da rede no momento da medida	100
lambda (conexões/s)	Taxa de partida no momento da medida	36
mu	Tempo médio de serviço das conexões estabelecidas até o momento da medida	0,10
Carga Atendida (GHz)	Carga das conexões atendidas até o momento da medida	30.825.000
Número Médio de Saltos	Número médio de saltos até o momento da medida	3,601

A Tabela 7 apresenta a estrutura das informações armazenadas no arquivo binário *Simulacao*, adotado na obtenção das medidas de média de número de saltos, tempo de operação e taxas de transmissão simuladas. Os campos que compõem este arquivo são data e horário do início e término da

simulação, duração da simulação, informações das conexões solicitadas, conexões estabelecidas e conexões bloqueadas. Também são armazenadas neste arquivo as informações de taxa de partida, capacidade da rede, cenário simulado, algoritmo de alocação da grade da banda de rede adotado, topologia da rede simulada e distribuição do tráfego de dados.

Tabela 7 - Informações armazenadas no arquivo binário *Simulacao*.

Informação	Descrição	Exemplo
Início da Simulação	Data e horário do início da simulação	Fri Aug 23 12:25:20 AMT 2013
Término da Simulação	Data e horário do término da simulação	Fri Aug 23 15:35:41 AMT 2013
Duração da Simulação	Tempo decorrente do início ao término da simulação	03:10:21
Número Total de Conexões Estabelecidas	Número de conexões estabelecidas	95.000
Número Total de Conexões Bloqueadas	Número de conexões bloqueadas	5.000
Probabilidade de Bloqueio (%)	Número de conexões bloqueadas em relação ao número de Conexões Solicitadas	0,05
Lambda (conexões / s)	Taxa de partida.	36
mu	Tempo médio de serviço das conexões	0,10
Tempo Médio de Serviço (s)	Duração média das conexões	10
Capacidade da Rede (GHz)	Capacidade total da rede	176.000
Carga Simulada (GHz)	Carga de rede simulada	30.825.000
Cenário Simulado	Cenário adotado na simulação	A
Algoritmo	Heurística de alocação do canal óptico adotada	MTLSC
Alfa2	Parâmetro de consecutividade de FSUs livres	2
Beta3	Parâmetro de número de FSUs livres	1

² Parâmetro utilizado apenas nos algoritmos de Melhor Ocupação Espectral que serão abordados no Capítulo 4.

Tabela 7 - Continuação - Informações armazenadas no arquivo binário *Simulacao*.

Informação	Descrição	Exemplo
Posição Seleccionada ³	Posição do bloco selecionado de FSUs selecionados [Primeiro, Maior e Menor]	Maior
Número Médio de Saltos	Número médio de saltos	3,0912
Topologia de Rede Simulada	Topologia de rede simulada	NSFNet 14
Distribuição da Carga de Rede Realizada (%)	Distribuição da carga de conexões (Taxa de transmissão x Percentual) realizada	10 GHz – 33% 100 GHz – 33% 400 GHz – 33%

A Tabela 8 apresenta a estrutura das informações armazenadas no arquivo binário *Conexoes*, arquivo este, de geração opcional, adotado para avaliar o comportamento do motor do simulador durante o processo de execução dos algoritmos de alocação de espectro óptico. Os campos que compõem este arquivo são identificador da conexão, nós de origem e de destino, rota adotada, banda utilizada, modulação do sinal, número de FSU utilizados, índice do FSU inicial, fibra alocada, unidade temporal de início e de duração da conexão.

Tabela 8 - Informações armazenadas no arquivo binário *Conexoes*.

Informação	Descrição	Exemplo
ID	Sequencial de Identificação da Conexão	123
NoOrigem	Nó de origem da conexão	11
NoDestino	Nó destino da conexão	2
Rota	Caminho (<i>path</i>) alocado pelo algoritmo para conexão	[11, 7, 2]
Banda (GHz)		25
Modulação	Modulação do sinal da conexão	QPSK
nFSU	Número de FSU ocupados pela conexão	2
FSU Inicial	Número do FSU onde inicia-se a região espectral ocupada pela conexão	14
Fibra	Fibra ocupada pela conexão	1
Início	Unidade de tempo que define a partida da conexão	0.8269

Tabela 8 - Continuação - Informações armazenadas no arquivo binário
Conexoes.

Informação	Descrição	Exemplo
Tempo de Vida	Unidade de tempo que define o encerramento da conexão	10.611

Os resultados armazenados nos arquivos binários estão estruturados no formato de tabelas, tendo como separadores uma tabulação. Os resultados podem ser facilmente exportados para ferramentas de análise por meio do processo de importação de dados no formato de arquivo texto. Portanto, a modelagem dos arquivos binários não possui nenhum limitante relativo à formatação, permitindo que sua leitura possa ser feita sem a necessidade de conversores de texto.

3.2 MÁQUINA DE ESTADOS

A máquina de estados do simulador define a ordem de execução dos componentes do simulador, ou seja, este componente é responsável por receber as entradas e controlar a ordem de execução do processo de simulação. A simulação gera um processo no qual as conexões são estabelecidas, permanecem ativas por um tempo determinado e são desfeitas finalmente. Tal processo baseia-se no comportamento encontrado em uma rede real.

Ao iniciar o processo de simulação, antes que as requisições de conexão e encerramento de conexão sejam iniciadas, faz-se necessária a inicialização da matriz que irá guardar as informações da alocação de banda. A matriz é definida como uma estrutura de *Nó*. Inicialmente todas as posições são preenchidas com 1 (Verdadeiro) que representa FSU livre. À medida que houver alocação do FSU no respectivo nó e enlace, nesta posição da matriz será preenchido com 0 (Falso)

FSU ocupado. A Listagem 1 descreve a representação conceitual da matriz de alocação de banda, sendo N_{FSU} dado por:

$$N_{FSU} = \frac{B_t}{F} \quad (8)$$

em que o parâmetro N_e representa o número de enlaces em cada nó e N_i o número de nós da topologia de rede.

Listagem 1. Representação do modelo conceitual da matriz de alocação de banda

estrutura Nó{

$$\text{lógico alocao}[N_i][N_e] = 1;$$

};

Nó matrizBanda [N_i];

A construção de *matrizBanda* descrita na Listagem 1 é expressa por

$$\text{matrizBanda} = \begin{bmatrix} N_{i0} \\ N_{i1} \\ \dots \\ N_{in} \end{bmatrix} \text{ sendo } N_{ii} = [N_{FSU0} \quad N_{FSU1} \quad \dots \quad N_{FSUn}] \text{ e } N_{FSUi} = \begin{bmatrix} N_{e0} \\ N_{e1} \\ \dots \\ N_{en} \end{bmatrix}. \text{ A matriz}$$

é constantemente atualizada durante o processo de simulação quando ocorre a requisição de uma nova conexão ou quando do término de dada conexão. O fluxograma apresentado na Figura 10 descreve no EONSim como são tratadas as requisições de início e término de conexão.

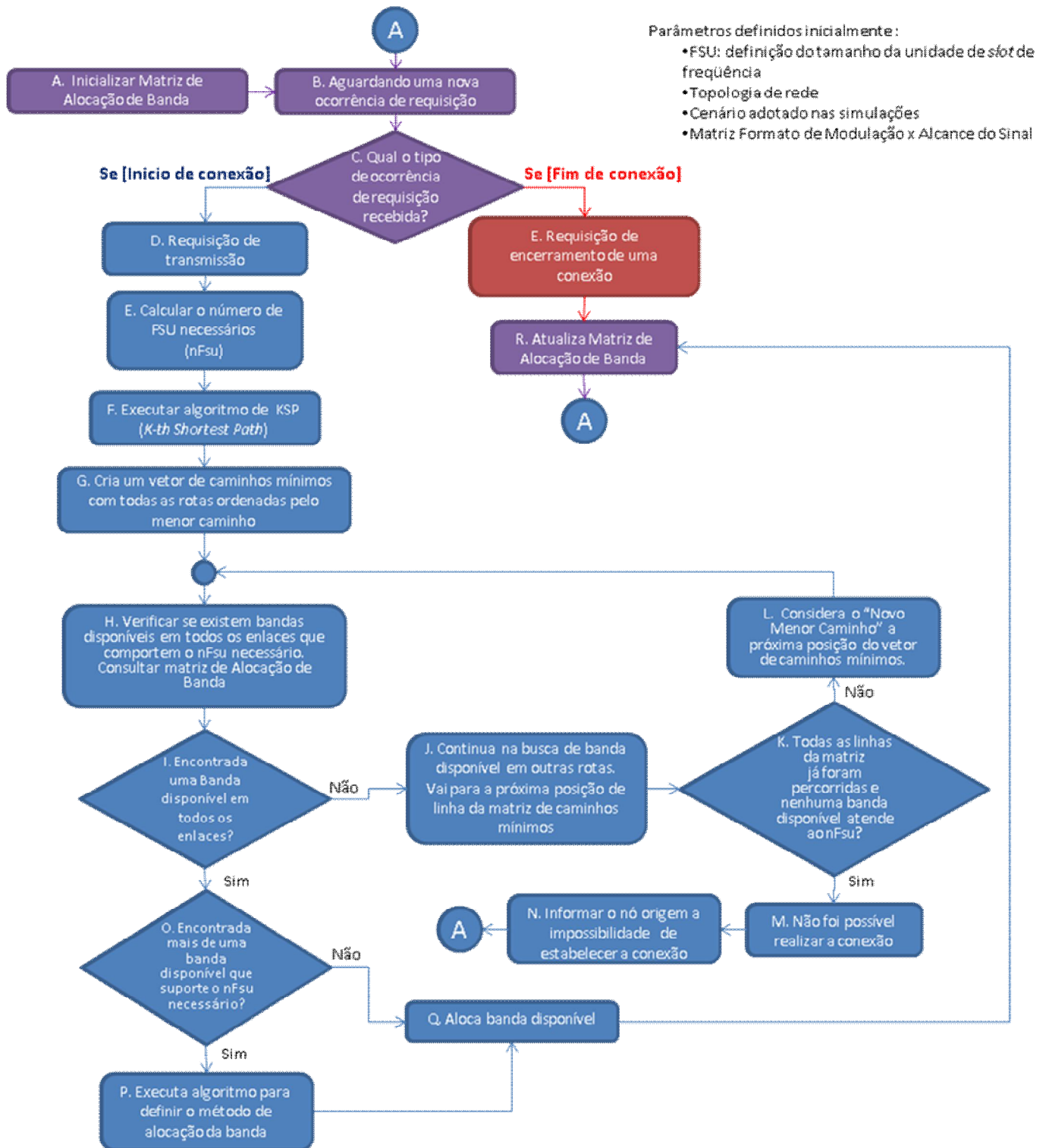


Figura 10. Fluxograma do processo de início e término de conexões no EONSim.

Os passos do fluxograma apresentado na Figura 10 são realizados a partir do fornecimento dos parâmetros apresentados pela Figura 8. Portanto, o simulador necessita receber os parâmetros e isso será variável de acordo com o cenário da simulação desejado. Os passos apresentados na cor roxa representam etapas iniciais ou finais do processo de simulação, como por exemplo, a espera por início de conexão e atualização da matriz de alocações de banda. Os itens na cor azul representam os passos de estabelecimento de conexão e o item apresentado na cor vermelha o fim da conexão.

A máquina de estados implementada no EONSim, descrita na Figura 10, é implementada seguindo o algoritmo proposto por SILVA (2013) que descreve a ordem de execução das ações como segue:

- A) EONSim inicializa a matriz de alocação da banda de rede;
- B) EONSim aguarda até que um ocorrência de requisição de conexão ou de encerramento de conexão seja recebida:
 - C) Verifica-se a existência de conexões cujo tempo de vida já tenham se exaurido;
 - C.1) Se houver conexões cujo tempo de vida já tenham se exaurido, envia uma requisição de encerramento de conexão e executa passo S;
 - C.2) Se houver conexões a serem estabelecidas executa-se o passo D;
 - D) Solicita-se estabelecimento de nova conexão, informando-se na GUI do EONSim nós de origem e destino, taxa de transmissão e seleção do formato de modulação do sinal;

E) Calcula-se o número de FSU necessários e armazena-se na variável *nFSU*.

F) Executa-se o algoritmo KSP para investigação dos caminhos mínimos conforme definições da requisição de conexão;

G) Constrói-se o vetor de caminhos mínimos considerando critérios de definição de custo do caminho;

H) Avalia-se a disponibilidade de recursos em todos os enlaces do caminho selecionado para *nFSU*;

I) Se os recursos necessários não estiverem disponíveis em todos os enlaces do caminho selecionado, descarte este caminho e avance para o próximo caminho;

J) Avalia-se a existência de caminhos mínimos na próxima posição da matriz de caminhos;

K) Havendo-se caminhos disponíveis, faça:

L) Retorna-se ao passo H descartando este caminho;

M) Não havendo caminhos disponíveis, registra-se conexão como bloqueada e executa o passo N;

N) Informa-se os nós de origem e destino da impossibilidade de estabelecer a conexão. Registra conexão bloqueada e retorna ao passo B.

O) Avalia-se se foi encontrada mais que uma região espectral que comporte o *nFSU*, faça:

P) Adotando-se os critérios do algoritmo RSA, realize a definição do método de alocação da banda de rede;

Q) Estabelece-se a conexão, registrando a conexão realizada;

R) Atualiza-se a matriz de alocação de banda de rede e retorna ao passo B;

S) Encerra-se a conexão e retornar ao passo R;

A operação da máquina de estados é concluída apresentando um resumo com os resultados da simulação realizada e gerando a persistência dos arquivos binários. Tais arquivos binários são apresentadas na subseção 3.1.3.

3.3 VALIDAÇÃO DO SIMULADOR

Para validação do simulador e avaliação dos resultados obtidos, foram adotados como referência os resultados apresentados por WANG (2012). Com o objetivo de reproduzir os resultados foram adotados os mesmos parâmetros de distribuição de tráfego de dados apresentados por WANG (2012). As conexões foram estabelecidas considerando nó de origem e nó de destino aleatoriamente. Conforme sugere WANG (2012), a carga de tráfego é distribuída em 33% para taxa de 40 Gb/s (Banda Ocupada de 50 GHz - 4 FSU), 33% para taxa de 100 Gb/s (Banda Ocupada de 50 GHz - 4 FSU) e 34% para taxa de 400 Gb/s (Banda Ocupada de 75 GHz - 6 FSU).

A Figura 11 apresenta a topologia simulada no EONSim. Foi considerado que os enlaces possuem 1 fibra atendendo cada sentido de comunicação. Para este ciclo de simulações foi adotado 4.400 GHz como tamanho da banda adotado na conexão e FSU de 12,5 GHz como descreve WANG (2012). A Figura 12 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações do cenário proposto por WANG (2012).

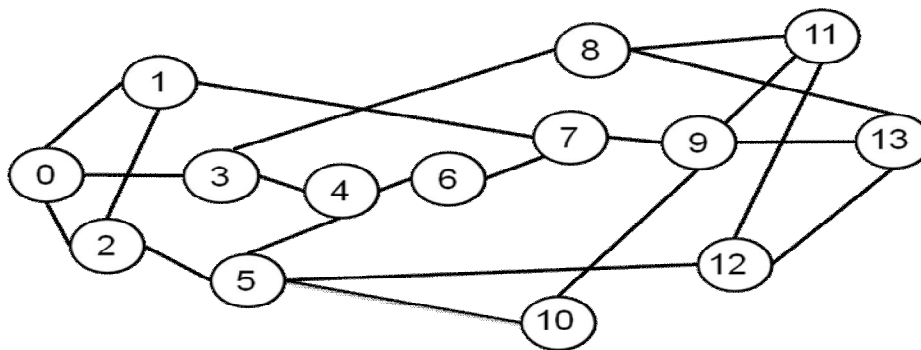


Figura 11. Topologia de Rede NSFNet 14 nós com 21 enlaces.

Na Figura 12 os resultados apontam consistência, com carga de 10 a 100 E os algoritmos RF *based*, KSP *based*, MTLSC e MPSC, na reprodução da curva do algoritmo MTLSC com carga de 10 E foi o ponto em que se identificou a maior diferença, segundo WANG (2012) a probabilidade de bloqueio é de aproximadamente 0,06% enquanto que no EONSim é de 0,05%. Portanto, estes resultados indicam a validade da ferramenta em relação a resultados outrora consolidados e apresentados por WANG (2012).

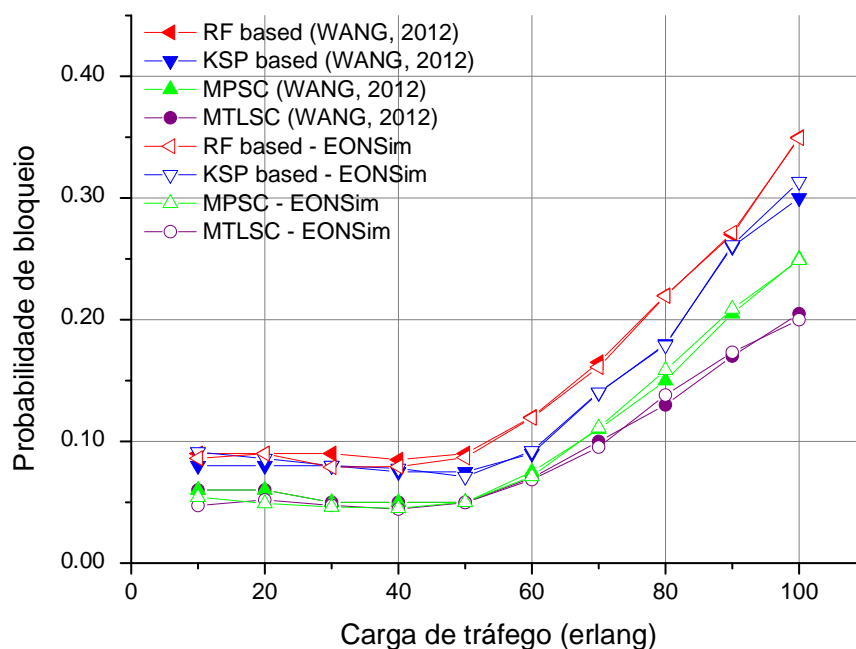


Figura 12. Resultados obtidos na reprodução dos resultados de WANG (2012).

A ferramenta EONSim permite a obtenção de resultados para a avaliação de EON e o seu desenvolvimento colabora para o aperfeiçoamento de pesquisas neste campo. No presente capítulo foram apresentados aspectos fundamentais do funcionamento do EONSim, bem como a validação da ferramenta. O capítulo a seguir apresentará os algoritmos RSA implementados para alocação de canais em EON.

4. HEURÍSTICAS DE ALOCAÇÃO DE CANAL

O capítulo anterior apresentou uma das importantes contribuições deste trabalho: o desenvolvimento do simulador de EON adotado na obtenção dos resultados, o EONSim. Neste capítulo são apresentadas as heurísticas de alocação de canal e o método de implementação de tais algoritmos no simulador.

A heurística de alocação de canal define como é realizada a alocação dos recursos disponibilizados em relação à banda do canal óptico. A utilização máxima dos recursos permite maior acomodação de tráfego. Portanto, heurísticas de alocação de canal com maior acomodação de tráfego reduzem o desperdício de recursos. O princípio de funcionamento do algoritmo responsável pela heurística de alocação do canal é encontrar a melhor forma de alocar a banda requerida pela conexão utilizando a quantidade mínima de recursos.

A Seção 4.1 apresentará os algoritmos de menor caminho. Na Subseção 4.1.1 a implementação dos algoritmos FF e RF são apresentadas em sua versão RSA. A Subseção 4.1.2. apresenta dois algoritmos *Spectrum Block Division* (SBD), elaborados por nosso grupo de trabalho, o *Spectrum Block Division First Fit* (SBD-FF) e o *Spectrum Block Division Random Fit* (SBD-RF). A Seção 4.2 abordará os algoritmos de melhor ocupação espectral e maior consecutividade de espectro. Na Subseção 4.2.1 uma nova proposta elaborada pelo grupo é apresentada, o algoritmo *Shortest Path with Maximum number of Free Frequency slot units* (SPMFF). A Subseção 4.2.2. apresenta o algoritmo proposto por WANG (2012) MTLSC. Na Subseção 4.2.3. o algoritmo proposto por WANG (2012) MPSC

é apresentado. Finalmente a Subseção 4.2.4 apresenta uma contribuição ao algoritmo MTSLC objetivando o aperfeiçoamento dos resultados de probabilidade de bloqueio e ocupação de banda de rede.

4.1 ALGORITMOS DE MENOR CAMINHO

Os algoritmos de menor caminho consideram a ordenação dos caminhos mínimos por meio do custo do caminho. A busca por recursos disponíveis é realizada a partir do menor caminho até o maior caminho de ligação entre o nó de origem e o nó de destino, sendo que a acomodação do tráfego no caminho mais curto deve comportar o número de FSU necessários. Tal comportamento permite a estes algoritmos o preenchimento progressivo da banda dos enlaces dos menores caminhos. Entretanto, a sua desvantagem é gerar a sobrecarga dos caminhos de menor custo, ocasionando o desbalanceamento da carga de tráfego na banda de rede (SOARES, 2004).

4.1.1 Algoritmos FF e RF

Os algoritmos FF e RF são implementados em sua versão RSA no EONSim como descreve SILVA (2013). O algoritmo FF é implementado como segue:

A. Aplica-se o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) para estabelecer o caminho mais curto e determinar uma possível caminho entre os nós de origem e de destino;

B. Pesquisam-se todas as regiões espectrais com largura de banda B_c livre em todos enlaces do caminho;

C. A partir de regiões determinadas em "B", o algoritmo seleciona aquela cujo primeiro FSU começa na menor posição de frequência óptica, e que está disponível em todos os enlaces do caminho óptico possível. Esta torna-se o caminho escolhido.

D. Se nenhuma região espectral satisfaz as condições especificadas no passo 'C', então o possível caminho considerado é excluído e os passos "A", "B", e "C" são executados novamente.

E. Se todos os caminhos possíveis são testadas e excluídos, a conexão solicitada é bloqueada.

Na implementação do algoritmo RF os passos são semelhantes àqueles válidos para os FF, com a exceção do passo "C" que é substituído por:

C': Das regiões determinadas em "B", o algoritmo escolhe aleatoriamente, adotando um processo randômico, um FSU inicial, com largura de banda B_c livre em todos enlaces do caminho;

4.1.2 Algoritmos SBD

Atualmente as operadoras adotam os algoritmos RWA nas redes ópticas. A introdução dos algoritmos RSA, tornaria o gerenciamento da rede mais complexo para as operadoras. Os algoritmos SBD, uma contribuição inédita deste trabalho, têm por objetivo adotar o comportamento dos algoritmos RWA em regiões que comportem diversas grades fixas.

Os algoritmos do tipo SBD são híbridos, definem regiões para cada acomodação do tráfego de dados, de acordo com a distribuição da carga que se

deseja avaliar para cada taxa de transmissão. A distribuição é realizada no início da execução do motor de simulação do EONSim, considerando o número de FSU necessários para acomodação das conexões na banda disponibilizada. Tais implementações do algoritmo SBD, em nossa visão correspondem a uma solução híbrida de algoritmo de alocação de canais. A Figura 13 apresenta exemplos de ocupação de largura de banda para EON e para redes ópticas com adoção de SBD.

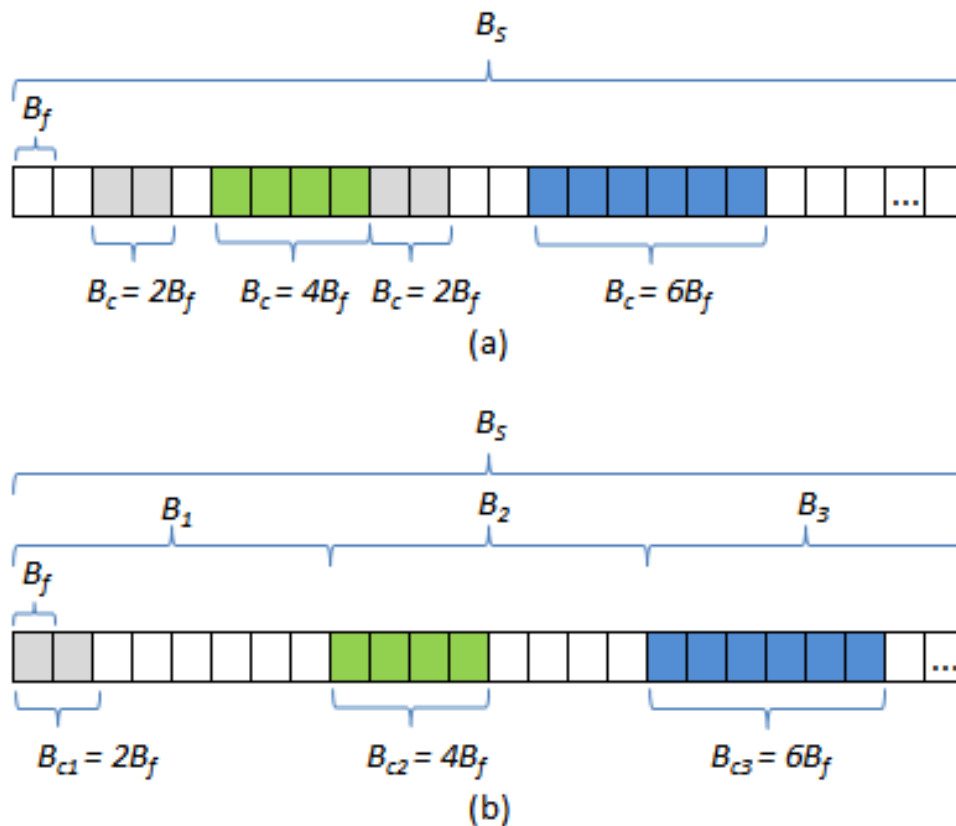


Figura 13. Exemplos de ocupação de largura de banda para (a) EON e (b) abordagens SBD (SILVA, 2013).

A Figura 13(a) ilustra o comportamento da banda do espectro óptico, B_s , com conexões que possuem comportamento elástico com determinado número de

B_f que representa o número de FSUs utilizados pela conexão alocada de forma arbitrária. A Figura 13(b) ilustra o comportamento da banda do espectro óptico, com a definição dos blocos, distribuídos seguindo a modelagem do cenário de simulação, e conexões acomodadas de acordo com a região reservada para tal taxa.

A especificação de tais algoritmos baseia-se nas definições realizadas por SILVA (2013). Na abordagem SBD, presume-se que as ligações utilizarão um máximo de N_b larguras de banda de canal. O espectro óptico disponível é então dividido em N_b blocos de espectrais. O i -ésimo bloco espectral ($i = 1, \dots, N_b$) é reservado para acomodar exclusivamente canais de largura de banda $B_{c,i}$. A largura de banda do i -ésimo bloco espectral ($i = 1, \dots, N_b$) é

$$B_i = P_i \left(\frac{B_{c,i}}{B_{c,max}} \right) B_s \quad (9)$$

sendo P_i a probabilidade de um pedido de conexão para um canal com largura de banda $B_{c,i}$ e $B_{c,max}$ é o valor máximo de todas $B_{c,i}$. O bloco espectral B_i da banda também é dividido em FSUs de banda $B_{f,i}$, de tal forma que os seus canais de largura de banda pode ser expresso por

$$B_{c,i} = n_{f,i} B_{f,i} \quad (10)$$

sendo $n_{f,i}$ um número de FSUs que são necessários acomodar a conexão.

No EONSim duas versões de algoritmos SBD são implementadas (SILVA, 2013). O primeiro algoritmo SBD-FF adota o comportamento do algoritmo FF

tradicional no preenchimento da banda do espectro óptico dentro da região a qual dada conexão pertence. O segundo algoritmo SBD-RF adota o comportamento do algoritmo RF tradicional no preenchimento da banda do espectro óptico dentro da região a qual dada conexão pertence. Os algoritmos RWA FF e RF são descritos por CHLAMTAC (1989).

A definição dos blocos determina a região em que uma conexão deverá ser alocada na banda do espectro óptico. Esta característica impede que conexões possam ser acomodadas em outras regiões da banda que possuam recursos, quando a região a qual esta conexão pertença não tenha recursos disponíveis. Portanto, os algoritmos SBD limitam a região que poderá ser ocupada pela conexão, garantem a distribuição das regiões de acordo com o tráfego previamente planejado, mas impõem limites para a ocupação de regiões desperdiçadas pela não utilização.

Os algoritmos de menor caminho selecionam os caminhos a partir do menor número de saltos. Tal comportamento proporciona uma ocupação progressiva dos caminhos disponíveis entre o nó de origem e o nó de destino e dada conexão. Uma limitação dos algoritmos de menor caminho é o fato de não considerarem a consecutividade espectral no custo do caminho. A seguir os algoritmos de melhor ocupação espectral serão apresentados.

4.2 ALGORITMOS DE MELHOR OCUPAÇÃO ESPECTRAL

Os algoritmos de melhor ocupação espectral avaliam o custo do caminho considerando a ocupação espectral da banda. Tais algoritmos fazem uma leitura

de todos os caminhos possíveis, realizando a medida de regiões que possuam disponibilidade de acomodação da banda requisitada pela conexão a ser estabelecida. Portanto, tais algoritmos consideram a ocupação da banda e a disponibilidade de recursos para acomodação do tráfego na seleção do caminho.

Os algoritmos de melhor ocupação espectral implementados no simulador EONSim são o SPMFF, proposto por nosso grupo (SILVA, 2013), os algoritmos MPSC e MTLSC propostos por WANG (2012), e os algoritmos MPSC e MTLSC melhorados, implementando uma proposta de contribuição. A seguir tais algoritmos são apresentados descrevendo a sua implementação computacional.

4.2.1 Algoritmo SPMFF

Além dos algoritmos clássicos FF e RF, propomos um novo algoritmo RSA, o SPMFF. Tal algoritmo acomoda uma determinada conexão no caminho mais curto, com o número máximo de FSUs consecutivos. Supondo-se que o número mínimo de FSU livres para atender a ligação solicitada é n_{fr} , o algoritmo SPMFF implementa as seguintes etapas:

A. Aplica-se o algoritmo KSP para descobrir todos os k caminhos que ligam nós de origem e de destino;

B. Para os k caminhos mais curtos:

B1. Agrupam-se todos FSUs livres em todos os enlaces do caminho;

B2. Encontra-se a intersecção entre todos os grupos determinados em B1; tais cruzamentos são chamados de regiões espectrais comuns (RSC);

B3. Para o j -ésimo RSC do k -ésimo caminho mais curto, atribui-se um custo C_{jk} que é igual ao número de FSU livres da RSC;

B4. Determina-se o valor máximo do C_{jk} , $C_{jk, max}$;

C. Se $C_{jk, max} \geq n_{fr}$ então utiliza-se o j -ésimo RSC do k -ésimo caminho mais curto para acomodar a conexão. Neste procedimento, a acomodação do sinal se dá na primeira FSU da j -ésima RSC;

D. Se $C_{jk, max} \geq n_{fr}$ possui mais de um caminho, então acomoda-se a conexão no j -ésimo RSC do menor de tais caminhos. Neste procedimento, a acomodação do sinal se dá no primeiro FSU do j -ésimo RSC escolhido;

E. Se $C_{jk, max} < n_{fr}$ então a conexão solicitada é bloqueada.

4.2.2 Algoritmo MTLSC

O algoritmo MTLSC é proposto por WANG (2012). A modelagem do algoritmo MTLSC considera o custo de consecutividade dos FSU livres e o número total de FSUs livres em um dado conjunto de enlaces. O custo de consecutividade é o número de FSU contíguos desocupados no enlace em relação ao número de blocos. Um bloco é definido no algoritmo MTLSC como uma sequência de FSUs consecutivos. O custo de FSUs livres é o número de FSUs livres em relação ao número de posições totais de FSU. Segundo WANG (2012), o vetor com as posições de FSU, U_i , que representa o enlace é dado por $U_i = [u_1^l, u_2^l, \dots, u_{N_f}^l]$, em que u representa as posições de FSU, e a ocupação do caminho U_p , que representa o caminho, é dado por

$$U_p = \bigcap_{l \in L(s,d)} U_l = [u_1^l, u_2^l, \dots, u_{N_f}^l] \quad (11)$$

sendo $L(s, d)$ o conjunto de ligação do caminho p , l o índice do enlace, u a posição do FSU e N_f o número total de FSUs do enlace.

O vetor é construído U_l a partir da leitura da *matrizBanda*, descrita no capítulo 3, analisando o valor de u . O custo de FSUs livres, segundo WANG (2012), é a relação do número de B_f que estejam livres em B_s . O custo do enlace C_l é dado por

$$C_l = \left(\frac{\sum_{i=1}^{F-1} u_i^l u_{i+1}^l}{B_l} \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^F u_i^l}{B_f} \right) \quad (12)$$

sendo B_l o número de blocos espectrais disponíveis no enlace l .

A Figura 14 apresenta um exemplo de cálculo do custo do caminho adotando o algoritmo MTLSC. Nesta figura ilustram-se quatro enlaces e o custo de cada um destes enlaces. O custo do enlaces é adotado na seleção do caminho a ser utilizado pelo algoritmo para acomodação da banda de rede requerida pela conexão a ser estabelecida. Esta figura ilustra a utilização da fórmula de cálculo de C_l para 4 enlaces. No Enlace E1 há 2 blocos de FSUs composto por 6 posições livres em um total de 20 posições de FSU. Os blocos são regiões do enlace que apresentam posições de FSU livres. As posições livres do Enlace E1 possuem a consecutividade de 4 posições de FSUs. O C_l obtido para o Enlace E1 é de 0.6. Para o Enlace E2 o C_l é de 1.16 resultante de 3 blocos de FSUs consecutivos e 7 posições livre no total. O Enlace E3 resulta em C_l de 3, proporcionado pelos 10

FSUs livres consecutivos encontradas no enlace. Finalmente, o Enlace E4, apesar de possuir um número de FSUs livres igual ao Enlace E2, possui C_l maior, de 2. O custo do Enlace E4 é maior que o do Enlace E2 por causa do maior número de FSU livres consecutivos, fazendo com que o valor de consecutividade de FSUs livres seja maior que o encontrado no Enlace E2.

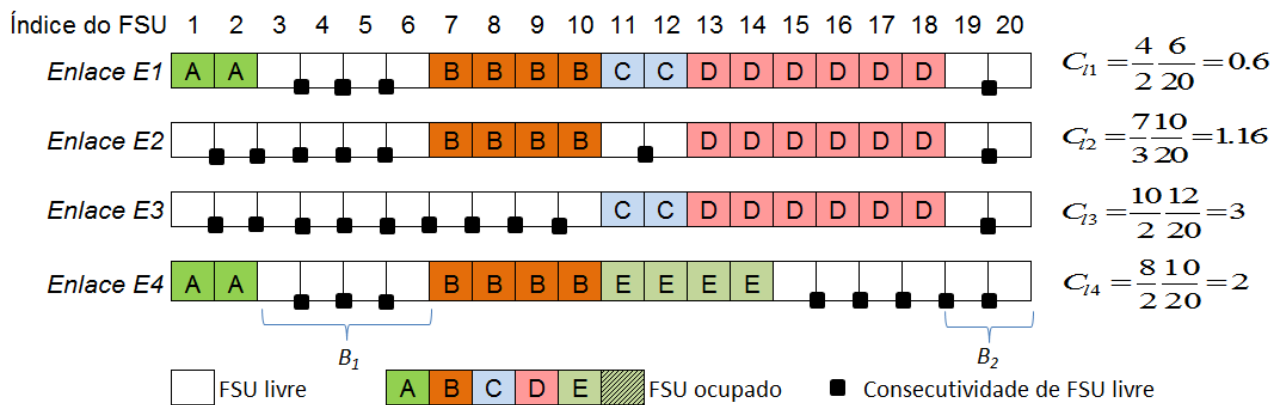


Figura 14. Ilustração do cálculo do custo do enlace adotando o algoritmo MTLSC.

Na Figura 14 após o cálculo do valor de C_l para cada um dos quatro enlaces do caminho, é realizada a obtenção do valor do custo do caminho. No exemplo apresentado, $Caminho[E1,E2,E3,E4]$ o C_l é de 6.76 resultante da soma dos custos de enlaces do caminho. Nota-se que duas regiões espectrais, bloco B_1 e bloco B_2 , estão livres nos quatro enlaces do caminho, oriundas de U_p .

O algoritmo apresentado por WANG (2012) é implementado por meio dos seguintes passos no EONSim:

A. Aplica-se o algoritmo KSP para descobrir todos os k caminhos que ligam nós de origem ao nó de destino;

B. Repete-se enquanto houver caminhos candidatos ($k > 0$):

B1. Calcula-se a ocupação espectral do caminho adotando-se (11);

B2. Procuram-se blocos espectrais nos enlaces capazes de acomodar a demanda de tráfego da conexão requisitada;

B3. Executa-se enquanto houver blocos espectrais candidatos B_i ($0 < i < n$)

B3.1. Percorre-se os enlaces do caminho, enquanto houver enlaces a serem percorridos

B3.1.1. Calcula-se o C_l adotando-se (12) e armazena-se em

$$C_{l_i}^{(B_i)}$$

B3.1.2. Acumulam-se os valores de $C_l^{(B_i)}$ adotando

$$C_l^{(B_i)} \leftarrow C_l^{(B_i)} + C_{l_i}^{(B_i)};$$

B3.1.3. Registra-se o resultado de $Cl = \{C_l^{B(1)}, C_l^{B(i)}, \dots, C_l^{B(n)}\}$;

C. Seleciona-se o bloco B_i de $C_l^{B(i)} = \max_{\forall j} C_l^{B(j)}$

D. Se o bloco B_i de $C_l^{B(i)} = \max_{\forall j} C_l^{B(j)}$ comporta a demanda de tráfego, alocam-se os recursos; senão a conexão solicitada é bloqueada.

O MTLSC proposto por WANG (2012) trata a consecutividade de espectro com o mesmo peso que o número de FSU livres. Sendo a consecutividade de espectro um fator que possibilita a redução da fragmentação da banda de rede, a ponderação de um peso maior para consecutividade pode ser uma alternativa para o aperfeiçoamento do algoritmo. Na Subseção 4.2.4 apresentaremos uma proposta feita para o aperfeiçoamento do MTLSC.

4.2.3 Algoritmo MPSC

O algoritmo MPSC foi proposto por WANG (2012). A modelagem do algoritmo MPSC considera o custo de consecutividade dos FSU livres e o número total de FSUs livres em um dado caminho. O custo de consecutividade é o número de FSU contíguos desocupados no enlace em relação ao número de blocos. O custo de FSUs livres é o número de FSUs livres em relação ao número de posições totais de FSU.

O vetor U_p é construído a partir da leitura da *matrizBanda* analisando o valor de u adotando a Equação 11. O custo de FSUs livres, segundo WANG (2012), é a relação do número de B_f que estejam livres em B_s . O custo do caminho C_p é dado por

$$C_p = \left(\frac{\sum_{i=1}^{F-1} u_i^p u_{i+1}^p}{B_p} \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^F u_i^p}{B_f} \right) \quad (13)$$

sendo B_p o número de blocos espectrais disponíveis no caminho p .

A Figura 15 apresenta exemplo de cálculo do custo do caminho adotando o algoritmo MPSC. O custo calculado é adotado na seleção do caminho a ser utilizado pelo algoritmo para acomodação da banda de rede requerida pela conexão a ser estabelecida.

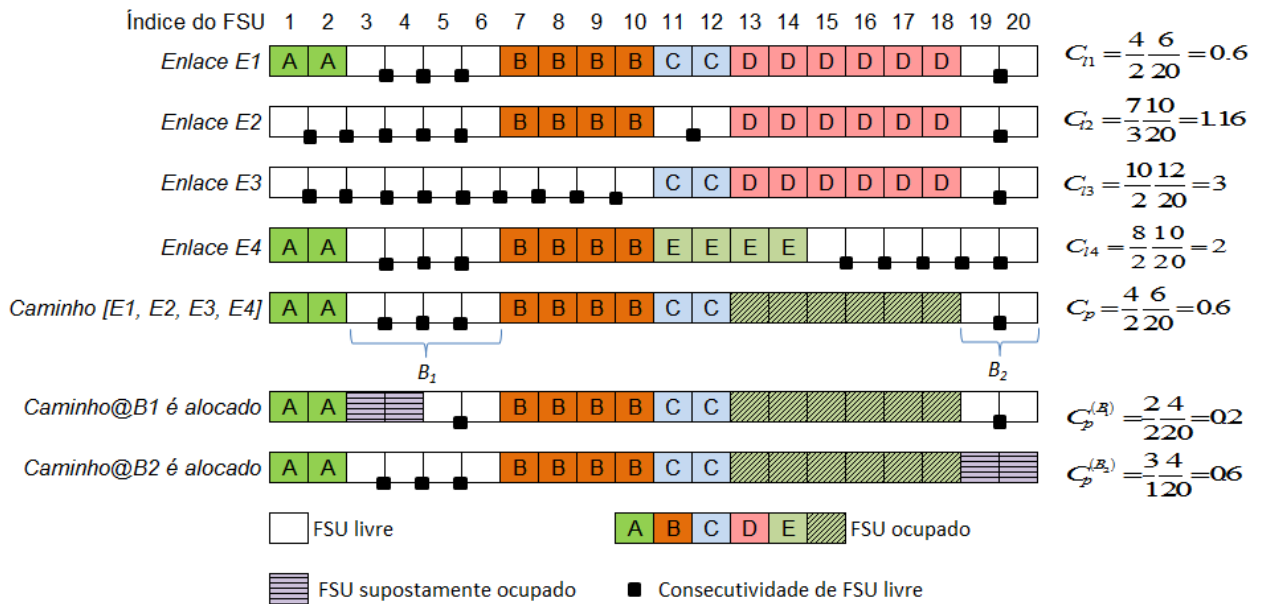


Figura 15. Ilustração do cálculo do custo do caminho adotando o algoritmo MPSC.

Para escolha do caminho considera-se o valor de C_p . O valor do C_p , como é a Figura 15 apresenta em *Caminho@B1* e *Caminho@B2*, está relacionado com a posição espectral a ser ocupada. Na ilustração, a acomodação do tráfego em B_1 resulta em $C_p^{(B_1)} = 0.2$ enquanto que a acomodação em B_2 resulta em $C_p^{(B_2)} = 0.6$. Neste exemplo a acomodação do tráfego seria realizada nos FSUs de índice 19 e 20 do espectro óptico, adotando como critério de escolha o valor máximo de C_p .

4.2.4 Algoritmo MTLSC aperfeiçoado

A partir do algoritmo MTLSC proposto por WANG (2012), nosso trabalho propõe um aperfeiçoamento do mesmo, com parâmetros α e β adotados no cálculo de C_l definidos por

$$C_l = \left(\frac{\sum_{i=1}^{F-1} u_i^l u_{i+1}^l}{B_l} \right)^\alpha \left(\frac{\sum_{i=1}^F u_i^l}{B_f} \right)^\beta \quad (14)$$

sendo α a ponderação para o custo de consecutividade de espectro e β a ponderação para o custo de FSU livre.

A proposta de inserção dos valores α e β permite que possamos priorizar o custo de consecutividade ou o custo do FSU livre. Uma atribuição maior do parâmetro α em relação ao β , por exemplo, $\alpha = 2$ e $\beta = 1$, prioriza a consecutividade de espectro na seleção do caminho. Esta ponderação permite que caminhos com maior consecutividade tenham uma valorização maior em relação aos demais caminhos disponíveis. Em contrapartida, um valor maior do parâmetro β em relação ao α , por exemplo, $\alpha = 1$ e $\beta = 2$, prioriza o custo de FSU livres. Tal priorização valoriza os caminhos que possuem maior número de FSU livre em relação aos demais caminhos disponíveis.

A Tabela 9 apresenta os resultados adotando o algoritmo MTLSC original proposto por WANG (2012) para uma rede hipotética composta por oito enlaces. Nesta tabela são apresentados o número de FSUs consecutivos, o número de

blocos de FSUs consecutivos, o número de FSUs livres total e o número total de FSUs disponíveis por enlace. Os custos dos enlaces C_{i1} a C_{i8} são calculados a partir da Equação 12. Nota-se que os enlaces E3 e E5 apresentam os maiores C_i e os enlaces E1 e E7 apresentam os menores C_i . O custo dos enlaces está relacionado ao número de FSUs livres consecutivos e número de FSUs livres total. Quanto maior o número de FSUs livres consecutivos por bloco, maior é o C_i deste enlace.

Tabela 9 - Exemplo de cálculo do C_i adotando o MTLSC original.

	Número de FSUs consecutivos	Número de blocos	Número de FSUs livres	Total de FSUs	C_i
Enlace E1	4	2	6	20	0,60
Enlace E2	7	3	10	20	1,17
Enlace E3	10	2	12	20	3,00
Enlace E4	8	3	10	20	1,33
Enlace E5	12	3	18	20	3,60
Enlace E6	12	6	13	20	1,30
Enlace E7	4	3	12	20	0,80
Enlace E8	7	3	10	20	1,17

Os resultados da Tabela 10 simulam valores de α e β com variação entre 2 e 4 para o algoritmo MTLSC aperfeiçoado nos enlaces da Tabela 9. São apresentados 3 caminhos possíveis entre um dado nó de origem e um dado nó de destino com o objetivo de apresentar os resultados de C_i para cada enlace e para cada caminho.

Tabela 10 - Exemplo de cálculo do C_i adotando o MTLSC aperfeiçoado.

	$\alpha = 1$ e $\beta = 1$	$\alpha = 2$ e $\beta = 1$	$\alpha = 3$ e $\beta = 1$	$\alpha = 4$ e $\beta = 1$	$\alpha = 1$ e $\beta = 2$	$\alpha = 1$ e $\beta = 3$	$\alpha = 1$ e $\beta = 4$
C_{11}	0,60	1,20	2,40	4,80	0,18	0,05	0,02
C_{12}	1,17	2,72	6,35	14,82	0,58	0,29	0,15
C_{13}	3,00	15,00	75,00	375,00	1,80	1,08	0,65
C_{14}	1,33	3,56	9,48	25,28	0,67	0,33	0,17
C_{15}	3,60	14,40	57,60	230,40	3,24	2,92	2,62
C_{16}	1,30	2,60	5,20	10,40	0,85	0,55	0,36
C_{17}	0,80	1,07	1,42	1,90	0,48	0,29	0,17
C_{18}	1,17	2,72	6,35	14,82	0,58	0,29	0,15
Caminho1[$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}$]	6,10	22,48	93,23	419,91	3,23	1,76	0,98
Caminho2[$C_{15}, C_{16}, C_{17}, C_{18}$]	6,87	20,79	70,57	257,52	5,15	4,04	3,30
Caminho3[$C_{11}, C_{16}, C_{13}, C_{18}$]	6,07	21,52	88,95	405,02	3,41	1,97	1,17

Na Tabela 10 os custos dos enlaces C_{11} a C_{18} são calculados a partir da Equação 14. Considerando o resultado no MTLSC original, em que não há ponderação de consecutividade de espectro ou número de FSU livres, o melhor resultado de custo pertence ao *Caminho2*[$C_{15}, C_{16}, C_{17}, C_{18}$] resultando em 6,87. A partir da priorização de consecutividade de espectro, quando aumentamos o valor de α em relação a β , o *Caminho1*[$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}$] passa a ter um maior custo, sendo então o melhor caminho por conta do número de FSUs consecutivos encontrados em seus enlaces. Pode-se notar também que priorizando-se o número FSUs livres, quando aumentamos o valor de β em relação a α , o *Caminho1*[$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}$] permanece como o caminho com maior custo, isso se deve ao seu número de FSUs livres encontrados em seus enlaces.

Os custos apresentados na Tabela 10 indicam que a priorização do número de FSUs livres não altera a opção de caminho indicado pelo algoritmo tradicional MTLSC. O aperfeiçoamento do MTLSC pode ser percebido quando priorizada a consecutividade de espectro, ou seja, quando um valor de α é maior que o valor de β . Portanto, os enlaces com maior número de FSUs consecutivos, possuem um custo de enlace maior, sendo assim selecionados como a melhor opção para acomodação do sinal na banda de rede.

No presente capítulo foram apresentados os algoritmos implementados para alocação do canal óptico neste trabalho. Dentre estes algoritmos destacam-se as propostas SBD, SPMFF e aperfeiçoamento do MTLSC, contribuições inéditas do nosso grupo. O capítulo a seguir apresentará os cenários adotados na obtenção dos resultados e como foram estruturados dentro das topologias de redes adotadas para tal.

5. ARRANJOS DAS SIMULAÇÕES

O capítulo anterior descreve os algoritmos adotados na heurística de alocação dos canais ópticos. Neste capítulo, serão apresentadas as topologias de rede e descritos os arranjos de simulações adotados na obtenção dos resultados deste trabalho. Na Seção 5.1 são apresentadas as topologias de rede adotadas nas simulações. A Seção 5.2 apresenta a modelagem dos cenários simulados. A Seção 5.3 descreve os cenários adotados nas simulações.

5.1 TOPOLOGIAS DE REDE ADOTADAS

Para obtenção dos resultados deste trabalho, foram adotadas duas topologias de rede. A primeira topologia de rede adotada nas simulações é a topologia NSFNet composta por 14 nós com 21 enlaces bidirecionais, conforme apresenta Figura 11, discutida no capítulo 3. A segunda topologia de rede adotada nas simulações é a topologia Brasileira (ASSIS, 2009) composta por 12 nós com 20 enlaces, apresentada na Figura 16.

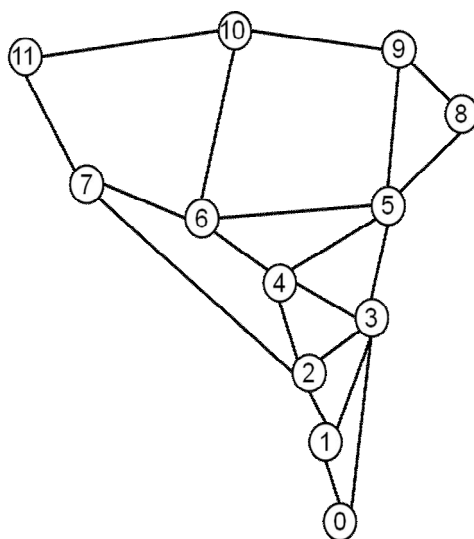


Figura 16. Topologia de rede Brasileira 12 nós com 20 enlaces.

A rede mostrada na Figura 16 é baseada na rede nacional de pesquisa formada por um conjunto de universidades e centros de pesquisa do Brasil. Podemos observar que comparando com a NSFNet, a rede Brasileira possui um número menor de nós e de enlaces. Na rede NSFNet os nós 5 e 9 possuem 4 enlaces cada, sendo os nós com maior número de ligações. Na rede Brasileira, os nós 3 e 5 possuem 5 enlaces, sendo os nós com maior número de ligações. Ambas as topologias de rede possuem média de 3 enlaces para cada nó. Tais topologias foram selecionadas por possuírem números de nós e enlaces diferentes. A conectividade média da topologia de rede NSFNet é de 3 enlaces por nó, inferior a topologia de rede Brasileira, que apresenta a conectividade média de 3,3 enlaces por nó.

5.2 MODELAGEM DOS CENÁRIOS

Um cenário é composto pela distribuição de tráfego de dados e a topologia de rede adotada. O desempenho de cada algoritmo pode variar de acordo com a distribuição de tráfego e a topologia de rede utilizada na simulação. Portanto, é importante que a distribuição e a topologia sejam consideradas na obtenção dos resultados de avaliação dos algoritmos de roteamento.

No presente trabalho as topologias de rede NSFNet e Brasileira foram implementadas no EONSim e simuladas para sete cenários de distribuição de tráfego. A modelagem dos cenários de distribuição de tráfego a serem simulados na ferramenta EONSim, foi realizada a partir de observações de trabalhos como GERSTEL (2012), WANG (2012) e SILVA (2013). Foi considerado que cada enlace possui um número de fibras $N_f = 2$, atuando cada uma destas fibras em um

sentido da transmissão. Nas simulações deste trabalho foram definidas banda disponível por fibra $B_f = 4.400$ GHz e banda do FSU $F = 12,5$ GHz.

A Tabela 11 apresenta a definição das cargas de tráfego simuladas. As conexões foram estabelecidas considerando o nó de origem e nó de destino aleatoriamente. A Tabela 11 apresenta a carga distribuída em cada um dos cenários considerando as taxas de transmissão de 10 Gb/s (Banda Ocupada de 25 GHz - 2 FSU), 100 Gb/s (Banda Ocupada de 50 GHz - 4 FSU), 400 Gb/s (Banda Ocupada de 75 GHz - 6 FSU) e 1 Tb/s (Banda Ocupada de 150 GHz - 12 FSU). Além da informação do percentual de distribuição das taxas, há também a informação do número de FSU que será reservado para cada taxa, informação esta adotada pelos algoritmos SBD apresentados no capítulo 4.

Tabela 11 - Definição dos cenários de carga de tráfego adotados.

Cenário	10 Gb/s	100 Gb/s	400 Gb/s	1 Tb/s
Cenário A	50% (110 FSUs)	40% (176 FSUs)	10% (66 FSUs)	0% (0 FSUs)
Cenário B	33% (58 FSUs)	33% (116 FSUs)	33% (178 FSUs)	0% (0 FSUs)
Cenário C	10% (14 FSUs)	40% (118 FSUs)	50% (220 FSUs)	0% (0 FSUs)
Cenário D	25% (30 FSUs)	25% (58 FSUs)	25% (88 FSUs)	25% (176 FSUs)
Cenário E	0% (0 FSUs)	33% (64 FSUs)	33% (96 FSUs)	33% (192 FSUs)
Cenário F	0% (0 FSUs)	50% (126 FSUs)	40% (150 FSUs)	10% (76 FSUs)
Cenário G	0% (0 FSUs)	10% (16 FSUs)	40% (96 FSUs)	50% (240 FSUs)

Os cenários propostos têm por objetivo avaliar a eficiência dos algoritmos RSA implementados para alocação do canal óptico no EONSim. A seguir, a descrição dos cenários de carga de tráfego serão apresentadas.

5.3 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS

Os Cenários A, B e C exibem cargas de tráfego adotadas no presente pelas operadoras de telecomunicação. As distribuições da carga de tráfego considerada nos Cenários D, E, F e G são uma prospecção futura para as operadoras de telecomunicação. O objetivo da definição de tais cenários é avaliar o comportamento das heurísticas de alocação de espectro, em função das cargas de tráfego presentes e futuras das operadoras de telecomunicação. A seguir, a distribuição da carga de tráfego e as particularidades de cada cenário proposto, serão descritas.

No Cenário A, as requisições de conexões com taxa de 10 Gb/s possuem uma atribuição de 50% do número total de requisições. Para a taxa de 100 Gb/s, é atribuído 40% do número total de requisições. Para a taxa de 400 Gb/s, é atribuído 10% do número total de requisições e para 1 Tb/s não são realizadas requisições de conexão. A distribuição da carga de tráfego no Cenário A resulta em 31,25% dos recursos de rede destinada às conexões de 10 Gb/s, 50% para conexões de 100 Gb/s e 18,75% para conexões de 400 Gb/s. Portanto, a maior parte dos recursos será alocada para a taxa de 100 Gb/s, isso se deve ao fato de que o número de FSU alocados por conexão nesta taxa é superior à da taxa de 10 Gb/s.

No Cenário B a distribuição da carga de tráfego é de um terço das requisições de conexão para as taxas de 10 Gb/s, 100 Gb/s e 400 Gb/s. Para a taxa de 1 Tb/s não são requisitadas conexões. A distribuição da carga de tráfego no Cenário B resulta em 16,48% dos recursos de rede destinada as conexões de 10 Gb/s, 32,95% para conexões de 100 Gb/s e 50,57% para conexões de 400

Gb/s. Portanto, a maior parte dos recursos será alocada para a taxa de 400 Gb/s, isso se deve ao fato de que o número de FSU alocados por conexão nesta taxa é superior a das taxas de 10 e 100 Gb/s.

No Cenário C 10% do número total de requisições de conexão são de 10 Gb/s. Conexões de 100 Gb/s ocorrem em 40% do número total de requisições. Conexões de 400 Gb/s possui atribuição de 50% do número total de requisições. No Cenário C para 1 Tb/s não são realizadas requisições de conexão. A distribuição da carga de tráfego no Cenário C resulta em 3,97% dos recursos de rede destinada as conexões de 10 Gb/s, 33,52% para conexões de 100 Gb/s e 62,51% para conexões de 400 Gb/s. Portanto, a maior parte dos recursos será alocada para a taxa de 400 Gb/s.

No Cenário D a distribuição da carga de tráfego é de um quarto das requisições de conexão para as taxas de 10 Gb/s, 100 Gb/s, 400 Gb/s e 1 Tb/s. A distribuição da carga de tráfego no Cenário D resulta em 8,52% dos recursos de rede destinada as conexões de 10 Gb/s, 16,48% para conexões de 100 Gb/s, 25% para conexões de 400 Gb/s e 50% para conexões de 1 Tb/s. Portanto, a maior parte dos recursos será alocada para a taxa de 1 Tb/s, isso se deve ao fato de que o número de FSU alocados por conexão nesta taxa é superior a das taxas de 10, 100 e 400 Gb/s.

No Cenário E a distribuição da carga de tráfego é de um terço das requisições de conexão para as taxas de 100 Gb/s, 400 Gb/s e 1 Tb/s. Para 10 Gb/s não são realizadas requisições de conexão. A distribuição da carga de tráfego no Cenário E resulta em 18,18% dos recursos de rede destinada às conexões de 100 Gb/s, 27,27% para conexões de 400 Gb/s e 54,55% para

conexões de 1 Tb/s. Portanto, a maior parte dos recursos será alocada para a taxa de 1 Tb/s, isso se deve ao fato de que o número de FSU alocados por conexão nesta taxa é superior ao das taxas de 100 e 400 Gb/s.

No Cenário F, as requisições de conexões com taxa de 100 Gb/s possuem uma atribuição de 50% do número total de requisições. Para a taxa de 400 Gb/s é atribuído 40% do número total de requisições. Para a taxa de 1 Tb/s, é atribuído 10% do número total de requisições e para 10 Gb/s não são realizadas requisições de conexão. A distribuição da carga de tráfego no Cenário F resulta em 35,8% dos recursos de rede destinada as conexões de 100 Gb/s, 42,6% para conexões de 400 Gb/s e 21,6% para conexões de 1 Tb/s. Portanto, a maior parte dos recursos será alocada para a taxa de 400 Gb/s, isso se deve ao fato de que o número de FSUs alocados por conexão nesta taxa é superior à da taxa de 100 Gb/s.

No Cenário G 10% do número total de requisições de conexão são de 100 Gb/s. A taxa de 400 Gb/s possui atribuição de 40% do número total de requisições. A taxa de 1 Tb/s possui atribuição de 50% do número total de requisições. No Cenário G para 10 Gb/s não são realizadas requisições de conexão. A distribuição da carga de tráfego no Cenário G resulta em 4,54% dos recursos de rede destinada as conexões de 100 Gb/s, 27,3% para conexões de 400 Gb/s e 68,16% para conexões de 1 Tb/s. Portanto, a maior parte dos recursos será alocada para a taxa de 1 Tb/s.

Cada taxa de transmissão possui um número de FSUs para acomodação da conexão na banda. O maior percentual de requisições de conexões nem

sempre implica em um maior número de recursos alocados. No Cenário A, podemos observar que mesmo a taxa de 10 Gb/s tendo 50% das requisições de conexão, sua utilização da banda de rede é menor que a da taxa de 400 Gb/s que terá apenas 40% das requisições de conexão. A consecutividade de espectro é privilegiada nas taxas superiores a 100 Gb/s, em que um maior número de FSU é alocado a cada conexão. Desta forma, os cenários podem ser avaliados considerando que a ocupação da banda dependerá do volume de recursos que cada taxa de transmissão necessitará.

Neste capítulo foram apresentadas as topologias de rede adotadas e os arranjos de simulação para a obtenção dos resultados deste trabalho. O capítulo a seguir apresentará os resultados deste trabalho e discutirá os efeitos das heurísticas de alocação de espectro óptico sobre os recursos de rede disponibilizados.

6. RESULTADOS

O capítulo anterior descreve os cenários e as topologias de rede adotadas na obtenção dos resultados deste trabalho. Neste capítulo, serão descritos os resultados deste trabalho. A Seção 6.1 apresenta e discute os resultados de probabilidade de bloqueio e ocupação da banda de rede, para os cenários A, C e G simulados adotando sete heurísticas de alocação de espectro óptico e as topologias de rede NSFNet e Brasileira. A Seção 6.2 apresenta resultados de número de saltos médios obtidos durante a simulação dos cenários e as duas topologias de rede, em relação às sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas. Finalmente, a Seção 6.3 apresenta as vantagens e desvantagens dos algoritmos de acordo com os resultados obtidos.

6.1 PROBABILIDADE DE BLOQUEIO E OCUPAÇÃO DA BANDA DE REDE

Uma conexão bloqueada é decorrente da ausência de banda em pelo menos um dos enlaces do caminho de ligação do nó origem ao de nó destino. A probabilidade de bloqueio representa o número estimado de conexões bloqueadas em relação ao número de conexões solicitadas. Quando reduzimos a probabilidade de bloqueio, podemos aumentar a ocupação da banda de rede, atendendo-se assim um número maior de requisições de conexões.

A seguir apresentaremos os resultados dos cenários de tráfego que apresentaram os melhores resultados. Estes cenários de tráfego são os cenários A, C e G. Os resultado dos demais cenários de carga de tráfego simulados, encontram-se no Apêndice deste trabalho.

Inicialmente, analisou-se o desempenho dos algoritmos RWA e RSA para o cenário A, no qual 50% das conexões solicitadas são de 10 Gb/s, 40% das conexões solicitadas são de 100 Gb/s e 10% das conexões solicitadas são de 400 Gb/s. A Figura 17 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego (erlang), para o Cenário A, para topologia de rede NSFNet. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

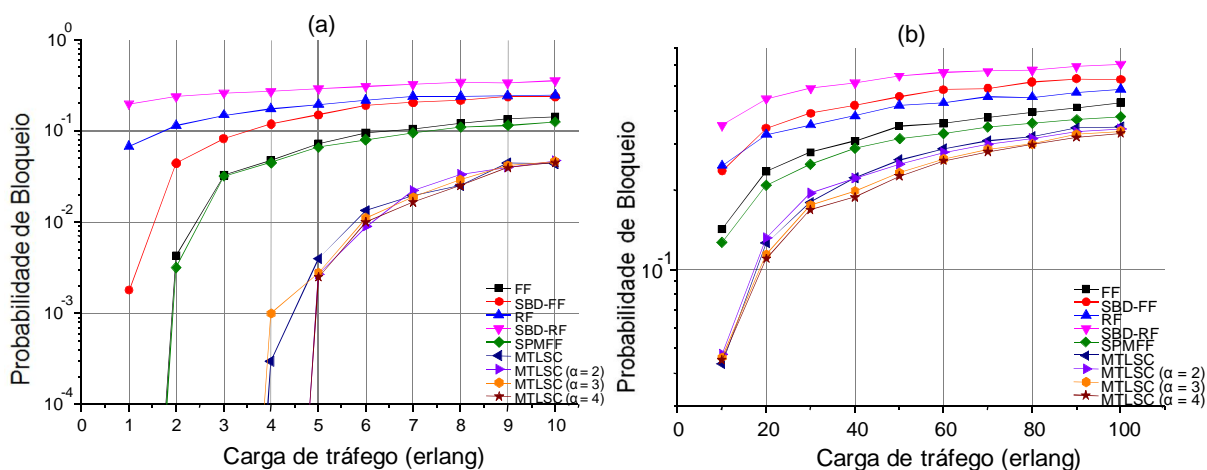


Figura 17. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

As Figuras 17(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio para os intervalos de carga de, respectivamente, 1 a 10 E e 10 a 100 E no cenário A. Nestas figuras observa-se uma probabilidade de bloqueio superior dos algoritmos SBD-FF e SBD-RF em relação aos algoritmos FF e RF. Isto pode ser visto, por exemplo, para uma carga de 2 E, em que o algoritmo SBD-RF apresenta 12% de probabilidade de bloqueio a mais que o algoritmo RF (SBD-RF

igual a 45% e o RF igual a 33%). Para as taxas superiores a 10 E, os algoritmos SBD são os com maiores probabilidade de bloqueio, como é o caso do algoritmo SBD-FF em relação ao FF. Para a carga de 20 E, por exemplo, o algoritmo SBD-FF possui um aumento de 11% na probabilidade de bloqueio comparado ao FF. Portanto, os algoritmos SBD-FF e SBD-RF possuem as maiores probabilidades de bloqueio. Esta constatação pode ser notada nos demais cenários e topologias simuladas neste trabalho.

Os algoritmos FF e SPMFF apresentam probabilidade de bloqueio próximas para as taxas de 1 a 4 E. A partir de 5 E o algoritmo SPMFF possui probabilidade de bloqueio menor do que a do algoritmo FF. No algoritmo FF, a ocupação é feita a partir do menor caminho, o que gera um desbalanceamento da carga na rede. O algoritmo SPMFF realiza um balanceamento da acomodação das conexões na banda de rede, distribuindo a carga entre os caminhos cujo número de FSUs consecutivos é maior. Tal comportamento permite ao algoritmo SPMFF uma acomodação mais uniforme das conexões na banda de rede. Para as cargas de tráfego superiores a 10 E, o algoritmo SPMFF provê uma redução de 2 a 5% da probabilidade de bloqueio em relação ao FF.

O algoritmo MTLSC, proposto por WANG (2012), apresenta para todas as cargas de tráfego probabilidade de bloqueio menor que os algoritmos FF, RF, SBF-FF, SBD-RF e SPMFF. Os resultados de probabilidade de bloqueio, por exemplo, para 8 E em que o SPMFF resultou em 11%, adotando o algoritmo MTLSC resultou em 2,5%. O algoritmo MTLSC, neste caso, apresentou redução de 8,5% na probabilidade de bloqueio.

Os resultados apresentados na Figura 17(a) mostram que o MTLSC aperfeiçoado possui resultados próximos aos resultados do MTLSC. No entanto, os melhores resultados apresentados na Figura 17(b), são do MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 3$ e $\alpha = 4$. Por exemplo, para as cargas de 40 e 50 E a redução da probabilidade de bloqueio é de até 3,5% do MTLSC aperfeiçoado em relação à versão tradicional do algoritmo.

A redução na probabilidade de bloqueio provida pelos algoritmos de melhor ocupação espectral, SPMFF e MTLSC, permitem à operadora de telefonia um aproveitamento maior dos recursos disponíveis. A redução da probabilidade de bloqueio permite que um número maior de conexões possa ser acomodada, aumentando a capacidade de atendimento da rede. Desta forma, com a redução da probabilidade de bloqueio e o aumento da capacidade de acomodação de tráfego, uma ampliação do número de clientes atendidos poderá ser implementada pela operadora de telefonia, sem que investimentos com aquisição de novos recursos da rede seja realizada.

A Figura 18 apresenta os resultados de ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego (erlang), para o Cenário A usando a topologia de rede NSFNet. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

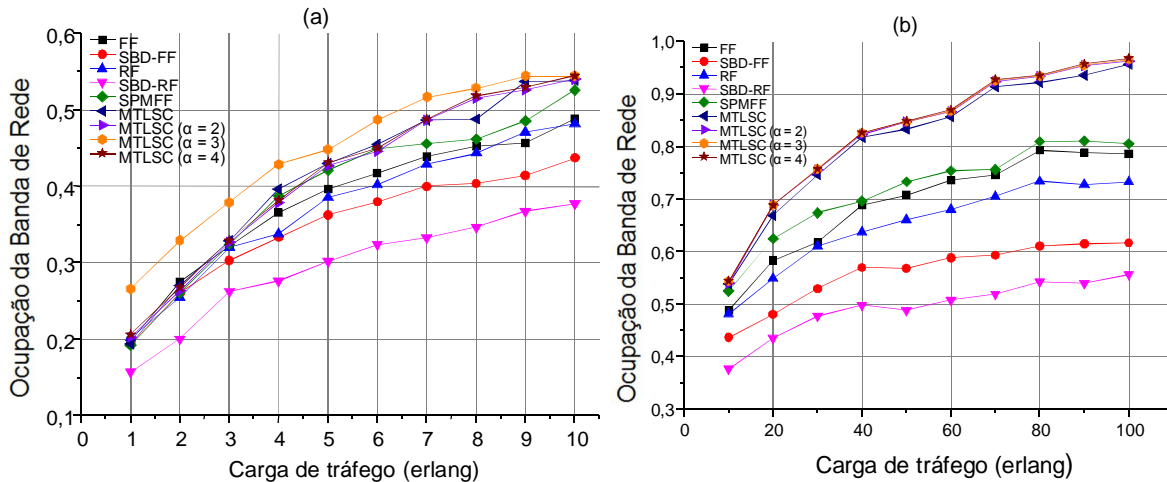


Figura 18. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

As Figuras 18(a) e (b) mostram os resultados de ocupação de banda de rede em função da carga de tráfego, respectivamente, 1 a 10 E e 10 a 100 E no cenário A. Observa-se na Figura 18(a) que os algoritmos SBD apresentam os menores resultados de ocupação da banda de rede para todas as cargas. Apenas a partir da carga de 80 E, por exemplo, o algoritmo SBD-FF resulta em ocupação da banda de rede superior a 60%, ao passo que o algoritmo FF apresenta a partir de 30 E, por exemplo, ocupação da banda de rede superior a 60%.

O algoritmo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 3$, é o algoritmo que apresenta a maior ocupação de banda de rede para as carga de 1 a 9 E. A partir de 10 E, como podemos observar na Figura 18(b), os resultados do algoritmo MTLSC aperfeiçoado são similares ao algoritmo MTLSC tradicional, sendo o MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$ o que possui maior ocupação de banda de rede com 97%.

A Figura 19 apresenta os resultados de ocupação da banda de rede em função probabilidade de bloqueio, para o Cenário A para topologia de rede NSFNet. Como nas Figuras 17 e 18, são apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico consideradas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

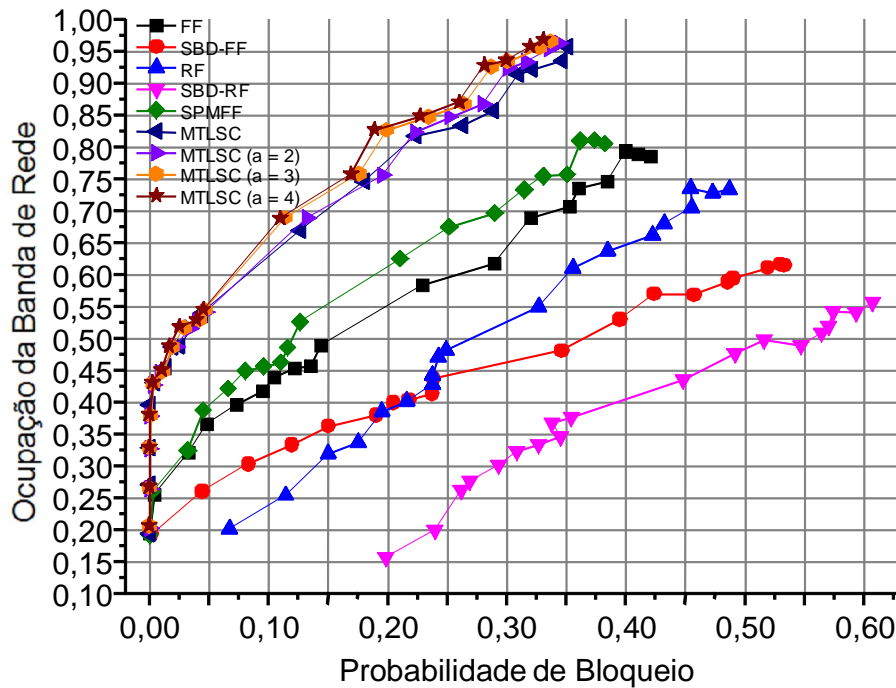


Figura 19. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Na Figura 19 exibe-se um comparativo da ocupação de banda da rede em função da probabilidade de bloqueio. Os algoritmos de melhor ocupação espectral, SPMFF, MTLSC e MTLSC aperfeiçoado apresentam maior ocupação de banda em menor probabilidade de bloqueio que os algoritmos de menor caminho FF, RF, SBD-FF e SBD-RF. O algoritmo FF, por exemplo, para probabilidade de bloqueio de até 12%, não ultrapassa a ocupação da banda de rede de 45%, ao passo que o

algoritmo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 3$ resulta em 68%. O algoritmo RF mostrou-se menos eficiente em ocupação da banda de rede que o algoritmo SBD-FF para até 17% de probabilidade de bloqueio. A partir de 20% de probabilidade de bloqueio, o algoritmo RF apresenta ocupação da banda de rede superior ao SBD-FF. Para a probabilidade de bloqueio em torno de 35%, por exemplo, o algoritmo RF apresenta ocupação da banda de rede 14% superior à do algoritmo SBD-FF. O algoritmo RF provê uma ocupação da banda de rede superior ao SBD-FF por considerar todos os recursos disponíveis para alocação da conexão na banda, ao passo que o SBD-FF limita os algoritmos a dadas regiões da banda para acomodação da conexão. Os algoritmos SBD atingem no máximo 62% de ocupação da banda de rede, ao passo que o algoritmo MTLSC tradicional resulta em 93% de ocupação da banda de rede.

Pode-se notar que o ganho provido pelo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$ em relação ao FF, por exemplo, para 10% de probabilidade de bloqueio, são 25% de incremento na ocupação da banda de rede. Para as operadoras de telefonia este é um ganho significativo, uma vez ajustado α , que se trata de um parâmetro do algoritmo MTLSC, pode se obter uma utilização maior dos recursos e conseqüentemente um aumento da receita da companhia.

A Figura 20 mostra os resultados de probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego (erlang), para o Cenário A para topologia de rede Brasileira. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

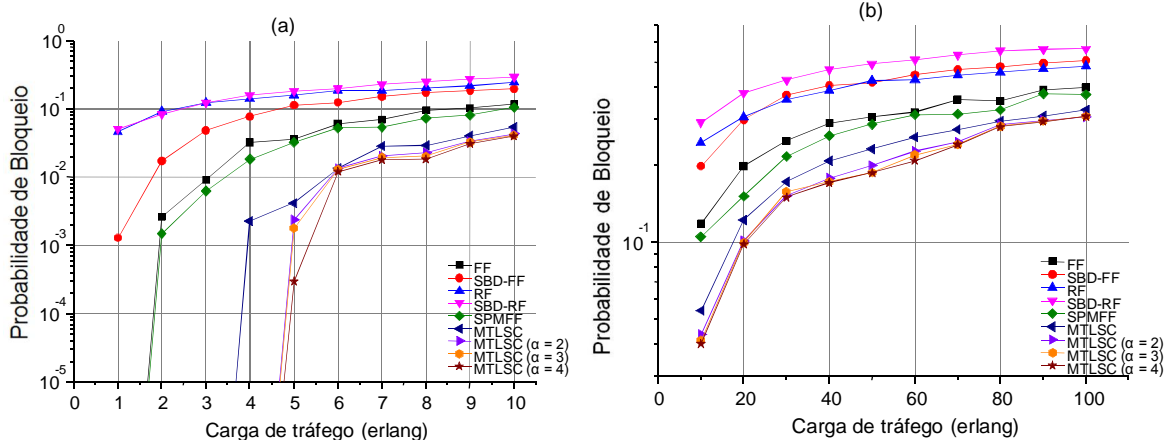


Figura 20. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

As Figuras 20(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio para os intervalos de carga de, respectivamente, 1 a 10 E e 10 a 100 E no cenário A. O comportamento dos algoritmos SBD são muito próximos aos resultantes na topologia de rede NSFNet, com exceção das cargas de 1 a 3 E e 6 E em que os algoritmos RF e SBD-RF possuem probabilidades de bloqueio equivalentes. O algoritmo SPMFF apresenta resultado superior ao algoritmo FF em todas as cargas de tráfego, resultando, por exemplo, em redução da probabilidade de bloqueio de 3% para carga de tráfego de 3 E.

Os resultados apresentados pelos algoritmos RF e SBD-RF, são equivalentes para cargas de 1 a 6 E. A partir de 7 E o algoritmo RF apresenta uma redução da probabilidade de bloqueio entre 3 e 5%. Os algoritmos SBD-FF e RF apresentam resultados equivalentes para as cargas de tráfego de 20 a 50 E. O

algoritmo RF mostra resultados de probabilidade de bloqueio, na ordem de 2 a 3% melhores ao SBD-FF a partir da carga de tráfego de 60 E.

Os algoritmos MTLSC aperfeiçoados resultam em probabilidade de bloqueio a partir de 5 E, enquanto que o MTLSC tradicional a partir de 4 E. O algoritmo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 2$, resulta em uma redução de probabilidade de bloqueio, por exemplo, para carga de 50 E de 3% em relação ao MTLSC tradicional. Portanto, os algoritmos MTLSC aperfeiçoados por permitirem a ponderação da consecutividade de FSUs por meio do parâmetro α , resultam nas menores probabilidades de bloqueio deste trabalho. Tal constatação pode ser observada nos demais cenários e topologias simuladas, não tornando a ser exposta neste trabalho.

Nota-se que a redução da probabilidade de bloqueio nas simulações para topologia de rede Brasileira provida pelos algoritmos SPMFF, MTLSC e MTLSC aperfeiçoado, é similar à topologia de rede NSFNet. Os resultados dos algoritmos de melhor ocupação espectral exibem uma redução da probabilidade de bloqueio, comparado aos algoritmos de menor caminho. Portanto, a redução da probabilidade de bloqueio oferece as operadoras de telefonia um incremento do número de conexões estabelecidas sem ampliação do número de recursos.

A Figura 21 mostra os resultados da ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego (erlang), para o Cenário A para topologia de rede Brasileira. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

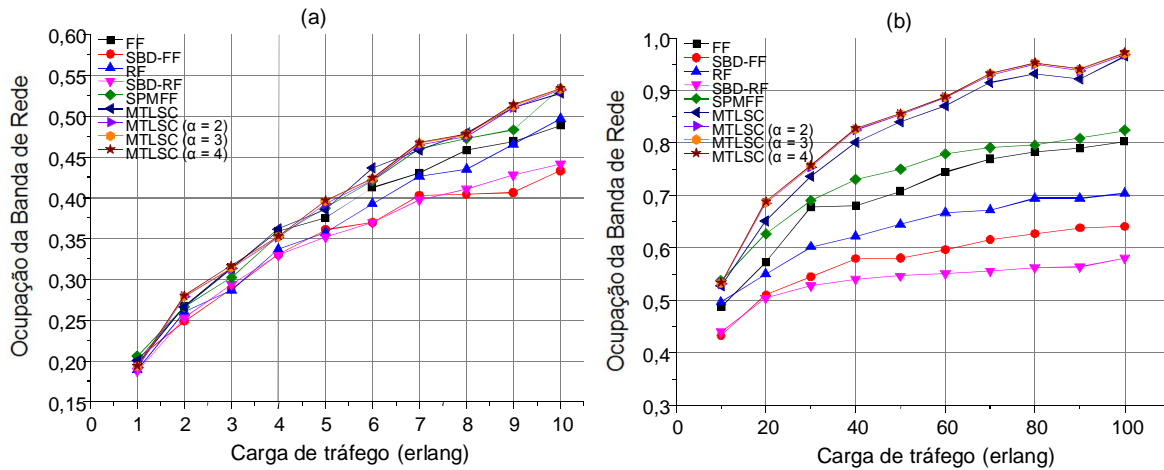


Figura 21. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

As Figuras 21(a) e (b) mostram os resultados de ocupação da banda de rede para os intervalos de carga de, respectivamente, 1 a 10 E e 10 a 100 E no cenário A. Nota-se o mesmo comportamento apontado nas simulações deste cenário na topologia de rede NSFNet. Os algoritmos MTLSC aperfeiçoados resultam em uma maior ocupação da banda de rede em relação ao MTLSC e os demais algoritmos. Tal comportamento deve-se à priorização da consecutividade de FSU provida pelo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha \geq 2$. Quando o número de FSU consecutivos é priorizado, ocorre uma ocupação maior da banda e um maior número de conexões é acomodada, reduzindo a probabilidade de bloqueio.

A Figura 22 exibe os resultados de ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio, para o Cenário A para topologia de rede Brasileira. Como nas Figuras 20 e 21, são exibidos os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

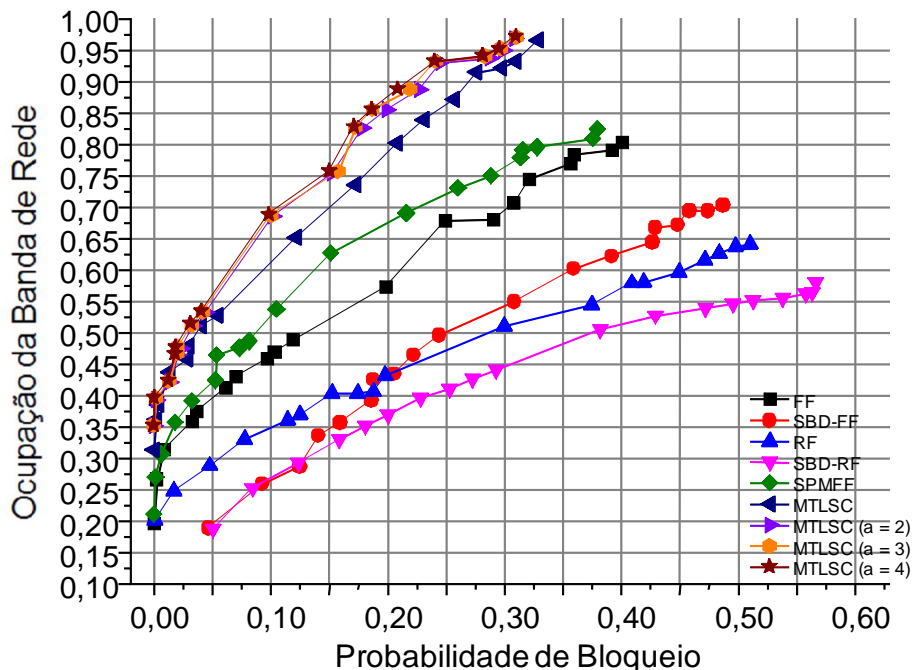


Figura 22. Simulações com o Cenário A para a Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Na Figura 22 observa-se um comportamento semelhante ao descrito na Figura 19 em que os algoritmos com maior ocupação da banda de rede resultam em números menores de probabilidade de bloqueio. O algoritmo MTLSC resulta em uma ocupação da banda de rede de 96% com probabilidade de bloqueio de 33%. O algoritmo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$ apresenta ocupação de 97% com uma probabilidade de bloqueio de 31%.

A consecutividade dos FSU contribui para o aumento da ocupação da banda de rede e a redução da probabilidade de bloqueio. Tal aumento permite que a operadora de telefonia, tenha um incremento no número de conexões atendidas com os mesmos recursos disponíveis. Portanto os algoritmos de melhor ocupação

espectral resultam em uma utilização mais eficiente dos recursos disponibilizados pela operadora.

A Figura 23 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o Cenário C para topologia de rede NSFNet. Conforme Tabela 10, no Cenário C 10% das conexões solicitadas são de 10 Gb/s, 40% das conexões solicitadas são de 100 Gb/s e 50% das conexões solicitadas são de 400 Gb/s. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α e β . A objetivo de adotar a variação do parâmetro β neste cenário, é avaliar uma maior ponderação do número de FSU livres em relação à consecutividade de FSU.

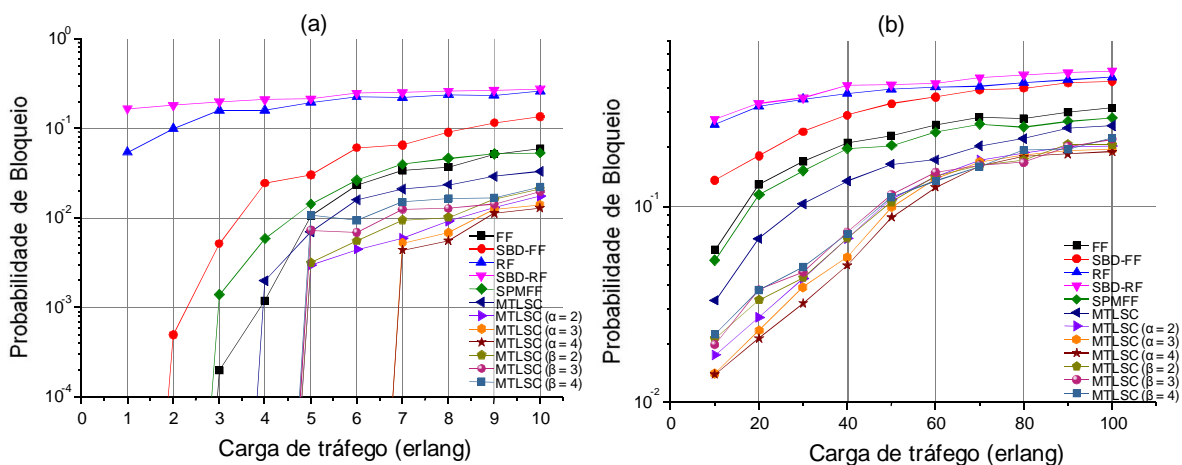


Figura 23. Simulações com o Cenário C para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

As Figuras 23(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio para os intervalos de carga de, respectivamente, 1 a 10 E e 10 a 100 E

no cenário C. Os resultados do MTLSC aperfeiçoado se destacam em todas as cargas de tráfego, sendo $\alpha = 4$ o com menor probabilidade de bloqueio e os algoritmos SBD com maior probabilidade de bloqueio. Neste cenário podemos observar que a variação do parâmetro β não apresenta reduções na probabilidade de bloqueio, sendo seus resultados piores, ou quando muito, equivalentes ao do MTLSC tradicional. Por esta razão, tal algoritmo não é adotado nos demais cenários de distribuição de tráfego.

Os algoritmos SBD-RF e RF foram os que tiveram os resultados mais altos de probabilidade de bloqueio. Para as cargas superiores a 60 E, os resultados dos algoritmos SBD-FF e RF foram similares.

Para as cargas inferiores a 10 E os resultados do FF foram superiores ou equivalentes ao SPMFF. Porém, o algoritmo SPMFF teve desempenho superior ao FF às cargas de tráfego maior ou igual 10 E. Neste Cenário A redução da probabilidade de bloqueio provida pelo SPMFF em relação ao FF foi em média de 3%. O melhor resultado do SPMFF em relação ao FF foi para carga de 100 E, em que há a redução da probabilidade de bloqueio de 4% (SPMFF igual a 28% e FF igual a 32%).

A Figura 24 apresenta a ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego. Como citado anteriormente na Figura 29, neste cenário adotamos para o algoritmo MTLSC aperfeiçoado variações para o parâmetro α e β . Nas Figuras 24(a) e (b) observa-se o comportamento encontrado no cenário A, no qual os algoritmos MTLSC aperfeiçoados possuem um resultado superior ao do MTLSC tradicional. Destaca-se na Figura 24(a), exceto o algoritmo SBD-RF, a similaridade dos algoritmos em relação à ocupação da banda de rede para cargas de tráfego

de até 7 E. Os algoritmos, apesar de terem probabilidades de bloqueio distintas, possuem ocupação de banda similar. Este é um efeito da fragmentação dos FSUs na banda de rede. Os algoritmos com melhor ocupação, aqueles que permitem maior consecutividade, permitem uma ocupação contígua de FSUs e menor probabilidade de bloqueio.

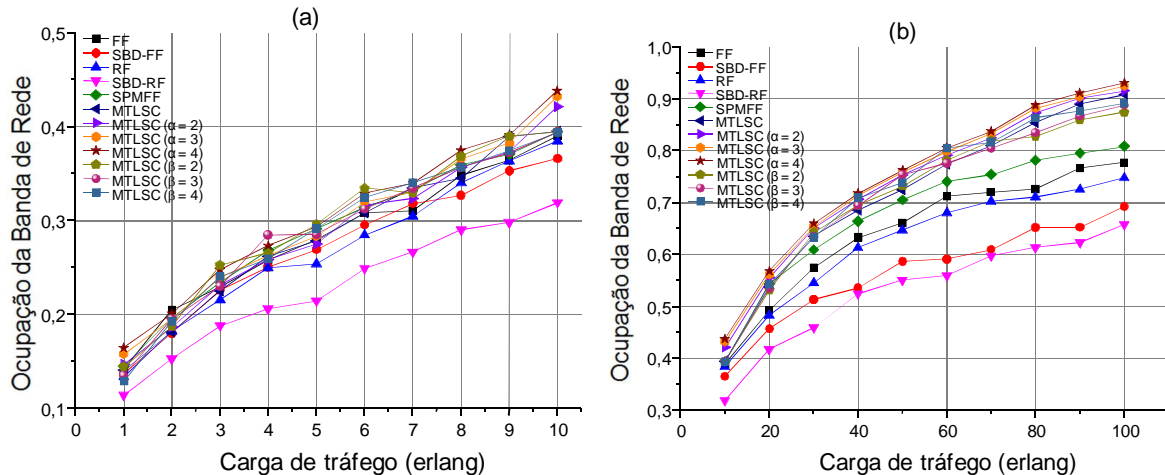


Figura 24. Simulações com o Cenário C Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Os resultados apresentados pela Figura 24(a) e (b) reforçam as limitações impostas pelos algoritmos SBD quanto à ocupação da banda de rede. Comparados ao SBD-FF, o algoritmo SPMFF provê uma ocupação de 15% superior para, por exemplo, a carga de tráfego de 60 E. Portanto, destacam-se neste cenários os algoritmos de melhor ocupação da banda, tais como o SPMFF e os MTLSC, que possuem ocupação da banda de rede superior a 80% para as cargas de tráfego maior ou igual a 90 E.

A Figura 25 apresenta os efeitos da ocupação da banda de rede em relação a probabilidade de bloqueio. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α e β . Na Figura 25 poderemos observar os melhores resultados da ocupação da banda de rede em relação a probabilidade de bloqueio provida pelos algoritmos SBD, neste trabalho.

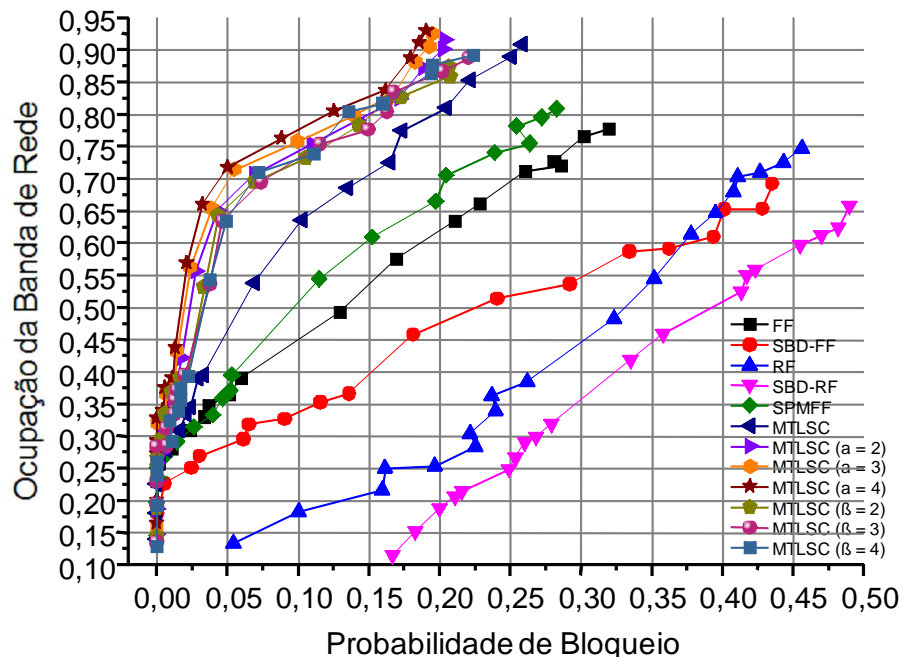


Figura 25. Simulações com o Cenário C Topologia de Rede NSFNet , em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Na Figura 25 observa-se os efeitos do melhor preenchimento de banda e menor probabilidade de bloqueio dos algoritmos FF e os de melhor ocupação espectral SPMFF, MTLSC e MTLSC aperfeiçoado. A ocupação da banda de rede provida pelo algoritmo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$ é de 94%, para uma probabilidade de bloqueio de 18%. O melhor resultado do algoritmo FF é de 77%

de ocupação da banda de rede com 33% de probabilidade de bloqueio. Um ganho considerável para o uso dos recursos de rede providos pelo MTLSC aperfeiçoado.

Uma observação importante sobre os resultados apresentados na Figura 25, é que o MTLSC aperfeiçoado com ponderação de β apresenta resultados de ocupação da banda de rede superiores aos exibidos pelo MTLSC tradicional. Apesar do MTLSC aperfeiçoado com α serem melhores que com a ponderação superior de β , os resultados da ponderação do β são importantes. Adotando a ponderação do parâmetro β , resultados superiores aos alcançados com o MTLSC tradicional foram observados. Por exemplo, para probabilidade de bloqueio de 7%, temos um incremento da ocupação da banda de rede de 18% provido pelo MTLSC aperfeiçoado com $\beta = 4$ em relação ao MTLSC tradicional (MTLSC $\beta = 4$ resulta em 72% e o MTLSC tradicional resulta em 54%). Apesar da ponderação do parâmetro α apresentar desempenho superior na ocupação da banda de rede e uma probabilidade de bloqueio menor que o parâmetro β , o MTLSC aperfeiçoado com β possui vantagens em relação ao MTLSC tradicional. Na seção 6.2 apresentaremos um outro resultado interessante provido pela maior ponderação de β , uma redução do número médio de saltos.

Os algoritmos SBD obtiveram neste cenários os melhores resultados de ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio deste trabalho. O algoritmo SBD-FF, por exemplo, é superado em ocupação da banda de rede pelo RF, apenas para probabilidades de bloqueio maior ou igual a 41%. Os algoritmos SBD-RF e SBD-FF chegam uma ocupação da banda de rede de 66% e 70%, respectivamente. A probabilidade de bloqueio dos algoritmos SBD-RF

e SBD-FF, também é menor. Adotando a máxima ocupação da banda de rede provida, chegam a probabilidade de bloqueio de 43% o SBD-FF e 48% o SBD-RF.

A Figura 26 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o Cenário C para topologia de rede Brasileira. Como nas simulações adotando a topologia de rede NSFNet, mostram-se os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α e β .

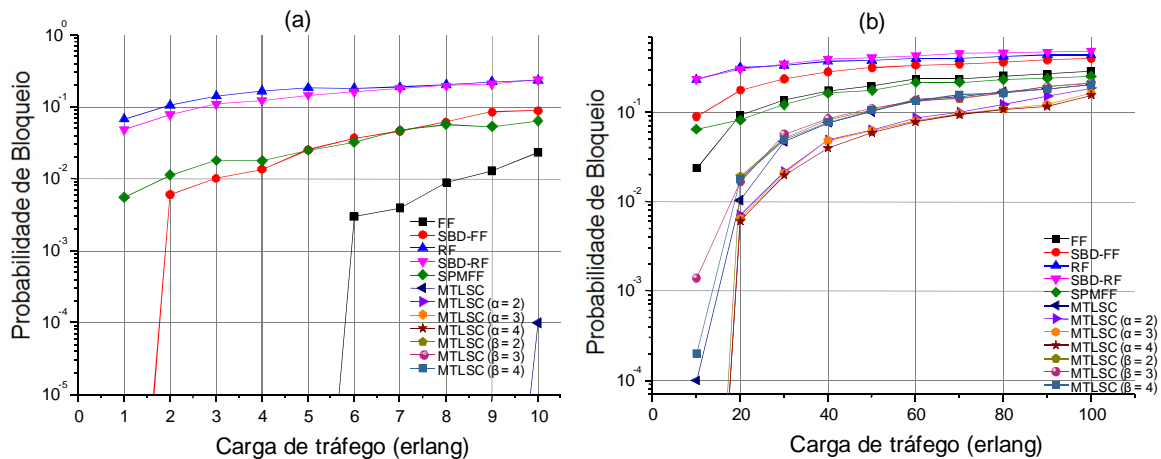


Figura 26. Simulações com o Cenário C para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

A Figura 26(a) e (b) mostra os resultados de probabilidade de bloqueio para os intervalos de carga de, respectivamente, 1 a 10 E e 10 a 100 E no cenário C. Na topologia de rede Brasileira os resultados para os algoritmos MTSLC são superiores aos encontrados na topologia de rede NSFNet ilustrada na Figura 23. Na Figura 26(a) observa-se que até 9 E a probabilidade de bloqueio, está abaixo

do limite inferior considerado nas simulações, para os algoritmos MTLSC. A partir de 10 E o algoritmo MTLSC tradicional apresenta probabilidade de bloqueio e o MTLSC aperfeiçoado a partir de 20 E. Tal efeito também ocorre no algoritmo FF que na Figura 23(a) apresenta probabilidade de bloqueio a partir de 3 E, por exemplo, e na topologia Brasileira apresentada na Figura 26(a) a partir de 6 E. Outra observação é o fato do algoritmo SPMFF que apresenta resultados inferiores ao algoritmo SBD-FF até 4 E e FF até 10 E. A partir de 10 E os resultados do SPMFF são superiores em relação a ambos os algoritmos.

A Figura 27 apresenta os resultados de ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. Assim como na Figura 27, neste cenário são simuladas variações do parâmetro α e β do algoritmo MTLSC aperfeiçoado.

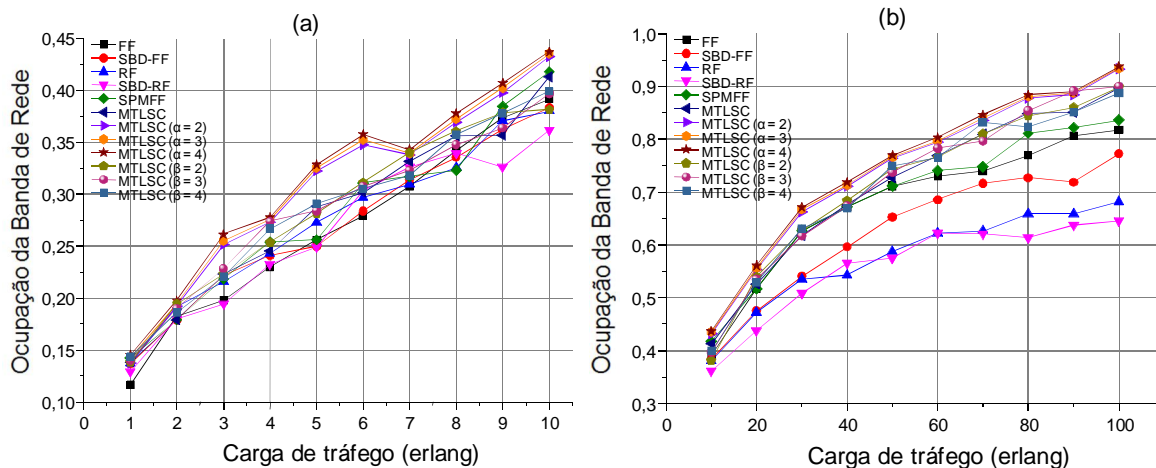


Figura 27. Simulações com o Cenário C Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Nas Figuras 27(a) e (b) os algoritmos MTLSC tiveram em todas as cargas de tráfego resultados superiores aos demais algoritmos. Em especial, destaca-se o MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$, que apresentou os melhores resultados de

ocupação da banda de rede deste cenário. Para a carga de tráfego de 80 E, o MTLSC aperfeiçoado com $\beta = 3$ apresentou o seu melhor resultado de ocupação da banda de rede para este cenário, tendo desempenho equivalente ao MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$. Tal efeito, não ocorreu na Figura 24(a) em que tais algoritmos tiveram resultados similares aos demais algoritmos. Este efeito indica que a topologia de rede interfere nos resultados do algoritmo de roteamento e alocação do canal óptico, não sendo esta observação citada nos demais cenários deste trabalho.

A Figura 28 apresenta os resultados de ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. Nesta figura podem-se observar os efeitos da probabilidade de bloqueio na ocupação da banda de rede. Os algoritmos com melhor ocupação espectral destacam-se pelo sua melhor ocupação da banda de rede. O algoritmo SBD-FF, por exemplo, apresenta ocupação da banda de rede de 77% com 40% de probabilidade de bloqueio. Para probabilidade de bloqueio menor ou igual a 5% os resultados de ocupação da banda de rede do SBD-FF, são similares aos SPMFF. A partir de maior ou igual a 6% os SPMFF supera o SBD-FF, apresentando uma ocupação da banda de rede superior e uma menor probabilidade de bloqueio.

O algoritmo FF resulta em uma ocupação da banda de rede superior ao SPMFF para probabilidade de bloqueio menor ou igual a 7%. A partir de 7% de probabilidade de bloqueio, os resultados do SPMFF são ligeiramente superiores ao FF. A redução da probabilidade de bloqueio provida pelo SPMFF em relação ao FF, varia entre 2% a 4%.

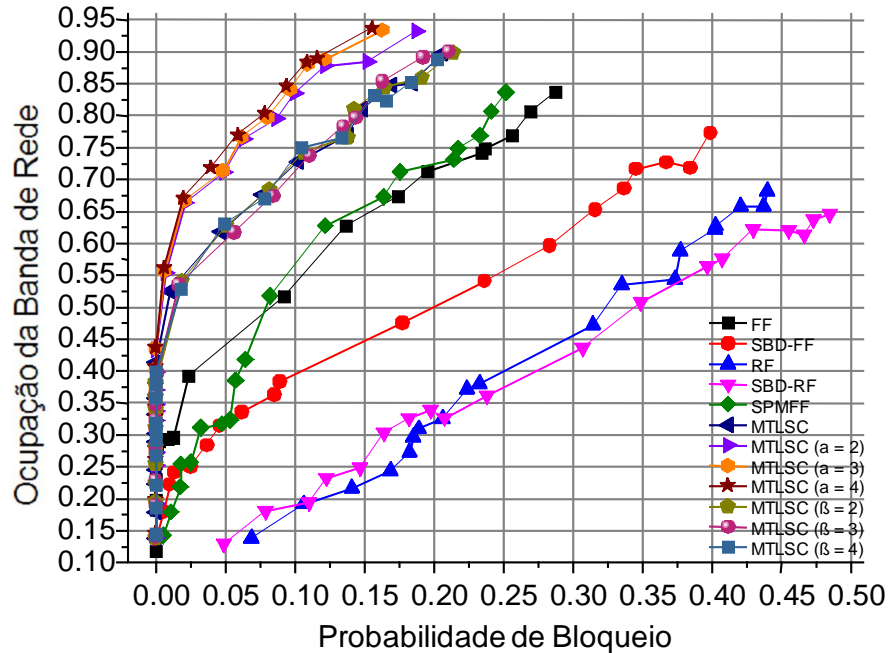


Figura 28. Simulações com o Cenário C Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Neste cenário obteve-se a melhor ocupação da banda de rede em relação a probabilidade de bloqueio de todo o trabalho. Tal resultado foi obtido pelo algoritmo MTLSC aperfeiçoado $\alpha = 4$, que apresenta ocupação da banda de rede 94% com 16% de probabilidade de bloqueio. O MTLSC aperfeiçoado obteve até 17% a mais de ocupação da banda de rede que o melhor dos algoritmos SBD, além de reduzir 24% da probabilidade de bloqueio. Diferente dos resultados exibidos pela Figura 25 adotando a topologia de rede NSFNet, neste cenário os resultados do MTLSC aperfeiçoado com variação de β foram similares aos do MTLSC tradicional.

A variação do parâmetro β não apresentou resultados superiores aos encontrados na variação do parâmetro α , no que tange probabilidade de bloqueio e ocupação da banda de rede. Desta forma, não são consideradas nos demais

cenários de simulação a variação do parâmetro β . Na Seção 6.3 trataremos do número médio de saltos, em que poderemos observar que a variação do parâmetro β , apesar dos resultados superiores em probabilidade de bloqueio e inferiores em ocupação da banda de rede, tem menor número médio de saltos.

A Figura 29 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o último cenário adotado neste trabalho para topologia de rede NSFNet, o cenário G. Conforme Tabela 10, no Cenário G a distribuição do tráfego de dados é 10% das conexões solicitadas são de 100 Gb/s, 40% das conexões solicitadas são de 400 Gb/s e 50% das conexões solicitadas são de 1 Tb/s. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

As Figuras 29(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio em relação a carga de tráfego, respectivamente de 1 a 10 E e 10 a 100 E, para o Cenário G adotando a topologia de rede NSFNet. Observa-se que o algoritmo RF apresenta resultados inferiores até 8 E em relação a versão SBD do mesmo. A partir de 9 E seus resultados são superiores ao RF, apresentando tendência de redução e equivalência aos resultados do SBD-FF. Os comportamentos apresentados na Figura 29 exibem semelhança aos cenários anteriores. Neste cenário, em específico, os algoritmos de menor caminho são superados pelos algoritmos de melhor ocupação em todas as cargas de tráfego.

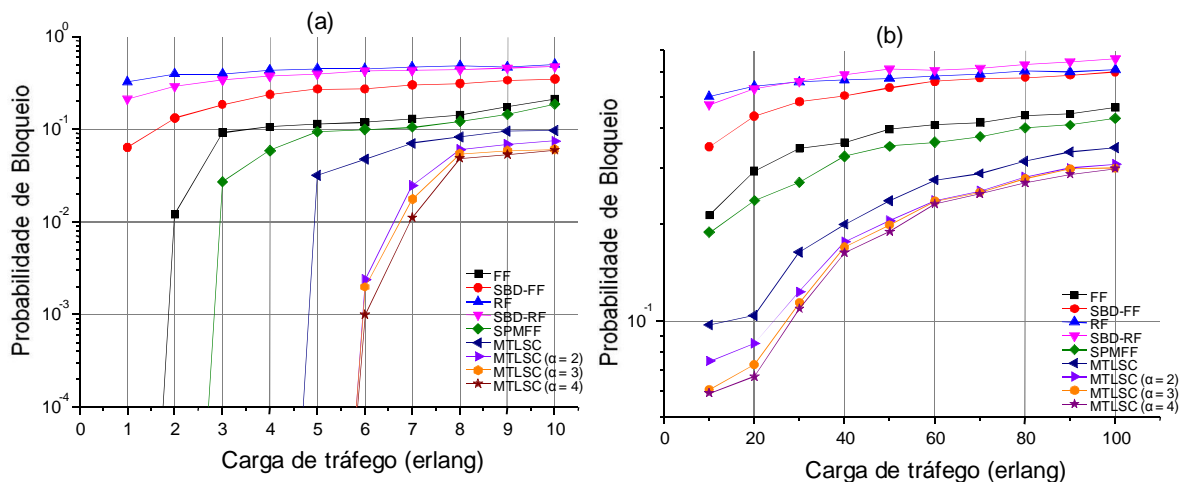


Figura 29. Simulações com o Cenário G para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

A Figura 30 mostra os resultados de ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para as simulações do Cenário G adotando a topologia de rede NSFNet. Como nos demais cenários, sete heurísticas de alocação do espectro são adotadas na simulação. Nas Figuras 30(a) e (b) destaca-se o comportamento do algoritmo RF, muito próximo ao FF nas cargas de 10 a 30 E. Os algoritmos SPMFF e MTLSC são os algoritmos com melhor ocupação da banda de rede, sendo para carga de tráfego 4 E o SPMFF superior ao MTLSC tradicional, no que tange a ocupação da banda de rede. Para as cargas de 2 e 30 E, o algoritmo RF apresenta resultados de ocupação da banda de rede similares aos resultantes do FF.

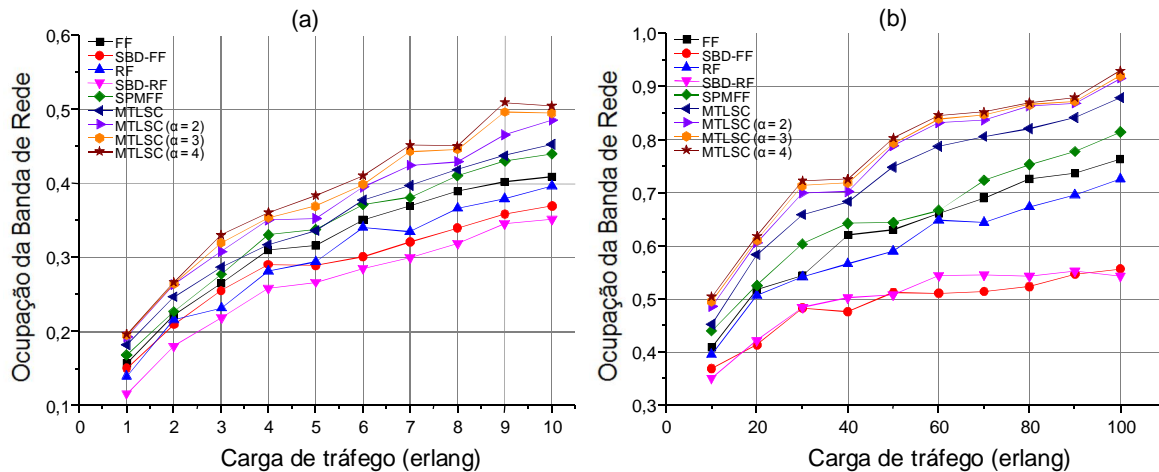


Figura 30. Simulações com o Cenário G Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

A Figura 31 apresenta os resultados de ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio para o Cenário G adotando a topologia de rede NSFNet. Nesta figura observa-se o efeito descrito anteriormente, no que tange a melhor ocupação da banda de rede associada à redução da probabilidade de bloqueio. Nota-se que para ocupação de 80% da banda de rede, os algoritmos FF, RF, SBD-FF e SBD-RF não possuiriam capacidade para tal, dado a probabilidade de bloqueio superior a 46% apresentada por estes algoritmos. O melhor resultado é novamente apresentado pelo algoritmo MTLSC $\alpha = 4$ com ocupação da banda de rede de 93% e probabilidade de bloqueio de 29%.

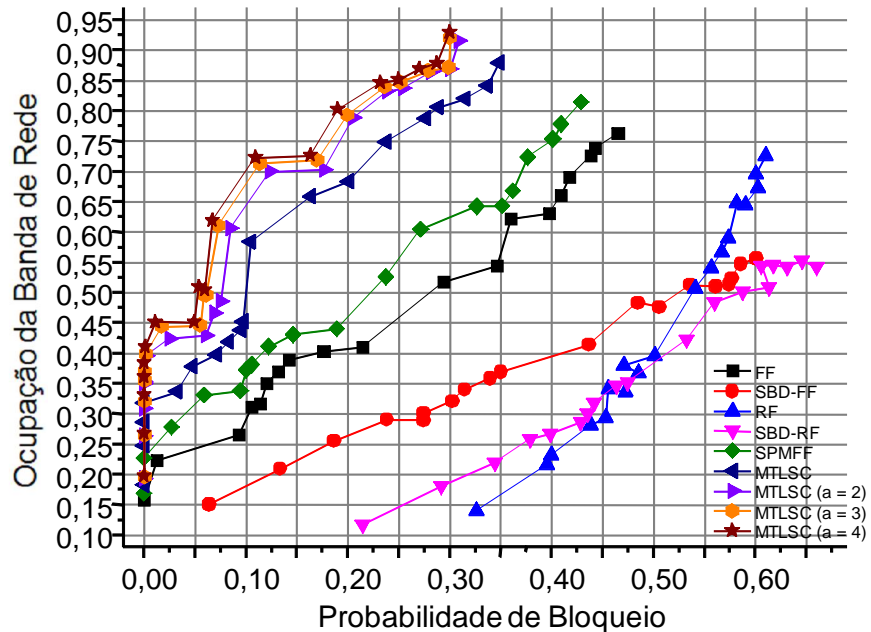


Figura 31. Simulações com o Cenário G Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

A Figura 32 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o Cenário G para topologia de rede Brasileira. Este é o último cenário simulado neste trabalho. As Figuras 32(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego, respectivamente de 1 a 10 E e 10 a 100 E, para o Cenário G adotando a topologia de rede Brasileira. As probabilidade de bloqueio apresentadas pelo SPMFF em relação ao FF para 1 E, são equivalentes. A partir de 4 E o MTLSC e o MTLSC aperfeiçoado $\alpha = 2$ apresentam probabilidade de bloqueio, sendo os resultados do MTLC $\alpha = 2$ inferior ao MTLSC tradicional para cargas entre 4 e 6 E. Para as cargas superiores a 10 E, a redução da probabilidade de bloqueio com a variação do α não apresenta reduções acima

de 2,5%, por exemplo, para 30 E a redução é de 2,4%, maior redução obtida em relação ao MTLSC tradicional.

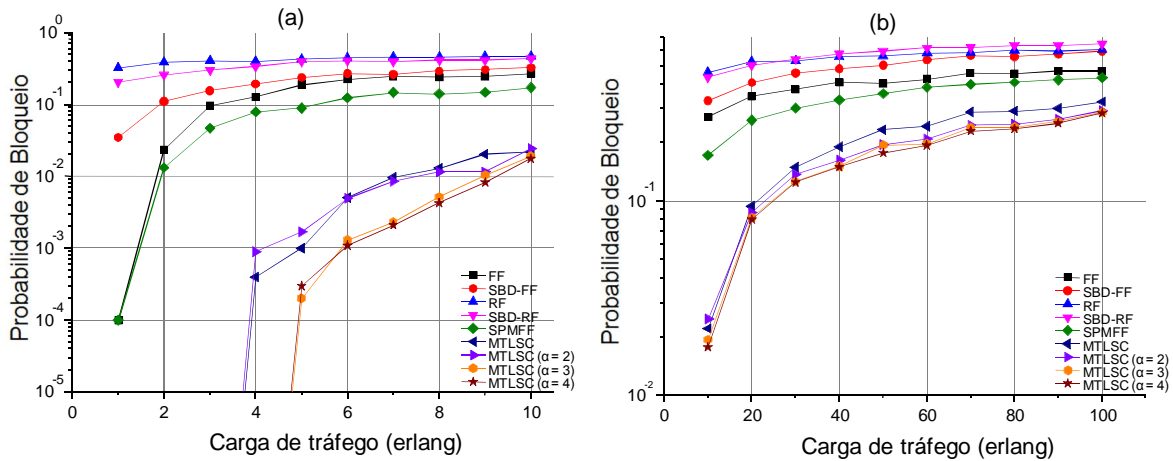


Figura 32. Simulações com o Cenário G para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

A Figura 33 apresenta a ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para o cenário de carga de tráfego G. Como citado anteriormente, neste cenário considera-se a topologia de rede Brasileira. Nas Figuras 33(a) e (b) nota-se o efeito semelhante ao apresentado nas simulações do mesmo cenário na topologia de rede NFSNet. Para carga de 10 E, por exemplo, o MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 2$ apresenta uma ocupação 5% maior que o MTLSC tradicional. O ganho provido pelo aperfeiçoamento do MTLSC permite um número maior de conexões estabelecidas, por sua vez uma ampliação do número de clientes atendidos pela operadora.

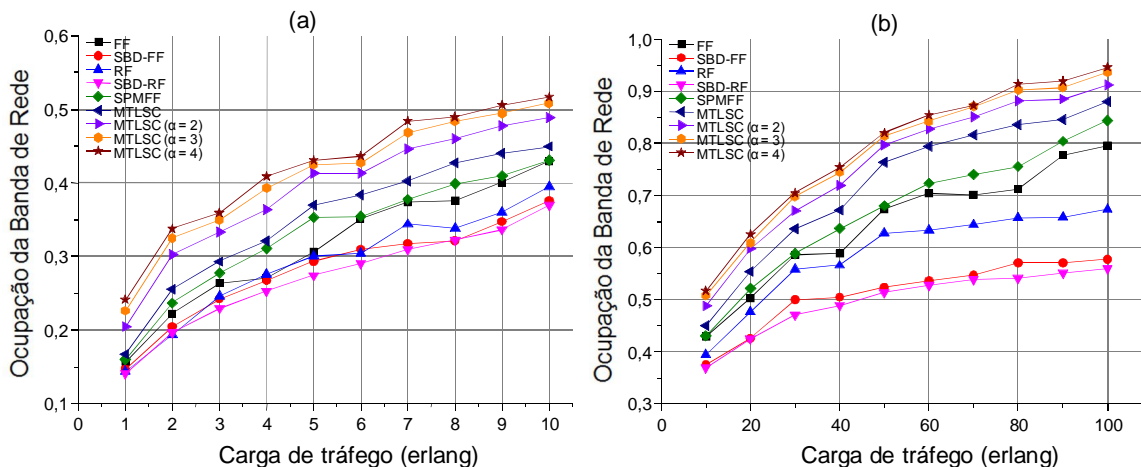


Figura 33. Simulações com o Cenário G Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Na Figura 34 exibem-se os resultados de ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. Esta figura finda a análise dos resultados de probabilidade de bloqueio e ocupação da banda de rede, dos cenários de tráfego de dados e topologias de redes propostos neste trabalho. O algoritmo MTLSC aperfeiçoado, apesar de não reduzir acima de 2,5% a probabilidade de bloqueio, permite um incremento na ocupação da banda de rede de até 18% para probabilidade de bloqueio de 19%. Tal resultado permite um incremento na acomodação do tráfego sem aumentar a probabilidade de bloqueio. O comportamento dos algoritmos de menor caminho é inferior ao dos algoritmos de melhor ocupação espectral. Tal efeito, apesar de positivo para redução da probabilidade de bloqueio, tem efeito negativo no número médio de saltos. O balanceamento de carga de tráfego entre os enlaces da topologia de rede permite que um número maior de conexões possa ser acomodada, gerando um número maior de saltos. Na seção 6.2, estas observações serão discutidas.

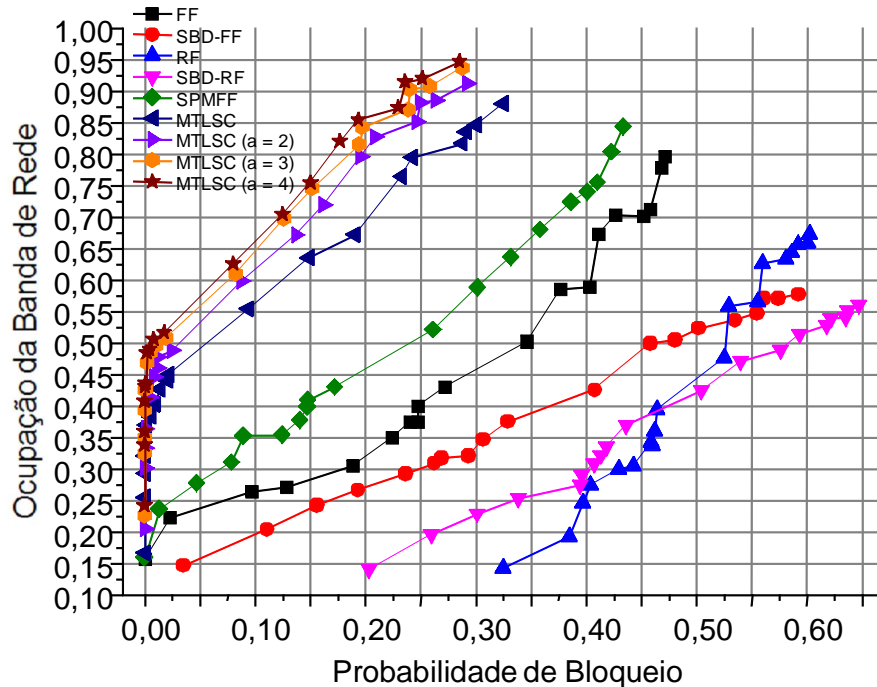


Figura 34. Simulações com o Cenário G Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Nesta seção foram apresentados os resultados de probabilidade de bloqueio e ocupação da banda de rede para os cenários de tráfego A, C e G e as duas topologias de rede adotadas. Os resultados dos demais cenários de tráfego, encontram-se no Apêndice deste trabalho. Os algoritmos com maior ocupação da banda de rede em relação a probabilidade de bloqueio, foram os algoritmos de melhor ocupação espectral SPMFF e MTLSC. Os algoritmos MTLSC aperfeiçoados superaram o algoritmo tradicional, dada a ponderação de consecutividade provida pela ponderação do parâmetro α , que prioriza a consecutividade de FSUs. Na próxima seção, abordaremos o número médio de saltos em relação aos cenários simulados. Nesta seção apresentaremos os

resultados obtidos nas simulações das heurísticas de alocação do espectro óptico adotadas neste trabalho.

6.2 NÚMERO MÉDIO DE SALTOS

O número médio de saltos indica o número de recursos que são alocados em cada conexão. Um maior número de recursos indica maior probabilidade de perdas e maior custo operacional. Durante a execução do motor de simulação do EONSim foram avaliados o número médio de saltos de cada conexão para as topologias de rede e cenários simulados.

Na obtenção dos resultados de número médio de saltos, foram consideradas as sete heurísticas de alocação de espectro, bem como as duas variações de parâmetros do algoritmo MTLSC (α e β) de acordo com os critérios considerados na Seção 6.1 para simulações. Os resultados do algoritmo MPSC utilizados no Capítulo 3 para validação do EONSim, são considerados na análise do número médio de saltos.

A Figura 35 apresenta o número médio de saltos resultantes das simulações de sete heurísticas de alocação de espectro óptico com a topologia de rede NSFNet. As heurísticas de alocação de espectro óptico foram avaliadas com carga máxima de 100 E. O resultado é um menor número de saltos sendo adotados nos algoritmos de menor caminho, tal como o SBD-FF que nos sete cenários utiliza um número médio menor que 3 saltos por conexão. Os algoritmos de menor ocupação espectral utilizaram um número médio superior ao dos

algoritmos de menor caminho, com exceção apenas para o Cenário B onde o MTLSC teve um número médio de saltos similar ao do RF.

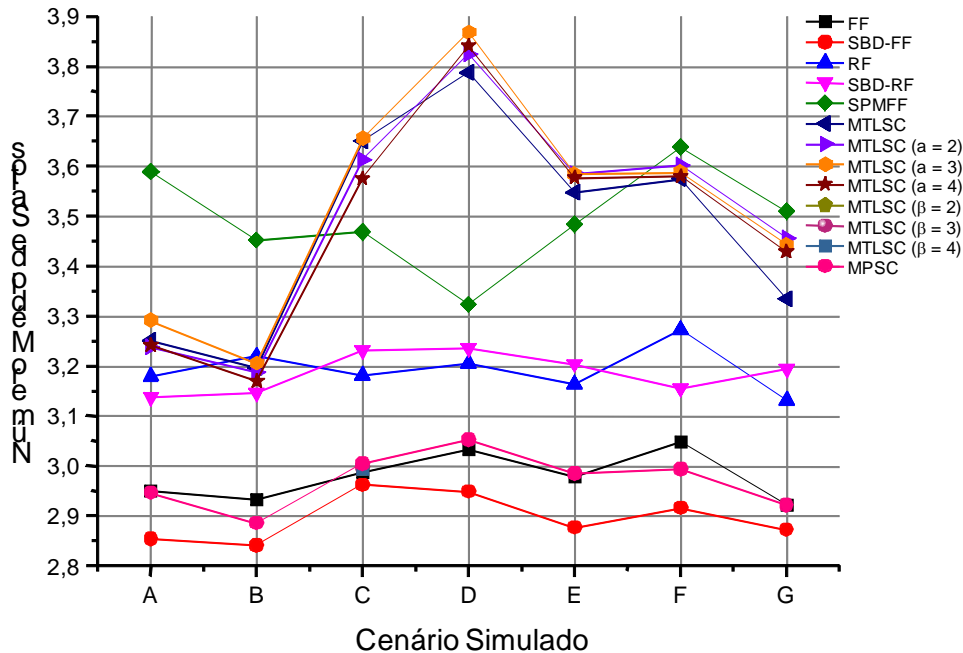


Figura 35. Número médio de saltos na topologia de rede NSFNet.

Os resultados do MTLSC com ponderação do parâmetro β , adotado apenas para o cenário C, são equivalentes aos resultados do FF. A ponderação do parâmetro β no MTLSC aperfeiçoado, supera o MTLSC com parâmetro α , permitindo um número médio de saltos menor. Desta forma, a priorização da consecutividade de FSUs, provida pela maior valorização de α , onera o número médio de saltos, enquanto que a priorização de β , reduz o número médio de saltos.

Nota-se que nos cenários de tráfego em que um maior número de conexões com 10 Gb/s é requerida, por exemplo, nos cenários A e B, os algoritmos MTLSC possuem um número médio de saltos menor. Nos cenários em

que existe um incremento das taxas de 400 Gb/s e 1 Tb/s, por exemplo, para o Cenário D, em que somada tais taxas de transmissão equivalem a 50% das conexões solicitadas, o MTLSC apresenta um número médio de saltos maior. Tal efeito ocorre dada a necessidade de um maior número de FSUs consecutivos, para acomodação do sinal de tais taxas de transmissão na banda de rede.

Como citado no Capítulo 5, as conexões de 400 Gb/s e 1 Tb/s, respectivamente requerem 6 e 12 FSUs. Uma conexão de 10 Gb/s, exige apenas 2 FSUs, um recurso que pode ser mais facilmente encontrado livre na banda de rede em caminhos com menor número de saltos. Deste modo, as taxas de transmissão maiores ou iguais a 400 Gb/s causam ao MTLSC um incremento no número médio de saltos por exigirem a adoção dos maiores caminhos, em que a disponibilidade de FSUs consecutivos é maior.

Os algoritmos SBD-RF e RF exibiram resultados similares, sendo os algoritmos que apresentaram as menores variações ao longo das simulações dos sete cenários de tráfego de dados. O desvio médio apresentado por estes algoritmos é de apenas 0,03 saltos entre os cenários de tráfego de dados simulados. Este resultado mostra a similaridade destes algoritmos em uma alocação média de saltos.

No geral os algoritmos que adotam a menor ocupação espectral consideram o balanceamento da carga pelos possíveis caminhos, o que onera caminhos com maior número de saltos e alivia os caminhos com menor número de saltos. Tal efeito não ocorre nos algoritmos de menor caminho, em que primeiro

saturam-se os recursos de tais caminhos e posteriormente avaliam-se os caminhos com maior número de saltos. Nota-se que os algoritmos SBD são os que possuem o menor número médio de saltos. Isso se deve ao fato de tais algoritmos restringem as regiões da banda que podem ser adotadas para o estabelecimento da conexão. Maiores detalhes foram apresentados no capítulo 4.

A Figura 36 apresenta o número médio de saltos oriundos das simulações de sete heurísticas de alocação de espectro óptico com a topologia de rede Brasileira. Os mesmos critérios adotados para obtenção dos resultados da Figura 59, são adotadas nesta figura.

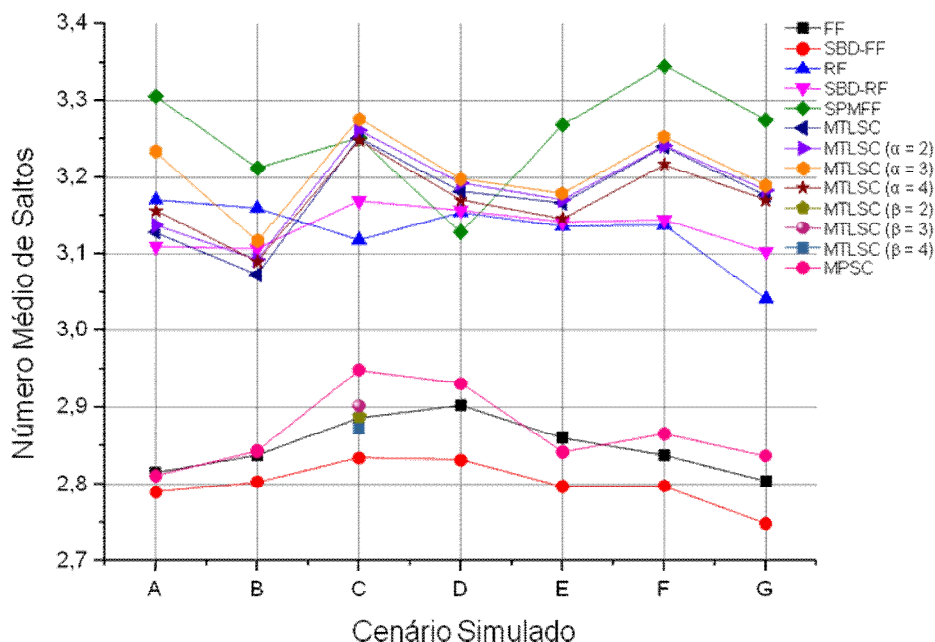


Figura 36. Número médio de saltos na topologia de rede Brasileira.

Na Figura 36 as heurísticas de alocação de espectro óptico foram avaliadas com carga máxima de 100 E. O resultado é um menor número de saltos sendo adotados nos algoritmos de menor caminho, tal como o SBD-FF e FF que

nos sete cenários utiliza um número médio menor que 2,9 saltos por conexão. Tais algoritmos exibiram resultados similares, sendo os algoritmos que apresentaram as menores variações ao longo das simulações dos sete cenários de tráfego de dados. O desvio médio apresentado por estes algoritmos é de apenas 0,02 saltos entre os cenários de tráfego de dados simulados. Este resultado mostra a similaridade destes algoritmos em uma alocação média de saltos.

Os algoritmos de menor ocupação espectral utilizaram um número médio superior ao dos algoritmos de menor caminho. No Cenário G o algoritmo SBD-FF resultou em um número médio de 2,7 saltos por conexão enquanto que o algoritmo SPMFF resultou em 3,3 saltos por conexão. Os resultados do SBD-FF reduzem a utilização em torno de 16% dos recursos de rede no cenário G, comparados aos resultados do SPMFF (SBD-FF igual a 2,7 saltos e SPMFF igual a 3,3 saltos).

Os algoritmos de menor caminho possuem um efeito positivo em relação a utilização média de saltos. Apesar de sua acomodação de tráfego ser menor e sua probabilidade de bloqueio maior, ver Seção 6.1, os algoritmos de menor caminho ocupam menos recursos que os algoritmos de menor ocupação espectral. Na topologia de rede Brasileira os algoritmos ocuparam menor número de saltos que comparado a topologia de rede NSFNet, isso deve-se ao fato de que o número de enlaces médio por nó é superior, permitindo aos algoritmos maior número de possíveis caminhos.

A avaliação do número médio de saltos, apesar de não ser um dos focos deste trabalho, mostra ser importante para o estudo do balanceamento da carga de rede, bem como na análise do custo da rede. A seguir findaremos o Capítulo 6 apresentando as vantagens e desvantagens observadas nas sete heurísticas de alocação espectral, face aos resultados obtidos.

6.3 VANTAGENS E DESVANTAGEM DOS ALGORITMOS PROPOSTOS

Os três algoritmos de roteamento e alocação do canal óptico, inéditos, propostos neste trabalho, e o aperfeiçoamento do MTLSC proposto por WANG (2012), apresentam vantagens e desvantagens a serem mencionadas. As vantagens representam um ganho em relação aos algoritmos existentes. As desvantagens, por sua vez, indicam limitações em relação aos algoritmos existentes. Os algoritmos existentes são, no caso RF, FF e MTLSC proposto por WANG (2012).

Inicialmente, a proposta dos algoritmos SBD-FF e SBD-RF apresentam os menores números médios de saltos, comparado respectivamente com o FF e RF. Um número médio de saltos menor representa uma vantagem destes algoritmos, em comparação com os demais algoritmos. Porém, como desvantagem seus resultados de probabilidade de bloqueio são, em grande parte dos resultados, os maiores. Dada esta desvantagem, seus resultados de ocupação da banda de rede também foram, em grande parte dos resultados, os menores.

Outra contribuição deste trabalho, o algoritmo SPMFF, apresenta como vantagem, resultado de redução da probabilidade de bloqueio e incremento da ocupação da banda de rede, em grande parte dos cenários, comparado aos

algoritmos RF, FF, SBD-RF e SBD-FF. Sua desvantagem é o aumento do número médio de saltos, característica essa marcante nos demais algoritmos de melhor ocupação espectral.

Neste trabalho fazemos uma contribuição ao algoritmo MTLSC tradicional. Esta contribuição é descrita no Capítulo 4. A vantagem do algoritmo MTLSC aperfeiçoado, é o incremento da ocupação da banda de rede e a redução da probabilidade de bloqueio apresentada pelo MTLSC tradicional. Sua desvantagem é um alto número médio de saltos, característica presente também no MTLSC tradicional.

Os algoritmos de melhor ocupação espectral SPMFF, MTLSC e MTLSC aperfeiçoado, exibem um ganho máximo de 2 a 8% na redução da probabilidade de bloqueio em relação aos algoritmos de menor caminho. Os resultados obtidos nas simulações, resultaram em incremento da ocupação da banda de rede máximo de 7 a 18% provido pelos algoritmos de melhor ocupação espectral. Entretanto, como descrito anteriormente, os algoritmos de melhor ocupação espectral, apresentam um número médio superior de saltos em relação aos algoritmos de menor caminho.

Os algoritmos de menor caminho apresentam como vantagem um número médio menor de saltos, dado ao preenchimento da banda de rede a partir dos menores caminhos de ligação do nó de origem ao nó de destino. Os algoritmos de melhor ocupação espectral realizam uma investigação do caminho a partir da obtenção do seu custo, ver Capítulo 4, selecionando assim o caminho a ser

adotado. O critério adotado pelos algoritmos de menor caminho é um preenchimento progressivo da banda de rede a partir do menor caminho até o maior caminho. Uma desvantagem, é que isso gera um desbalanceamento da carga de tráfego, entre os caminhos de ligação do nó de origem ao nó de destino.

O desbalanceamento provido pelos algoritmos de menor caminho tem como efeito a sobrecarga dos enlaces adotados nos menores caminhos. A sobrecarga de alguns enlaces torna os outros caminhos, aqueles que ainda possuem recursos, inoperantes. Para que um caminho seja selecionado, todos os enlaces que compõem o caminho devem possuir recursos disponíveis para acomodação da conexão. Tal comportamento resulta no preenchimento fragmentado da banda de rede, aumentando a probabilidade de uma conexão ser bloqueada.

Os algoritmos de melhor ocupação espectral distribuem ao longo dos caminhos as conexões a serem estabelecidas, utilizando assim um número maior de saltos. Esta ação proporciona um balanceamento da carga ao longo dos caminhos de ligação do nó de origem ao nó de destino. O balanceamento provido pelos algoritmos de melhor ocupação espectral permite uma acomodação maior de conexões, resultando em uma menor probabilidade bloqueio. Portanto, os algoritmos de melhor ocupação espectral, comparados aos algoritmos de menor caminho, apresentam uma ocupação da banda de rede superior. Para uma operadora de telefonia, o incremento do número de conexões estabelecidas é importante, porém uma utilização média de recursos maior pode onerar o custo financeiro da operação.

Neste capítulo foram apresentados os resultados deste trabalho. Foram descritos os resultados de probabilidade de bloqueio, ocupação da banda de rede e número médio de saltos, para os dois cenários simulados adotando sete heurísticas de alocação de espectro óptico. No capítulo seguinte serão apresentadas as conclusões deste trabalho.

7. CONCLUSÃO

As contribuições deste trabalho são o desenvolvimento de um novo simulador para redes ópticas elásticas, o EONSim, e a proposta de três algoritmos inéditos de roteamento e alocação do espectro óptico, sendo o SPMFF, SBD-FF e SBD-RF, além de uma contribuição ao algoritmo MTLSC proposto por WANG (2012). Outra contribuição deste trabalho, é a avaliação do número médio de saltos em função dos algoritmos de alocação do espectro óptico, e cada um dos cenários de tráfego de dados propostos.

7.1 RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados dos novos algoritmos propostos exibem uma melhoria que varia de 7 a 18% na ocupação da banda de rede, além de uma redução da probabilidade de bloqueio de 2 a 8%. Como mencionado no decorrer deste trabalho, os algoritmos de melhor ocupação espectral apresentam resultados significativos no que tange a redução da probabilidade de bloqueio e melhor ocupação da banda de rede.

Os algoritmos de menor caminho, tais como o FF, RF, SBD-FF e SBD-RF, não fazem o balanceamento da carga de tráfego na rede, prejudicando a acomodação do tráfego. Apesar dos resultados positivos de redução da probabilidade de bloqueio e incremento da ocupação da banda de rede, os algoritmos de melhor ocupação espectral utilizam um número médio de saltos superior aos de menor caminho em até 16%. Desta forma, os algoritmos de melhor ocupação, tais como, SPMFF e MTLSC, ocupam um número maior de

recursos de rede enquanto que os de menor caminho são os que ocupam o menor número de recursos.

7.2 CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

A ferramenta EONSim, disponibilizada por nosso grupo para toda a comunidade em <<http://sourceforge.net/p/eonsim/wiki/Home/>>, pode ser aperfeiçoada. Novas funcionalidades visuais ao EONSim para que a ocupação da banda de rede, a construção da topologia, e a execução do simulador possa ser apresentada de forma pictográfica e animada, é sugerida. Tal aperfeiçoamento permitiria a adoção da ferramenta para ensino de redes EON, contribuindo para sua difusão e pesquisa.

A fragmentação da banda de rede é um dos fatores que implicam na redução do número de conexões atendidas. A fragmentação da banda de rede é ocasionada pela ausência de consecutividade dos FSU alocados nos enlaces, ocasionando posições vazias que são desperdiçadas. Como perspectiva de continuidade deste trabalho, é possível sugerir o desenvolvimento de algoritmos de desfragmentação associados às heurísticas de alocação de espectro propostas por nosso grupo.

A avaliação do número médio de saltos em relação ao desempenho dos algoritmos propostos, também é pertinente. A diminuição do número de recursos alocados permite uma redução dos custos da operadora. Portanto, é recomendada para a elaboração de trabalhos futuros, a avaliação do desempenho dos algoritmos em relação aos custos dos recursos alocados.

As redes totalmente ópticas eliminam a necessidade conversores eletro/ópticos. O desenvolvimento de estudo para avaliação da eficiência energética provida pelas redes totalmente ópticas, e uma correlação com os resultados ora apresentados, poderia contribuir para o aperfeiçoamento e viabilidade das EON.

8. TRABALHOS PUBLICADOS

SILVA, P. C. B.; ABBADE, M. L. F.; BONANI, L. H., "Performance of transparent optical networks with multiple bandwidth channels." Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International. IEEE, 4-7 Aug. 2013.

9. SOFTWARE DESENVOLVIDO

SILVA, P. C. B.; ABBADE, M. L. F.; Elastic Optical Networks Simulator version 2.0 (EONSim 2.0), 2013.

10.REFERÊNCIAS

ASSIS, K.D.R; MARANHÃO, J.; SANTOS, A.F.; GIOZZA, W. F., "*Heuristic to Maximize the Open Capacity of OBS Networks with Initial Static Traffic*". Telecomunicações (Santa Rita do Sapucaí), v. 12, pp. 18-23, 2009.

BOSCO, G.; CURRI, V.; CARENA, A.; POGGIOLINI, P.; FORGHIERI, F., "*On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers*". Lightwave Technology, Journal of, vol.29, no.1, pp. 53-61, January 1, 2011.

BOBROVS, V.; PORINS, J.; IVANOV, G., "*Influence of nonlinear optical effects on the NRZ and RZ modulation signals in WDM systems*". Lithuanian Journal of Electronics and Electrical Engineering, no.4, pp. 31-34, 2007.

CHANDRASEKHAR, S.; LIU, X., "*Terabit Superchannels for High Spectral Efficiency Transmission*". Optical Communication (ECOC), 2010.

CAVDAR, C., "*A new transmission paradigm in optical networks: Evolution from fixed grid to flexible-grid*". NEGONET Group. Optical Networks Lab – The Royal Institute of Technology (KTH). Em: <http://www.ict.kth.se/MAP/FMI/Negonet/tgn-ons/documents/2012_03_29%20Meeting/elasticbt_2012_web.pdf>. Acesso em: 20 de agosto de 2013.

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.

CHRISTODOULOPOULOS, K.; TOMKOS, I.; VARVARIGOS, E.A., "*Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-Based Optical Networks*". *Lightwave Technology, Journal of*, vol.29, no.9, pp.1354-1366, May 1, 2011

CHLAMTAC, I.; GANZ, A.; KARMI, G.; "*Purely optical network for terabit communication*". In *IEEE Infocom '89*, pp. 887–896, 1989.

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.

DIJKSTRA, E. W., "*A note on two problems in connection with graphs*". *Numerische Mathematik* 1, pp. 269-271, 1959.

EONSIM Simulator, Em: <<http://sourceforge.net/p/eonsim/wiki/Home/>>. Acesso em: 31 de agosto de 2013.

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.

INFINERA. Documento WP-SC-10-2012, Em: <www.infinera.com>. Acesso em: 17 de setembro de 2013.

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

JINNO, M., TAKARA, 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.

JINNO, M.; TAKARA, H.; SONE, Y.; YONENAGA, K.; HIRANO, A., "*Elastic Optical Path Network Architecture: Framework for Spectrally-Efficient and Scalable Future Optical Networks*". In: IEICE Transactions, 95-B, Nr. 3, pp. 706-713, 2012.

KLINKOWSKI, M.; CAREGLIO, D., "*A routing and spectrum assignment problem in optical OFDM networks*". Proceedings of 1st European Teletraffic Seminar (ETS2011), Poznan, Poland, February 14-16, 2011-A.

KLINKOWSKI, M.; WALKOWIAK, K.; JAWORSKI, M., "*Off-line algorithms for Routing, Modulation Level, and Spectrum Assignment in elastic optical networks*". Transparent Optical Networks (ICTON), 2011 13th International Conference on, pp.1-6, 26-30 June, 2011-B.

LEUTHOLD, J.; SCHMOGROW, R.; HILLERKUSS, D.; KOOS, C.; FREUDE, W. "*Super channels based on Nyquist multiplexing*". Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), 2012.

MOREA, A.; R., O., "*Efficiency gain from elastic optical networks*". Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2011. ACP. Asia, vol., pp.1-7, 13-16, November, 2011.

MORIOKA, T.; JINNO, M.; TAKARA, H.; KUBOTA, H., "*Innovative Future Optical Transport Network Technologies*". NTT Technical Review, Vol. 9 No. 8 August, 2011.

MUÑOZ, R.; CASELLAS, R.; MARTINEZ, R., "*Dynamic distributed spectrum allocation in GMPLS-controlled elastic optical networks*". Optical Communication (ECOC), 2011 37th European Conference and Exhibition on, 2011.

NS-3. Network Simulator 3, Em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>. Acesso em: 1 julho de 2013.

OMNETPP. OMNet++ Simulator, Em: <<http://www.omnetpp.org/>>. Acesso em: 1 de julho de 2013.

OPNET Simulator, Em: <<http://www.opnet.com/>>. Acesso em: 1 de julho de 2013.

OZDAGLAR, A. E.; BERTSEKAS, D. P. "*Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks*". IEEE Transactions on Networking, no. 2, pp. 259-272, April, 2003.

PARKINSON, R., "*Traffic Engineering Techniques in Telecommunications*". INFOTEL Systems Corp. Em: <<http://www.kt.agh.edu.pl/~brus/kolejki/Tutorial.pdf>>. Acesso em: 26 de outubro de 2012.

PASCOAL, M.; MARTINS, E., "A new implementation of Yen's ranking loopless paths algorithm". 4OR – Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies, 2003.

PATACA, D.M.; CARVALHO, L.H.H; ADAMI, C.B.F.; SIMÕES, F.D.; OLIVEIRA, J.C.R.F., "Transmissão de um supercanal OFDM de 1,12 Tb/s por 452 km com eficiência espectral de 4 b/s/Hz". XXX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBrT'12, 2012

PATEL, A.N.; JI, P.N.; JUE, J.P.; WANG, T., "Routing, wavelength assignment, and spectrum allocation algorithms in transparent flexible optical WDM networks". Optical Switching and Networking, 2012.

POLITI, C.; ANAGNOSTOPOULOS, V.; MATRAKIDIS, C.; STAVDAS, A., "Routing in dynamic future flexi-grid optical networks". Optical Network Design and Modeling (ONDM), 16th International Conference on, 2012.

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., "Optical Networks: A Practical Perspective". 2nd ed. San Francisco, California, U.S.A.: MorganKaufmann Publishers, Inc., 2002.

ROUZIC, E. L.; BONETTO, E.; CHIARAVIGLIO, L.; GIROIRE, F.; IDZIKOWSKI, F.; JIMENEZ, F.; LANGE, C.; MONTALVO, J.; MUSUMECI, F.; TAHIRI, I.; VALENTI, A.; VAN HEDDEGHEM, W.; YABIN YE; BIANCO, A.; PATTAVINA, A., "*TREND towards more energy-efficient optical networks*". In 17th Conference on Optical Network Design & Modeling (ONDM), pp.211-216, Brest, France, 2013.

SANTOS, A. F.; SANTOS, C. C.; DURAES, G. M.; Assis, K. D. R.; Almeida Jr, R. C., "Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas: O Conceito SLICE". Anais do XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT), vol. 1. pp. 1-5, 2012.

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

SILVA, P. C. B.; ABBADE, M. L. F.; BONANI, L. H., "*Performance of transparent optical networks with multiple bandwidth channels*". Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International. IEEE, 4-7 August 2013.

VELASCO, L.; KLINKOWSKI, M.; RUIZ, M.; COMELLAS, J., "*Modeling the Routing and Spectrum Allocation Problem for Flexgrid Optical Networks*". Springer Photonic Network Communications, vol. 24, pp. 177-186, 2012.

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.

YATES, 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

YEN, J. Y., "*Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network*". Management Science 17:712–716, 1971.

YIN, Y.; WEN, B.; GEISLER, D. J.; LIU, R.; YOO, S. J. B., "*Dynamic on-demand defragmentation in flexible bandwidth elastic optical networks*". Opt. Express 20 (2) 1804 (1798): 2012.

ZANG, H.; JUE. J. P.; MUKHERJEE, B., "*A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Network*". Optical Network Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 47-60, 2000.

ZHANG, S.; MARTEL, C.; MUKHERJEE, B., "*Dynamic Traffic Grooming in Elastic Optical Networks*". Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, vol.31, no.1, pp.4-12, January, 2013.

ZHU, B; LIU, X.; CHANDRASEKHAR, S.; PECKHAM, D.W.; LINGLE JR.,R, "*Ultra-Long-Haul Transmission of 1.2-Tb/s Multicarrier No-Guard-Interval CO-OFDM Superchannel Using Ultra-Large-Area Fiber*". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, No. 11, June, 2010.

11.APÊNDICES

Apêndice A - Resultados das simulações do cenário de carga de tráfego B

A Figura 37 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o Cenário B para topologia de rede NSFNet. Conforme Tabela 10, no Cenário B um terço das conexões solicitadas são de 10 Gb/s, 100 Gb/s e de 400 Gb/s. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

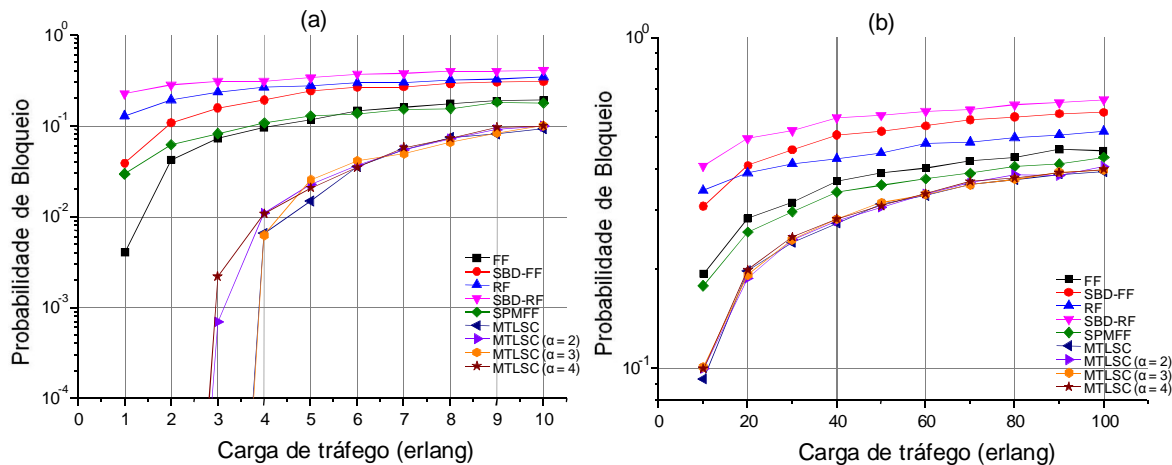


Figura 37. Simulações com o Cenário B para a Topologia de Rede NSFNet (a)

probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

As Figuras 37(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio para os intervalos de carga de, respectivamente, 1 a 10 E e 10 a 100 E no cenário B. O algoritmo FF apresenta resultados superiores aos apresentados pelo SPMFF nas cargas de tráfego de 1 a 5 E. A partir de 6 E o algoritmo SPMFF

apresenta resultados melhores de probabilidade de bloqueio em relação aos algoritmos FF, RF, SBD-FF e SBD-RF. Os algoritmos MTLSC foram os com menor probabilidade de bloqueio em todos as cargas de tráfego. Para cargas inferiores a 5 E, por exemplo, essa redução de probabilidade é de até 9%.

A Figura 38 mostra os resultados da ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego (erlang), para o Cenário B para topologia de rede NSFNet. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

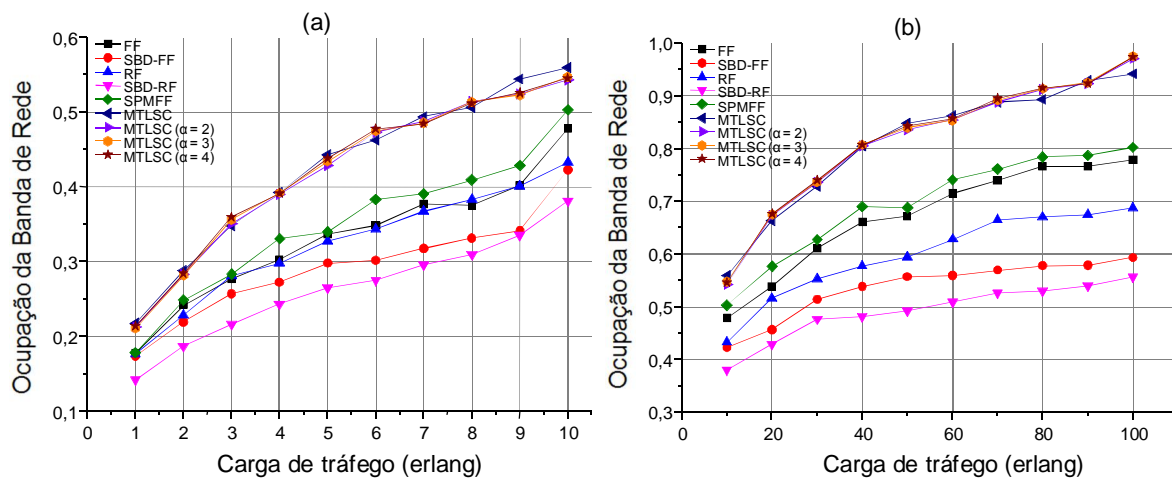


Figura 38. Simulações com o Cenário B Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Os aperfeiçoamentos no algoritmo MTLSC não surtiram efeitos de redução da probabilidade de bloqueio, mantendo os resultados do algoritmo MTLSC proposto por WANG (2012). Na Figura 38(a) e (b) nota-se que a ocupação da banda de rede nos algoritmos MTLSC e MTLSC aperfeiçoado não apresentam diferenças significativas.

A Figura 39 exibe os resultados de ocupação da banda de rede em função probabilidade de bloqueio, para o Cenário B para topologia de rede Brasileira. Como nas Figuras 37 e 38, são exibidos os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

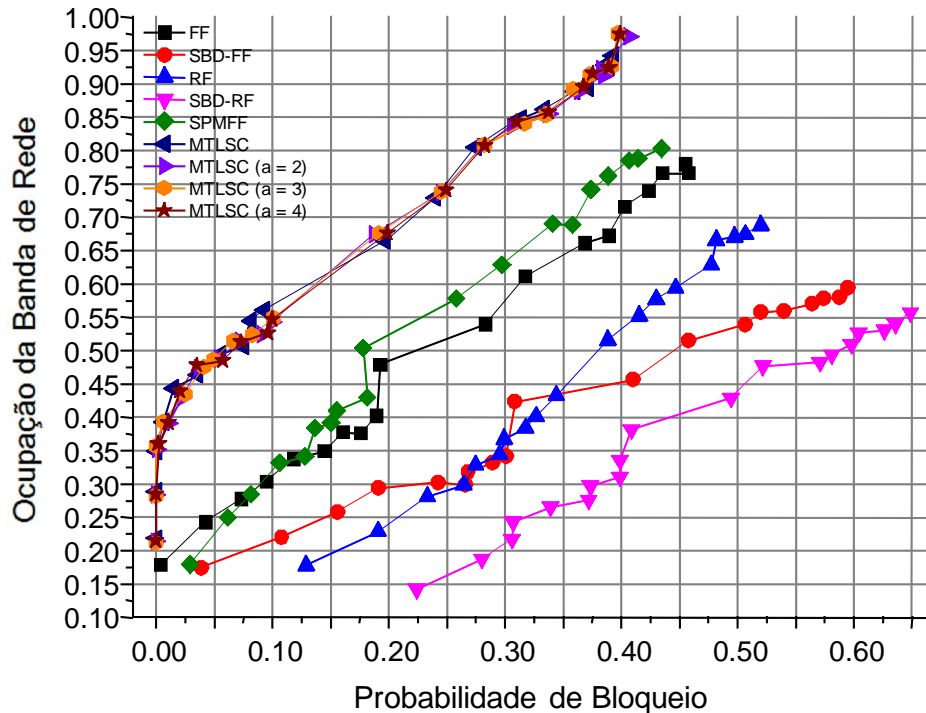


Figura 39. Simulações com o Cenário B Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Na Figura 39 os resultados exibidos mostram a capacidade superior dos algoritmos MTLSC e MTLSC aperfeiçoado, em relação a ocupação da banda de rede e redução da probabilidade de bloqueio, comparado aos demais algoritmos. Para ocupação de até 47% da banda de rede, o MTLSC apresenta probabilidade de bloqueio inferior a 5%. Comparado ao FF que possui ocupação de banda de rede de 24% para probabilidade bloqueio inferior a 5%, o algoritmo MTLSC prove

um incremento de até 23% de ocupação de banda de rede. Podemos notar que os algoritmos MTLSC e MTLSC aperfeiçoado apresentam resultados similares neste cenário simulado.

A Figura 40 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o Cenário B para topologia de rede Brasileira. Assim como na Figura 37, apresentam-se os resultados das sete heurísticas de alocação do espectro óptico adotadas neste trabalho.

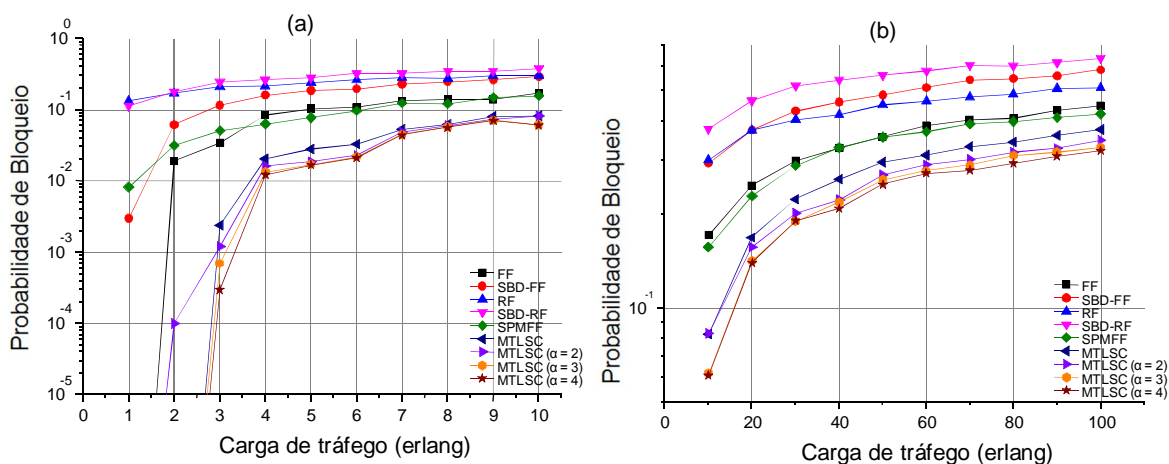


Figura 40. Simulações com o Cenário B para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

A Figura 40(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio para os intervalos de carga de, respectivamente, 1 a 10 E e 10 a 100 E no cenário B. O algoritmo SPMFF apresenta resultados superiores aos resultados do algoritmo FF a partir da carga de 4 E. Os resultados do MTLSC aperfeiçoado se destacam em todas as cargas de tráfego, sendo $\alpha = 4$ o com menor probabilidade de bloqueio e os algoritmos SBD com maior probabilidade de

bloqueio. Para carga de 5 E, por exemplo, o algoritmo MTLSC resulta em 3% de probabilidade de bloqueio para 1,5% resultantes do algoritmo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$. Para carga de 70 E, por exemplo, o algoritmo MTLSC resulta em 33% de probabilidade de bloqueio para 28% resultantes do algoritmo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$. Desta forma, os algoritmos MTLSC aperfeiçoado obtiveram resultados de redução da probabilidade de bloqueio superiores ao MTLSC tradicional.

A Figura 41 mostra a ocupação da banda de rede em relação a carga de tráfego. É possível, por exemplo, observar o efeito da ocupação de banda do algoritmo com menor probabilidade de bloqueio, o MTLSC aperfeiçoado, em relação aos demais algoritmos.

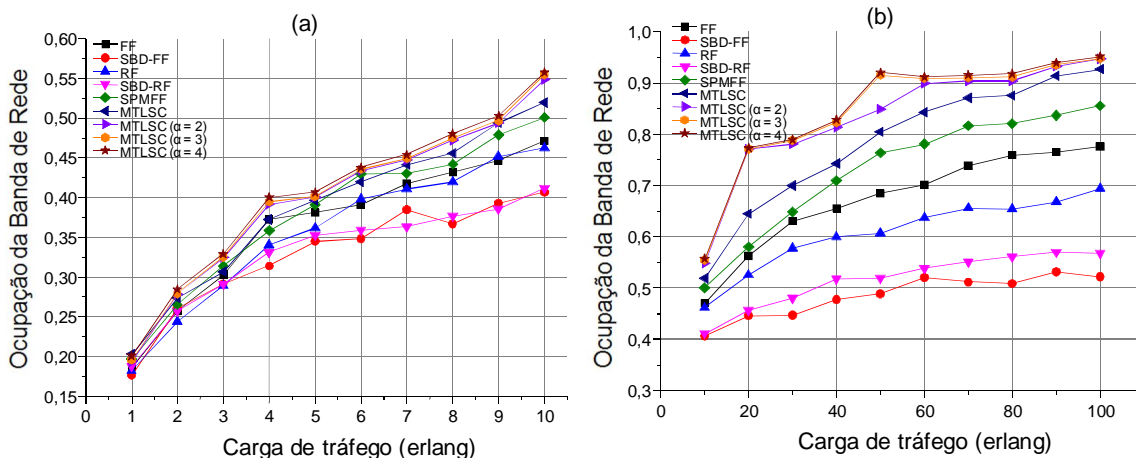


Figura 41. Simulações com o Cenário B Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Nas Figuras 41(a) e (b) nota-se um comportamento diferente do apontado nas simulações deste cenário na topologia de rede NSFNet. Os algoritmos MTLSC aperfeiçoados resultam em uma maior ocupação da banda de rede em relação ao

MTLSC e os demais algoritmos. Destaque para a carga de 20 e 50 E em que o incremento de ocupação da banda de rede provida pelo MTLSC aperfeiçoado em relação ao MTLSC tradicional é de aproximadamente 11%.

O algoritmo SBD-RF nas Figuras 40(a) e (b) é o que apresenta a maior probabilidade de bloqueio para todas as cargas de tráfego simuladas, sendo assim o algoritmo com o menor desempenho. Este comportamento não se repete nas Figuras 41(a) e (b). O algoritmo SBD-RF possui resultados similares ao SBD-FF para as cargas ≤ 20 E, e apresenta uma ocupação da banda de rede superior para cargas > 20 E. Apesar de sua probabilidade de bloqueio maior, o algoritmo SBD-RF possui uma ocupação da banda de rede igual ou superior ao SBD-FF.

No cenário de carga de tráfego B adotando a topologia de rede Brasileira, os algoritmos de melhor ocupação espectral, tais como o SPMFF e MTLSC, apresentaram resultados de ocupação de banda de rede em relação a carga de tráfego, superior em até 9% comparado aos algoritmos de menor caminho. Para a carga de 60 E, por exemplo, o algoritmo SPMFF teve um desempenho de 79% de ocupação da banda de rede. O algoritmo FF para a carga de 60 E teve uma ocupação 9% menor que a provida pelo SPMFF. Desta forma, mantendo-se a mesma carga de tráfego, e substituindo apenas o algoritmo de roteamento e alocação do canal óptico (FF pelo SPMFF), uma operadora pode incrementar em torno de 9% a utilização dos recursos disponibilizados.

Na Figura 42 observa-se o comportamento da ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. Nesta figura podemos notar o efeito favorável da redução da probabilidade de bloqueio para uma maior ocupação da banda de rede.

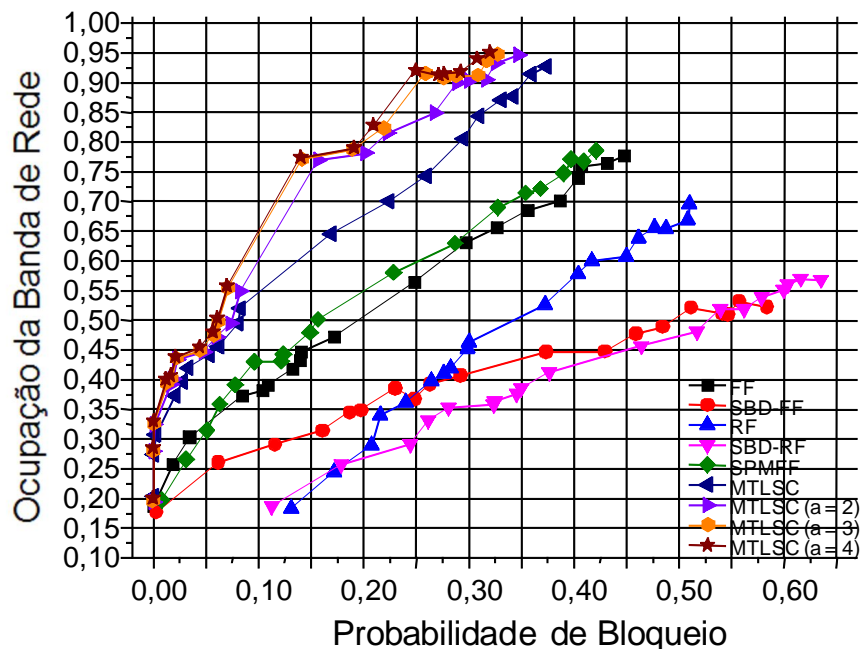


Figura 42. Simulações com o Cenário B Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Na Figura 42 observa-se comportamento semelhante ao descrito na Figura 39 em que os algoritmos com maior ocupação da banda de rede resultam em números menores de probabilidade de bloqueio. Os algoritmos MTLSC aperfeiçoados, por exemplo com $\alpha = 2$, chegam a superar em 12% a ocupação da banda de rede do tradicional MTLSC para probabilidade de bloqueio de 17%.

Para probabilidade de bloqueio de até 15%, o algoritmo RF é aquele que provê a menor ocupação da banda de rede. Entre 20 e 25% de probabilidade de bloqueio é o algoritmo com a segunda menor ocupação de banda de rede. A partir de 25% é o RF que supera a ocupação da banda de rede provida pelos algoritmos SBD-FF e SBD-RF. Por exemplo, para probabilidade de bloqueio de 52% a ocupação de banda de rede do RF é de até 23% superior ao SBD-RF (RF = 70% e SBD-RF = 47%).

A partir de 27% de probabilidade de bloqueio, os algoritmos SBD são aqueles com menor ocupação da banda de rede. O algoritmo SBD-RF provê uma ocupação da banda de rede máxima de 57%, sendo 5% superior ao SBD-FF. Porém, o algoritmo SBD-RF possui uma probabilidade de bloqueio 10% superior ao SBD-FF (SBD-RF é igual a 68% e SBD-FF é igual a 58%). Deste modo, o algoritmo SBD-RF comparado ao SBD-FF, para uma operadora de telefonia não seria interessante. Apesar do incremento de ocupação da banda de rede provido pelo SBD-RF (5%), o aumento da probabilidade de bloqueio (10%) ocasionaria um menor número de conexões atendidas.

Para este cenário os resultados providos pelo SPMFF em relação ao FF são apenas redução da probabilidade de bloqueio, sendo a ocupação de banda de rede equivalente. A probabilidade de bloqueio provida pelo SPMFF em relação ao FF é reduzida em apenas 3% adotando o SPMFF. Portanto, o algoritmo SPMFF provê ocupação de banda de rede similar ao FF com uma probabilidade de bloqueio um pouco melhor.

Apêndice B - Resultados das simulações do cenário de carga de tráfego D

A Figura 43 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o Cenário D para topologia de rede NSFNet. Conforme Tabela 10, no Cenário D um quarto das conexões solicitadas são de 10 Gb/s, 100 Gb/s, 400 Gb/s e de 1 Tb/s. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

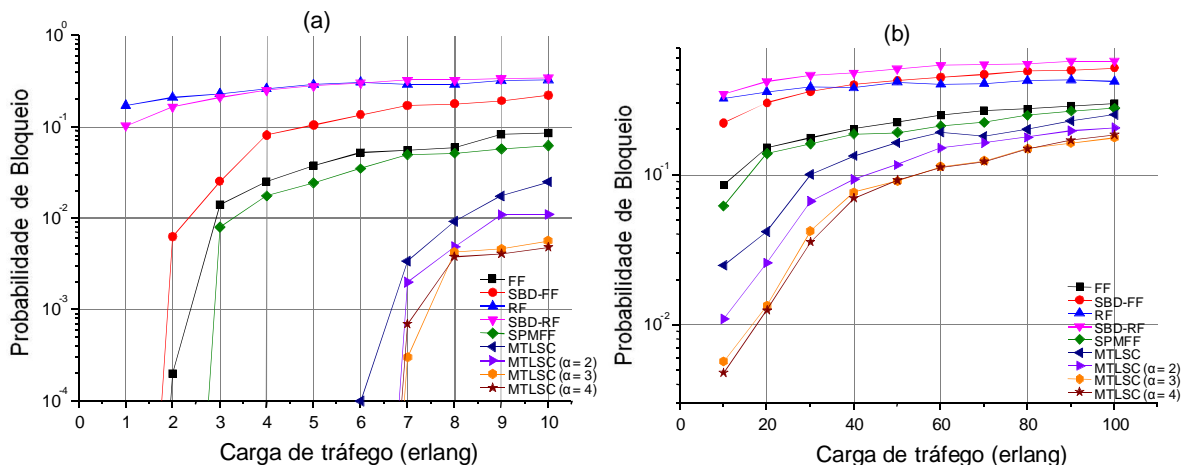


Figura 43. Simulações com o Cenário D para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

A Figura 43(a) e (b) apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego, respectivamente de 1 a 10 E e de 10 a 100 E para o cenário D. Neste cenário observou-se que o algoritmo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 2$ apresenta resultados superiores ao MTLSC tradicional, apresentando probabilidade de bloqueio a partir de 7 E. A partir de 8 E os resultados do algoritmo MTLSC aperfeiçoado são superiores, apresentando reduções de probabilidade de bloqueio significativas, por exemplo, para carga de 70 E adotando $\alpha = 3$, a redução é de aproximadamente 4%.

A Figura 44 apresenta os resultados de ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego. Como citado anteriormente na Figura 43, neste cenário adotou-se a topologia de rede NSFNet.

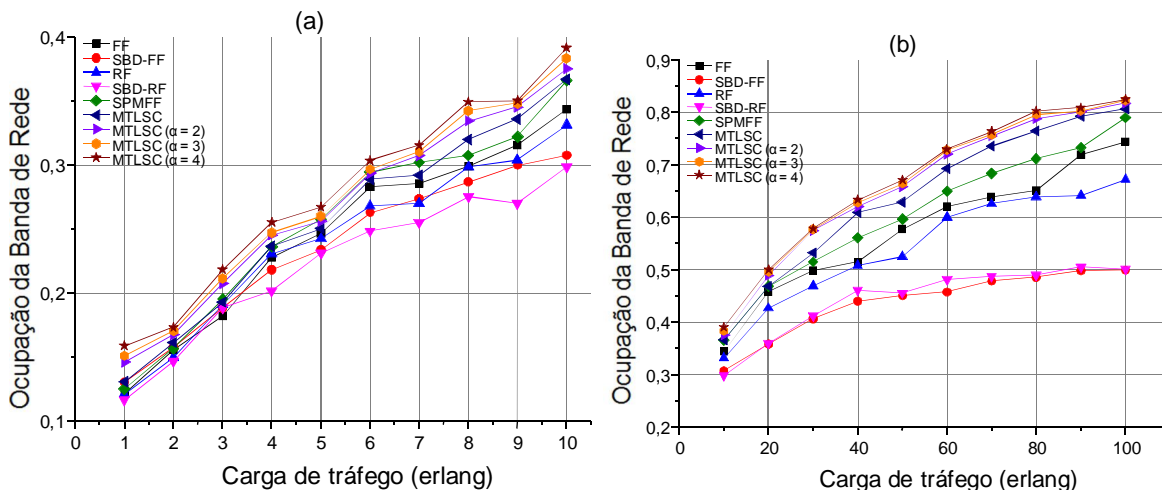


Figura 44. Simulações com o Cenário D Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Nas Figuras 44(a) e (b) o comportamento apresentado é semelhante ao dos cenários A e B em que os algoritmos MTLSC aperfeiçoados são superiores aos demais algoritmos. Os algoritmos SBD apresentam resultados distintos até 9 E, sendo a partir de 10 E similares. Neste cenário os algoritmos SBD apresentam os menores resultados de ocupação da banda de rede. Tal efeito destaca-se a partir de 9 E. Por exemplo, para carga de 80 E, o algoritmo FF apresenta uma ocupação da banda de rede de 14% superior ao SBD-FF (FF igual a 63% e SBD-FF igual a 49%).

A ocupação provida pelo SPMFF para as cargas de 3 a 7 E, 10 e 20 E são similares ou superiores aos do MTLSC tradicional. Para cargas de tráfego maior que 20 E, os algoritmos MTLSC superam a ocupação de banda de rede do SPMFF em até 8%, como é o caso para carga de 90 E (MTLSC igual a 80% e SPMFF igual a 72%).

A Figura 45 exibe a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio para o Cenário D adotando a topologia de rede NSFNet. Podemos observar nesta figura, os efeitos da ocupação da banda quando reduzidas as probabilidades de bloqueio.

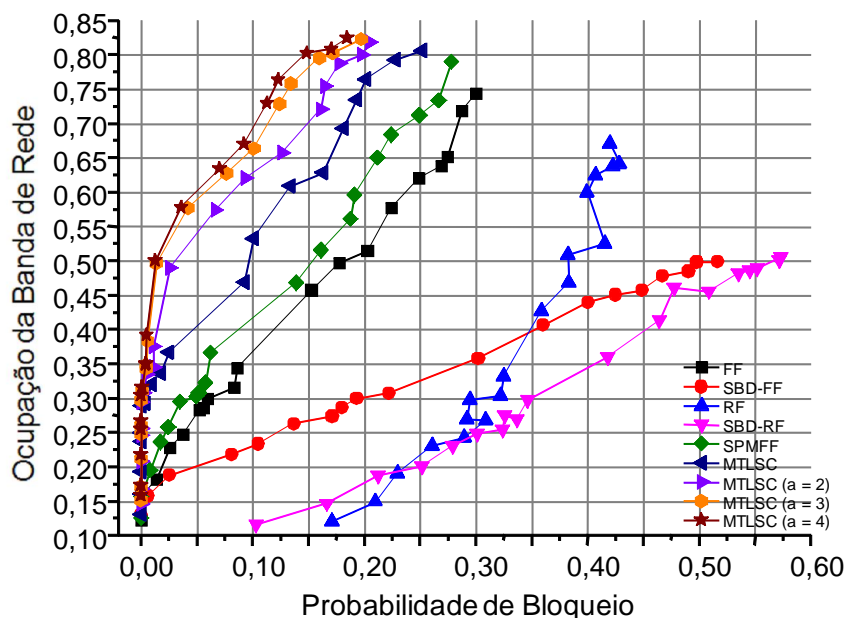


Figura 45. Simulações com o Cenário D Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Os resultados da Figura 45 exibem um ganho de 5% na ocupação da banda de rede e na redução da probabilidade de bloqueio do algoritmo MTLSC em relação ao algoritmo FF. O algoritmo SPMFF apresentou resultados muito próximos ao MTLSC, perdendo apenas na redução da probabilidade de bloqueio. Para ocupação da banda de rede aproximadamente 36%, o MTLSC apresenta 2% de probabilidade de bloqueio e o SPMFF 6%, uma diferença de 4%. Esta diferença é superior, por exemplo, para ocupação da banda de rede próxima a 60%, em que o MTLSC apresenta 13% de probabilidade de bloqueio e o SPMFF

19%, uma diferença de 6%. Desta forma, o SPMFF apresenta uma probabilidade de bloqueio maior para ocupação da banda de rede equivalente à provida pelo MTLSC.

A Figura 46 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o Cenário D para topologia de rede Brasileira. Assim como a Figura 35, são apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

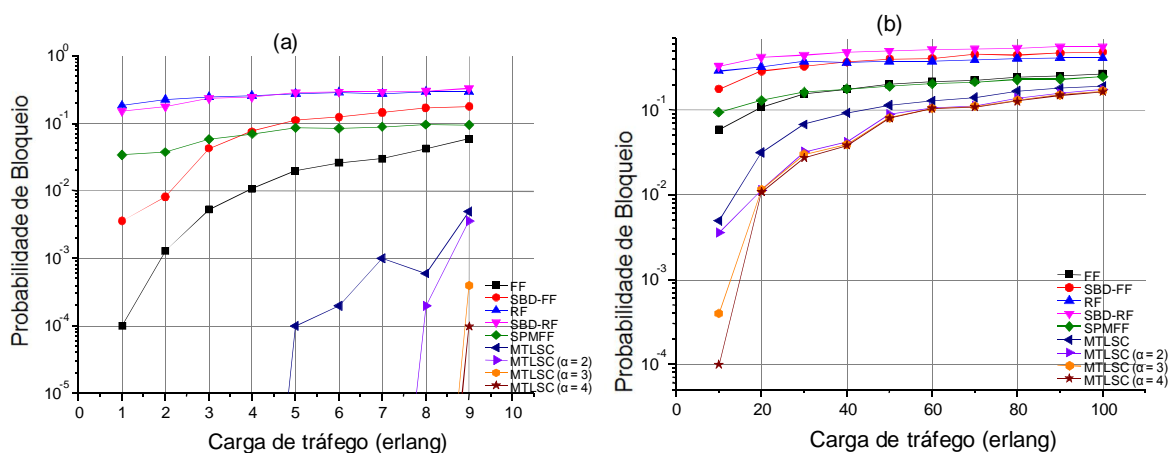


Figura 46. Simulações com o Cenário D para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

A Figura 46(a) e (b) apresenta as simulações do Cenário D adotando a topologia de rede Brasileira. Nesta topologia os resultados para os algoritmos MTLSC são superiores aos encontrados na topologia de rede NSFNet ilustrada na Figura 43. A topologia de rede Brasileira permitiu uma maior acomodação do tráfego, o que proporciona uma maior ocupação da banda de rede provida pelos

algoritmos MTLSC e MTLSC aperfeiçoado. Para cargas inferiores a 5 E, por exemplo, os algoritmos MTLSC não apresentam probabilidade de bloqueio.

Neste cenário foram observados os piores resultados do algoritmo SPMFF, que para cargas de tráfego menor ou igual a 3 E são superados, por exemplo, pelo SBD-FF. A partir de 4 E, o SPMFF supera os resultados apresentados pelo SBD-FF. O algoritmo FF para as cargas de tráfego menor que 30 E supera o SPMFF, sendo os resultados do SPMFF similares ao FF para cargas maior ou igual a 40 E.

Os algoritmos SBD-RF e RF para as cargas de tráfego maior ou igual a 3 e menor ou igual a 10 E exibem resultados equivalentes. A partir de 20 E o RF supera o SBD-RF, sendo o SBD-FF superado também a partir de 40 E. Desta forma, o algoritmo SBD-RF foi o que exibiu os menores resultados para o cenário simulado, em relação à redução da probabilidade de bloqueio.

A Figura 47 apresenta a relação da ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. São adotadas as cargas de tráfego do Cenário D utilizando a topologia de rede Brasileira.

Nas Figuras 47(a) e (b) observa-se que os algoritmos MTLSC aperfeiçoado superam os demais algoritmos em ocupação da banda de rede. O algoritmo SPMFF supera ou equipara-se ao algoritmo MTLSC para as cargas de 1 a 4 E e 8 a 10 E. Neste cenário a diferença dos resultados de ocupação da banda de rede provida pelo MTLSC tradicional, em relação ao SPMFF, varia em média apenas 2,5%. Um resultado que mostra que o aperfeiçoamento do MTLSC é

significativo, uma vez que comparado ao SMPFF, a variação média do MTLSC aperfeiçoado é de até 17%, por exemplo, para 50 E.

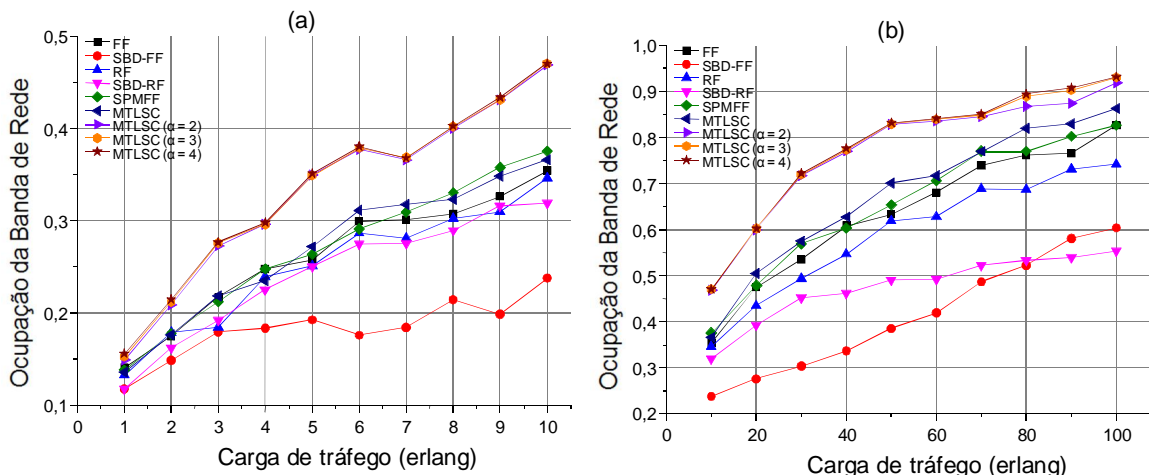


Figura 47. Simulações com o Cenário D Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Na Figura 48 os resultados de ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio para o cenário D, são apresentados. Nesta figura observa-se o melhor desempenho dos algoritmos MTLSC comparados ao FF para probabilidades de bloqueio maior ou igual a 3% e menor ou igual a 7%.

A Figura 48 apresenta a ocupação da banda de rede em relação à probabilidade de bloqueio. Nota-se que o algoritmo SPMFF, para ocupação inferior a 50% é superado pelo algoritmo FF. A partir de 50% de ocupação, o SPMFF possui resultados similares ou superiores. O algoritmo RF neste cenário mostrou melhor no que tange ocupação da banda de rede, entretanto, ainda

apresenta probabilidade de bloqueio superior aos demais algoritmos, exceto os SBD.

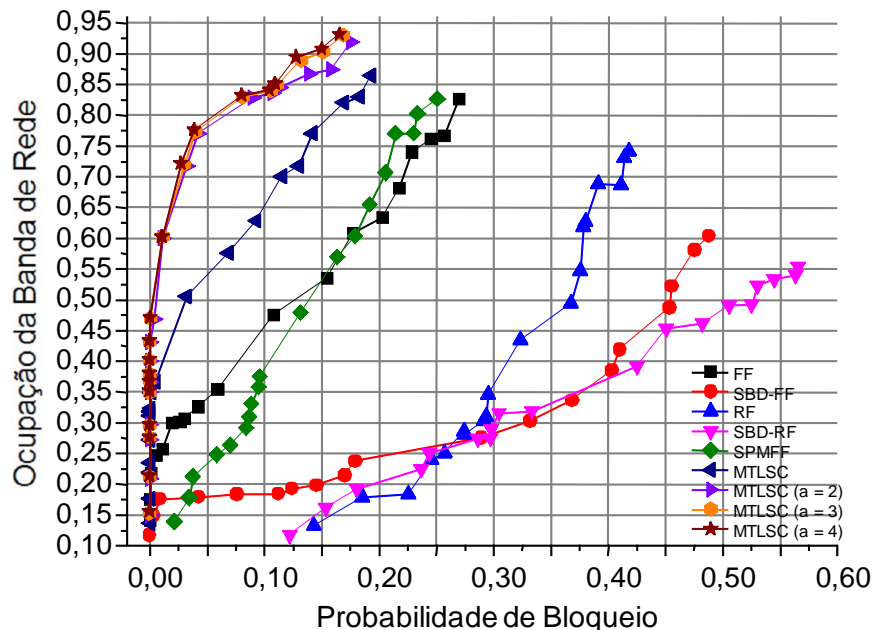


Figura 48. Simulações com o Cenário D Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Neste cenário encontram-se os melhores resultados de ocupação da banda de rede do MTLSC aperfeiçoado em relação ao FF. Para, por exemplo, probabilidade de bloqueio menor ou igual a 5%, o incremento de ocupação provida pelo MTLSC aperfeiçoado é de até 41%. Estes resultados exibem a importância do desenvolvimento de novas heurísticas de alocação da banda de rede, e a contribuição que tais desenvolvimentos oferecem as operadoras de telefonia.

Apêndice C - Resultados das simulações do cenário de carga de tráfego E

A Figura 49 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o

Cenário E para topologia de rede NSFNet. Conforme Tabela 10, no Cenário E um terço das conexões solicitadas são de 100 Gb/s, 400 Gb/s e de 1 Tb/s. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

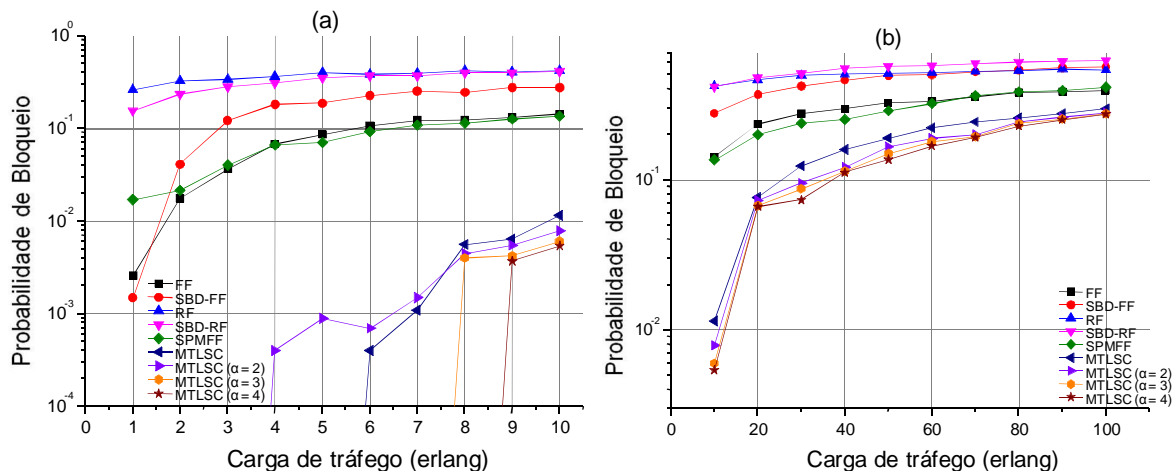


Figura 49 Simulações com o Cenário E para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

As Figuras 49(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego, respectivamente de 1 a 10 E e 10 a 100 E, para o Cenário E adotando a topologia de rede NSFNet. O algoritmo SPMFF apresenta resultados superiores ao FF nas cargas de tráfego superiores a 4 E e inferiores a 60 E. Para as demais cargas, o SPMFF apresenta resultados inferiores ou equivalentes ao FF. Os algoritmos MTLSC aperfeiçoados superam os resultados do MTLSC tradicional, apresentando probabilidades de bloqueio a partir de 9 E enquanto que o algoritmo tradicional apresenta a partir de 4 E.

Neste cenário o algoritmo SBD-FF apresenta para a carga de tráfego de 1 E menor probabilidade de bloqueio que os algoritmos SPMFF e FF. Para as cargas de tráfego maior ou igual a 2 e menor ou igual a 50 E o algoritmo SBD-FF é superado, com exceção do SBD-RF e RF, pelos demais algoritmos. Este efeito não é notado para as cargas de tráfego maior que 50 E em que o SBD-FF e RF apresentam resultados similares.

A Figura 50 apresenta os resultados de ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. São mostrados os resultados das simulações do Cenário E adotando a topologia de rede NSFNet.

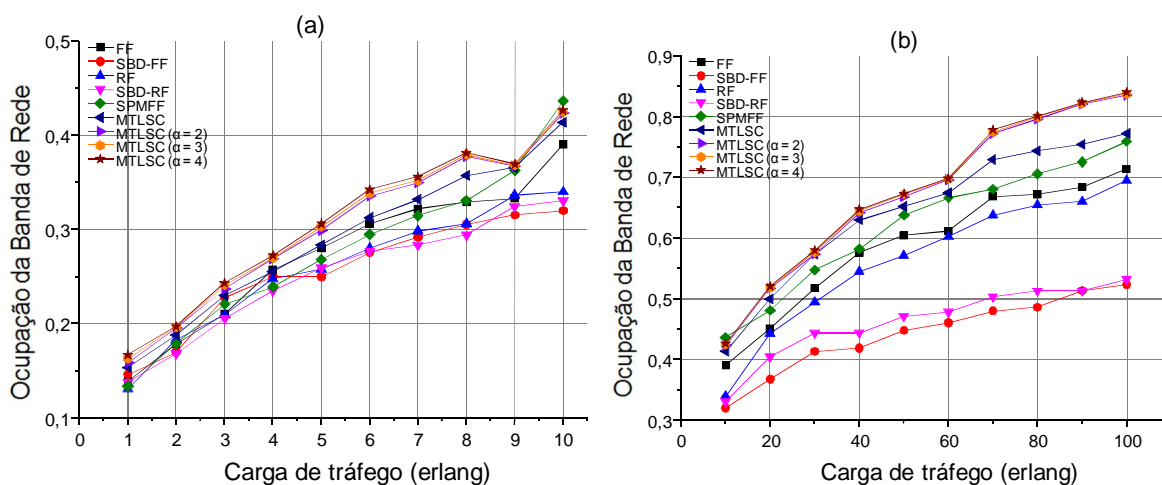


Figura 50. Simulações com o Cenário E Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Em relação à ocupação da banda de rede, observa-se nas Figuras 50(a) e (b) que os algoritmos MTLSC superam os demais algoritmos em todas as cargas de tráfego. Destaque para o SPMFF, que para carga de tráfego de 10 E é o algoritmo com maior ocupação da banda de rede.

Neste cenário o RF apresenta, por exemplo, para carga de 100 E, uma ocupação da banda de rede de 18% superior ao SBD-RF (RF igual a 70% e SBD-RF igual a 52%). Os algoritmos SBD são os que possuem a menor ocupação da banda de rede dada as restrições de regiões de ocupação definidas em sua estrutura de implementação.

Na Figura 51 são exibidos os resultados de ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. Tais resultados adotam, assim como nas Figuras 49 e 50 o cenário de carga de tráfego E adotando a topologia de rede NSFNet.

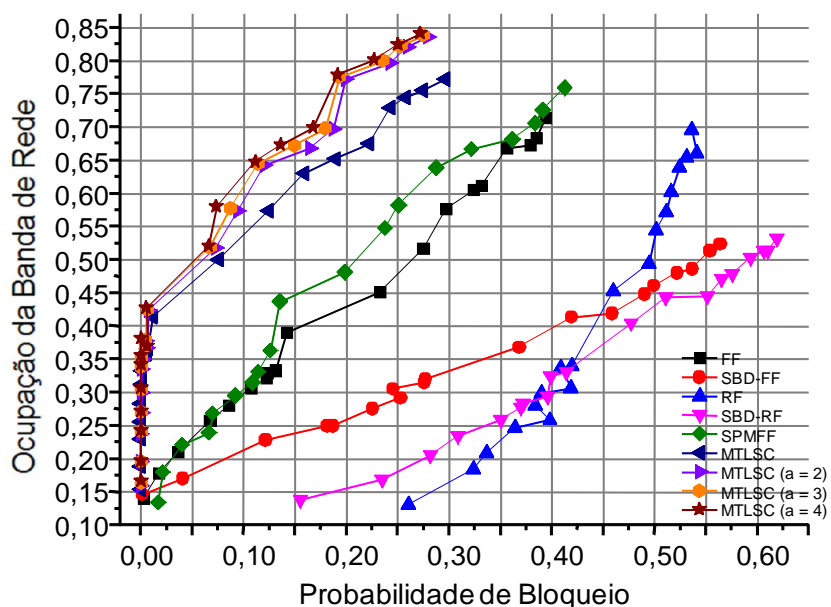


Figura 51. Simulações com o Cenário E Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Na Figura 51 nota-se que o algoritmo SPMFF possui ocupação de banda equivalente a do algoritmo MTLSC tradicional. Ambos possuem ocupação da banda de rede, por exemplo de 77%, porém, o algoritmo SPMFF possui 12% a mais de probabilidade de bloqueio (SPMFF 42% e MTLSC 30%). O mesmo

comportamento ocorre para os algoritmos FF e RF. O algoritmo RF possui ocupação da banda de rede semelhante a do algoritmo FF, porém, apresenta aproximadamente 13% a mais de probabilidade de bloqueio (FF 40% e RF 53%).

As Figuras 52(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio para os intervalos de carga de, respectivamente, 1 a 10 E e 10 a 100 E para o Cenário E adotando a topologia de rede Brasileira. Adotam-se neste cenários as mesmas cargas de tráfego adotadas na Figura 49.

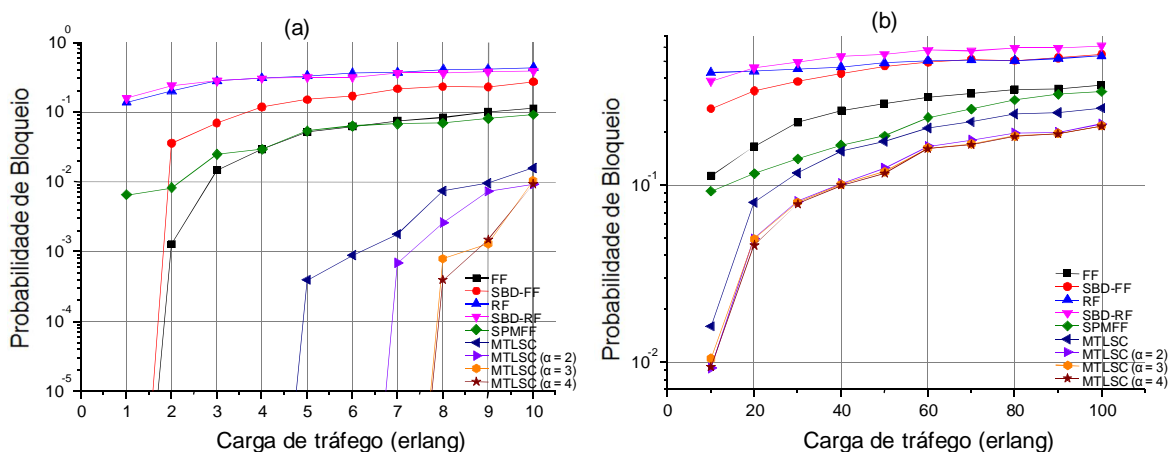


Figura 52. Simulações com o Cenário E para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

As Figuras 52(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio em relação a carga de tráfego para o Cenário E adotando a topologia de rede Brasileira. O algoritmo SBD-FF destacou-se por apresentar uma probabilidade equivalente a do FF superando o SPMFF na carga de tráfego de 1 E. O comportamento encontrado na topologia Brasileira para os algoritmos

MTLSC volta a ser reproduzido nesta topologia, em que os algoritmos de melhor ocupação apresentam as menores probabilidades de bloqueio.

Na Figura 53 a ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego é mostrada. Nesta figura exibem-se os melhores resultados do algoritmo SBD-RF em relação ao RF, para as cargas de 1 a 9 E.

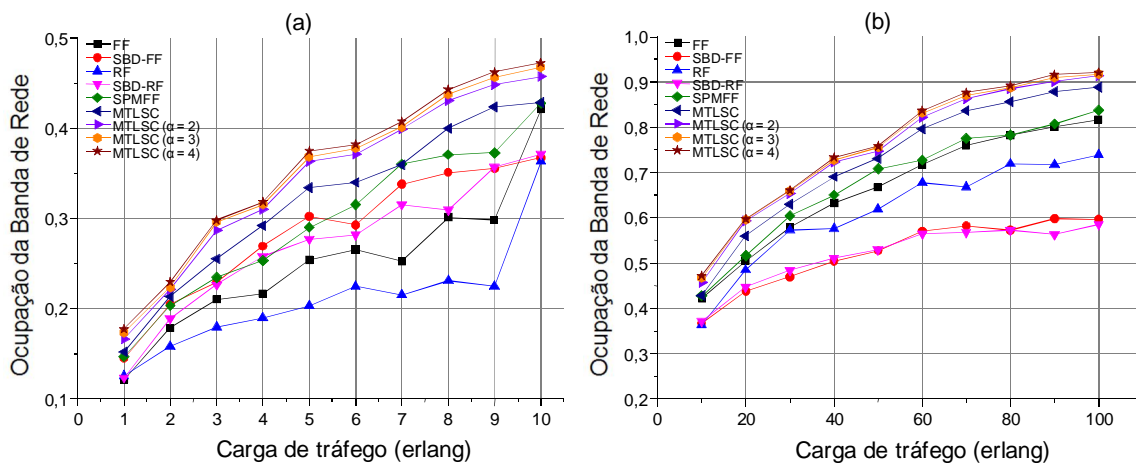


Figura 53. Simulações com o Cenário E Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Na Figura 53(a) nota-se uma ocupação de banda dos algoritmos SBD superior a dos algoritmos FF e RF respectivamente. Destaca-se o algoritmo SBD-RF que em relação ao RF, apresenta uma ocupação de banda 15% superior, por exemplo, para carga de 9 E. A partir de 10 E, resultados apresentados na Figura 45(b) os algoritmos SBD reproduzem o mesmo comportamento apresentando na Figura 50(b) em que tais algoritmos são os que possuem menor ocupação da banda de rede.

A Figura 54 apresenta a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. Exibe-se nesta figura os resultados positivos do SPMFF em relação FF para probabilidade de bloqueio de até 20%.

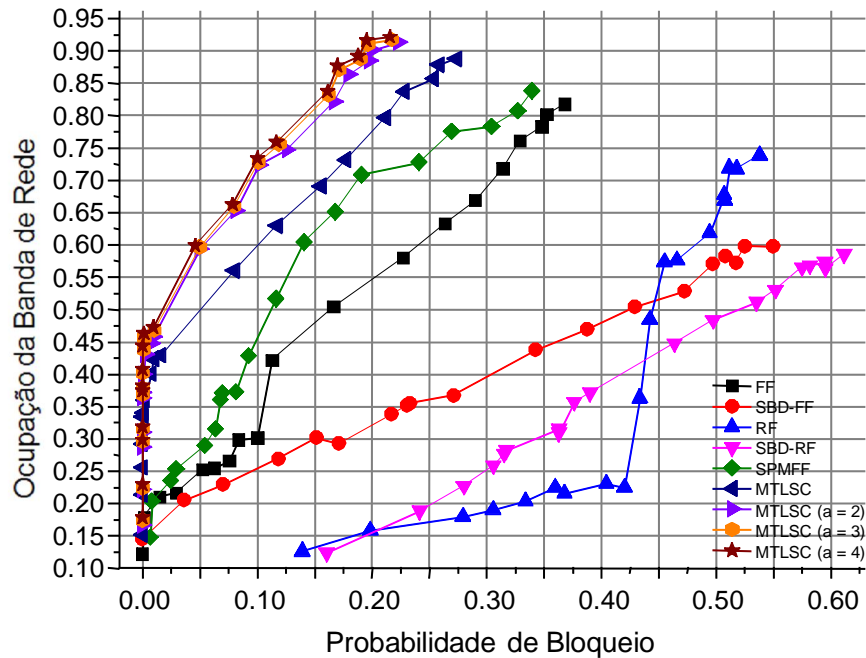


Figura 54. Simulações com o Cenário E Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

A Figura 54 reproduz um comportamento similar ao exibido pela Figura 51 para os algoritmos SBD e RF. Porém, os algoritmos SPMFF e FF possuem uma distância menor em relação a ocupação da banda em relação a probabilidade de bloqueio. Para a ocupação da banda de rede de 80%, o algoritmo FF possui apenas 3% a mais de probabilidade de bloqueio. O ponto observado na figura que apresenta o maior ganho em relação aos resultados de ambos, é para 15% de probabilidade de bloqueio, em que o SPMFF supera o FF em uma ocupação da banda de rede em incremento de 15%.

Apêndice D - Resultados das simulações do cenário de carga de tráfego F

A Figura 55 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação a carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o Cenário F para topologia de rede NSFNet. Conforme Tabela 10, no Cenário F a distribuição carga de tráfego é 50% das conexões solicitadas são de 100 Gb/s, 40% das conexões solicitadas são de 400 Gb/s e 10% das conexões solicitadas são de 1 Tb/s. São apresentados os resultados das sete heurísticas de alocação de espectro óptico adotadas neste trabalho, sendo o MTLSC aperfeiçoado apresentado com três variações do valor de α .

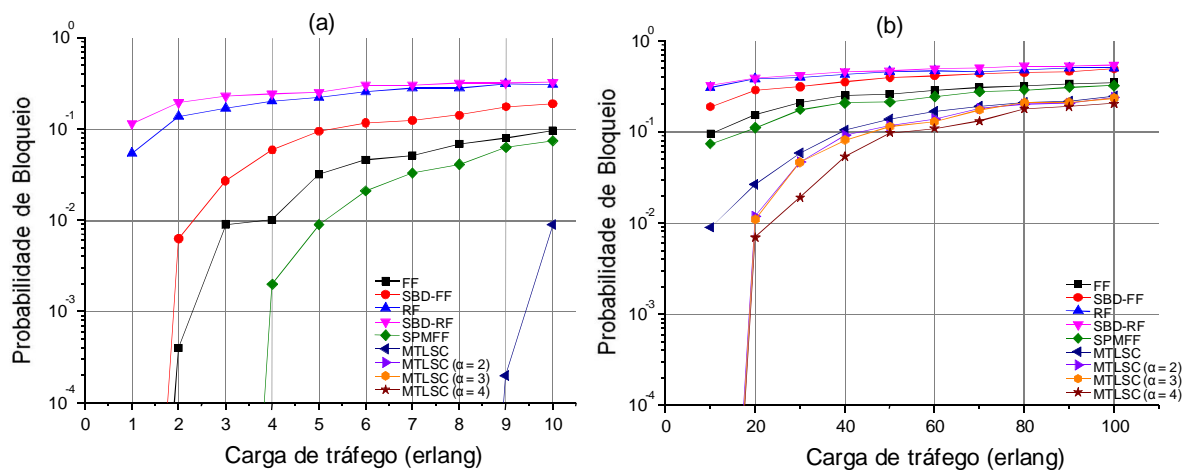


Figura 55. Simulações com o Cenário F para a Topologia de Rede NSFNet (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

As Figuras 55(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio em relação a carga de tráfego para, respectivamente 1 a 10 E e 10 a 100 E, o Cenário F adotando a topologia de rede NSFNet. O MTLSC apresenta probabilidade de bloqueio a partir de 9 E. Os algoritmos MTLSC aperfeiçoados

apresentam probabilidades de bloqueio superior a dos demais algoritmos. Tal comportamento apresenta probabilidades de bloqueio a partir de 20 E. Neste cenário identifica-se o maior ganho de redução da probabilidade de bloqueio dos cenários simulados em 60 E, redução da probabilidade de bloqueio em 6%.

A Figura 56 mostra a ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego. Nesta figura o algoritmo RF apresenta seus melhores resultados de ocupação da banda de rede.

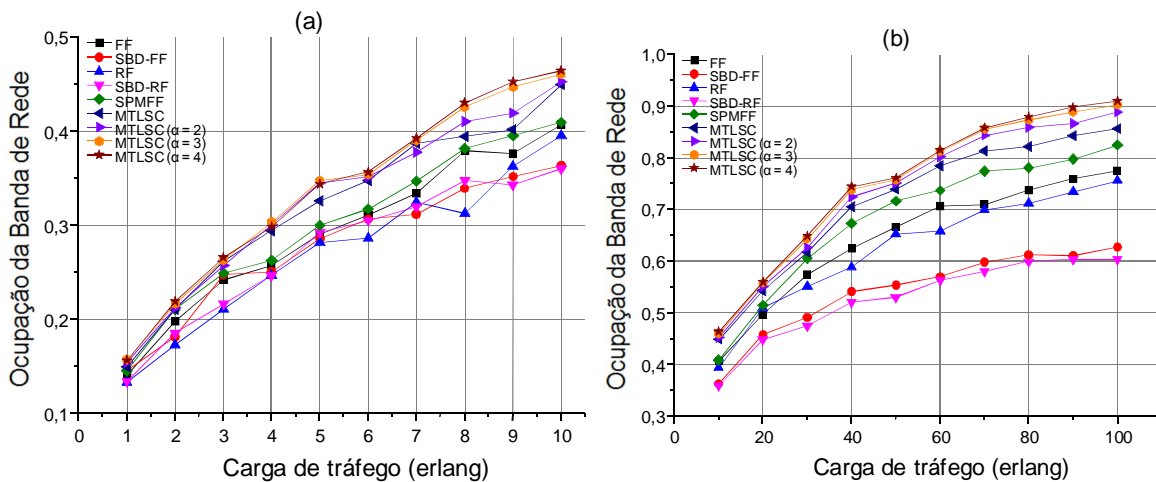


Figura 56. Simulações com o Cenário F Topologia de Rede NSFNet (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Nas Figuras 56(a) e (b) nota-se que o comportamento dos demais cenários, no que tange os algoritmos MTLSC, se repete. O algoritmo FF possui ocupação máxima de 77% em 100 E. O FF comparado ao MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$, possui uma ocupação da banda de rede de 14% menor.

Neste cenário o algoritmo RF apresentou ocupação da banda de rede de 73% para carga de 100 E, o melhor resultado deste algoritmo nos cenários

simulados neste trabalho. Tal resultado é 13% superior à ocupação da banda de rede provida pelo SBD-RF (RF igual a 73% e SBD-RF igual a 60%).

A Figura 57 exibe os resultados de ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. Nesta Figura são exibidos os melhores resultados do MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$ em relação ao $\alpha = 3$.

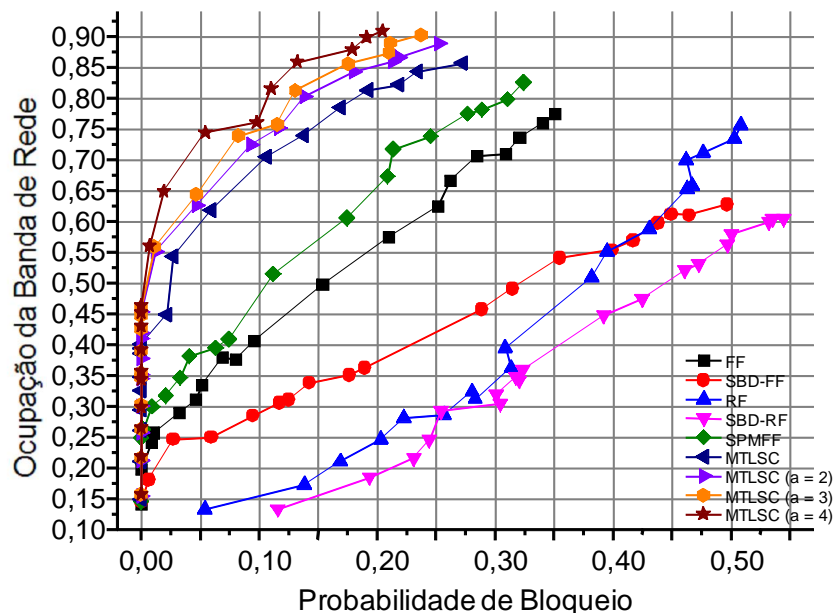


Figura 57. Simulações com o Cenário F Topologia de Rede NSFNet, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

Na Figura 57 nota-se que o algoritmo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$, além de uma maior ocupação da banda de rede, possui também uma redução de probabilidade de bloqueio na ordem de 10%, por exemplo, para ocupação da banda de rede de 86%. O algoritmo MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 4$ em relação ao $\alpha = 3$, apresenta uma redução da probabilidade de bloqueio de até 4%, como é o caso para 86% de ocupação da banda de rede. Tais reduções da probabilidade

de bloqueio devem se a melhor ocupação espectral provida pelos algoritmos que primam pela maximização da consecutividade dos FSUs.

A Figura 58 apresenta os resultados de probabilidade de bloqueio em relação a carga de tráfego (erlang), e a ocupação da banda de rede para o Cenário F para topologia de rede Brasileira. Como descrito anteriormente, o Cenário F possui a distribuição de tráfego de 50% das conexões solicitadas de 100 Gb/s, 40% das conexões solicitadas de 400 Gb/s e 10% das conexões solicitadas de 1 Tb/s. Nesta figura exibem-se os melhores resultados de probabilidade de bloqueio apresentados pelo algoritmo SBD-FF.

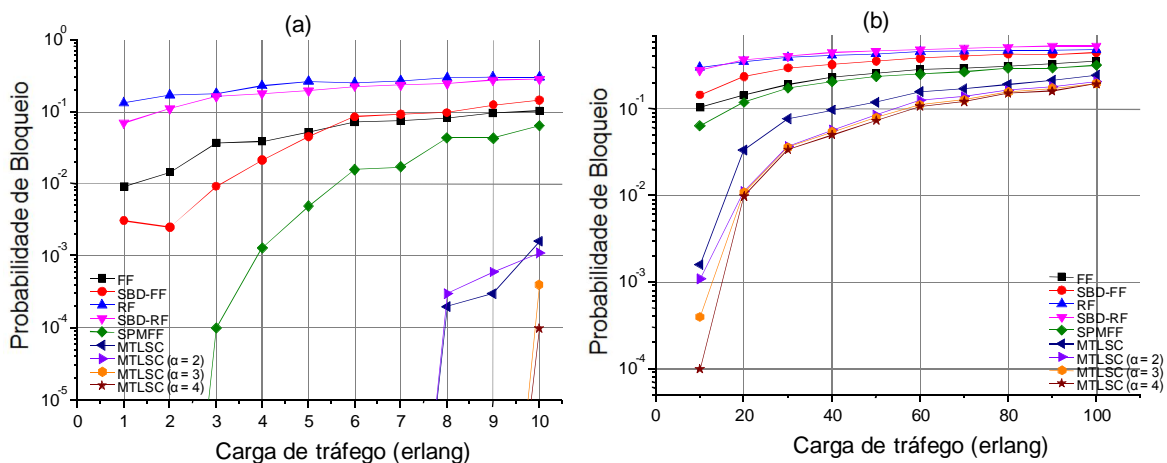


Figura 58. Simulações com o Cenário F para a Topologia de Rede Brasileira (a) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) probabilidade de bloqueio em função da carga de tráfego para 10 a 100 E.

As Figuras 58(a) e (b) apresentam os resultados de probabilidade de bloqueio em relação à carga de tráfego para, respectivamente 1 a 10 E e 10 a 100 E, o Cenário F adotando a topologia de rede Brasileira. O algoritmo SBD-FF neste cenário apresenta seus melhores resultados para as cargas menor ou igual a 5 E.

O SBD-FF exibe probabilidade de bloqueio inferior ao FF para as cargas de 1 a 4 E, tem resultados similares ao FF para carga de 5 E. O algoritmo SPMFF apresenta para todas as cargas de tráfego, desempenho superior ao FF. Para cargas superiores a 9 E, o MTLSC aperfeiçoado com $\alpha = 3$ e 4 apresentam probabilidade de bloqueio superior a 0, um resultado muito interessante comparado aos demais algoritmos que apresentam probabilidade a partir de 1 E, como por exemplo, o algoritmo FF.

Na Figura 59 mostram-se os resultados de ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego. Como nos demais cenários, o resultado dos sete algoritmos de roteamento e alocação do canal óptico são exibidos.

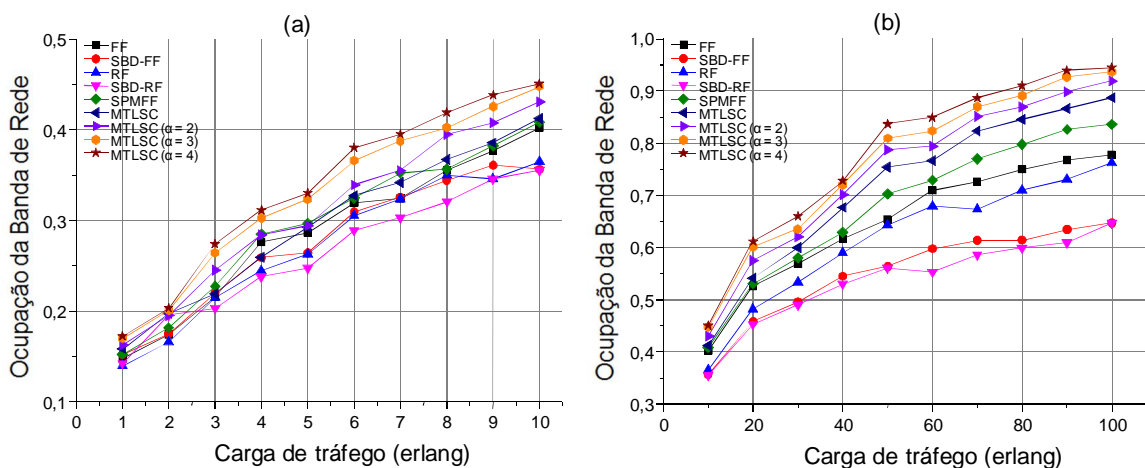


Figura 59. Simulações com o Cenário F Topologia de Rede Brasileira (a) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego para 1 a 10 E; (b) ocupação da banda de rede em função da carga de tráfego 10 a 100 E.

Nas Figuras 59(a) e (b) observa-se que os resultados obtidos adotando a topologia NSFNet se repetem, no que tange o desempenho dos algoritmos SPMFF, MTLSC e MTLSC aperfeiçoado. Os algoritmos SBD são os que possuem

a maior probabilidade de bloqueio e menor ocupação da banda de rede, para as cargas maiores ou igual a 10 E.

A Figura 60 mostra a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio. O comportamento identificado nos cenários anteriores, se repete, incluindo o desempenho superior dos algoritmos de melhor ocupação espectral.

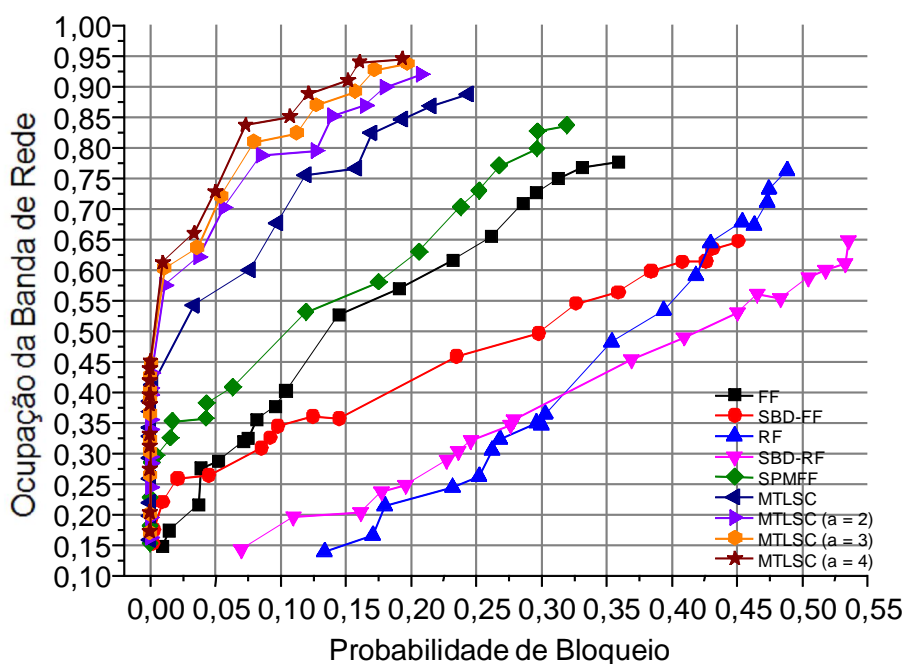


Figura 60. Simulações com o Cenário F Topologia de Rede Brasileira, em relação a ocupação da banda de rede em função da probabilidade de bloqueio.

A Figura 60 exibe resultados similares aos apresentados na Figura 57. Para a ocupação da banda de rede de 95% do algoritmo MTLSC aperfeiçoado $\alpha = 4$ temos uma redução na probabilidade de bloqueio de 5% em relação ao MTLSC tradicional. Além da redução da probabilidade de bloqueio, houve o incremento de 6% na ocupação da banda de rede provida pelo MTLSC aperfeiçoado em relação

ao MTLSC tradicional. Tal ganho permite que os recursos de rede possam ser melhor aproveitados e um número maior de conexões possam ser atendidas.