



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA - UFBA
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



Planejamento de Redes Ópticas Elásticas por meio do problema Max-RMSA

Thiale Moura Alcântara de Oliveira

Salvador - Bahia
SETEMBRO DE 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA - UFBA
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



Planejamento de Redes Ópticas Elásticas por meio do problema Max-RMSA

Thiale Moura Alcântara de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Karcus Day Rosário Assis

Salvador - Bahia

Setembro de 2020

O48 Oliveira, Thiale Moura Alcântara de.
Planejamento de redes ópticas elásticas por meio do
problema Max-RMSA/ Thiale Moura Alcântara de Oliveira. –
Salvador, 2020.
78 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Karcus Day Rosário Assis.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
Escola Politécnica, 2020.

1. Rede óptica elástica - planejamento. 2. Max-RMSA. 3.
Grooming. I. Assis, Karcus Day Rosário. II. Universidade
Federal da Bahia. III. Título.

CDD.: 621.382 7

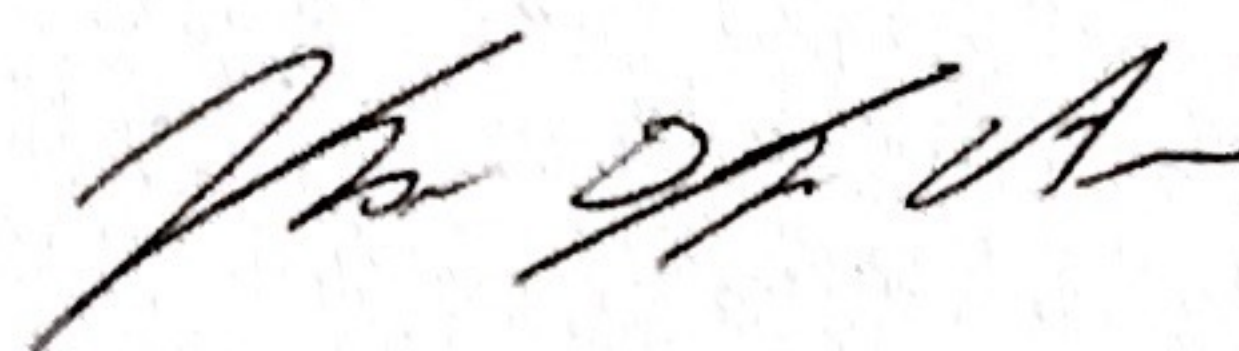
Thiale Moura Alcântara de Oliveira

"Planejamento de Redes Ópticas Elásticas por meio do Problema Max-RMSA".

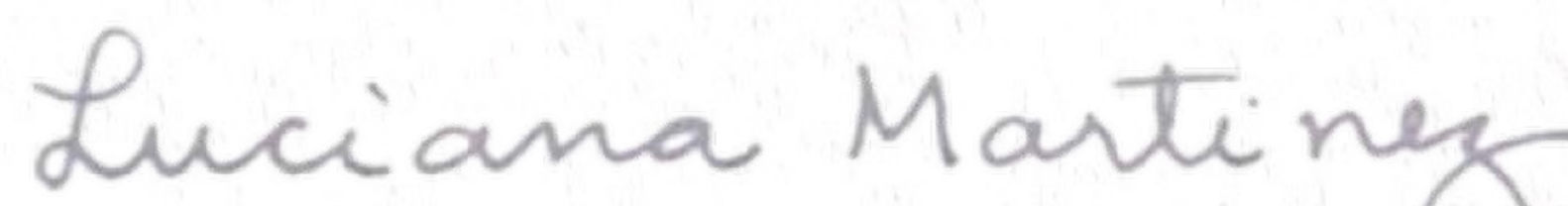
Dissertação apresentada à Universidade Federal da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em: 11 de Setembro de 2020.

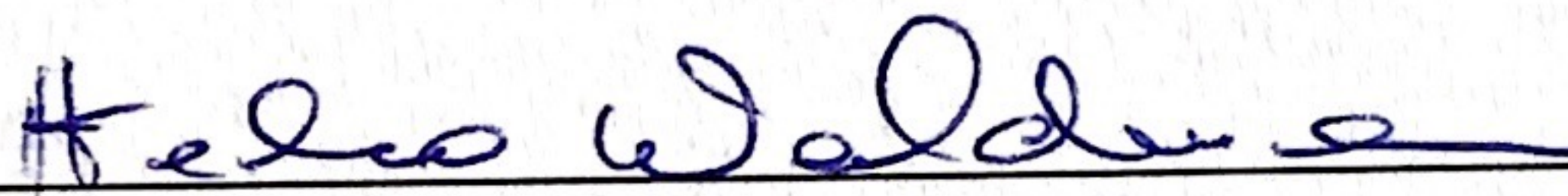
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Karcus Day Rosário Assis
Orientador/UFBA



Prof. Dr. Luciana Martinez
UFBA



Prof. Dr. Hélio Waldman
UNICAMP

À minha família

Agradecimentos

Concluir a trajetória deste mestrado foi um grande desafio, muita luta, dificuldades, superação, realizações e alegrias. Apesar de parecer um trabalho solitário, eu não finalizaria essa etapa da minha vida sem o apoio de várias pessoas.

Gostaria de agradecer primeiramente a meus pais, João Carlos Alcântara e Sirley Moura. Nada que eu escreva aqui vai conseguir expor o quanto eles são responsáveis por essa conclusão e o quanto eu sou grata em ter os pais mais amáveis e persistentes do mundo, que nunca desistiram de mim, mesmo quando eu mesma já não acreditava tanto. A eles o meu mais profundo muito obrigada. Estendo esse agradecimento a toda a minha família: minha irmã Tainã Moura, minha avó Ana Cavalcante, meus amados tios e tias e primos e primas, que acompanharam de longe e de perto os meus dias e todos os meus momentos e as minhas dificuldades. Obrigada pelo amor e pelo exemplo.

Agradeço à Universidade Federal da Bahia e à todos os Professores que formaram minha base nesse processo acadêmico. Primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Karcus Day Rosário Assis, pelo apoio, pelos ensinamentos, pelo encorajamento e por ter confiado em mim que seria possível a realização de projeto. Aos professores da banca de qualificação, Prof. Dr. Vitaly Félix Rodríguez Esquerre e Prof. Dr. Marcelo Sampaio de Alencar pelas observações tão minuciosas, pela atenção ao meu trabalho. Aos professores desta banca de defesa, Profa. Dra. Luciana Martinez e Prof. Dr. Hélio Waldmam, pelas observações e carinho com a minha dissertação. Ao secretário do PPGEE Jaime Rodrigues Neto pelo apoio e paciência. À todos os colegas do Labtel pelos cafés e companhia no laboratório. Agradeço a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB: Proc. BOL0285/2019) pela bolsa de mestrado concedida.

Aos meus estagiários e grandes amigos, Rafael Vieira e Suzana Varjão, meus fieis escudeiros que me apoiaram e me suportaram todo esse tempo que trabalhamos juntos e sem o carinho e a dedicação deles eu não teria base para concluir esse mestrado. Aos amigos que ajudaram diretamente na escrita deste texto e confecção das imagens como: Safira Moura, Gabriela Costa, Lauro Tiago, Pedro Henrique Alves, Davide Araujo, Victor Cunha, Isabela Almeida, Victor Porto, o meu muito obrigada.

Aos meus afilhados Kayque Batista, Allany Garcia, Nicolas Cavalcanti, Francisco

Moura, às minhas comadres Ana Maria Batista, Arleide Garcia, Lúdia Cavalcanti, Yolle Moura, ao meu padrinho e madrinhas, Neilton Evangelista, Leonice Evangelista e Sueane Castro, o meu muito obrigada.

Não posso deixar de agradecer imensamente ao INATEL (Instituto Nacional de Telecomunicações), pois este processo foi iniciado nesta instituição. A todos os professores que fizeram parte desta fase da formação, em especial Prof. Dr. Joel J. P. C. Rodrigues, meu orientador nesse período, por também acreditar sempre em mim e me apoiar na difícil decisão de ir para UFBA. À secretária do mestrado, Gisele Moreira pelo apoio e carinho ao me receber de braços abertos em Santa Rita do Sapucaí. Aos queridos colegas desse mestrado, em especial, Rita Leles, Paulo José Loureiro, Daniel Siqueira, Gabriel Lobão, Guilherme Moreira, Luzia Natacha de Carvalho, Elvira Diogo, Andreia Castro, Dani Bravin entre outros.

*"It's a new dawn,
it's a new day,
it's a new life for me
And I'm feeling good".
Nina Simone*

Resumo

Serão apresentadas quatro formulações de Programação Linear Inteira Mista (MILP - *Mixed Linear Integer Programming*) para resolver o problema de maximização do tráfego e roteamento, modulação e alocação de espectro (Max-RMSA) em redes ópticas elásticas (EONs). Os dois primeiros modelos são formulações sem a utilização da técnica de *Grooming* com e sem caminhos ópticos predefinidos (NPSP - *Non Predefined Shortest Paths*) e (PSP - *Predefined Shortest Paths*), onde a NPSP fornece a solução ótima global, pois contem todas as possibilidades de caminhos da rede entre cada um dos pares de nós, já a PSP fornece, em geral, solução próxima da ótima, pois conta apenas com um conjunto de caminhos predefinidos, reduzindo assim, a complexidade e seu espaço de busca. Os dois últimos modelos são também para resolver o Max-RMSA, porém considerando o uso da técnica *Grooming*. Foram feitas diversas simulações para cada MILP e os resultados foram analisados em redes de pequenas instâncias. Para redes moderadamente grandes como a *National Science Foundation Network* (NSFNET) serão utilizadas apenas as formulações PSP, devido a complexidade das formulações NPSP em redes com maior número de instâncias, podendo encontrar uma boa solução com um tempo de simulação razoável.

Palavras-chave: Max-RMSA, EON, MILP, *Grooming*.

Abstract

Four formulations of Mixed Integer Linear Programming (MILP) will be presented to solve the problem of traffic maximization and spectrum routing, modulation and allocation (Max-RMSA) in elastic optical networks (EONs). The first two models are formulations without using the Grooming technique with and without predefined optical paths (NPSP - Non Predefined Shortest Paths) and (PSP - Predefined Shortest Paths), in which NPSP provides the global optimal solution, as it contains all the possibilities of network paths between each of the pairs of nodes, whereas the PSP provides, in general, a near-optimal solution, as it only has a set of predefined paths, thus reducing complexity and its search space. The last two models are also for solving Max-RMSA, however considering the use of the Grooming technique. Several simulations were carried out for each MILP and the results were analyzed in networks of small instances. For moderately large networks such as the National Science Foundation Network (NSFNET) only PSP formulations will be used, due to the complexity of NPSP formulations in networks with a higher number of instances, and a good solution can be found with a reasonable simulation time.

Keywords: Max-RMSA, EON, MILP, Grooming.

Lista de Figuras

1.1	Fluxograma das simulações para rede de 6 nós.	4
1.2	Fluxograma das simulações para rede de 14 nós.	4
1.3	Metodologia da dissertação	5
2.1	Grade fixa WDM.	8
2.2	Grade flexível EON.	10
2.3	Exemplo de enlace (1,2) de uma EON com técnica OFDM contendo três demandas distintas	12
2.4	Exemplo da formação da técnica <i>Grooming</i>	14
2.5	Exemplo comparativo no <i>link</i> físico 1-2 com e sem <i>Grooming</i>	14
5.1	Topologia física da rede de 6 nós utilizada para simulações.	33
5.2	Topologia física da rede NSFNET de 14 nós utilizada para simulações. . . .	34
5.3	Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós em formulação NPSP.	39
5.4	Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós em formulação PSP $k = 2$	39
5.5	Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós em formulação PSP $k = 1$	40
5.6	Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede NSFNET em formulação PSP $k = 1$	42
5.7	Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede NSFNET em formulação PSP $k = 2$	43

5.8	Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós para as formulações NPSP e PSP ($k = 2$) com <i>Grooming</i>	46
5.9	Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós para a formulação PSP ($k = 1$) com <i>Grooming</i>	46
5.10	Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede NSFNET para a formulação PSP ($k = 1$) com <i>Grooming</i>	49
5.11	Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede NSFNET para a formulação PSP ($k = 2$) com <i>Grooming</i>	49
5.12	Topologia virtual sob topologia física para $C = 7$	51
5.13	Topologia virtual sob topologia física para $C = 4$	51
5.14	Os enlaces virtuais então tendem a coincidir com os enlaces físicos.	52
5.15	Comparação entre os <i>links</i> vituais criados com a camada física	53

Lista de Tabelas

5.1	Valores da função objetivo de (4.1) NPSP e (4.16) PSP para rede de 6 nós e diferentes valores de C	35
5.2	Valores de tempo de simulação, em segundos, para rede de 6 nós e diferentes valores de C	36
5.3	Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais em relação a $V_{u,v}^d$. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$	37
5.4	Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais em relação a $V_{u,v}^d$. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$	37
5.5	Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais em relação a $V_{u,v}^d$. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$	38
5.6	Valores da função objetivo de (4.16) para a rede NSFNET, formulações PSP e diferentes valores C	41
5.7	Valores de tempo de simulação, em segundos, para rede NSFNET e diferentes valores de C	41
5.8	Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais em relação a $V_{u,v}^d$. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$	41
5.9	Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais em relação a $V_{u,v}^d$. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$	42
5.10	Valores da função objetivo de (4.27) para rede de 6 nós e diferentes valores de C	44
5.11	Valores de tempo de simulação, em segundos, para rede de 6 nós e diferentes valores de C	44

5.12	Número de demandas estabelecidas entre os nós s, d organizadas em percentuais em relação a D. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$	45
5.13	Número de demandas estabelecidas entre os nós s, d organizadas em percentuais em relação a D. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$	45
5.14	Valores da função objetivo eq. (4.27) para rede NSFNET, para formulação PSP para vários valores de C	47
5.15	Valores de tempo de simulação, em segundos, para rede NSFNET para Formulação PSP com <i>Grooming</i> e diversos valores de C	47
5.16	Número de demandas estabelecidas entre os nós s, d organizadas em percentuais em relação a D. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$	48
5.17	Número de demandas estabelecidas entre os nós s, d organizadas em percentuais em relação a D. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$	48
5.18	Valores mínimos de C para volume de tráfego totalmente estabelecido da rede de 6 nós nas formulações.	50
5.19	Valores mínimos de C para volume de tráfego totalmente estabelecido da rede de 14 nós nas formulações.	50

Lista de Abreviaturas

- p*-Cycle pre-configured-Cycle - Projeto de Proteção de Ciclo preconfigurado
- BPSK Binary Phase Shift Keying - Chaveamento por Deslocamento de Fase Binário
- BV-WXCs Bandwidth Variable Cross Conects - *Switches Cross-connects* de Largura de Banda Flexível
- BVT Bandwidth Variable Transponder - *Transponder* com Largura de Banda Variável
- CAPEX Capital Expenditure - Gasto de Capital Global
- CO-OFDM Coherent Optical Orthogonal Frequency-division Multiplexing - Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal Óptica Coerente
- CoWDM Coherent Wavelength Division Multiplexing - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Coerente
- DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Densa
- EON Elastic Optical Network - Rede Óptica Elástica
- EsPAT Espaçamento Pró Agregação de Tráfego
- FGB Filter Guard Band - Banda de Guarda para Filtro
- FS Frequency Slot - *Slot* de Frequência
- IP Internet Protocol - Protocolo de Internet
- ITU International Telecommunication Union - União Internacional de Telecomunicações
- ITU-T ITU-Telecommunication Standardization Sector - Setor de Normalização das Telecomunicações da ITU

m-MEL Minimized Multi-hop Elastic Lightpath - Caminho Óptico Elástico de Multi-saltos Minimizados

M-QAM M Quadrature Amplitude Modulation - Modulação de Amplitude em Quadratura com M símbolos

Max-RMSA Maximum RMSA - Maximização Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro

MILP Mixed Linear Integer Programming - Programação Linear Inteira Mista

MSC Maximum Spectrum Completeness - Espectro de Completude Máxima

NP-hard Non Polynomial - hard - Não Polinomial - (Difícil)

NPSP Non Predefined Shortest Paths - Sem Caminhos mais Curtos Predefinidos

NSFNET National Science Foundation Network- Rede Fundação de Ciência Nacional

OADM Optical Add-Drop Multiplexing

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing - Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais

PSP Predefined Shortest Paths - Caminhos mais Curtos Predefinidos

PWCE Protected Working Capacity Envelope - Envelope de Capacidade de Trabalho Protegido

QoS Quality of Service - Qualidade de Serviço

RMSA Routing, Modulation and Spectrum Allocation - Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro

RSA Routing and Spectrum Allocation - Roteamento e Alocação de Espectro

RWA Routing and Wavelength Assignment - Roteamento e Alocação de Comprimento de onda

SBVT Sliceable Bandwidth Variable Transponder - *Transponder* de Largura de Banda Variável Elástica

SD-IPoEON Software Defined IP-over-EON - Rede Definida por *Software* IP sobre EON

SDM Spatial Division Multiplexing - Multiplexação por Divisão Espacial

SLICE spectrum resource slicing and elastic allocation - Alocação Elástica e Fatiamento de Recurso Espectral

SNetS Slice Network Simulator - Simulador de Redes - SNetS

VON Virtual Optical Network - Rede Óptica Virtual

WCC Wavelength Continuity Constraint - Restrição de Continuidade de Comprimento de onda

WDM Wavelength Division Multiplexing - Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivações e Objetivos	1
1.2	Metodologia	3
1.3	Organização	6
2	Conceitos Básicos	7
2.1	Comunicações por Fibra Óptica	7
2.2	Redes Ópticas Elásticas	9
2.2.1	<i>Transponders</i> de Largura de Banda Variável e Transmissões Flexíveis	10
2.2.2	Modulação OFDM	11
2.2.3	Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro	12
2.2.4	<i>Grooming</i> de Tráfego	13
3	Revisão da Literatura	15
4	Planejamento e <i>Grooming</i> do Max-RMSA	18
4.1	Estabelecimento das Demandas sem <i>Grooming</i>	18
4.1.1	Formulação NPSP	18
4.1.2	Formulação PSP	21
4.2	Estabelecimento das Demandas com <i>Grooming</i>	24
4.2.1	Formulação NPSP com <i>Grooming</i>	24
4.2.2	Formulação PSP com <i>Grooming</i>	29
5	Resultados e Discussão	33
5.1	Análise do estabelecimento das Demandas sem <i>Grooming</i>	35
5.1.1	Rede de 6 Nós	35
5.1.2	Rede NSFNET	40
5.2	Análise do Estabelecimento das Demandas com <i>Grooming</i>	43
5.2.1	Rede de 6 Nós	43
5.2.2	Rede NSFNET	47

5.3	Discussão	50
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	54
6.1	Artigos Publicados	55
	Referências Bibliográficas	56

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivações e Objetivos

Com o crescimento da demanda dos usuários na Internet por convergência de voz, vídeo e dados, o gerenciamento de recursos de redes tem exercido um papel importante na ampliação da vida útil de redes. Frente a isso, diversas técnicas de multiplexação são atualmente utilizadas por companhias especializadas em comunicação de dados, tendo em vista um ambiente global de acesso crítico à informação [1]. Dentre as técnicas aplicadas encontra-se a Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) uma ferramenta que consiste no fluxo bidirecional de dados por meio do transporte de diversos sinais ópticos, com diferentes comprimentos de ondas em uma mesma fibra óptica. Assim, a técnica WDM foi inicialmente difundida no uso de redes ópticas, pois expande a capacidade da rede sem a necessidade de fibras ópticas adicionais para transportar dados [2]. Por outro lado, apresenta certas desvantagens, como por exemplo, rigidez na atribuição de comprimento de onda com uma grade fixa e homogênea, gerando, assim, um desperdício de espectro [3].

À vista disso, recentemente, houve significativo crescimento de investigações por arquiteturas de redes ópticas que busquem a manutenção de elementos da rede a fim de dar suporte às principais limitações apresentadas pelas redes ópticas atuais [4]. As Redes Ópticas Elásticas (EONs - *Elastic Optical Networks*) são novas redes flexíveis que admitem alocação de espectro variável para adaptação dos recursos demandados pelo usuário com maior eficiência espectral [3]. Deste modo, as EON's rapidamente se tornaram candidatas para atender a crescente demanda por capacidade e diversas necessidades do setor de telecomunicações ao proporem uma transmissão heterogênea, flexível e com alta granularidade, gerada pela utilização de subportadoras ortogonais entre si. Assim, a ortogonalidade e eficiência espectral robustas necessárias são garantidas pela técnica conhecida por Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM - *Orthogonal*

Frequency Division Multiplexing), comumente utilizadas em EON's [5].

OFDM é uma técnica de modulação digital por múltiplas portadoras que permite o uso de comprimentos de onda variável para uma alocação elástica da largura de banda variável, tornando possível, em termos de espectro, a construção de redes ópticas eficientes [3]. Assim, baseando-se nos fundamentos teóricos da técnica OFDM, utiliza-se a arquitetura de rede de alocação elástica e fatiamento de recurso espectral (SLICE - *spectrum resource slicing and elastic allocation*), segmentação comumente utilizada no domínio óptico para transmissão efetiva dos dados capaz de satisfazer o fluxo de demanda entre os nós de origem e destino usando um ou mais slots de espectro consecutivos. Isto posto, a técnica OFDM baseada em SLICE provê uma rápida e eficiente acomodação do tráfego reduzindo o consumo dos recursos espectrais, de forma que a largura de banda livre pode ser utilizada para outros caminhos ópticos. Consequentemente, a ferramenta OFDM, utilizada em EON's, mostra-se como alternativa ao uso da WDM, ao apresentar soluções satisfatórias, como por exemplo, a sobreposição de canais sem interferência devido à sua propriedade ortogonal [3].

Os principais norteadores no projeto de uma EON são o dimensionamento adequado da rede com relação à capacidade espectral e a determinação de um plano de alocação de espectro. Dessa forma, os projetos se utilizam de formulações matemáticas ou algoritmos de aprovisionamento para a resolução do problema de Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro (RMSA - *Routing, Modulation and Spectrum Allocation*), que por sua vez, determina qual o melhor recurso a ser roteado, modulado e alocado pela demanda, promovendo maior flexibilidade no uso do espectro [3]. Entretanto, a aplicação desta resolução a uma rede puramente elástica caracteriza-se por possuir uma estrutura descentralizada e fracamente controlável, causando um enrijecimento da rede e eventual desperdício de espectro, exigindo-se o uso de novas abordagens de arquitetura para o aprimoramento da flexibilidade das redes.

Uma das propriedades essenciais das EONs é a capacidade de alocar dinamicamente seus recursos de acordo com os requisitos de conexões existentes. Apesar disso, abordagens voltadas para a economia de transmissores e de espectro são sugeridas para um maior aproveitamento na performance das redes. Deste modo, o processo de virtualização e agrupamento de demandas, conhecido como Tráfego *Grooming*, tem se mostrado uma estratégia benéfica no planejamento de projetos de redes, ao tornar a rede programável e reduzir, significativamente, o desperdício de espectro [6]. Assim, para um estudo mais completo de planejamento de EONs, este trabalho apresenta uma análise comparativa do planejamento de redes com e sem *Grooming* na resolução do problema Max-RMSA (Max-RMSA - *Maximum Routing, Modulation and Spectrum Allocation*), um problema inédito baseado na maximização de demandas estabelecidas a partir de um recurso fixo de

rede, em que cada caminho óptico transportará o tráfego relacionado à apenas um par de nós fonte-destino.

Dentre as alternativas encontradas na literatura para a resolução do problema Max-RMSA, emprega-se a Programação Linear Inteira Mista (MILP - *Mixed Linear Integer Programming*), uma técnica de otimização que tem por objetivo a maximização ou minimização de uma função de interesse, levando-se em conta as devidas restrições. Assim, este trabalho apresenta uma formulação MILP baseada em um conjunto predefinido de caminhos (PSP - *Predefined Shortest Paths*). A fim de analisar o desempenho e comparar a abordagem escolhida, a formulação sem conjunto predefinido de caminhos (NPSP - *Non Predefined Shortest Paths*), que garante a solução ótima, também foi utilizada. Embora possua alta complexidade (NP-hard - *Non Polynomial - hard*), essa última formulação é amplamente utilizada para obtenção do resultado ótimo global voltado para redes com número limitado de instâncias. Desta forma, resultados para redes pequenas foram comparados às soluções obtidas com uso do PSP.

O presente trabalho apresenta uma proposta de uma nova abordagem, composta de múltiplas estratégias de MILP, para a análise e aprimoramento do planejamento de projeto de redes e seu gerenciamento. Assim, ao longo desta pesquisa, propõe-se comparar o uso da formulação PSP para redes moderadamente grandes, com e sem o uso de *Grooming*, por meio dos valores ótimos alcançados com as formulações NPSP. Em seguida, o comportamento das redes é investigado por meio da análise de tráfego, em que será realizada uma análise comparativa entre os resultados das formulações responsáveis pelo estabelecimento das demandas.

1.2 Metodologia

Com a finalidade de deixar explícito os procedimentos realizados para alcançar os objetivos propostos, citados acima, se apresenta, a seguir, o caminho percorrido nesta pesquisa. Para realização desse estudo, foram escolhidos dois tipos de redes: uma arquitetura de 6 nós para representar uma rede de pequenas instâncias e outra moderadamente grande com 14 nós (NSFNET). Para ambas, foram consideradas uma matriz de tráfego estática de 100 Gbit/s entre todos os nós da rede, totalizando $N * (N - 1)$ demandas para cada rede, no qual, N é o número de nós.

Na rede pequena, foram utilizadas as formulações NPSP e PSP com e sem *Grooming*, comparando seus respectivos resultados para validação da formulação PSP como uma aproximação favorável à ser usada em redes com mais instâncias. A Figura 1.1 mostra o fluxograma de simulações (otimizações) para esta rede.

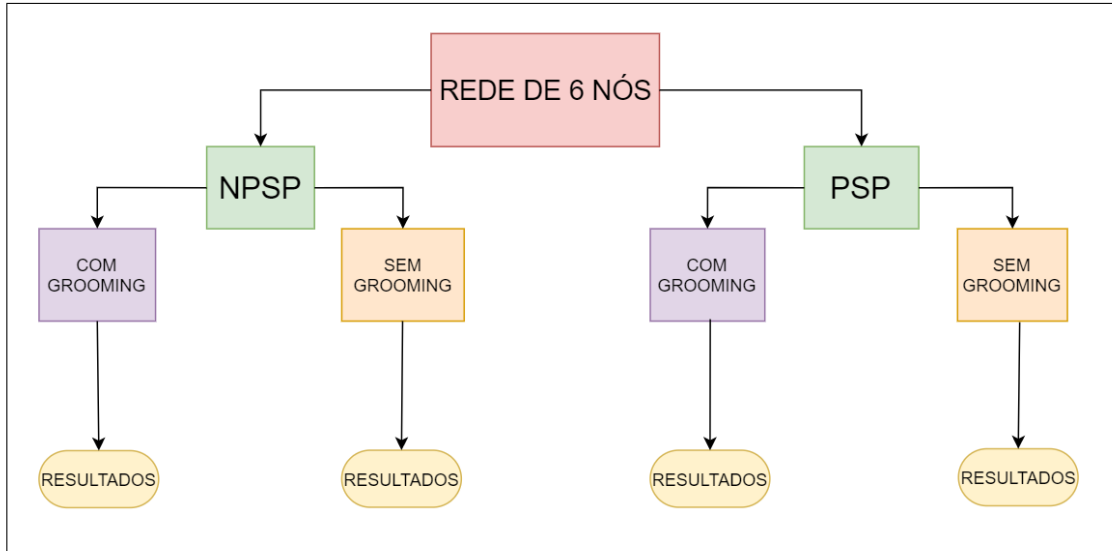


Figura 1.1: Fluxograma das simulações para rede de 6 nós.

Com os dados resultantes da etapa anterior, para rede de 14 nós, foi aplicada apenas a formulação PSP, com e sem *Grooming*. Com isso, foram comparados os desempenhos da rede e analisados o comportamento da rede virtual, ou seja, com *Grooming*. A Figura 1.2 ilustra o fluxograma de simulações desta rede.

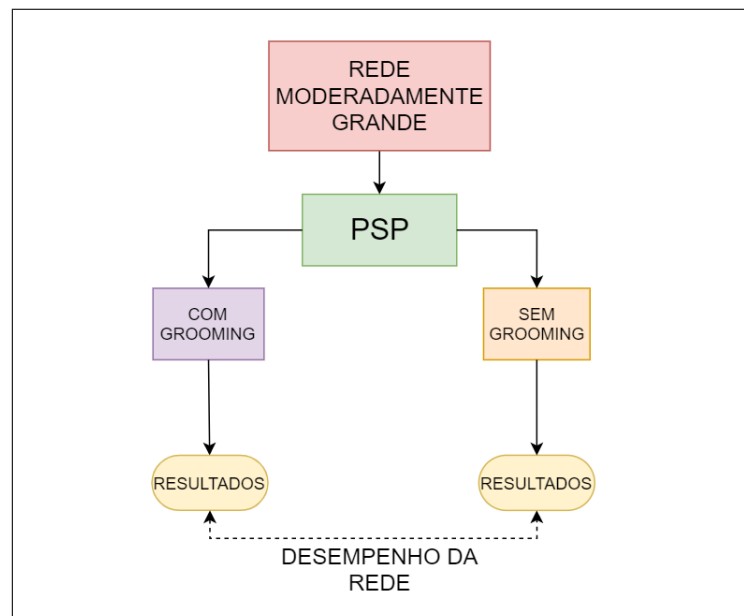


Figura 1.2: Fluxograma das simulações para rede de 14 nós.

Desta forma, na Figura 1.3 temos o fluxograma completo que será apresentado no presente trabalho.

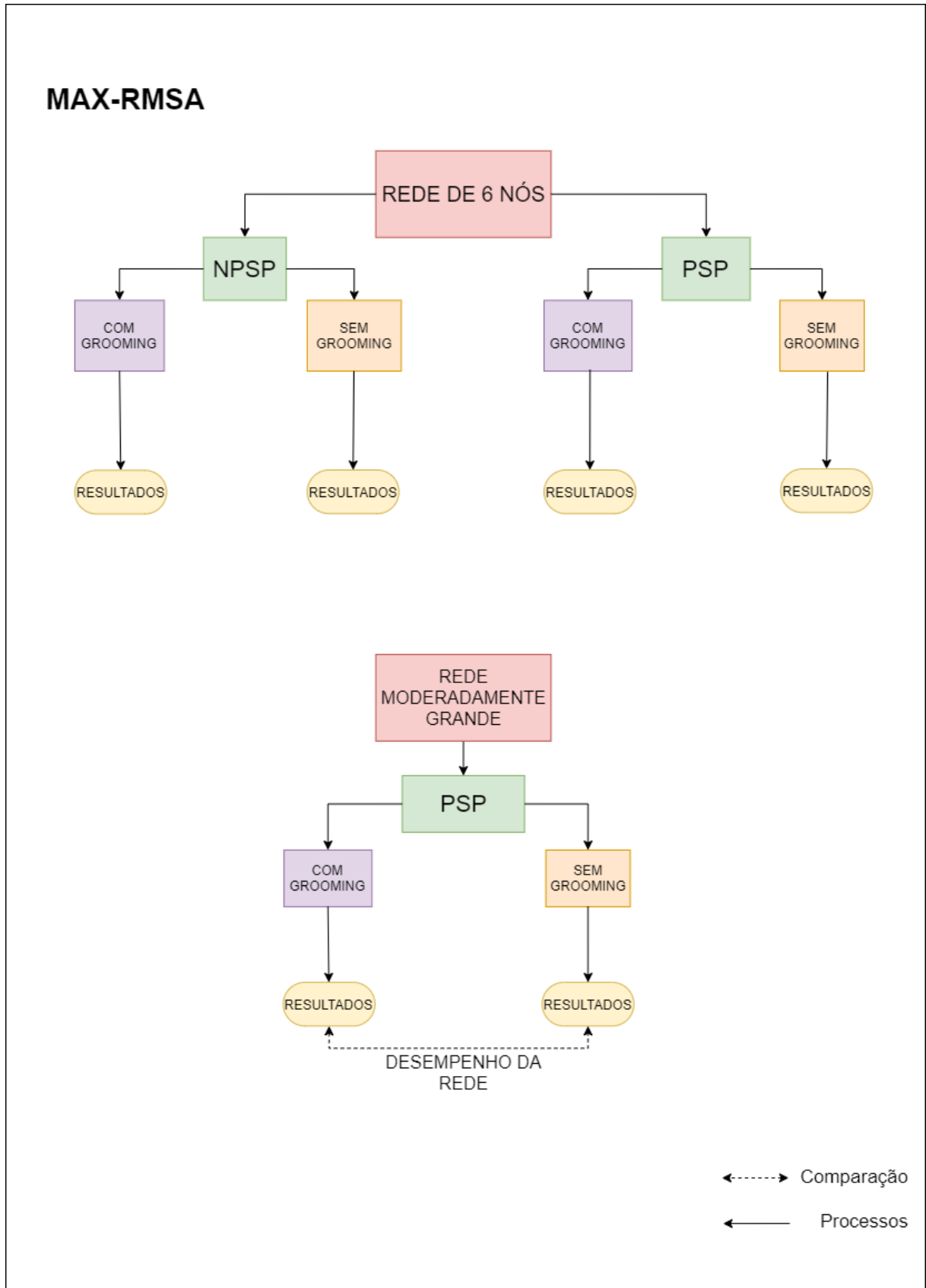


Figura 1.3: Metodologia da dissertação

1.3 Organização

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

O capítulo 2 discorre sobre assuntos básicos necessários para a compreensão do tema tratado nesta dissertação. Neste capítulo os conceitos de Comunicações Ópticas, EONs e Tráfego *Grooming* serão descritos, bem como, sua importância para a compreensão do que foi realizado neste trabalho. Igualmente, conceitos correlatos serão brevemente contextualizados, tais como, transponders de largura de banda variável, arquitetura de redes elásticas, modulação OFDM e outros.

A partir do capítulo 3 será apresentada a revisão bibliográfica com um breve resumo do que foi recentemente produzido em artigos, teses e dissertações relacionados ao tema proposto. O capítulo 4 descreve as formulações de programação linear inteira mista utilizadas para encontrar soluções ótimas globais e/ou ótimas locais para o problema de maximização de tráfego em redes ópticas elásticas com multiplexação OFDM. Para as simulações serão descritas suas variáveis, parâmetros, restrições e funções objetivo correspondentes.

Por meio do capítulo 5 são apresentados resultados obtidos a partir das simulações feitas por meio das formulações matemáticas apresentadas no capítulo 4, bem como uma apresentação de gráficos tabelas e figuras produzidas a partir dos resultados das simulações e uma análise e discussão deste material. Finalmente no capítulo 6 é apresentado a conclusão fazendo uma breve retomada de temas importantes e propondo trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

2.1 Comunicações por Fibra Óptica

A comunicação por fibra óptica é um esquema de transmissão de informações em ondas de luz por meio de fibras ópticas. Esse meio de transmissão trouxe inúmeros avanços para a área de telecomunicações, como a possibilidade de acréscimo de mais comprimentos de ondas às portadoras de cada fibra resultando no aumento da taxa de transmissão de informações transmitidas. À vista disto, as fibras ópticas apresentam características estruturais e funcionais promissoras para uso na área de comunicações se comparadas aos fios de cobre, como por exemplo, dimensão e peso reduzidos, capacidade de transmissão a longas distâncias e capacidade de comportar maior volume de informações de maneira segura e sem interferências elétricas.

Apesar de seus benefícios, na década de 80, as fibras ópticas eram utilizadas apenas em links ponto a ponto, com a transmissão de um comprimento de onda único, ou seja, apenas um sinal mensagem era transmitido de um nó a outro, sem o uso de nós intermediários. Com o surgimento da tecnologia WDM, essa capacidade de links ponto a ponto foi ampliada, aumentando N vezes a capacidade da fibra (N comprimentos de ondas). Nos anos seguintes, o avanço de dispositivos ópticos e o surgimento de novos tipos de fibra popularizou o uso da WDM na região em torno de 1550 nm, faixa do espectro eletromagnético em que ocorrem menores perdas em fibras baseadas em sílica.

A multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) tem como funcionamento básico a utilização de diversas fontes de dados, com sinais de comprimentos de onda ligeiramente diferentes determinados pelo *transponder* fixo utilizado. Em seguida, a combinação dos sinais (multiplexação) é realizada com informações independentes para uma mesma fibra óptica, por meio dos dispositivos OADM (*Optical Add-Drop Multiplexing*). Tradicionalmente, as grades espectrais padronizadas internacionalmente pelo Setor de Normatização das Telecomunicações da União Internacional de Telecomunicações (ITU-T

- *International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*) são utilizadas para a definição dos esquemas de multiplexação, em que são especificados os espaçamentos dos canais a nível de frequência. Deste modo, os padrões utilizados pela WDM apresentam espaçamentos fixos de 100 e 50 GHz nas bandas L e C, como indicados pela G.692 da ITU-T, de forma que vários comprimentos de onda diferentes são transmitidos de maneira independente e bidirecional.

Uma característica fundamental das redes WDM é utilização de uma tecnologia única de *transponder*, que simplifica o planejamento e a implantação do sistema, bem como, o gerenciamento do uso de *transponders* e regeneradores. Porém, a condição de transmissão de uma única taxa de dados imposta pelo *transponder* fixo e a limitação do tamanho da grade resultam em uma ineficiência no uso do espectro em relação às demandas requeridas, que possuem natureza variável e heterogênea. Por exemplo, se a demanda requisitada for menor do que a grade é capaz comportar, a grade é subutilizada. Por outro lado, se a demanda requisitada for maior, utiliza-se mais de uma grade, com isso a demanda tem que ser dividida causando desperdício de espectro entre as partes, bem como em suas fronteiras, como ilustrado na Figura 2.1 em que a demanda de 200 Gbit/s foi dividida em duas de 100 Gbit/s [7],[8].

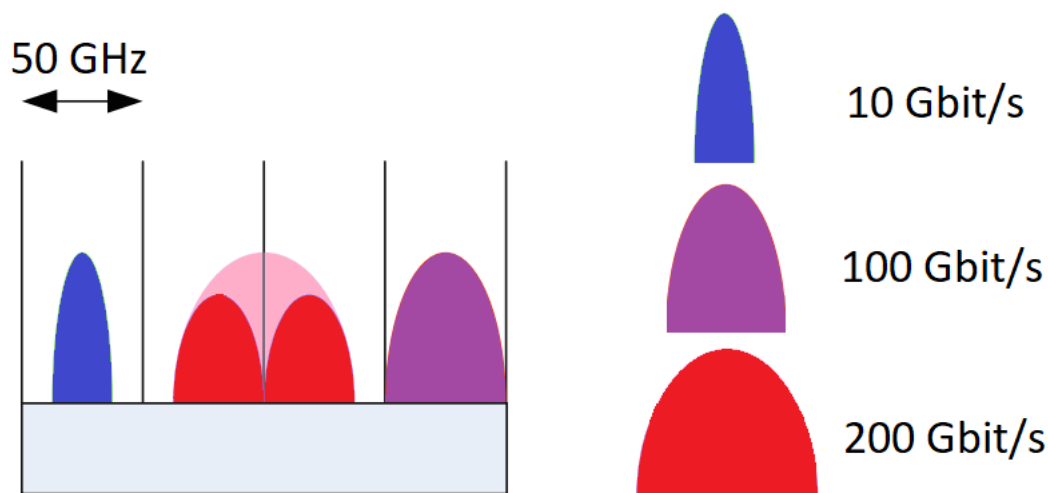


Figura 2.1: Grade fixa WDM.

Com o objetivo de atenuar os efeitos da perda de espectro e com os benefícios trazidos pelo desenvolvimento de novas técnicas de processamento digital de sinais (DSP - *Digital Signal Processing*), a ITU-T lançou, em 2002¹, a recomendação G.694.1, que se refere à uma nova tecnologia de multiplexação, chamada WDM densa (DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing*). Esta tecnologia requer o emprego de dispositivos

¹A versão mais atualizada desta recomendação está datada de 2012, e pode ser encontrada no site oficial da União Internacional de Telecomunicações.

mais sofisticados e possibilita o uso de espaçamentos de frequência de 100 a 12,5 GHz, permitindo uma transmissão de demandas de forma mais agrupada, em comparação com a WDM [9].

A princípio, a maioria dos sistemas DWDM mundiais utilizavam tecnologias de *transponders* de 10 Gbit/s. Estas tecnologias são mais baratas, porém, se mostravam insuficientes para muitos operadores devido ao não atendimento do crescimento de demandas em seus principais links de alta largura de banda da época. Atualmente, os *transponders* mais utilizados nas redes possuem capacidade de taxa de transmissão de dados de 100 Gbit/s, atendendo às necessidades atuais dos operadores. Todavia, de acordo com [7], prevê-se, a longo prazo, um crescimento de tráfego para cerca de 400 Gbit/s e 1 Tbit/s por link, o que, possivelmente, poderá causar uma futura exaustão das redes.

Atualmente, as redes possuem uma maximização de desempenho pelo uso de diferentes tipos de transceptores para diferentes taxas de dados (2,5 a 100 Gbit/s), resultando em uma redução significativa o gasto de capital global (CAPEX - *Capital Expenditure*). Entretanto, esta resolução limita a reconfiguração das redes e, conseqüentemente, sua evolução. Além disso, devido à modulação de fase, redes gerenciadas por dispersores cromáticos não são compatíveis com canais acima de 100 Gbit/s, acrescentando uma fragilidade aos efeitos não-lineares e um aumento na figura de ruído do sinal [7].

Como forma de lidar com esse cenário, que compreende uma limitação para a evolução das redes ópticas, pesquisas em novos formatos de arquiteturas redes ópticas se apresentam como necessárias para o atendimento de demandas futuras. Deste modo, as redes ópticas elásticas se tornaram uma alternativa promissora e bem aceita na indústria e na academia [10].

2.2 Redes Ópticas Elásticas

Para sanar o problema de desperdício de espectro nas redes óticas DWDM, foi proposta a alternativa de arquitetura de rede SLICE que é atualmente chamada de EON por simplicidade [3]. A EON é uma rede adaptativa de grade flexível que é capaz de utilizar o espectro disponível de maneira heterogênea, como a própria natureza das demandas, assim, alocando-as com menos desperdício de espectro. Para entender esse conceito, é necessário a compreensão de *slot* de frequência (FS - *Frequency Slot*). FS é a unidade básica de recurso espectral numa EON. Com a EON é possível dividir um canal de 50GHz em *slot* de frequência de largura única e tipicamente, bem menor, como 12,5GHz. Na Figura 2.2 é possível comparar o efeito de uma grade flexível com a grade fixa, note que agora uma demanda de 10 Gbit/s pode ser alocado em um espaço menor e mais apropriado de 2 FSs = 25GHz, bem como uma demandas de 200 Gbit/s também pode ser atendida

com 8 FSs = 100GHz concatenados.

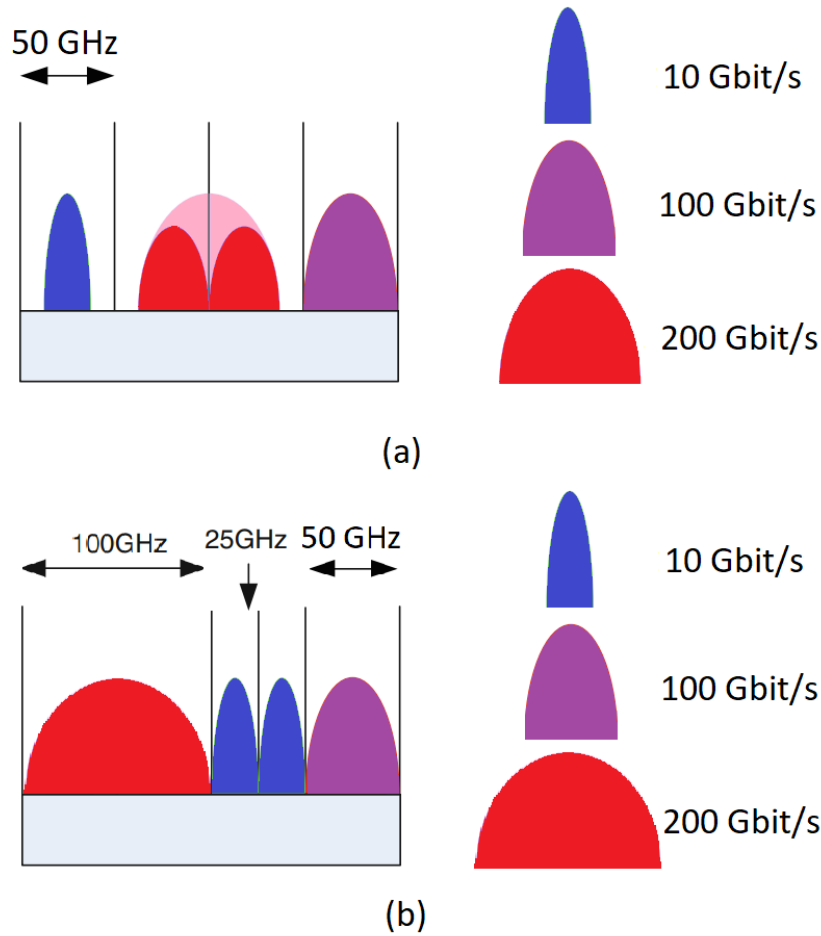


Figura 2.2: Grade flexível EON.

Para isso são necessários transceptores adaptativos e elementos de rede cujo comportamento possa ser alterado de acordo com a necessidade.

2.2.1 *Transponders* de Largura de Banda Variável e Transmissões Flexíveis

Dois tecnologias de multiplexação com múltiplas portadoras, Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda Coerente (CoWDM - *Coherent Wavelength Division Multiplexing*) [11] e Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal Óptica Coerente (CO-OFDM - *Coherent Optical Orthogonal Frequency-division Multiplexing*) [12] foram propostas como possibilidades com o uso de *transponders* para EONs. O *Transponder* com largura de banda variável (BVT - *Bandwidth Variable Transponder*) tem a capacidade de ajustar a largura de banda de acordo com a taxa de bits demandada e/ou formatos de modulação adotados. Os BVTs são capazes de suportar alta taxa de transmissão, para isso precisam usar formatos de modulação de alta eficiência espectral como Modulação

de Amplitude em Quadratura com 16 símbolos (16-QAM - 16-*Quadrature Amplitude Modulation*), porém formatos de modulação com alta eficiência espectral estão mais sujeitos a ruído e, conseqüentemente, a erros de transmissão, fazendo com que sua distância máxima percorrida seja menor. Com isso, para distâncias maiores é necessário usar formatos de modulação mais resistentes a erros como Chaveamento por Deslocamento de Fase em Quadratura (QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying*) e Chaveamento por Deslocamento de Fase Binário (BPSK - *Binary Phase Shift Keying*). Dessa forma, os BVTs tem a capacidade de fazer um balanço entre eficiência espectral e alcance da mensagem.

O problema desse tipo de compensação é que quando um BVT opera com formato de modulação abaixo de sua capacidade máxima de transmissão uma parcela de sua capacidade é desperdiçada. Para lidar com esse desperdício, foi proposto um *Transponder* de Largura de Banda Variável Elástica (SBVT - *Sliceable Bandwidth Variable Transponder*) [13] que é projetado para alcançar maior flexibilidade. O SBVT é capaz de dividir sua taxa de transmissão em um ou mais caminhos ópticos a um ou mais destinos. Dessa forma, o SBVT consegue gerar fluxos com baixa e alta taxa de transmissão dependendo da demanda e da distância, ou seja, consegue se adequar melhor a uma matriz de demandas heterogênea com menos desperdício de espectro. Além disso, com o SBVT é possível utilizar a virtualização e a técnica de agrupamento de tráfego (*Grooming*) nas camadas superiores de acordo com cada necessidade.

2.2.2 Modulação OFDM

Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM - *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) é uma técnica de modulação e multiplexação que, usando processamento digital de sinais, distribui uma alta taxa de transmissão em série em um fluxo de múltiplas subportadoras paralelas de baixa taxa de transmissão [3]. Os espectros das subportadoras podem se sobrepor desde que mantendo ortogonalidade, garantida pelo produto interno entre elas, aumentando a eficiência espectral da transmissão ao não desperdiçar o espaço entre as subportadoras, diferente do que ocorre com redes WDM. Com a OFDM é possível unir diversas subportadoras e formar um supercanal, possibilitando uma rede com maior granularidade e flexibilidade, o que é essencial para atender a heterogeneidade das conexões. Na Figura 2.3 é possível observar os canais gerados pela união de diversas subportadoras, o espaço entre os canais é a banda de guarda reservada para filtro (FGB - *Filter Guard Band*), esse espaço é tipicamente de uma ou duas subportadoras dependendo da qualidade do filtro. Um BVT OFDM gera um sinal óptico com uma quantidade de recursos suficiente, levando em consideração formatos de modulação, eficiência espectral e distância de transmissão para servir a uma determinada demanda. Como tipicamente o sinal OFDM é gerado no domínio da rádio frequência, é possível determinar importantes

propriedades de transmissão como o número de bits por subportadora OFDM, que depende do formato de modulação escolhido, geralmente M-QAM ou QPSK.

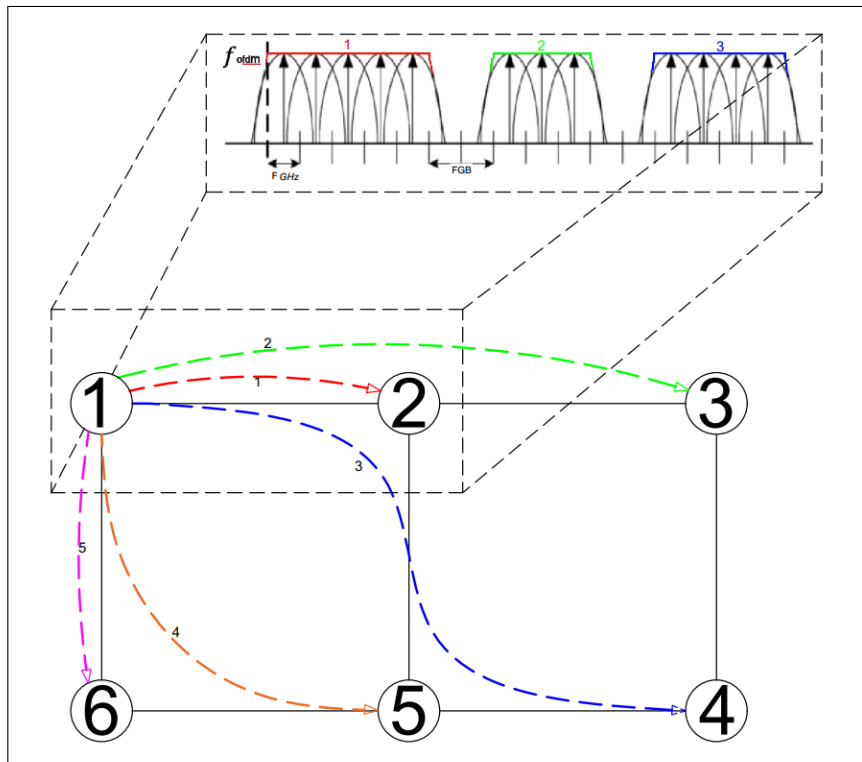


Figura 2.3: Exemplo de enlace (1,2) de uma EON com técnica OFDM contendo três demandas distintas

2.2.3 Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro

Para haver transmissão de informação de forma eficiente nas redes ópticas é necessária a definição de caminhos ópticos e alocação de recursos espectrais na rede de forma que apresente adequada Qualidade de Serviço (QoS - *Quality of Service*). Essa definição deve ser feita considerando, inclusive, futuras alterações na rede, bem como limitação nos recursos espectrais. Em redes ópticas WDM, o roteamento e atribuição de comprimento de onda, ou seja, a definição do caminho físico destinado a estabelecer a demanda dada e a largura de comprimento de onda associada a mesma. A esse problema dá-se o nome de roteamento e alocação de comprimento de onda (RWA - *Routing and Wavelength Assignment*). Em redes ópticas WDM existe uma restrição chamada de restrição de continuidade de comprimento de onda (WCC - *Wavelength Continuity Constraint*). Essa restrição ordena que, em todos os enlaces ao longo do caminho óptico, o mesmo comprimento de onda deve ser utilizado [14, 15].

Nas EONs, existe um problema parecido a se resolver, em que é necessário determinar um caminho físico e uma quantidade de FSs, contíguos e contínuos, para estabelecer uma

demanda. A esse problema dá-se o nome de roteamento e alocação de espectro (RSA - *Routing and Spectrum Allocation*). A restrição de continuidade se refere ao fato de que os FSs para uma determinada demanda devem ocupar os mesmos índices em todos os enlaces do caminho físico. A restrição de contiguidade afirma que os FSs para uma determinada demanda devem ser alocados de forma contígua, ou seja, sem banda de guarda ou quaisquer FSs de outras demandas entre os seus FSs. Se existe a possibilidade de escolha de formatos de modulação diferentes para estabelecer as demandas então o problema se chama Roteamento Modulação e Alocação de Espectro (RMSA) e uma nova restrição é adicionada, a restrição de modulação, que ordena que apenas um formato de modulação seja usado para estabelecer uma determinada demanda. Atender valores adequados de uso de recurso espectral respeitando todas essas restrições é o desafio para as EON.

Nas redes ópticas, tanto WDM como EON, o tráfego pode ser classificado como estático ou dinâmico. Tráfego estático significa que todas as demandas são conhecidas aprioristicamente, então o objetivo é minimizar a quantidade de recursos espectrais necessários, isto é, o número de FSs ou comprimentos de onda para uma dada matriz de demandas da rede. Para o tráfego dinâmico, ocorre o contrário, a matriz de demandas não é previamente conhecida e aparece com valores aleatórios para a rede. Nesse caso, o objetivo é tornar mínima a probabilidade de bloqueio de demandas, para isso, se deve otimizar a utilização dos recursos espectrais disponíveis na rede [14, 16]. Neste trabalho lidaremos apenas com o caso de tráfego estático, porém com um novo foco (Max-RMSA).

2.2.4 *Grooming* de Tráfego

Em redes WDM tradicionais a técnica de agrupamento (*Grooming*) de demandas é considerada essencial. Nessa técnica, múltiplos fluxos com capacidade reduzida são agrupados em um caminho óptico de alta capacidade [17]. Com os SBVTs é possível criar uma arquitetura de rede elástica, bem como a implementação de *Grooming*, pois conseguem lidar com múltiplos formatos de modulação, múltiplas taxas de *bit*, múltiplos alcances de transmissão e múltiplos serviços [13]. Pode-se, inicialmente, questionar o uso de *Grooming* já que a rede já é elástica e redes futuras poderão oferecer cada vez mais granularidade de espectro. A questão é que a alta capacidade dos transmissores será desperdiçada se apenas um tipo de SBVT for usado para todos os tipos de tráfego, principalmente para demandas de baixa capacidade [6]. Ocorre também que a capacidade de transmissão é melhor aproveitada se vários caminhos ópticos são agrupados no mesmo transmissor como pode ser observado na Figura 2.4.

Isso é possível devido a técnica de virtualização que cria diversos enlaces virtuais contendo as demandas da matriz de tráfego. Além disso utiliza um formato de modulação

mais eficiente que se as demandas não fossem agrupadas, pois cada uma teria seu formato de modulação com quantidades maiores de FSs.

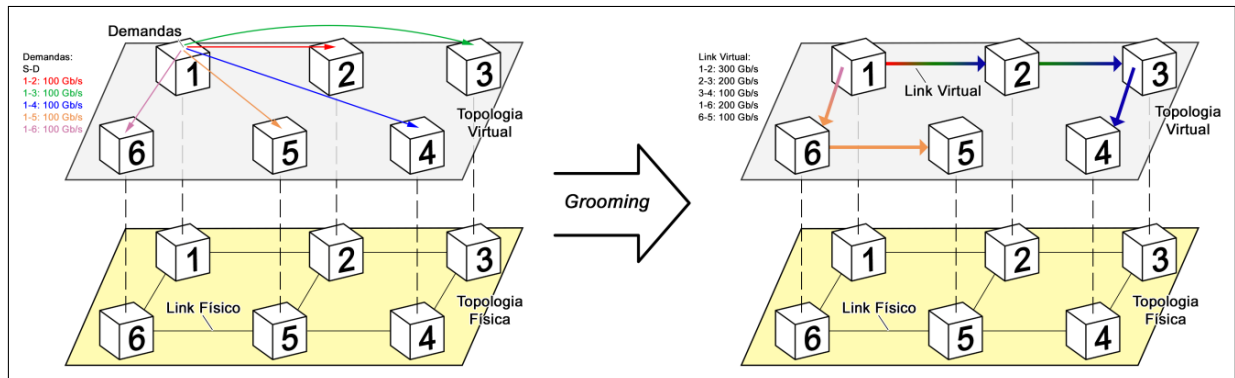


Figura 2.4: Exemplo da formação da técnica *Grooming*

Também vimos anteriormente que demandas em EONs diferentes necessitam de FGB entre elas, porém se elas forem agrupadas (*Grooming*) já não há mais a necessidade das FGBs, fazendo assim uma economia de espectro. A Figura 2.5 exemplifica o que acontece em um enlace físico com e sem as demandas agrupadas (*Grooming*). É possível notar a remoção das FGBs, pois foi criado um único enlace virtual contendo todas as demandas, simplificando a escolha da modulação adequada, e com isso, permitindo que enlaces virtuais sejam roteadas em caminhos mais curtos, possibilitando assim, a escolha de modulação com maior eficiência espectral.

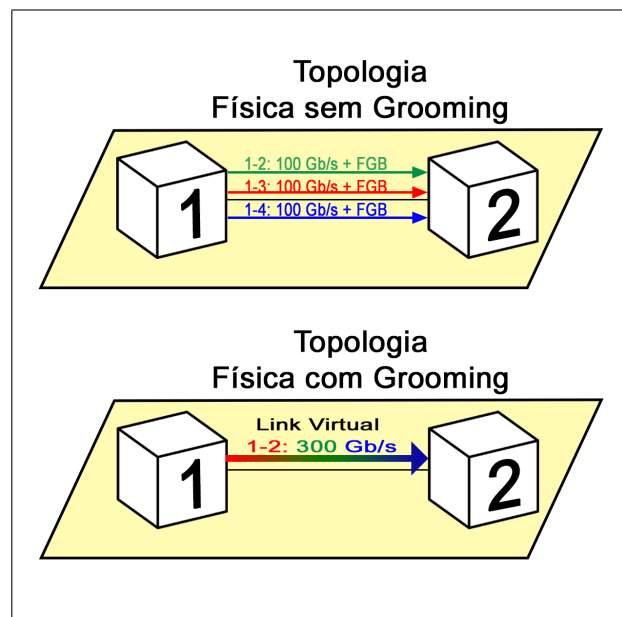


Figura 2.5: Exemplo comparativo no *link* físico 1-2 com e sem *Grooming*

Capítulo 3

Revisão da Literatura

Dentre os vários estudos de planejamento de redes, em [18] é proposto um modelo MILP baseado em enlace para resolver o problema de alocação de recurso, com o objetivo de quantificar os benefícios potenciais de novas funcionalidades em EONs, tais como regeneração de sinal, conversão de comprimento de onda, atribuição de espectro com maior granularidade e conversão de modulação. [18] propõe também um modelo recursivo para ampliação de recursos nas redes existentes (espectro e regeneradores) ou diminuir o esforço computacional da alocação de recursos em redes maiores e com maior demandas de tráfego que um modelo MILP pode calcular.

Em [19] os autores investigam o projeto de proteção de ciclo pré-configurado (*p-Cycle- pre-configured-Cycle*). É proposto um algoritmo, combinando envelope de capacidade de trabalho protegido (PWCE - *Protected Working Capacity Envelope*) *p-cycle* com planejamento de espectro, que é capaz de obter *p-cycle* dinâmico em EONs. Para isso são usados ciclos Hamiltonianos e partição de topologia para reduzir os tamanhos dos caminhos de *backup*.

De outra forma, o artigo [20] disserta sobre o efeito implícito da topologia da rede, distribuição de tráfego e esquema de roteamento no uso de recursos espectrais. O objetivo é fazer uma análise teórica sobre o impacto desses três fatores chaves. Para isso, duas cadeias teóricas são propostas: primeiro o uso de espectro ótimo pode ser medido pelo número cromático do grafo conflitante que é positivamente correlacionado com a probabilidade de intersecção: segundo a probabilidade de intersecção é determinada pela topologia da rede, distribuição de tráfego e esquema de roteamento via uma programação quadrática parametrizada com uma matriz de coeficientes de conflito.

[21] traz como principal produto um algoritmo que usa rotas pré-definidas para alocação de espectro baseado em espectro de completude máximo (MSC - *Maximum Spectrum Completeness*), a fim de evitar geração de fragmentos únicos na rota. Os resultados de simulação mostram que o algoritmo MSC apresenta melhor performance do

que esquemas tradicionais.

Em trabalhos como [22], soluções de redes ópticas baseada em Multiplexação por Divisão Espacial (SDM - *Spatial Division Multiplexing*) são propostas com o intuito de reduzir o bloqueio de requisições para estabelecimento de conexões, bem como a redução da utilização de recursos. Para isso foram considerados esquemas para proteção de caminhos, tais como, modulação adaptativa, agregação de tráfego, sobreposição de espectro em caminhos de proteção, roteamento com interferência mínima e roteamento por multi-caminhos.

O artigo [23] propõe, por meio de um mecanismo de agregação de tráfego, melhorar a eficiência na utilização dos recursos de redes ópticas elásticas. Especificamente, é realizado um estudo de *Transponder* de Banda Larga Variável (BVT) e Switches Cross-connects de Largura de Banda Flexível (BV-WXCs - *Bandwidth Variable Cross Connects*) com a estratégia de agregação de tráfego e alocação de recursos já existentes. É preciso ressaltar que neste estudo utiliza-se modelagem matemática e algoritmos de Espaçamento Pró Agregação de Tráfego (EsPAT), bem como simulações com a ferramenta *Slice Network Simulator* (SNetS). De forma semelhante, uma das topologias utilizadas no presente trabalho para as simulações foi a NSFNET. Experimentos realizados mostram que houve redução nas taxas de bloqueio de banda sem comprometer o consumo energético.

Outra abordagem é observada em [24], que apresenta um projeto de gerenciamento de redes com foco em segurança da informação na camada física, através do uso de técnicas de escuta consciente utilizando um código de espalhamento espectral para cada demanda requisita na rede. Esse código é adicionado no RSA baseado em OFDM.

Abordando a técnica *Grooming*, [25] considera uma rede definido por *software* de uma rede IP sobre EON (SD-IPoEON - *Software Defined IP-over-EON*), onde o tráfego é previsto através de um algoritmo *deep learning* baseado em redes neurais baseadas em memória de curto e longo prazo. Então são desenvolvidos algoritmos para explorar essa predição de tráfego realizando *cross layer* proativa para lidar de forma constante com falhas graves ou simples. Isso significa fazer decisões *online* para reagrupar e rotear novamente os fluxos de tráfego e para reconfigurar caminhos ópticos para melhorar o desempenho da rede e diminuir perdas de pacotes.

Por meio do artigo [26], os autores propõem uma formulação linear com proteção para o projeto de EONs utilizando várias redes ópticas virtuais (VON - *Virtual Optical Network*). A formulação MILP integra conceitos de compressão de banda, *Grooming* e formato de modulação e permite diferentes capacidades de proteção em cada VON. Esta proposta tem como função objetivo a minimização da capacidade da rede e apresenta resultados eficientes de capacidade de sobrevivência e economia de recursos espectrais.

Em [27] é proposto uma formulação linear e uma heurística interativa ambos com

capacidade de agrupamento de tráfego (*Grooming*) que é capaz de maximizar o número de rotas disponíveis restantes e minimizar o número de transceptores nas EONs. O objetivo é preservar a capacidade aberta para a acomodação de demandas futuras desconhecidas. Semelhante a este trabalho, os autores em [27] tem o objetivo de maximizar, porém com variáveis diferentes. Estudos de caso são realizados para analisar as propriedades básicas da formulação em redes pequenas e a heurística é usada para lidar com redes maiores.

Já em [28] os autores investigam os algoritmos de caminho óptico elástico de multi-saltos minimizados (m-MEL - *Minimized Multi-hop Elastic Lightpath*) e caminho óptico elástico de multi-saltos (*Multi-hop Elastic Lightpath*) que tem como objetivo a realização do agrupamento de tráfego (*Grooming*). Com isso [28] propõe um algoritmo diferente nomeado de próximo caminho óptico elástico mais curto de multi-salto que maximiza e minimiza contagem de saltos e fluxo da rede simultaneamente. Essa abordagem é utilizada para redes de larga escala, redes de 76 nós, por exemplo.

Em [29] os autores exploram planejamento de rede visando eficiência energética e métodos de provisionamento de tráfego que exploram a flexibilidade do *transponder* variável de largura de banda com granularidade para fornecer opções de transmissão múltipla e configurar múltiplos canais independentes ópticos abrangendo diferentes formatos de formulação e uma condição dinâmica e estática de tráfego.

Sob diversas técnicas, todos os trabalhos relacionados acima têm como cerne a minimização do índice máximo de *Slots* de Frequência (FS) associado ao problema de roteamento e alocação de espectro (RSA). Porém, nenhum deles apresenta, até o momento, resultados de simulação de um tratamento matemático com foco na maximização de demandas estabelecidas. À vista disso, indica-se uma nova abordagem de análise da formulação MILP por meio da maximização das demandas estabelecidas mantendo um recurso fixo da rede, aliado a isso trazemos a técnica do *Grooming* para agrupar previamente as demandas a serem alocadas, trazendo informações importantes de planejamento das EONs e fornecendo novas ferramentas para o projeto destas redes, através de um comparativo entre essas duas técnicas.

Capítulo 4

Planejamento e *Grooming* do Max-RMSA

4.1 Estabelecimento das Demandas sem *Grooming*

4.1.1 Formulação NPSP

Na formulação NPSP, os caminhos para uma conexão não são definidos previamente; portanto, a formulação MILP é projetada para escolher a configuração de roteamento mais eficiente para todos pares de origem e destino da rede. Por essa abordagem, é possível encontrar a solução ótima global. Como o problema é do tipo NP-hard o tempo computacional para resolução cresce exponencialmente com o aumento da complexidade da rede, ou seja, com o crescimento do número de nós, enlaces e demandas. Devido a isso, é apenas viável encontrar a solução para redes menores e não para redes com maiores instâncias. Na formulação NPSP foram utilizadas as seguintes notações, parâmetros e variáveis:

Índices

- d : Representa a demanda requisitada pela rede;
- d_k, d_t : Os índices auxiliares t e k representam as diferentes demandas d ;
- i, j : Representam dois nós que definem um enlace;
- z : Representa o formato de modulação a ser utilizado;
- u, v : Representam, respectivamente, nó fonte e destino de uma demanda d .

Conjuntos

- N : Conjunto de nós da rede;
- A : Conjunto de enlaces (i, j) da rede;
- M : Conjunto de formatos de modulação disponível;
- D : Conjunto de demandas da rede.

Parâmetros

- Ω : Largura de banda do *slot* de frequência;
- η_z : Eficiência espectral do formato de modulação z ;
- $d_{i,j}$: Distância em número de saltos do enlace i - j ;
- d_z : Máxima distância que o formato de modulação z pode alcançar;
- G : Banda de guarda para filtro;
- $V_{u,v}^d$: Tráfego de cada demanda d do nó fonte u ao nó destino v ;
- χ : Um número arbitrariamente grande;
- ζ : Um número arbitrariamente muito próximo de 1 pelo limite esquerdo.
- C : Máximo índice de *slot* possível na rede, isto é, a capacidade da rede.

Variáveis

- AT_d : Variável que indica o quanto do tráfego da demanda d foi estabelecido;
- T_d : Variável inteira que representa o tráfego em *slots* na rede para uma demanda d ;
- $E_{d,z}$: Variável binária que é igual a 1, se a demanda d usa o formato de modulação z e é 0, caso contrário;
- $x_{i,j}^d$: Variável binária que é igual a 1, se o enlace (i, j) é usado para atender à demanda d e 0, caso contrário;
- S_d : Índice do primeiro *slot* atribuído à demanda d ;
- W_{d_k, d_t} : Variável binária que é igual a 1, se a frequência inicial para a demanda $d_k \in D$, isto é, o índice do primeiro *slot* atribuído, for menor que para a demanda $d_t \in D$, e é 0, caso contrário.

- **Função Objetivo:**

$$\text{Maximizar : } \sum_{d \in D} AT_d \quad (4.1)$$

- **Sujeito a:**

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{i,j}^d - \sum_{j:(j,i) \in A} x_{j,i}^d = 1 \quad \forall d \in D : i = u; \quad (4.2)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{i,j}^d - \sum_{j:(j,i) \in A} x_{j,i}^d = 0 \quad \forall d \in D : i \neq u, \quad i \neq v; \quad (4.3)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{i,j}^d - \sum_{j:(j,i) \in A} x_{j,i}^d = -1 \quad \forall d \in D : i = v; \quad (4.4)$$

$$T_d \geq ((AT_d)/(\Omega \cdot \eta_z)) - (1 - E_{z,d}) \cdot \chi \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in M; \quad (4.5)$$

$$T_d \leq ((AT_d)/(\Omega \cdot \eta_z)) + \zeta + (1 - E_{z,d}) \cdot \chi \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in M; \quad (4.6)$$

$$\sum_z E_{z,d} = 1 \quad \forall d \in D; \quad (4.7)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{i,j}^d \cdot d_{i,j} \leq \sum_z d_z \cdot E_{z,d} \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in M; \quad (4.8)$$

$$AT_d \leq V_{u,v}^d, \quad \forall d \in D, \quad u, v \in A; \quad (4.9)$$

$$S_d + T_d \leq C, \quad \forall d \in D; \quad (4.10)$$

$$W_{d_t, d_k} + W_{d_k, d_t} \leq 1 \quad \forall d_k, d_t \in D : d_t \neq d_k; \quad (4.11)$$

$$W_{d_t, d_k} + W_{d_k, d_t} \geq (x_{i,j}^{d_t} + x_{i,j}^{d_k} - 1) \quad \forall (i,j) \in A \quad \forall d_k, d_t \in D : d_t \neq d_k; \quad (4.12)$$

$$W_{d_t, d_k} + W_{d_k, d_t} \geq (x_{j,i}^{d_t} + x_{j,i}^{d_k} - 1) \quad \forall (j,i) \in A \quad \forall d_k, d_t \in D : d_t \neq d_k; \quad (4.13)$$

$$S_{d_t} + T_{d_t} + G \leq S_{d_k} + \chi \cdot [1 - W_{d_t, d_k}] \quad \forall d_k, d_t \in D : d_t \neq d_k; \quad (4.14)$$

$$S_{d_k} + T_{d_k} + G \leq S_{d_t} + \chi \cdot [1 - W_{d_k, d_t}] \quad \forall d_k, d_t \in D : d_t \neq d_k; \quad (4.15)$$

A Equação (4.1) denota a função objetivo, que visa maximizar as demandas estabelecidas. As Equações (4.2) à (4.4) são as restrições de conservação dos fluxos de

tráfego na topologia física. A primeira parcela da (4.2), considerando $i = u$, soma os fluxos que saem do nó i para todos os outros nós, portanto, sua primeira parcela tem que ser igual a 1 já que i é no fonte. Enquanto que a segunda parcela deve ser igual a 0, pois soma os fluxos de todos os nós para o nó $i = u$ que é fonte e não destino. A equação (4.3) soma todos fluxos dos nós que não são fonte nem destino, ou seja, intermediários, dessa forma a soma só pode resultar em 0, pois o fluxo que entra no nó é igual ao que sai. A equação (4.4) em sua primeira parcela soma o fluxo de todos os nós $i = v$ para todos os outros nós, esse resultado só pode ser 0, dado que i é nó destino, a segunda parcela soma todos os fluxos dos outros nós para i , esse resultado só pode ser igual a -1, pois i é nó destino.

A quantidade de *slots* para o caminho óptico é fornecido por (4.5) e (4.6), considerando um formato de modulação atribuído para atender determinada demanda. Isso é feito dividindo o tráfego da demanda estabelecida AT_d em Gbit/s pelo produto do tamanho do *slot* Ω em Hz pela eficiência espectral η_z da demanda d .

Um formato de modulação é atribuído à um caminho óptico que satisfaça as restrições de (4.7) à (4.8), o que implica que um único formato de modulação seja empregado em um caminho óptico e sua limitação de distância deve ser satisfeita, por isso o somatório dessa restrição só pode ter como resultado 1. A restrição (4.9) limita a função objetivo, na qual as demandas estabelecidas não podem ser maiores do que as demandas requisitadas.

A Equação (4.10) é a capacidade da rede, isto é, o índice máximo de *slot* que pode ser ocupado na rede, que por sua vez, limita a quantidade de *slots* a serem utilizados. Isso é demonstrado pela adição de S_d por T_d , ou seja, o primeiro *slot* alocado para a demanda d mais a quantidade de *slots* alocados para a mesma. De (4.11) à (4.15) são tratadas as restrições de contiguidade para evitar sobreposição de frequências, de forma a alocar na ordem exata as demandas concorrentes e a banda de guarda onde necessário. Caso essas demandas não sejam concorrentes, essas restrições são inócuas, devido aos termos $\chi \cdot [1 - W_{d_k, d_t}]$ e $\chi \cdot [1 - W_{d_t, d_k}]$ e a não limitação nos valores da variável W_{d_k, d_t} .

4.1.2 Formulação PSP

Para redes pequenas, com cerca de 6 nós, a formulação NPSP MILP pode ser resolvida de forma exata, porém, para redes maiores, é necessário a predefinição de caminhos para diminuir a complexidade do problema e assim diminuir o esforço computacional. Assim sendo, recomenda-se a formulação com caminhos predefinidos, em que um número predeterminado de caminhos k é definido pela regra dos caminhos mais curtos para cada demanda, ou seja, cada demanda terá k menores caminhos escolhidos pelo algoritmo visto em [30].

Dado o grafo G e o conjunto de demandas D , a função objetivo da formulação com caminhos predefinidos é o mesmo da formulação NPSP apresentada anteriormente.

Mas os caminhos entre um nó fonte u e destino v são escolhidos a partir de um conjunto de caminhos mais curtos P_d . Com essa abordagem é possível obter uma solução viável para o MILP para redes grandes, mas a solução ótima global não é garantida. A notação, parâmetros e variáveis usadas na formulação PSP são descritas nas subseções abaixo.

Índices

- d : Representa a demanda requisitada pela rede;
- d_k, d_t : Os índices auxiliares t e k representam as diferentes demandas d ;
- p : Representam representa qual caminho pré-definido;
- z : Representa o formato de modulação a ser utilizado;
- u, v : Representam, respectivamente, nó fonte e destino de uma demanda d .

Conjuntos

- N : Conjunto de nós da rede;
- M : Conjunto de formatos de modulação disponível;
- D : Conjunto de demandas da rede.
- P_d : Conjunto de caminhos candidatos p para uma demanda d ;
- $\mathcal{P} = \cup_d P_d$: Conjunto total de caminhos candidatos para o conjunto de demandas $D, d \in D$.

Parâmetros

- Ω : Largura de banda do *slot* de frequência;
- η_z : Eficiência espectral do formato de modulação z ;
- d_p : Distância do caminho em número de saltos;
- d_z : Máxima distância que o formato de modulação z pode alcançar;
- G : Banda de guarda para filtro;
- $V_{u,v}^d$: Tráfego de cada demanda d do nó fonte u ao nó destino v ;
- χ : Um número arbitrariamente grande;
- ζ : Um número arbitrariamente muito próximo de 1 pelo limite esquerdo.
- C : Máximo índice de *slot* possível na rede, isto é, a capacidade da rede.

Variáveis

- AT_d : Variável que indica o quanto do tráfego da demanda d foi estabelecido;
- T_d : Variável inteira que representa o tráfego em *slots* na rede para uma demanda d ;
- $E_{z,d}$: Variável binária que é igual a 1, se a demanda d usa o formato de modulação z e é 0, caso contrário;
- x_p^d : Variável binária que assume valor 0, se o caminho p não é utilizado e 1, se p é utilizado para cada demanda d ;
- S_d : Índice do primeiro *slot* atribuído à demanda d ;
- W_{d_k,d_t} : Variável binária que é igual a 1, se a frequência inicial para a demanda $d_k \in D$, isto é, o índice do primeiro *slot* atribuído, for menor que para a demanda $d_t \in D$, e é 0, caso contrário.

- *Função Objetivo:*

$$\text{Maximizar : } \sum_{d \in D} AT_d \quad (4.16)$$

- *Sujeito a:*

$$\sum_{p \in P_d} x_p^d = 1 \quad \forall d \in D; \quad (4.17)$$

$$T_d \geq ((AT_d)/(\Omega \cdot \eta_z)) - (1 - E_{z,d}) \cdot \chi \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in M; \quad (4.18)$$

$$T_d \leq ((AT_d)/(\Omega \cdot \eta_z)) + \zeta + (1 - E_{z,d}) \cdot \chi \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in M; \quad (4.19)$$

$$\sum_z E_{z,d} = 1 \quad \forall d \in D; \quad (4.20)$$

$$\sum_{(p) \in A} x_p^d \cdot d_p \leq \sum_z d_z \cdot E_{z,d} \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in M; \quad (4.21)$$

$$AT_d \leq V_{u,v}^d \quad \forall d \in D, \quad u, v \in A; \quad (4.22)$$

$$S_d + T_d \leq C, \quad \forall d \in D; \quad (4.23)$$

Se $\exists p \in P_{d_k}$ e $\exists q \in P_{d_t}$ tal que $p \cap q \neq 0$, então para cada $d_t, d_k \in D$ e todo $p, q \in \mathcal{P}$, então as restrições (4.24) a (4.26) são empregadas.

$$W_{d_t, d_k} + W_{d_k, d_t} = 1 \quad \forall d_k, d_t \in D : d_t \neq d_k; \quad (4.24)$$

$$S_{d_t} + T_{d_t} + G - S_{d_k} \leq \chi \cdot [1 - W_{d_t, d_k} + 2 - x_p^{d_k} - x_q^{d_t}] \quad \forall p, q \in P_d \quad \forall d_k, d_t \in D : d_t \neq d_k; \quad (4.25)$$

$$S_{d_k} + T_{d_k} + G - S_{d_t} \leq \chi \cdot [1 - W_{d_k, d_t} + 2 - x_p^{d_t} - x_q^{d_k}] \quad \forall p, q \in P_d \quad \forall d_k, d_t \in D : d_t \neq d_k; \quad (4.26)$$

De maneira análoga à formulação NPSP, a Equação (4.16) refere-se a função objetivo, que visa maximizar as demandas estabelecidas. A Equação (4.17) corresponde às equações (4.2) a (4.4) da formulação anterior, pois estas restrições são de conservação dos fluxos de tráfego na topologia física e garantem a escolha de apenas um caminho físico.

A quantidade de *slots* para o caminho óptico é fornecido por (4.18) e (4.19), considerando um formato de modulação atribuído para atender determinada demanda. Isso é feito dividindo o tráfego da demanda estabelecida AT_d em Gbit/s pelo produto do tamanho do *slot* Ω em Hz pela eficiência espectral η_z da demanda z .

Um formato de modulação é atribuído a um caminho óptico que satisfaça as restrições de (4.20) à (4.21), o que implica que um único formato de modulação seja empregado em um caminho óptico e sua limitação de distância deve ser satisfeita, por isso o somatório dessa restrição só pode ter como resultado 1. A restrição (4.22) limita a função objetivo, na qual as demandas estabelecidas não podem ser maiores do que as demandas requisitadas.

Da mesma maneira que na formulação NPSP, Equação (4.23) refere-se a capacidade da rede, isto é, o índice máximo de *slot* que pode ser ocupado na rede, esse índice limita a quantidade de *slots* a serem utilizados. As equações de (4.24) a (4.26) tratam da contiguidade para evitar sobreposição de frequências alocadas nos respectivos caminhos, bem como determinar a ordem exata e a alocação da banda de guarda onde necessário.

4.2 Estabelecimento das Demandas com *Grooming*

As formulações a seguir consideram a técnica *Grooming*, isto é, agrupamento de demandas.

4.2.1 Formulação NPSP com *Grooming*

Primeiramente a formulação NPSP com *Grooming* será apresentada com os índices, parâmetros e as variáveis necessários para o modelo.

Índices

- s, d : Representa os nós de fonte e destino das demandas de tráfego (em Gbit/s) na topologia virtual.
- i, j : Representam nós de fonte e destino de um caminho óptico com largura de banda variável na topologia virtual.
- $(i_t, j_t), (i_k, j_k)$: Os índices auxiliares t e k representam os diferentes links virtuais (i, j) .
- z : Representa o formato de modulação a ser usado.
- m, n : Denota nós finais de um link físico no substrato da rede (camada física).

Conjuntos

- N : Conjunto de nós da rede.
- L : Conjunto de links (i, j) da rede virtual.
- A : Conjunto de links (m, n) da rede física.
- M : Conjunto de formatos de modulação disponíveis.

Parâmetros

- Ω : Largura de banda do *slot* de frequência.
- $D_{s,d}$: Matriz de tráfego de valor máximo para cada demanda s, d .
- η_z : Eficiência espectral do formato de modulação z .
- $d_{m,n}$: Distância física do link $m-n$, em saltos.
- d_z : Distância máxima alcançada pelo formato de modulação z .
- G : Banda de guarda para filtro.
- χ : Um número arbitrariamente grande.
- ζ : Um número arbitrariamente muito próximo de 1 pelo limite esquerdo.
- C : Máximo índice de *slot* possível na rede.

Variáveis

- $AT_{s,d}$: Variável que indica quanto de cada demanda s, d foi estabelecida em Gbit/s.
- $\lambda_{i,j}^{s,d}$: Variável de fluxo no enlace virtual (i, j) devido a uma demanda s, d .
- $T_{i,j}$: Variável inteira que representa a quantidade de *slots* do tráfego de um link virtual (i, j) .
- $V_{i,j}$: Tráfego de um link virtual (i, j) a ser roteado na topologia física em Gbit/s.
- $Vb_{i,j}$: Variável binária igual a 1 se o *link* virtual (i, j) possui fluxo, e 0 caso contrário.
- $E_{i,j,z}$: Variável binária igual a 1 se o link virtual (i, j) usar o formato de modulação z e 0, caso contrário.
- $xb_{m,n}^{i,j}$: Variável binária que é igual a 1 se há fluxo no link físico (m, n) devido ao link virtual (i, j) , e 0 caso contrário.
- $S_{i,j}$: Índice do primeiro *slot* atribuído ao link virtual (i, j) .
- $W_{(i_k, j_k), (i_t, j_t)}$: Variável binária igual a 1 se a frequência inicial do link virtual (i_k, j_k) for menor que a frequência inicial do link virtual (i_t, j_t) , e 0 caso contrário.

- Função Objetivo:

$$\text{Maximize : } \sum_{(s,d) \in L} AT_{s,d} \quad (4.27)$$

- Sujeito a:

- Restrições da Camada Virtual

$$\sum_{j:(i,j) \in L} \lambda_{i,j}^{s,d} - \sum_{j:(j,i) \in L} \lambda_{j,i}^{s,d} = AT_{s,d} \quad \forall (s, d) \in L : i = s; \quad (4.28)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in L} \lambda_{i,j}^{s,d} - \sum_{j:(j,i) \in L} \lambda_{j,i}^{s,d} = 0 \quad \forall (s, d) \in L : i \neq s, \quad i \neq d; \quad (4.29)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in L} \lambda_{i,j}^{s,d} - \sum_{j:(j,i) \in L} \lambda_{j,i}^{s,d} = -AT_{s,d} \quad \forall (s, d) \in L : i = d; \quad (4.30)$$

$$\lambda_{i,j}^{s,d} \leq D_{s,d} \quad \forall (s, d), (i, j) \in L; \quad (4.31)$$

$$\sum_{s,d} \lambda_{i,j}^{s,d} = V_{i,j} \quad \forall (i, j) \in L; \quad (4.32)$$

$$Vb_{i,j} \geq V_{i,j}/\chi \quad \forall (i,j) \in L; \quad (4.33)$$

$$Vb_{i,j} \leq V_{i,j}/\chi + \zeta \quad \forall (i,j) \in L; \quad (4.34)$$

$$AT_{s,d} \leq D_{s,d}, \quad \forall (s,d) \in L; \quad (4.35)$$

- *Restrições da Camada Física*

$$\sum_{n:(m,n) \in A} xb_{m,n}^{i,j} - \sum_{n:(n,m) \in A} xb_{n,m}^{i,j} = Vb_{i,j} \quad \forall (i,j) \in L : m = i; \quad (4.36)$$

$$\sum_{n:(m,n) \in A} xb_{m,n}^{i,j} - \sum_{n:(n,m) \in A} xb_{n,m}^{i,j} = 0 \quad \forall (i,j) \in L : m \neq i, \quad m \neq j; \quad (4.37)$$

$$\sum_{n:(m,n) \in A} xb_{m,n}^{i,j} - \sum_{n:(n,m) \in A} xb_{n,m}^{i,j} = -Vb_{i,j} \quad \forall (i,j) \in L : m = j; \quad (4.38)$$

$$T_{i,j} \geq ((V_{i,j})/(\Omega.\eta_z)) - (1 - E_{z,i,j}).\chi \quad \forall (i,j) \in L, \quad \forall z \in M; \quad (4.39)$$

$$T_{i,j} \leq ((V_{i,j})/(\Omega.\eta_z)) + \zeta + (1 - E_{z,i,j}).\chi \quad \forall (i,j) \in L, \quad \forall z \in M; \quad (4.40)$$

$$\sum_z E_{z,i,j} = 1 \quad \forall (i,j) \in L; \quad (4.41)$$

$$\sum_{(m,n) \in A} xb_{m,n}^{i,j}.d_{m,n} \leq \sum_z d_z.E_{z,i,j} \quad \forall (i,j) \in L, \quad \forall z \in M; \quad (4.42)$$

$$S_{i,j} + T_{i,j} \leq C.Vb_{i,j} \quad , \forall (i,j) \in L; \quad (4.43)$$

$$W_{(i_t, j_t), (i_k, j_k)} + W_{(i_k, j_k), (i_t, j_t)} \leq 1 \quad \forall (i_k, j_k), (i_t, j_t) \in L : i_t \neq i_k \vee j_t \neq j_k; \quad (4.44)$$

$$W_{(i_t, j_t), (i_k, j_k)} + W_{(i_k, j_k), (i_t, j_t)} \geq (xb_{m,n}^{(i_t, j_t)} + xb_{m,n}^{(i_k, j_k)} - 1) \quad (4.45)$$

$$\forall (m,n) \in A \quad \forall (i_k, j_k), (i_t, j_t) \in L : i_t \neq i_k \vee j_t \neq j_k;$$

$$W_{(i_t, j_t), (i_k, j_k)} + W_{(i_k, j_k), (i_t, j_t)} \geq (x_{n,m}^{(i_t, j_t)} + x_{n,m}^{(i_k, j_k)} - 1) \quad (4.46)$$

$$\forall(m, n) \in A \quad \forall(i_k, j_k), (i_t, j_t) \in L : i_t \neq i_k \vee j_t \neq j_k;$$

$$S_{i_t, j_t} + T_{i_t, j_t} + G \leq S_{i_k, j_k} + \chi \cdot [1 - W_{(i_t, j_t), (i_k, j_k)}] \quad (4.47)$$

$$\forall(i_k, j_k), (i_t, j_t) \in L : i_t \neq i_k \vee j_t \neq j_k;$$

$$S_{i_k, j_k} + T_{i_k, j_k} + G \leq S_{i_t, j_t} + \chi \cdot [1 - W_{(i_k, j_k), (i_t, j_t)}] \quad (4.48)$$

$$\forall(i_k, j_k), (i_t, j_t) \in L : i_t \neq i_k \vee j_t \neq j_k.$$

Equação (4.27) refere-se a função objetivo que é o tópicos desse trabalho, ou seja, maximizar o tráfego total estabelecidas. Essa função objetivo está sujeita as restrições que nessa formulação são divididas em duas etapas, a virtual e a física, ou seja, terão equações específicas para cada etapa. A primeira etapa a ser analisada será a virtual.

As Equações de (4.28) a (4.30) são restrições de conservação dos fluxos de tráfego na topologia lógica e são responsáveis pela escolha de um ou mais caminhos virtuais válidos para cada demanda. A equação (4.31) limita a variável $\lambda_{i,j}^{s,d}$ a valores que foram de fato requisitados. A equação (4.32) se refere à técnica *Grooming* em si, pois nessa restrição é feito o agrupamento das demandas (s, d) em relação ao seu link virtual (i, j) . A equação (4.35) é responsável pela limitação da função objetivo à matriz de tráfego máximo $D_{s,d}$. As restrições (4.33) e (4.34) tem o propósito de definir os valores da variável $Vb_{i,j}$, ou seja, guardar a informação de quais caminhos virtuais transmitem fluxo de dados.

As restrições da camada física são expostas a seguir. As equações (4.2) a (4.4) são de conservação dos fluxos de tráfego na topologia física e selecionam apenas um caminho físico para cada link virtual.

A quantidade de *slots* para o caminho óptico é fornecido por (4.39) e (4.40), considerando um formato de modulação atribuído para atender determinada demanda. Isso é feito dividindo o tráfego da demanda estabelecida AT_d em Gbit/s pelo produto do tamanho do *slot* Ω em Hz pela eficiência espectral η_z da demanda z . Apenas um formato de modulação é atribuído à apenas um caminho óptico por meio da restrição (4.41). A (4.42) impõe o limite de distância percorrida que deve ser satisfeita para cada formato de modulação.

De maneira semelhante a formulação NPSP sem grooming, a equação (4.43) refere-se a capacidade da rede, isto é, o índice máximo de *slot* que pode ser ocupado na rede, esse índice limita a quantidade de *slots* a serem utilizados, a diferença é que agora é necessário a multiplicação pela variável $V_{i,j}$ para que a variável $S_{i,j}$ seja forçada a ser igual a 0 para caminhos ópticos nos quais nenhum fluxo foi alocado. As equações de (4.44) a (4.48)

tratam da contiguidade para evitar sobreposição de frequências alocadas nos respectivos caminhos, bem como determinar a ordem exata e a alocação da banda de guarda onde necessário.

4.2.2 Formulação PSP com *Grooming*

A partir de agora a formulação PSP com *Grooming* será apresentada com os índices, parâmetros e as variáveis necessários para o modelo.

Índices

- s, d : Representa os nós de fonte e destino das demandas de tráfego (em Gbit/s) na topologia virtual.
- i, j : Representam nós de fonte e destino de um caminho óptico com largura de banda variável na topologia virtual.
- $(i_t, j_t), (i_k, j_k)$: Os índices auxiliares t e k representam os diferentes links virtuais (i, j) .
- z : Representa o formato de modulação a ser usado.
- p : Denota quantidade de caminhos pré-calculados no substrato da rede (camada física).

Conjuntos

- N : Conjunto de nós da rede.
- L : Conjunto de links (i, j) da rede virtual.
- M : Conjunto de formatos de modulação disponíveis.
- $P_{i,j}$: Conjunto de p caminhos candidatos para um caminho virtual i, j ;
- $\mathcal{P} = \cup_{i,j} P_{i,j}$: Conjunto total de caminhos candidatos para um caminho virtual i, j .

Parâmetros

- Ω : Largura de banda do *slot* de frequência.
- $D_{s,d}$: Matriz de tráfego de valor máximo para cada demanda s, d .
- η_z : Eficiência espectral do formato de modulação z .

- d_p : Distância física do caminho p , em saltos.
- d_z : Distância máxima alcançada pelo formato de modulação z .
- G : Banda de guarda para filtro.
- χ : Um número arbitrariamente grande.
- ζ : Um número arbitrariamente muito próximo de 1 pelo limite esquerdo.
- C : Máximo índice de *slot* possível na rede.

Variáveis

- $AT_{s,d}$: Variável que indica quanto de cada demanda s, d foi estabelecida em Gbit/s.
- $\lambda_{i,j}^{s,d}$: Variável de fluxo no enlace virtual (i, j) devido a uma demanda (s, d) .
- $T_{i,j}$: Variável inteira que representa a quantidade de *slots* do tráfego de um link virtual (i, j) .
- $V_{i,j}$: Tráfego de um link virtual (i, j) a ser roteado na topologia física em Gbit/s.
- $Vb_{i,j}$: Variável binária igual a 1 se o *link* virtual (i, j) possui fluxo, e 0 caso contrário.
- $E_{i,j,z}$: Variável binária igual a 1 se o link virtual (i, j) usar o formato de modulação z e 0, caso contrário.
- $xb_p^{i,j}$: Variável binária que é igual a 1 se há fluxo no caminho pré-calculado p devido ao link virtual (i, j) , e 0 caso contrário.
- $S_{i,j}$: Índice do primeiro *slot* atribuído ao link virtual (i, j) .
- $W_{(i_k, j_k), (i_t, j_t)}$: Variável binária igual a 1 se a frequência inicial do link virtual (i_k, j_k) for menor que a frequência inicial do link virtual (i_t, j_t) , e 0 caso contrário.

- **Função Objetivo:**

$$\text{Maximize : } \sum_{(s,d) \in L} AT_{s,d} \quad (4.49)$$

- **Sujeito a:**

- **Restrições da Camada Virtual**

$$\sum_{j:(i,j) \in L} \lambda_{i,j}^{s,d} - \sum_{j:(j,i) \in L} \lambda_{j,i}^{s,d} = AT_{s,d} \quad \forall (s, d) \in L : i = s; \quad (4.50)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in L} \lambda_{i,j}^{s,d} - \sum_{j:(j,i) \in L} \lambda_{j,i}^{s,d} = 0 \quad \forall (s,d) \in L : i \neq s, \quad i \neq d; \quad (4.51)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in L} \lambda_{i,j}^{s,d} - \sum_{j:(j,i) \in L} \lambda_{j,i}^{s,d} = -AT_{s,d} \quad \forall (s,d) \in L : i = d; \quad (4.52)$$

$$\lambda_{i,j}^{s,d} \leq D_{s,d} \quad \forall (s,d), (i,j) \in L; \quad (4.53)$$

$$\sum_{s,d} \lambda_{i,j}^{s,d} = V_{i,j} \quad \forall (i,j) \in L; \quad (4.54)$$

$$AT_{s,d} \leq D_{s,d}, \quad \forall (s,d) \in L; \quad (4.55)$$

$$Vb_{i,j} \geq V_{i,j}/\chi \quad \forall (i,j) \in L; \quad (4.56)$$

$$Vb_{i,j} \leq V_{i,j}/\chi + \zeta \quad \forall (i,j) \in L; \quad (4.57)$$

- *Restrições da Camada Física*

$$\sum_{p \in P_{i,j}} xb_p^{i,j} = Vb_{i,j} \quad \forall i,j \in L; \quad (4.58)$$

$$T_{i,j} \geq ((V_{i,j})/(\Omega \cdot \eta_z)) - (1 - E_{z,i,j}) \cdot \chi \quad \forall (i,j) \in L, \quad \forall z \in M; \quad (4.59)$$

$$T_{i,j} \leq ((V_{i,j})/(\Omega \cdot \eta_z)) + \zeta + (1 - E_{z,i,j}) \cdot \chi \quad \forall (i,j) \in L, \quad \forall z \in M; \quad (4.60)$$

$$\sum_z E_{z,i,j} = 1 \quad \forall (i,j) \in L; \quad (4.61)$$

$$\sum_{p \in P_{i,j}} xb_p^{i,j} \cdot d_p \leq \sum_z d_z \cdot E_{z,i,j} \quad \forall (i,j) \in L, \quad \forall z \in M; \quad (4.62)$$

$$S_{i,j} + T_{i,j} \leq C \cdot Vb_{i,j} \quad , \forall (i,j) \in L; \quad (4.63)$$

Se $\exists p \in P_{i_k, j_k}$ e $\exists q \in P_{i_t, j_t}$ tal que $p \cap q \neq \emptyset$, então para cada $(i_k, j_k), (i_t, j_t) \in L$ e todo $p, q \in \mathcal{P}$.

$$W_{(i_t, j_t), (i_k, j_k)} + W_{(i_k, j_k), (i_t, j_t)} = 1 \quad \forall (i_k, j_k), (i_t, j_t) \in L : i_t \neq i_k \vee j_t \neq j_k; \quad (4.64)$$

$$S_{i_t, j_t} + T_{i_t, j_t} + G - S_{i_k, j_k} \leq \chi \cdot [1 - W_{(i_t, j_t), (i_k, j_k)} + 2 - x_p^{i_t, j_t} - x_q^{i_t, j_t}] \quad (4.65)$$

$$\forall p, q \in P_{i, j}, \quad \forall (i_k, j_k), (i_t, j_t) \in L : i_t \neq i_k \vee j_t \neq j_k;$$

$$S_{i_k, j_k} + T_{i_k, j_k} + G - S_{i_t, j_t} \leq \chi \cdot [1 - W_{(i_k, j_k), (i_t, j_t)} + 2 - x_p^{i_t, j_t} - x_q^{i_k, j_k}] \quad (4.66)$$

$$\forall p, q \in P_{i, j}, \quad \forall (i_k, j_k), (i_t, j_t) \in L : i_t \neq i_k \vee j_t \neq j_k;$$

A equação (4.49) objetiva a maximização do tráfego total estabelecido. Essa função objetivo também está sujeita a restrições que podem ser divididas em duas etapas, a virtual e a física, ou seja, terão equações específicas para cada etapa.

As restrições da camada lógica se comportam da mesma forma que na formulação NPSP. Portanto as equações de (4.50) a (4.52) são restrições de conservação dos fluxos de tráfego na topologia lógica e são responsáveis pela escolha de um ou mais caminhos virtuais válidos para cada demanda. A equação (4.53) limita a variável $\lambda_{i,j}^{s,d}$ a valores que foram de fato requisitados. A equação (4.54) se refere à técnica *Grooming* em si, pois nessa restrição é feito o agrupamento das demandas (s, d) em relação ao seu link virtual (i, j) . A equação (4.55) é responsável pela limitação da função objetivo à matriz de tráfego máximo $D_{s,d}$. As restrições (4.56) e (4.57) tem o propósito de definir os valores da variável $Vb_{i,j}$, ou seja, guardar a informação de quais caminhos virtuais transmitem fluxo de dados.

As restrições da camada física são expostas a seguir. A equação (4.58) é de conservação dos fluxos de tráfego na topologia física e seleciona apenas um caminho físico para cada link virtual que contenha fluxo.

A quantidade de *slots* para o caminho óptico é fornecido por (4.59) e (4.60), considerando um formato de modulação atribuído para atender determinada demanda. Isso é feito dividindo o tráfego da demanda estabelecida AT_d em Gbit/s pelo produto do tamanho do *slot* Ω em Hz pela eficiência espectral η_z da demanda z . Apenas um formato de modulação é atribuído à apenas um caminho óptico por meio da restrição (4.61). A (4.62) impõe o limite de distância percorrida que deve ser satisfeita para cada formato de modulação.

De maneira semelhante a formulação PSP sem *grooming*, a equação (4.63) se refere a capacidade da rede, isto é, o índice máximo de *slot* que pode ser ocupado na rede, esse índice limita a quantidade de *slots* a serem utilizados, a diferença é que agora também é necessário a multiplicação pela variável $V_{i,j}$. Dessa forma a variável $S_{i,j}$ é forçada a ser igual a 0 para caminhos ópticos nos quais nenhum fluxo foi alocado. As equações de (4.64) a (4.66) tratam da contiguidade para evitar sobreposição de frequências alocadas nos respectivos caminhos, bem como determinar a ordem exata e a alocação da banda de guarda onde necessário.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Simulações foram executadas para uma rede com seis nós, como pode ser visto na Figura 5.1. Para redes moderadamente grandes, foi utilizado o Modelo de rede NSFNET, ilustrado na Figura 5.2. Em todas as formulações, a largura do *slot*, Ω , é definida como 12,5 GHz e a faixa de proteção do filtro entre as bandas de frequência é definida para um *slot*. Supõe-se três formatos de modulação disponíveis ($\overline{M} = 3$) para os MILPs. A eficiência espectral de cada formato de modulação, η_z , é definida como $\eta_1 = 2$, $\eta_2 = 4$, $\eta_3 = 8$ Gbit/s/Hz. O alcance máximo de um caminho óptico em cada formato de modulação z é $d_1 = 4$, $d_2 = 2$ e $d_3 = 1$ em número de saltos. Foi fornecida uma matriz estática de tráfego com demandas de 100 Gbit/s para todos os pares de nós existentes na rede.

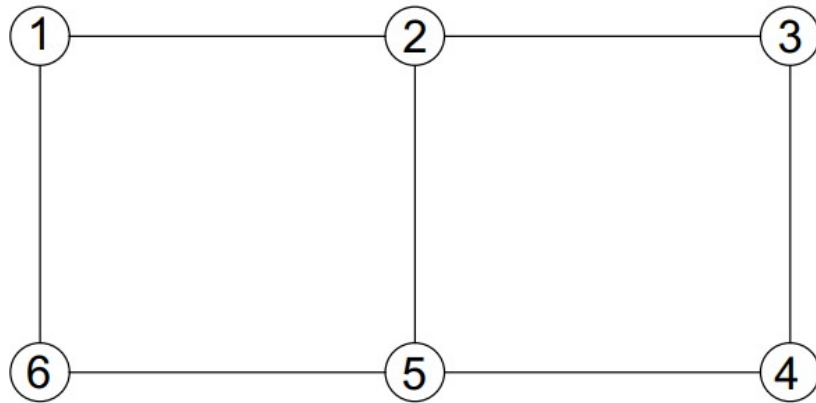


Figura 5.1: Topologia física da rede de 6 nós utilizada para simulações.

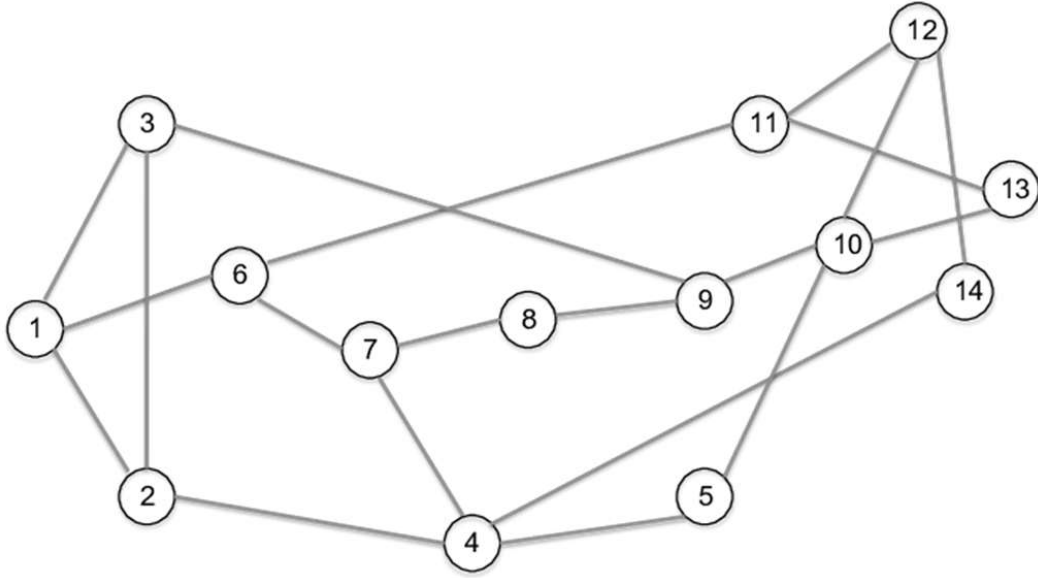


Figura 5.2: Topologia física da rede NSFNET de 14 nós utilizada para simulações.

Para realizar a otimização proposta e avaliar a sua eficácia, as formulações MILP PSP e NPSP com e sem *Grooming* foram resolvidas pelo IBM ILOG CPLEX v.11.0 [31], usando uma máquina Intel i7 3.6 GHz de frequência do processador e 32 GB de memória RAM. Dessa forma, o problema tratado neste trabalho produz soluções exatas, em que a resposta só será modificada se as instâncias mudarem.

Para fins de análise, os valores de cada demanda da matriz AT_d foram extraídos das simulações e a porcentagem de tráfego efetivamente estabelecida pela rede é calculada em relação ao tráfego máximo de 100 Gbits/s. Também foram extraídos os tempos de cada simulação para comparação. Para o caso das formulações com *Grooming* é apresentado uma análise dos links virtuais criados pelas restrições, comparando a topologia virtual criada com a topologia física (substrato da rede).

5.1 Análise do estabelecimento das Demandas sem *Grooming*

5.1.1 Rede de 6 Nós

Para uma comparação mais abrangente entre as formulações, é interessante investigar o desempenho da rede em relação à função objetivo, ou seja, como e quantas demandas e conexões são estabelecidas. No presente trabalho, a Tabela 5.1 mostra os resultados da função objetivo para diversos valores de C (capacidade da rede) quando o tráfego solicitado pelas demandas de origem-destino é estabelecido. Bem como, a Tabela 5.2 mostra os valores de tempo de simulação obtidos, em segundos, para rede de 6 nós ($N = 6$). O valor ótimo global é baseado na formulação NPSP. Apesar disso, a formulação com caminhos 2 predefinidos (PSP $k = 2$), forneceu resultados consideravelmente próximos, em que o valor ótimo foi alcançado em 3 dos 5 casos.

Com base nesses resultados alcançados por meio do NPSP para redes pequenas e, levando-se em consideração as soluções obtidas para 6 nós em ambas as técnicas, mostra-se razoável a extrapolação de simulações em PSP para redes moderadamente grandes. Isso pode ser confirmado pela diferença de tráfego atendido entre as duas formulações (GAP%), que é nula ou praticamente nula em todos os casos. Portanto, a formulação PSP parece ser uma estratégia adequada para redes moderadamente grandes, nas quais o NPSP é impraticável, visto que, o Max-RMSA é um problema de tempo polinomial não determinístico (NP-hard) [10].

Tabela 5.1: Valores da função objetivo de (4.1) NPSP e (4.16) PSP para rede de 6 nós e diferentes valores de C .

	$C = 4$	$C = 6$	$C = 8$	$C = 10$	$C = 12$
NPSP	1400	2156	2600	2808	3000
PSP[$k = 2$]	1400	2150	2600	2800	3000
PSP[$k = 1$]	0	1750	2150	2400	2600
GAP% [$k = 2$]	0	0,28	0	0,29	0
GAP% [$k = 1$]	100	18,83	17,3	14,53	13,33

Tabela 5.2: Valores de tempo de simulação, em segundos, para rede de 6 nós e diferentes valores de C .

	$C = 4$	$C = 6$	$C = 8$	$C = 10$	$C = 12$
NPSP	3604,53	7277,95	4201,28	9701,99	6,469
PSP [$k = 2$]	3626,06	3617,08	3614,28	3611,62	3,828
PSP [$k = 1$]	2,875	3710,64	3704,63	1673,53	244,766

As Tabelas 5.3 à 5.5 ilustra os resultados para as formulações NPSP e PSP [$k = 1$, $k = 2$] MILP, respectivamente, no qual observa-se o número de demandas estabelecidas para diferentes intervalos da taxa de tráfego estabelecida (ETR - *Established Traffic Rate*) são apresentados para diversos valores de C . Os intervalos de ETR são 0%, (0% - 25%), [25% - 50%), [50% - 75%), [75% - 100%) e 100%. Para exemplificar, toma-se $C = 10$ na formulação NPSP na Tabela 5.3, e observa-se que: 26 demandas possuem tráfego completamente estabelecido (100 %); uma demanda possui uma porcentagem do tráfego estabelecido dentro do intervalo [75% -100%); duas demandas estão dentro de [50% - 75%) e uma demanda estabeleceu tráfego dentro do intervalo [0% - 50%).

Como pode ser visto, nas duas formulações MILP, quanto maior o recurso espectral da rede, maior o número de demandas estabelecidas com um ETR alto e vice-versa. É evidente, na Tabela 5.3, que para $C \geq 6$, a maioria das demandas de tráfego são totalmente estabelecidas e para $C \geq 8$ todas as demandas são estabelecidas mesmo que parcialmente. Por outro lado, para $C = 4$, muitas demandas não são estabelecidas. Resultados semelhantes foram encontrados para o PSP [$k = 2$], como visto na Tabela 5.5. É interessante observar que o PSP [$k = 2$] fornece distribuição ETR semelhante quando comparado ao NPSP, que indica a proximidade dos resultados obtidos com as duas formulações. Os *Gaps* de tráfego estabelecidos entre NPSP e PSP [$k = 2$] estão evidenciados na Tabela 5.1.

Porem para PSP [$k = 1$] na tabela 5.4, a quantidade de demandas estabelecidas e os valores da função objetivo foram piores, evidenciando que quanto mais caminhos disponíveis, maior é a proximidade à formulação NPSP. Posteriormente, na seção 5.2, veremos que o mesmo não ocorre para formulação com *Grooming*.

Tabela 5.3: Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais em relação a $V_{u,v}^d$. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$

NPSP N=6					
C	$\beta(\%)$				
	0%	(0% - 50%)	[50% - 75%)	[75% - 100%)	100%
4	16	0	0	0	14
6	7	0	3	0	20
8	4	0	0	0	26
10	0	1	2	1	26
12	0	0	0	0	30

Tabela 5.4: Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais em relação a $V_{u,v}^d$. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$

PSP $k = 1$ N=6					
C	$\beta (\%)$				
	0%	(0% - 50%)	[50% - 75%)	[75% - 100%)	100.00%
4	0	0	0	0	0
6	12	0	1	0	17
8	8	0	1	0	21
10	6	0	0	0	24
12	4	0	0	0	26

Tabela 5.5: Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais em relação a $V_{u,v}^d$. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$

PSP $k = 2$ N=6					
C	β (%)				
	0%	(0% - 50%)	[50% - 75%)	[75% - 100%)	100.00%
4	16	0	0	0	14
6	7	3	0	0	20
8	4	0	0	0	26
10	0	4	0	0	26
12	0	0	0	0	30

As Figuras 5.3 à 5.5 mostram, em losango, a razão entre o tráfego estabelecido e tráfego demandado resultando em volume de tráfego estabelecido. Em quadrado está a razão entre número de conexões estabelecidas e número de conexões requisitadas, ou seja, a taxa de conexão estabelecida normalizada. Ambas as grandezas foram expressas em função da capacidade da rede, C . Quando $C = 12$, pode-se observar que, para NPSP (Figura 5.3) ou PSP [$k = 2$] (Figura 5.4), a totalidade das conexões é estabelecida com todo o tráfego requisitado. Desta forma, é evidente a semelhança entre os resultados, pois as diferenças observadas entre as taxas estão na ordem da terceira casa decimal. Na Figura 5.5 se nota que para $k = 1$ a totalidade das demandas não é atendida nem para $C = 12$. Isso já era esperado a partir da análise dos resultados das tabelas anteriores.

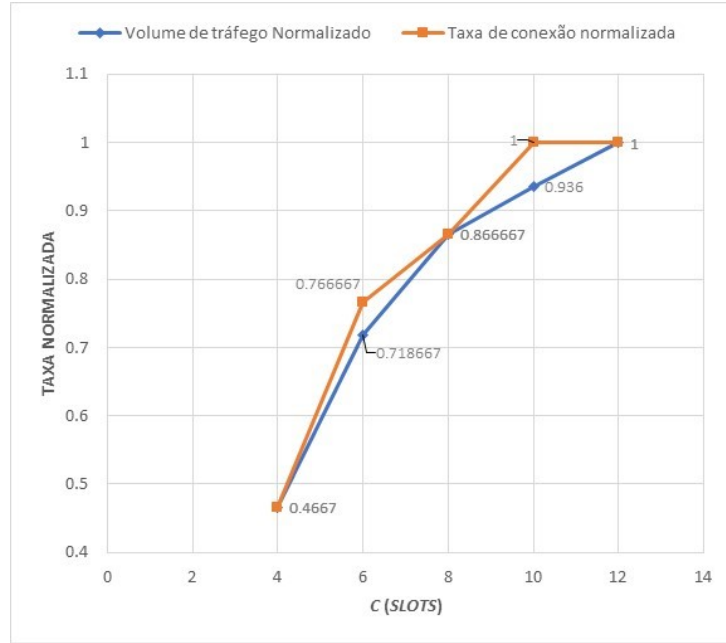


Figura 5.3: Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós em formulação NPSP.

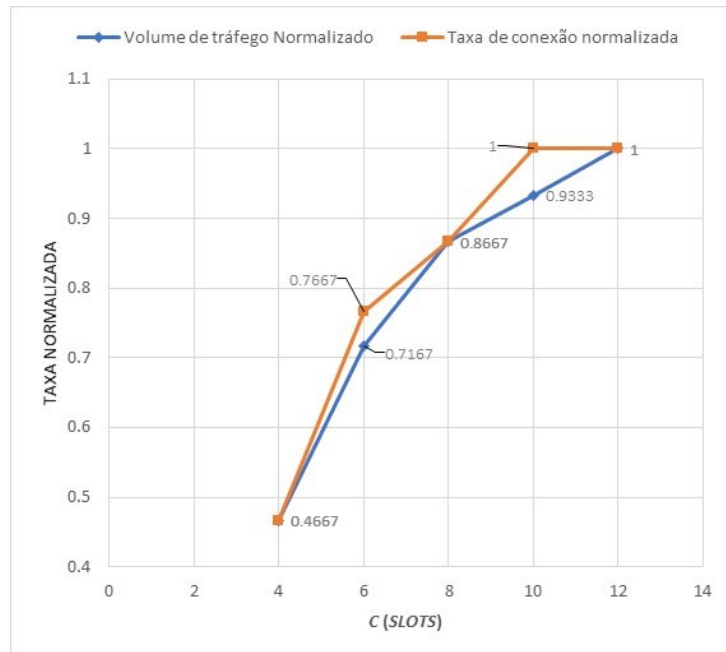


Figura 5.4: Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós em formulação PSP $k = 2$.

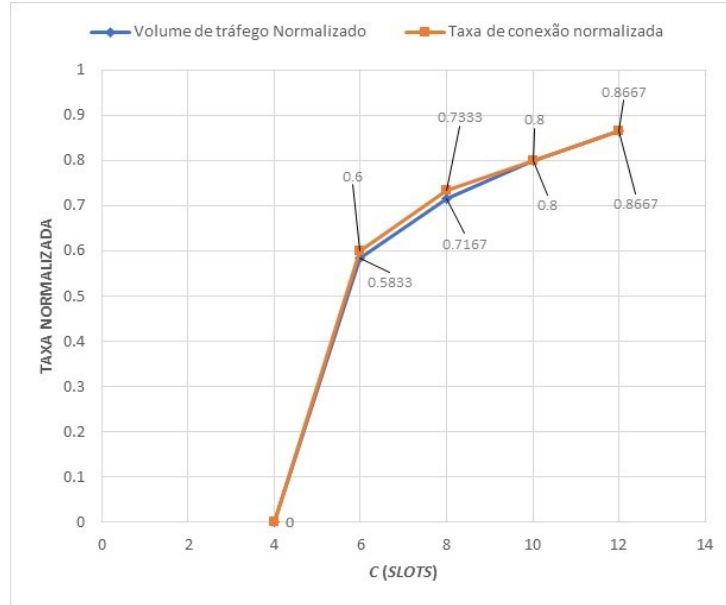


Figura 5.5: Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós em formulação PSP $k = 1$.

5.1.2 Rede NSFNET

Devido à complexidade da solução das formulações MILP para redes grandes, as análises foram realizadas apenas com a formulação PSP para a rede NSFNET, considerada moderadamente grande, composta por 14 nós e 21 enlaces bidirecionais (Figura 5.2). Foram usados números de caminhos $k = 1$ e $k = 2$ a fim de criar o conjunto de caminhos predefinidos e, posteriormente, compará-los.

Em redes maiores (em torno de 20 ou mais nós), mesmo a formulação PSP pode exigir um tempo impraticável para retorno de uma solução factível. A simulação para o NSFNET foi limitada à 12h. Foram usados $k = 1$ ou $k = 2$ para encontrar os caminhos predefinidos de cada demanda.

Tendo em vista que o número de nós e de enlaces são moderadamente grandes em redes ópticas de *backbone* e, considerando que podem ser usados recursos com maior capacidade de processamento, é razoável o uso da formulação PSP tanto para encontrar uma solução quanto para ser referência de futuras pesquisas.

Observando os resultados ilustrados nas Tabelas 5.6 e 5.7 pode-se concluir que: a formulação PSP com $k = 2$ resultou na saturação da curva de taxa de conexão e atendimento de demandas em $C = 70$, ou seja, todas as demandas foram estabelecidas, diferentemente para $k = 1$, no qual a curva de saturação ocorre em $C = 80$ como ilustrado na Figura 5.6. Considerando que o tráfego total na rede é $N * (N - 1) * 100 \text{ Gbit/s}$, onde N é o número de nós na rede, então, para $N = 14$, tem-se 18200 Gbit/s como tráfego total.

Esse valor é alcançado para $C = 70$ com $k = 2$, confirmado pelos dados exibidos na Figura 5.7. O valor de C encontrado na saturação da curva de taxa normalizada tem implicações importantes para os projetistas de EONs, pois pode servir como suporte para a redução do custo computacional necessário em projetos de redes (CAPEX).

Tabela 5.6: Valores da função objetivo de (4.16) para a rede NSFNET, formulações PSP e diferentes valores C .

	$C = 40$	$C = 50$	$C = 60$	$C = 70$
$k = 2$	14700	16425	17550	18200
$k = 1$	14475	16275	17350	18125

Tabela 5.7: Valores de tempo de simulação, em segundos, para rede NSFNET e diferentes valores de C .

	$C = 40$	$C = 50$	$C = 60$	$C = 70$
$k = 2$	43226,7	45294,9	56224	42730,2
$k = 1$	36085,8	36083,8	36092,3	36080,9

Tabela 5.8: Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais em relação a $V_{u,v}^d$. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$

PSP $k = 1$ NSFNET					
C	β (%)				
	0%	(0% - 50%)	[50% - 75%)	[75% - 100%)	100.00%
40	32	6	17	0	127
50	13	7	13	0	149
60	5	3	8	0	166
70	0	1	1	0	180
80	0	0	0	0	182

Tabela 5.9: Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais em relação a $V_{u,v}^d$. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$

PSP $k = 2$ NSFNET					
C	β (%)				
	0%	(0% - 50%)	[50% - 75%)	[75% - 100%)	100.00%
40	27	11	16	0	128
50	13	7	8	0	154
60	6	1	2	0	173
70	0	0	0	0	182
80	0	0	0	0	182

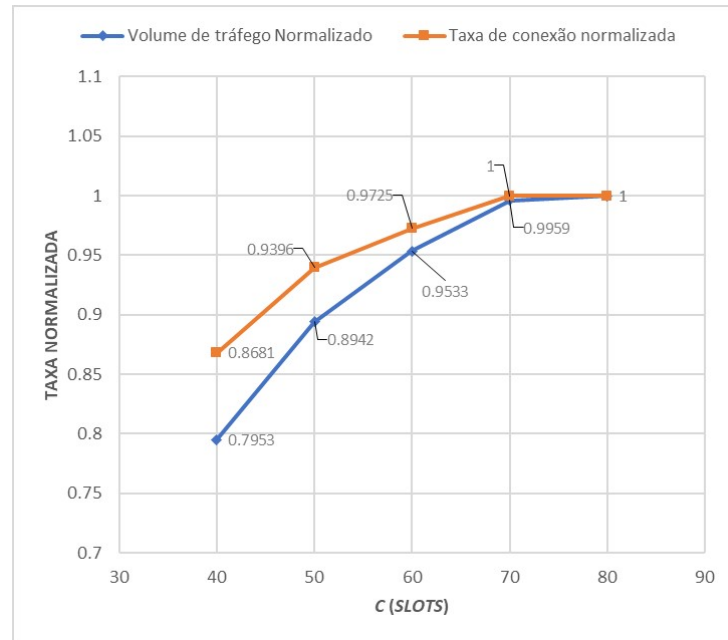


Figura 5.6: Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede NSFNET em formulação PSP $k = 1$.

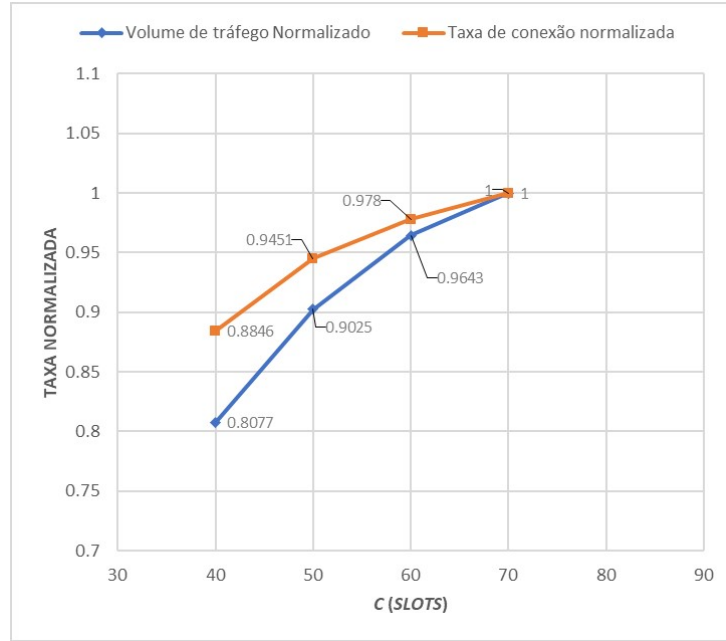


Figura 5.7: Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede NSFNET em formulação PSP $k = 2$.

5.2 Análise do Estabelecimento das Demandas com *Grooming*

5.2.1 Rede de 6 Nós

A mesma comparação que foi feita entre as formulações sem *Grooming* é repetida aqui. Foi analisado como e quantas demandas e conexões são estabelecidas. A Tabela 5.10 mostra os resultados da função objetivo para diversos valores de C quando o tráfego solicitado pelas demandas de origem-destino é estabelecido para ambas as formulações. Já a Tabela 5.11 mostra os valores de tempo de simulação obtidos, em segundos, para rede de 6 nós. O valor ótimo global é baseado na formulação NPSP. Diferentemente do que aconteceu com o caso sem *Grooming*, a formulação PSP com caminhos predefinidos forneceu resultados exatamente iguais ao ótimo a partir de $k = 1$ em todos os casos.

A partir dessa informação temos que a formulação PSP com *Grooming* já apresenta valores iguais a NPSP, tanto para $k = 1$ como para $k = 2$, por causa da virtualização. Levando-se em consideração as soluções obtidas para 6 nós com *Grooming*, é amplamente favorável a extrapolação de simulações em PSP com *Grooming* para redes moderadamente grandes. Isso pode ser confirmado pela diferença de tráfego atendido entre as duas formulações (GAP%), que é nula em todos os casos. Portanto, usando virtualização, a

formulação PSP parece ser uma estratégia adequada para redes moderadamente grandes, nas quais o NPSP é impraticável, visto que, o Max-RMSA é um problema de tempo polinomial não determinístico (NP-hard). [10].

Tabela 5.10: Valores da função objetivo de (4.27) para rede de 6 nós e diferentes valores de C .

	$C = 1$	$C = 2$	$C = 3$	$C = 4$	$C = 5$
NPSP	1400	2100	2600	3000	3000
PSP[$k = 1$]	1400	2100	2600	3000	3000
PSP[$k = 2$]	1400	2100	2600	3000	3000
GAP %	0	0	0	0	0

Tabela 5.11: Valores de tempo de simulação, em segundos, para rede de 6 nós e diferentes valores de C .

	$C = 1$	$C = 2$	$C = 3$	$C = 4$	$C = 5$
NPSP	15,4077	8954,92	21600,1	1,86657	28,6157
PSP [k = 2]	1,51275	37,4874	220,201	0,391317	0,174262
PSP [k = 1]	0,185491	1,32704	6,69314	0,730082	0,461908

Pode ser visto na Tabela 5.12 que o estabelecimento das demandas se comporta de maneira igual para NPSP e a formulação PSP $k = 2$, o que não acontece com os resultados na Tabela 5.13 no caso de PSP $k = 1$, mesmo a função objetivo alcançando o mesmo valor. Para $C = 2$, a formulação NPSP e PSP $k = 2$ atendem parcialmente 6 demandas entre 50 e 75%, isso não acontece para formulação PSP $k = 1$, no qual não atende nenhuma demanda nessa faixa de porcentagem para o mesmo C .

Tabela 5.12: Número de demandas estabelecidas entre os nós s, d organizadas em percentuais em relação a D. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$

NPSP e PSP [$k = 2$] N=6 com Grooming					
C	β (%)				
	0.00%	(0% - 50%)	[50% - 75%)	[75% - 100%)	100.00%
1	16	0	0	0	14
2	6	0	6	0	18
3	4	0	0	0	26
4	0	0	0	0	30
5	0	0	0	0	30

Tabela 5.13: Número de demandas estabelecidas entre os nós s, d organizadas em percentuais em relação a D. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$

PSP($k = 1$) N=6 com Grooming					
C	β (%)				
	0.00%	(0% - 50%)	[50% - 75%)	[75% - 100%)	100.00%
1	16	0	0	0	14
2	9	0	0	0	21
3	4	0	0	0	26
4	0	0	0	0	30
5	0	0	0	0	30

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram, em losango, a razão entre o tráfego estabelecido e tráfego demandado resultando em volume de tráfego estabelecido. Em quadrado está a razão entre número de conexões estabelecidas e número de conexões requisitadas, ou seja, a taxa de conexão estabelecida normalizada. Ambas as grandezas foram expressas em função da capacidade da rede, C . Os gráficos obtidos para NPSP e PSP $k = 2$ refletem os resultados apresentados na Tabela 5.12. Observa-se que quando $C = 4$ ocorre a saturação de ambas as curvas. Porém para $k = 1$ o volume de tráfego é estabelecido exatamente igual a taxa de conexão, como mostrado na Figura 5.9. Isso já era esperado a partir da análise dos resultados das tabelas anteriores.

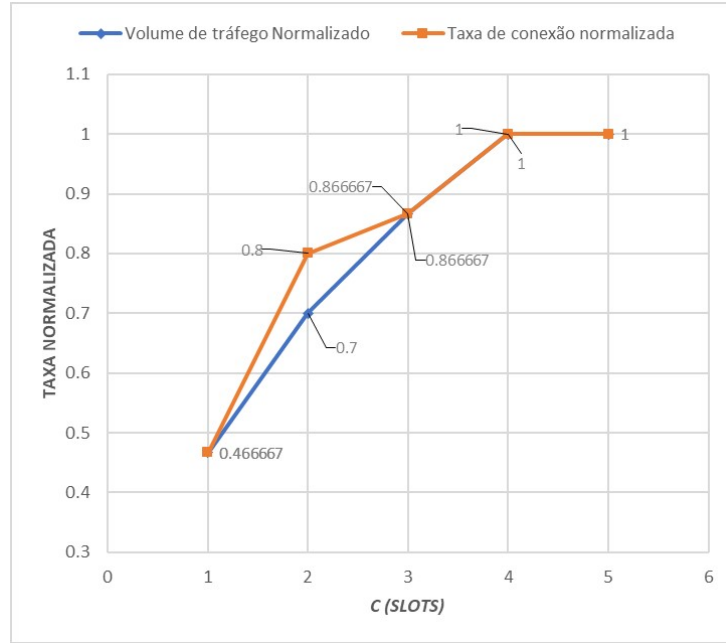


Figura 5.8: Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós para as formulações NPSP e PSP ($k = 2$) com *Grooming*

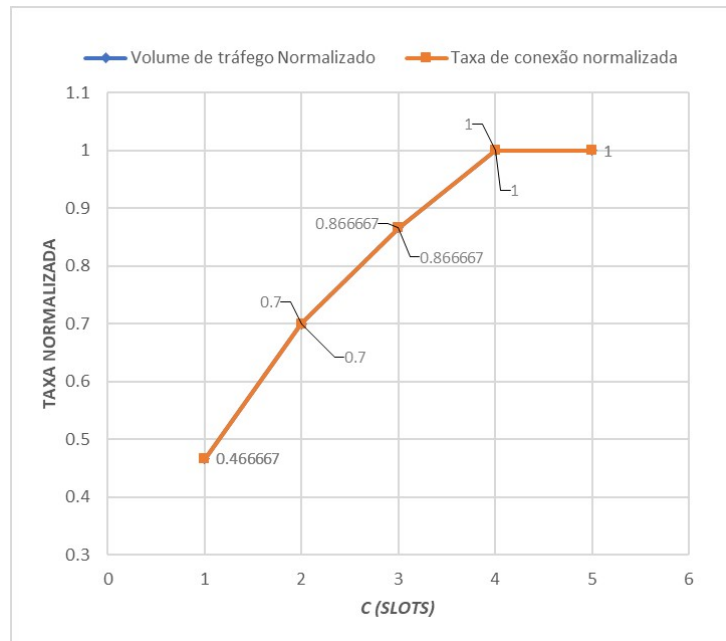


Figura 5.9: Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós para a formulação PSP ($k = 1$) com *Grooming*

5.2.2 Rede NSFNET

Da mesma forma que para 6 nós, a função objetivo é a mesma para PSP $k = 1$ e $k = 2$, no qual o volume de tráfego estabelecido é exatamente igual para ambos, como explanados na Tabela 5.14. Os tempos de simulação para ambas as formulações podem ser vistos na Tabela 5.15, no qual foram limitados para 6 horas, pois para essas formulações foi utilizado o servidor NEOS que possui limite de tempo disponível para simulação. O solucionador usado neste servidor foi o CPLEX [31], que é o mesmo das simulações sem *Grooming*.

O servidor NEOS é um serviço gratuito para solucionar problemas de otimização numérica por meio da internet. Fornece acesso a mais de 60 solucionadores de última geração em várias categorias de otimização. Esse servidor está disponível online na referência [32].

Tabela 5.14: Valores da função objetivo eq. (4.27) para rede NSFNET, para formulação PSP para vários valores de C .

	$C = 10$	$C = 11$	$C = 12$	$C = 13$	$C = 14$
$k = 2$	16400	17200	18000	18200	18200
$k = 1$	16400	17200	18000	18200	18200

Tabela 5.15: Valores de tempo de simulação, em segundos, para rede NSFNET para Formulação PSP com *Grooming* e diversos valores de C .

	$C = 10$	$C = 11$	$C = 12$	$C = 13$	$C = 14$
$k = 2$	21612,5	21601,8	21601,9	876,325	15991,1
$k = 1$	21601,7	21603	21601,6	17813	6176,15

Mesmo com função objetivo igual, os resultados presentes nas Tabelas 5.16 e 5.17 se comportam de maneira diferente, no qual para mesmas faixas de demandas estabelecidas os valores divergem em diversos valores de C .

Tabela 5.16: Número de demandas estabelecidas entre os nós s, d organizadas em percentuais em relação a D. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$

PSP($k = 1$) NSFNET com Grooming					
C	β (%)				
	0.00%	(0% - 50%)	[50% - 75%)	[75% - 100%)	100.00%
10	18	0	0	0	164
11	7	3	0	2	170
12	0	4	0	0	178
13	0	0	0	0	182
14	0	0	0	0	182

Tabela 5.17: Número de demandas estabelecidas entre os nós s, d organizadas em percentuais em relação a D. Entre $\beta = 0\%$, $0\% < \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$

PSP($k = 2$) NSFNET com Grooming					
C	β (%)				
	0.00%	(0% - 50%)	[50% - 75%)	[75% - 100%)	100.00%
10	8	9	3	1	164
11	6	3	3	4	166
12	0	2	0	3	177
13	0	0	0	0	182
14	0	0	0	0	182

Mantendo o padrão, as Figuras 5.10 e 5.11 mostram, em losango, a razão entre o tráfego estabelecido e tráfego demandado resultando em volume de tráfego estabelecido. Em quadrado está a razão entre número de conexões estabelecidas e número de conexões requisitadas, ou seja, a taxa de conexão estabelecida normalizada. Ambas as grandezas foram expressas em função da capacidade da rede, C . Os gráficos obtidos para PSP $k = 1$ e $k = 2$ são diferentes, resultante dos dados apresentados nas Tabelas 5.16 e 5.17. Observa-se que quando $C = 13$ ocorre a saturação de ambas as curvas. Porém para $k = 1$ o volume de tráfego e a taxa de conexão são muito próximas, diferente do que acontece para $k = 2$. Esse último caso pode ser visto na Figura 5.11, principalmente para $C = 10$.

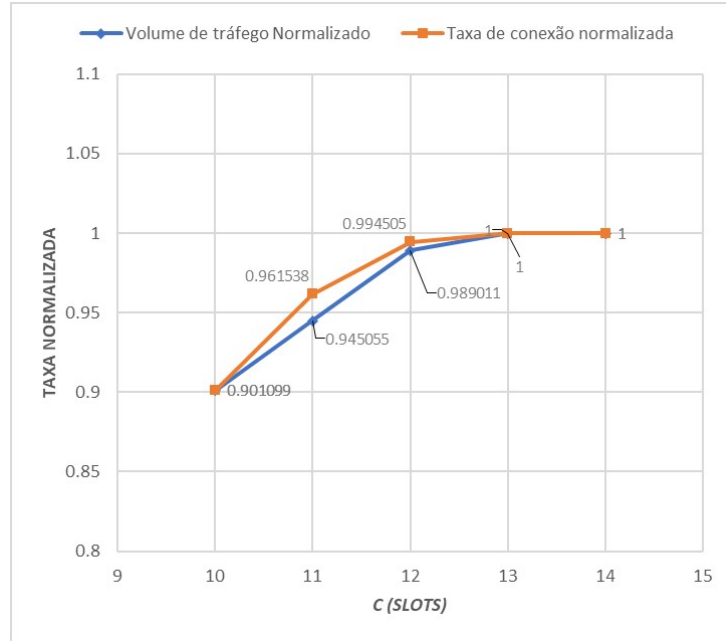


Figura 5.10: Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede NSFNET para a formulação PSP ($k = 1$) com *Grooming*

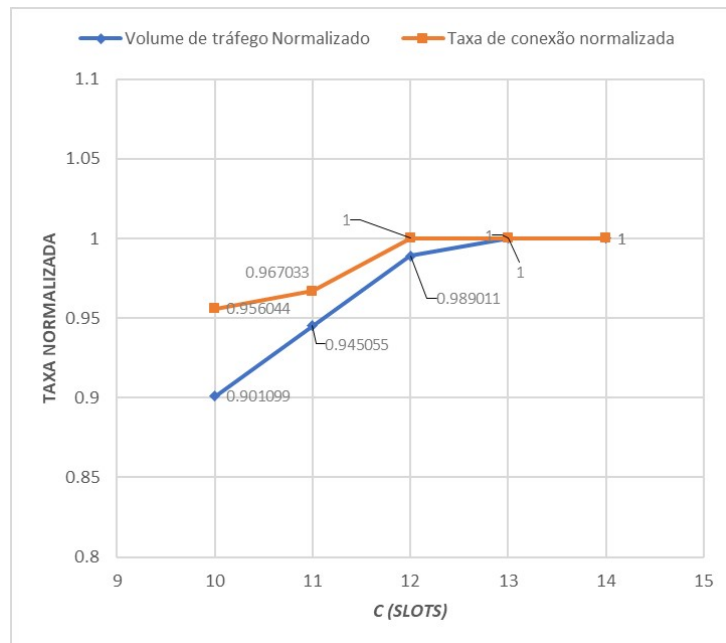


Figura 5.11: Em losango, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em quadrado, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede NSFNET para a formulação PSP ($k = 2$) com *Grooming*

5.3 Discussão

Nessa seção será feita a comparação entre os resultados obtidos por meio dos métodos com e sem *Grooming*. De forma geral, por meio dos resultados obtidos constatamos que a virtualização e o agrupamento (*Grooming*) de demandas aumenta substancialmente o volume de tráfego e a quantidade de conexões estabelecidas para uma dada capacidade de rede C .

As Tabelas 5.18 e 5.19 apresentam valores mínimos de C para os quais as demandas são totalmente estabelecidas. A Tabela 5.18 analisa a rede de 6 nós, na qual percebe-se que com a formulação sem *Grooming* é necessário 3 vezes mais recurso espectral que com a formulação com *Grooming*. Já na Tabela 5.19 é analisada a rede NSFNET de 14 nós, para $k = 1$ são necessários 6,15 vezes mais recurso espectral com a formulação sem *Grooming*, já para $k = 2$ são necessários 5,38 vezes mais recurso espectral.

Tabela 5.18: Valores mínimos de C para volume de tráfego totalmente estabelecido da rede de 6 nós nas formulações.

Formulação	C
$k = 2$	12
$k = 2$ <i>Grooming</i>	4
NPSP	12
NPSP <i>Grooming</i>	4

Tabela 5.19: Valores mínimos de C para volume de tráfego totalmente estabelecido da rede de 14 nós nas formulações.

Formulação	C
$k = 1$	80
$k = 1$ <i>Grooming</i>	13
$k = 2$	70
$k = 2$ <i>Grooming</i>	13

Fica evidente a vantagem em se usar o método do *Grooming* para reagrupar as demandas e só depois se fazer o roteamento. Para entender esse fato precisamos notar que a técnica do *Grooming* remove a necessidade da banda de guarda entre as demandas solicitadas, ocorrendo também a simplificação da escolha do formato de modulação e a forma como as restrições de camada lógica compõem os enlaces virtuais, ou seja, enlaces em que a matriz $V_{ij} \neq 0$ resultando assim numa maior economia de recurso espectral

da rede. Outro fato interessante é que a topologia virtual converge para a topologia física a medida em que o problema fica mais restritivo, ou seja, com a diminuição dos valores de C . Observa-se que quando o problema é menos restritivo, como por exemplo para $C = 7$, diversos enlaces virtuais diferentes se comparados ao substrato da rede são criados, enquanto que para $C = 4$ — problema mais restritivo — todos os enlaces virtuais coincidem com os enlaces físicos da rede, como pode ser visto nas Figuras 5.12 e 5.13 em que os enlaces virtuais criados são exibidos sobre o substrato da rede para $C = 7$ e $C = 4$, enlaces com setas são unidirecionais já enlaces sem setas são bidirecionais. Na Figura 5.14 é possível observar isso de forma mais gradual para diversos valores de C , note que para $C = 4$ a convergência ocorre e se mantém para $C \leq 4$, mesmo padrão de enlaces é feito nessa Figura.

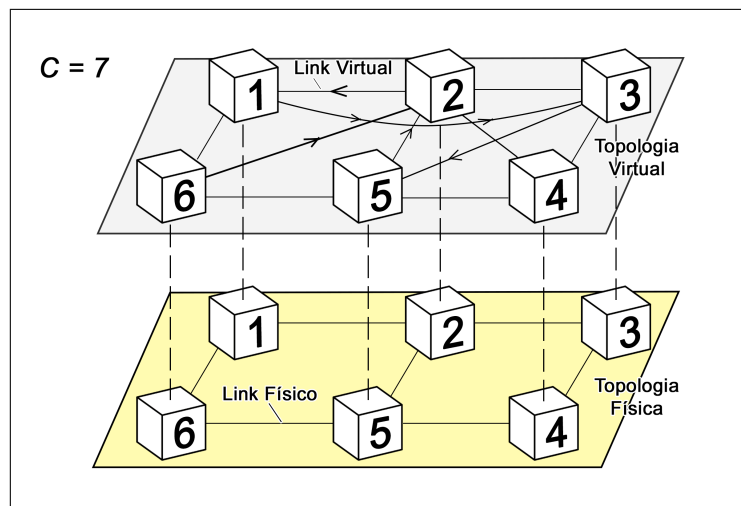


Figura 5.12: Topologia virtual sob topologia física para $C = 7$.

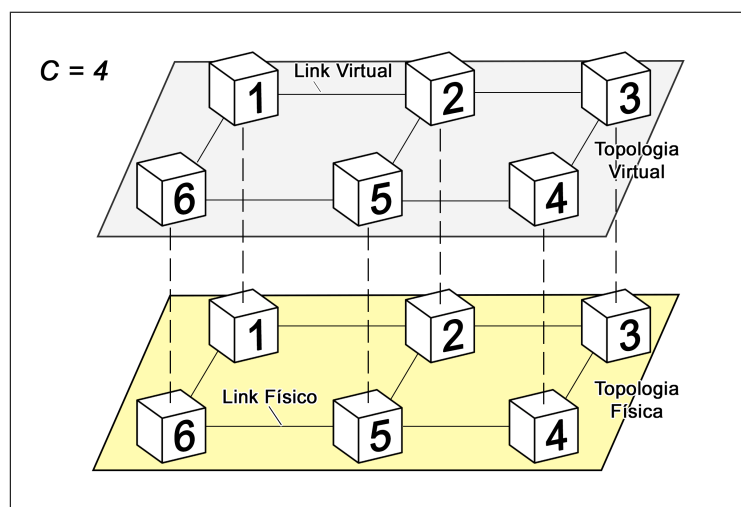


Figura 5.13: Topologia virtual sob topologia física para $C = 4$.

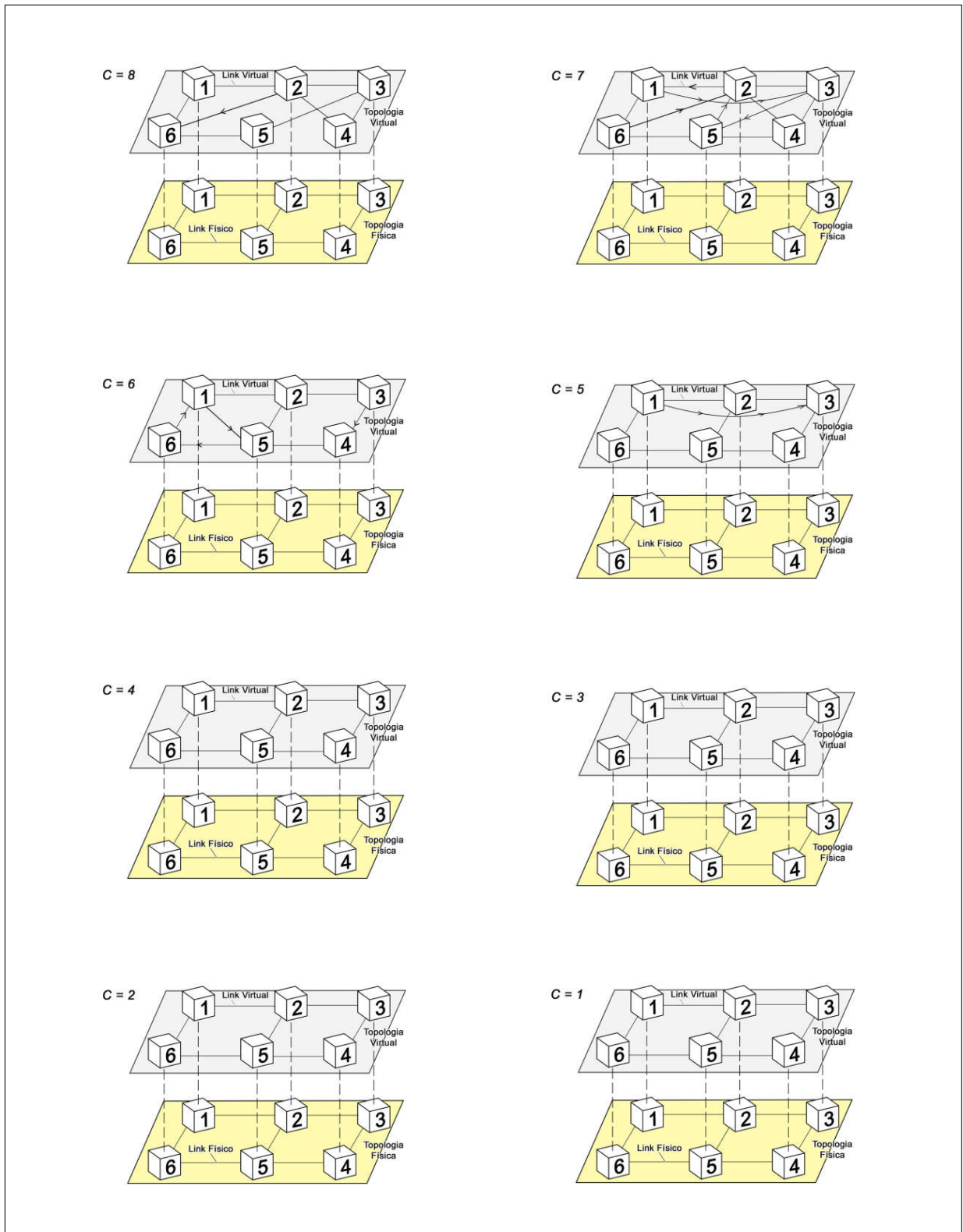


Figura 5.14: Os enlaces virtuais então tendem a coincidir com os enlaces físicos.

Isso sugere uma tendência dos enlaces virtuais convergirem para o conjunto A (camada física) como pode ser visto no Figura 5.15 para a rede de 6 nós, em que é mostrado a quantidade de enlaces virtuais iguais (em quadrado) e enlaces físicos (em losango) em

função da capacidade da rede C .

Pode-se ir ainda mais além e fazer a seguinte conjectura: para o problema Max-RMSA com *Grooming*, aplicado a uma rede em que todos os enlaces físicos tem o mesmo tamanho, existe pelo menos uma solução ótima em que as rotas não são concorrentes, bem como coincidem com os enlaces físicos. Para esta solução ótima os enlaces virtuais são os mesmos que os enlaces físicos, e como os enlaces físicos são também caminhos entre os nós, então os caminhos utilizados para atender cada enlace virtual são formados por apenas 1 enlace físico, portanto nenhuma concorrência de demanda é registrada nos enlaces físicos da rede, e ainda mais, é possível escolher o formato de modulação mais eficiente, levando a aproveitamento ótimo de recursos espectrais.

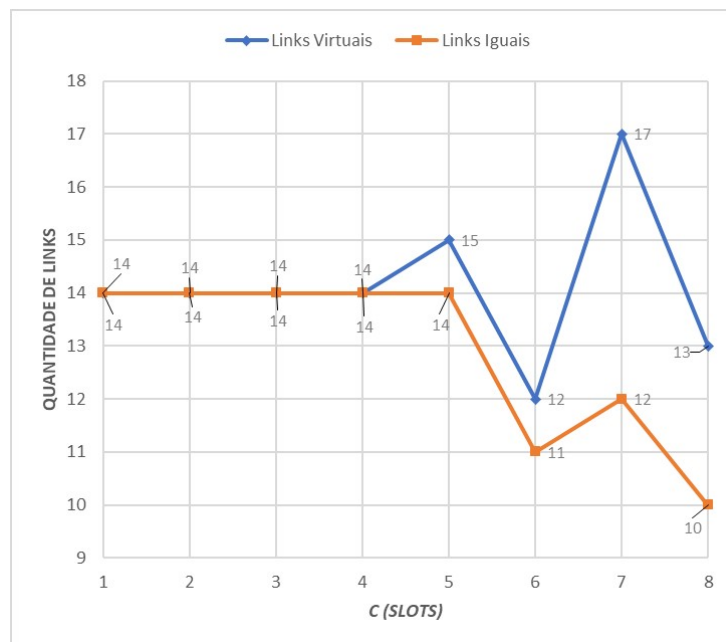


Figura 5.15: Comparação entre os *links* vituais criados com a camada física

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

Foi apresentado um apanhado geral sobre comunicações ópticas e redes ópticas elásticas, com seus principais elementos, como *transponders* (BVTs e SBVTs), bem como a técnica de modulação OFDM escolhida arquitetura EON. Foi apresentado também o problema que decorre dessa arquitetura EON com OFDM que é o RMSA, a partir desse problema, formulamos um outro problema relacionado que é o Max-RMSA.

Foram apresentadas quatro formulações MILP para solucionar o problema Max-RMSA em EONs. Foram feitas diversas simulações para cada MILP e os resultados foram analisados em redes de pequenas instâncias. Para a rede moderadamente grande, NSFNET, foram utilizadas apenas as formulações PSP, devido a complexidade das formulações NPSP em redes com maior número de instâncias, ainda assim pôde-se encontrar uma boa solução com um tempo de simulação razoável.

Conclui-se duas observações importantes. A primeira é que a formulação com *Grooming* apresenta uma eficiência espectral superior que a *Grooming*. Isso se deve ao fato do *Grooming* remover as FGBs bem como simplificar a escolha do formato de modulação, possibilitando uso do recurso espectral com mais eficiência. A segunda é que a medida em que o problema fica mais restritivo o conjunto de enlaces virtuais tende a ser igual ao conjunto de enlaces físicos da rede, fazendo com que, os caminhos sejam compostos de apenas um link, portanto, menor distância possível e, com isso, modulação com melhor eficiência espectral.

Isso nos permitiu formular a conjectura que diz: para o problema Max-RMSA com *Grooming*, aplicado a redes com enlaces físicos de mesma distância, existe pelo menos uma solução ótima global a qual possui enlaces virtuais coincidentes com enlaces físicos, e cujas rotas são compostas desses enlaces físicos e, conseqüentemente, não concorrentes. Dessa forma abre-se a possibilidade — para trabalhos futuros — de formulação de uma possível simplificação ou heurística para o problema Max-RMSA ao usar um modelo onde os caminhos virtuais seriam predefinidos coincidindo com os caminhos físicos, reduzindo

a complexidade do problema e, possivelmente chegando aos mesmos resultados. Além disso pode-se considerar mais de uma camada virtual para tratar do problema agregando a proteção de informação para o caso de bloqueio de caminhos, bem como, remodelar o problema para considerar o caso de tráfego dinâmico.

6.1 Artigos Publicados

Durante a realização deste mestrado, foram publicados os seguintes artigos:

- K. D. R. Assis, L. A. J. Mesquita, R. C. Almeida Jr, T. Moura e M. S. Alencar - Virtualização de Redes Ópticas Elásticas: Formulação Linear Considerando o Grooming de Tráfego - XXXVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS, DOI: 10.14209/SBRT.2019.1570558949. [33]
- Thiale M. Alcântara, Rafael. A. Vieira, Raul C. Almeida Jr, William F. Giazza, Joel J. P. C. Rodrigues, Karcus D. R. Assis - Planejamento de Redes Ópticas Elásticas por meio da solução do Max-RMSA - XXXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Site de aceitação http://sbrc2020.sbc.org.br/?page_id=1796. [34]

Referências Bibliográficas

- [1] Cisco public. Cisco Visual Networking Index: Forecast and trends, 2017–2022, 2019. White paper.
- [2] P. Oner. Routing and spectrum allocation in static fiber optic networks. In *master of science - graduate school of engineering and science of bilkent university*, 2016.
- [3] M. Jinno. Elastic optical networking: Roles and benefits in beyond 100-gb/s era. *Journal of Lightwave Technology*, 35(5):1116–1124, March 2017.
- [4] L. Ruiz, I. González, R. J. Durán, I. d. Miguel, N. Merayo, J. C. Aguado, P. Fernández, R. M. Lorenzo, and E. J. Abril. Comparing different types of flexibility when solving the rsa problem in eons. In *2017 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, pages 1356–1359, Dec 2017.
- [5] E. Oki and B. C. Chatterjee. Design and control in elastic optical networks: Issues, challenges, and research directions. In *2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pages 546–549, Jan 2017.
- [6] Suzana Miladić-Tešić, Goran Marković, and Valentina Radojičić. Traffic grooming technique for elastic optical networks: a survey. *Optik*, 176:464–475, 2019.
- [7] Victor López, Luis Velasco, et al. Elastic optical networks. *Architectures, Technologies, and Control, Switzerland: Springer Int. Publishing*, 2016.
- [8] André Victor Silva XAVIER. Roteamento e proteção dedicada em redes ópticas usando inteligência computacional. 2016.
- [9] Gerd Keiser. *Comunicações por Fibras Ópticas-4*. AMGH Editora, 2014.
- [10] Masahiko Jinno, Hidehiko Takara, Bartłomiej Kozicki, Yukio Tsukishima, Yoshiaki Sone, and Shinji Matsuoka. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE communications magazine*, 47(11):66–73, 2009.

- [11] Paola Frascella, Naoise Mac Suibhne, Fatima C Garcia Gunning, Selwan K Ibrahim, Paul Gunning, and Andrew D Ellis. Unrepeated field transmission of 2 tbit/s multi-banded coherent wdm over 124 km of installed smf. *Optics Express*, 18(24):24745–24752, 2010.
- [12] William Shieh, Hongchun Bao, and Yan Tang. Coherent optical ofdm: theory and design. *Optics express*, 16(2):841–859, 2008.
- [13] B. C. Chatterjee, N. Sarma, and E. Oki. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3):1776–1800, May 2015.
- [14] Hui Zang, Jason P Jue, Biswanath Mukherjee, et al. A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks. *Optical networks magazine*, 1(1):47–60, 2000.
- [15] Siamak Azodolmolky, Mirosław Klinkowski, Eva Marin, Davide Careglio, Josep Solé Pareta, and Ioannis Tomkos. A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks. *Computer networks*, 53(7):926–944, 2009.
- [16] C Siva Ram Murthy and Mohan Gurusamy. *WDM optical networks: concepts, design, and algorithms*. Prentice Hall, 2002.
- [17] Keyao Zhu and B. Mukherjee. Traffic grooming in an optical wdm mesh network. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(1):122–133, 2002.
- [18] X. Wang, M. Brandt-Pearce, and S. Subramaniam. Impact of wavelength and modulation conversion on translucent elastic optical networks using milp. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 7(7):644–655, July 2015.
- [19] Fan Ji, Xiaoliang Chen, Wei Lu, Joel JPC Rodrigues, and Zuqing Zhu. Dynamic p-cycle protection in spectrum-sliced elastic optical networks. *Journal of lightwave technology*, 32(6):1190–1199, 2014.
- [20] H. Wu, F. Zhou, Z. Zhu, and Y. Chen. Spectrum management in elastic optical networks: Perspectives of topology, traffic and routing. In *2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*, pages 1–9, May 2019.
- [21] J. Zhang, C. Yu, L. Luc, X. Liu, and J. Shen. Maximum-spectrum-completeness based routing and spectrum assignment algorithms for elastic optical networks. In *2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC)*, pages 1–5, May 2019.

- [22] Helder Oliveira and Nelson Fonseca. Proteção em redes Ópticas elásticas com multiplexação espacial. In *Anais Estendidos do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 161–168, Porto Alegre, RS, Brasil, 2019. SBC.
- [23] Iallen Gábio Santos, Lucas Hiago, Alexandre Fontinele, José Augusto Suruagy Monteiro, André Soares, and Divanilson Campelo. Um mecanismo para potencialização da agregação de tráfego em redes ópticas elásticas. In *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pages 321–334, Porto Alegre, RS, Brasil, 2019. SBC.
- [24] G. Savva, K. Manousakis, and G. Ellinas. Eavesdropping-aware routing and spectrum/code allocation in ofdm-based eons using spread spectrum techniques. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 11(7):409–421, July 2019.
- [25] Siqi Liu, Bin Niu, Deyun Li, Min Wang, Shaofei Tang, Jawei Kong, Baojia Li, Xiaokang Xie, and Zuqing Zhu. DL-assisted cross-layer orchestration in software-defined ip-over-eons: from algorithm design to system prototype. *Journal of Lightwave Technology*, 37(17):4426–4438, 2019.
- [26] K. D. R. Assis, L. A. J. Mesquita, R. C. Almeida, H. Waldman, A. Hammad, and D. Simeonidou. Virtualisation of optical networks utilising squeezing protection: the exact formulation. *Electronics Letters*, 55(20):1098–1101, 2019.
- [27] Karcus DR Assis, Ali Hammad, Raul C Almeida, and Dimitra Simeonidou. Approaches to maximize the open capacity of elastic optical networks. In *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [28] Prasanta Majumdar and Tanmay De. A distance-based adaptive traffic grooming algorithm in large eon under dynamic traffic model. In *Progress in Computing, Analytics and Networking*, pages 225–236. Springer, 2020.
- [29] Pramit Biswas and Aneek Adhya. Energy-efficient network planning and traffic provisioning in ip-over-elastic optical networks. *Optik*, 185:1115 – 1133, 2019.
- [30] Jin Y Yen. Finding the k shortest loopless paths in a network. *management Science*, 17(11):712–716, 1971.
- [31] ILOG, Inc. ILOG CPLEX: High-performance software for mathematical programming and optimization, 2018. See <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer>.

- [32] University of Wisconsin. NEOS SERVER: State-of-the-art solvers for numerical optimization, 2020. See <https://neos-server.org/neos/>.
- [33] K.D.R. Assis, Marcelo Alencar, Raul Almeida, Leonardo Mesquita, and Thiale Moura. Virtualização de redes Ópticas elásticas: Formulação linear considerando o grooming de tráfego. 01 2019.
- [34] Alcântara, T.M. and Vieira, R. A. and Almeida, R. C. Jr. and Guiozza, W. F. and Rodrigues, J. J. P. C. and Assis, K.D.R. Planejamento de Redes Ópticas Elásticas por meio da solução do Max-RMSA, 2020. See http://sbrc2020.sbc.org.br/?page_id=1796.