

Planejamento de Redes Ópticas Elásticas por meio da solução do Max-RMSA

Thiale M. Alcântara¹, Rafael. A. Vieira¹, Raul C. Almeida Jr², William F. Giozza³,
Joel J. P. C. Rodrigues^{4,5}, Karcus D. R. Assis¹

¹Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Rua Professor Aristídes Novis – 40210-630 – Salvador – BA – Brasil

²Departamento de Engenharia Eletrônica – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Recife – PE – Brasil

³Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília (UnB) – Brasília, DF – Brasil

⁴Universidade Federal do Piauí (UFPI), Teresina – PI, Brasil

⁵Instituto de Telecomunicações, Portugal

{thialemoura, ravieirann, ralmeida.ufpe}@gmail.com, giozza@unb.br

joeljr@ieee.org, karcus.assis@ufba.br

Abstract. *This paper presents a Predefined Shortest Paths (PSP) based on Mixed Integer Linear Programming (MILP) formulation to solve the problem of maximization of established demands, routing, modulation and spectrum allocation, called Max-RMSA in elastic optical networks (EONs). In order to analyze performance and validate the chosen methodology, the Non Predefined Shortest Paths (NPSP) formulation was used. Although it has high complexity, this formulation is widely used to obtain the optimal global result for networks with limited number of vertices. Thus, results for small networks were compared to the solutions obtained using PSP. In this approach, progressive approximations of the optimal value for moderately large networks were performed and robust solutions in viable simulation time were achieved. The techniques used are analyzed through the maximum established demands. Finally, the benefits are presented as suggestions for future heuristics applied to backbone network planning.*

Resumo. *Este trabalho apresenta uma formulação de Programação Linear Mista (MILP) baseada em um conjunto pré-definido de caminhos (PSP) para resolver o problema de maximização de demandas estabelecidas, roteamento, modulação e alocação de espectro em redes ópticas elásticas (EONs), chamado por Max-RMSA. A fim de analisar o desempenho e comparar a abordagem escolhida em relação à solução ótima, a formulação sem conjunto pré-definido de caminhos (NPSP) também foi utilizada. Embora possua alta complexidade, 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. Nesta abordagem, foram realizadas aproximações progressivas do valor ótimo para redes moderadamente grandes e soluções robustas em tempo de simulação viável foram alcançadas. As técnicas utilizadas são analisadas com o objetivo de maximizar as demandas estabelecidas. Por fim, os benefícios são apresentados assim como sugestões para futuras pesquisas aplicadas ao planejamento de redes de backbone.

1. Introdução

A crescente demanda dos usuários por convergência de voz, vídeo e dados na Internet tornou-se um problema central para companhias especializadas em comunicação de dados, tendo em vista um ambiente global onde o acesso à informação mostra-se crítico e de vital importância [Cisco public 2019]. Atualmente, a técnica de multiplexação mais utilizada nas redes ópticas é a Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*), capaz de transportar em um mesma fibra, diversos sinais em diferentes comprimentos de ondas. A técnica WDM permite o fluxo bidirecional de dados e expande a capacidade da rede óptica sem a necessidade de fibras adicionais para transportar dados [Oner 2016]. Por outro lado, esta técnica apresenta rigidez na atribuição de comprimento de onda com uma grade fixa e homogênea [Jinno 2017].

Devido a isso, um crescente interesse na investigação de arquiteturas de redes ópticas tem sido o foco de várias pesquisas, [Ruiz et al. 2017], em que o gerenciamento e os elementos da rede darão suporte para uma largura de banda de caminhos ópticos flexíveis. Ou seja, busca-se ocupar uma largura livre do espectro de acordo com o volume de tráfego e as requisições do usuário. Desta forma, Redes Ópticas Elásticas (EONs - *Elastic Optical Networks*) estão rapidamente se tornando candidatas para atender à crescente demanda por capacidade e às várias necessidades do setor de telecomunicações [Jinno 2017]. As EONs propõem uma transmissão heterogênea e flexível por apresentarem alta granularidade devido à utilização de subportadoras ortogonais entre si, uma técnica conhecida por Multiplexação de Frequências Ortogonais (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), que possui uma eficiência espectral mais robusta [Oki and Chatterjee 2017].

A tecnologia 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. Com base nos fundamentos desta técnica, a rede de caminho óptico elástico em fatias de espectro (comumente chamado de SLICE) é um novo esquema que pode satisfazer o fluxo de demanda entre os nós de origem e destino usando um ou mais *slots* de espectro consecutivos. A tecnologia OFDM apresenta soluções viáveis para as principais desvantagens da tecnologia WDM, como por exemplo, sobreposição de canais sem interferência devido à sua propriedade ortogonal [Jinno 2017].

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, por meio de formulações matemáticas ou algoritmos de provisionamento para a resolução do Problema de Roteamento, Modulação e Alocação de Espectro (RMSA- *Routing, Modulation and Spectrum Allocation*). Dentre as alternativas encontra-

das na literatura, 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.

Em [Swaminathan and Sivarajan 2002], uma solução para o problema tradicional de Roteamento e atribuição de comprimento de onda (RWA - *Routing and Wavelength Assignment*) é apresentada com o objetivo de maximizar o número de conexões estabelecidas usando o número mínimo de comprimentos de onda. A principal contribuição do presente trabalho, semelhante à abordagem proposta em [Swaminathan and Sivarajan 2002], entretanto aplicado à EONs, é a proposta de um planejamento de redes por meio da resolução de Max-RMSA, um problema baseado na maximização de demandas estabelecidas a partir de um recurso fixo de rede, em que cada caminho óptico transportará o tráfego relacionado a apenas um par de nós fonte-destino.

Tendo em vista o enfrentamento de uma possível ameaça de exaustão da capacidade da rede [Jinno 2017], devido ao aumento da demanda por convergência de dados, percebe-se a necessidade urgente da otimização do uso dos recursos espectrais da rede. De maneira semelhante, levando-se em consideração a evolução da tecnologia óptica recente, o maior desafio para as EONs é a alocação do espectro de acordo com a capacidade dos enlaces de transmissão e a necessidade de atendimento do tráfego.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 realiza uma revisão bibliográfica e discute os trabalhos relacionados. A Seção 3 detalha o problema RMSA para maximização de tráfego estabelecido. A Seção 4 apresenta as formulações MILPs utilizadas. Os resultados do trabalho desenvolvido, as simulações e seus detalhamentos estão presentes na Seção 5. Por fim, as considerações finais foram expostas na Seção 6.

2. Trabalhos Relacionados

Dentre os vários estudos de planejamento de redes, [Wang et al. 2015] propõe um modelo recursivo, baseado em MILP, para aumentar as implementações de redes existentes ou acelerar o tempo computacional de alocação de recursos para redes mais extensas com maiores demanda de tráfego. Com tal característica, [Wu et al. 2019] disserta sobre duas cadeias teóricas para análise de fatores-chave na utilização do espectro, fundamentada na investigação de impactos na topologia de redes, distribuição de tráfego e sistema de roteamento na gestão do espectro em EONs.

[Zhang et al. 2019] traz como principal produto um algoritmo estruturado para uso de rotas pré-definidas de alocação de espectro em *Maximum Spectrum Completeness* (MCS), a fim assegurar a integridade máxima do espectro na rede e evitar a geração de fragmentos únicos na rota. Em trabalhos como [Oliveira and Fonseca 2019], 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. Diferentemente, o presente trabalho apresenta formulações matemáticas combinadas com a técnica de multiplexação OFDM.

[Santos et al. 2019] propõe um mecanismo de potencialização de agregação de tráfego para redes ópticas elásticas. Especificamente, é realizado um estudo de Transponder de Banda Larga Variável (BVT - *Bandwidth Variable Transponders*) 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 artigo para as simulações foi a NSFNET (*National Science Foundation Network*).

Outra abordagem é observada em [Savva et al. 2019], que apresenta um projeto de gerenciamento de redes com foco em segurança da informação, através do uso de técnicas de escuta e ciência para roteamento e alocação de espectro (RSA - *Routing and Spectrum Allocation*).

Sob diversas técnicas, todos os trabalhos relacionados acima têm como cerne a minimização do índice máximo de *Slots* de Frequência (FS - *Frequency Slot*) 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 a partir de um recurso fixo de rede, trazendo informações importantes de planejamento das EONs e fornecendo novas ferramentas para a projeto destas redes.

3. RMSA para Maximização de Tráfego Atendido

Dado o benefício de uma maior granularidade de espectro, as redes baseadas em OFDM podem usar uma largura de banda variável, tendo $12,5\text{ GHz}$, como sua unidade portadora fundamental, também conhecida como a FS, ou subportadora. O uso de subportadoras ortogonais para transmitir dados permite maior eficiência espectral, não apenas devido à possibilidade de acomodar demandas pequenas sem desperdício, mas também porque as subportadoras ortogonais podem ser alocadas sequencialmente para acomodar demandas de tamanho variável.

Em EONs, os FSs atribuídos a uma demanda são agrupados continuamente e sequencialmente. Tal característica pode ser modelada a partir de restrições nas formulações MILP, como exposto em [Christodoulopoulos et al. 2011, Klinkowski et al. 2011], e conhecidas como restrições de continuidade e contiguidade de FSs em todos os enlaces ao longo da rota escolhida para a conexão.

Se a rede suportar diferentes formatos de modulação, uma nova dimensão será adicionada ao problema e a formulação deverá ser responsável por escolher o formato adequado para cada demanda. Essa escolha leva em consideração a relação entre o uso do espectro e a distância máxima de transmissão a ser suportada pela demanda, antes de atingir os limites aceitáveis de ruído ou QoS (*Quality Of Service*). A Tabela 1 lista três formatos de modulação diferentes e algumas de suas características. Esses valores foram obtidos em [Oliveira and da Fonseca 2017].

As formulações bases utilizadas nesse artigo para solução do problema RMSA foram NPSP (*Non Predefined Shortest Paths*) e PSP (*Predefined Shortest Paths*). A primeira pressupõe que a solução ótima para redes pequenas deve ser atingida através de uma busca completa das rotas de conexão, alocação de *slots* e formatos de modulação. A segunda formulação, por sua vez, tem a mesma função objetivo que a primeira, entretanto,

Tabela 1. Formatos de Modulação.

Formatos de Modulação	Taxa de Símbolo	Distância Máxima (km)	Eficiência Espectral (bit/s/Hz)	Largura de Banda por Portadora (GHz)
16QAM	1/4	500	4	12,5
8QAM	1/3	1000	3	12,5
QPSK	1/2	2000	2	12,5

há um conjunto de caminhos predefinidos para o roteamento. Devido a esta propriedade, a formulação PSP reduz, significativamente, a complexidade computacional da formulação NPSP, tornando-se viável no estudo de redes de grandes instâncias.

4. Formulações MILP

Uma demanda é definida como uma quantidade de tráfego estático em *Gbits/s* entre pares de origem e destino. Por roteamento adaptável à distância, o tráfego pode ser expresso em número de *slots*, considerando a capacidade (*C*) como o recurso espectral da rede, isto é, o índice máximo de *slot* de frequência a ser ocupado na rede. A topologia de rede física é representada como o grafo $G(N; E)$, na qual *N* representa o conjunto de nós e *E* representa o conjunto de fibras direcionais. A topologia física, a matriz de demanda de tráfego, a capacidade da rede e os formatos de modulação disponíveis são fornecidos como entrada para o problema.

4.1. 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 os pares de origem e destino na rede. Por essa abordagem, a solução para o problema Max-RMSA é capaz de alcançar o resultado ótimo global para uma rede pequena. Foram utilizadas as seguintes notações, parâmetros e variáveis:

4.1.1. Índices

- *d*: Representa a demanda requisitada pela rede;
- *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*.

4.1.2. 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.

4.1.3. 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;
- C : Máximo índice de *slot* possível na rede, isto é, a capacidade da rede.

4.1.4. Variáveis

- AT_d : Variável que indica o quanto da demanda d foi estabelecida;
- 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 ;
- $W_{dk,dt}$: Variável binária que é igual a 1, se a frequência inicial para a demanda $dk \in D$, isto é, o índice do primeiro *slot* atribuído, for menor que para a demanda $dt \in D$, e é 0, caso contrário.

- **Função Objetivo:**

$$\text{Maximizar : } \sum_{d \in D} AT_d; \quad (1)$$

- **Sujeito a:**

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{i,j}^d - \sum_{j:(j,i) \in A} x_{j,i}^d = 1 \quad \forall d \in D : i = u; \quad (2)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{i,j}^d - \sum_{j:(j,i) \in A} x_{j,i}^d = 0 \quad \forall d \in D : i \neq u, \quad i \neq v; \quad (3)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{i,j}^d - \sum_{j:(j,i) \in A} x_{j,i}^d = -1 \quad \forall d \in D : i = v; \quad (4)$$

$$T_d \geq ((AT_d)/(\Omega \cdot \eta_z)) - (1 - E_{z,d}) \cdot \chi \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in M; \quad (5)$$

$$T_d \leq ((AT_d)/(\Omega \cdot \eta_z)) + 1 + (1 - E_{z,d}) \cdot \chi \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in M; \quad (6)$$

$$\sum_z E_{z,d} = 1 \quad \forall d \in D; \quad (7)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{i,j}^d \cdot d_{i,j} \leq \sum_z d_z \cdot E_{z,d} \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in M; \quad (8)$$

$$AT_d \leq V_{u,v}^d, \quad \forall d \in D, \quad u, v \in A; \quad (9)$$

$$S_d + T_d \leq C, \quad \forall d \in D; \quad (10)$$

$$W_{dt,dk} + W_{dk,dt} \leq 1 \quad \forall dk, dt \in D : dt \neq dk; \quad (11)$$

$$W_{dt,dk} + W_{dk,dt} \geq [(x_{i,j}^{dt} + x_{i,j}^{dk} - 1)] \quad \forall (i,j) \in A \quad \forall dk, dt \in D : dt \neq dk; \quad (12)$$

$$W_{dt,dk} + W_{dk,dt} \geq [(x_{j,i}^{dt} + x_{j,i}^{dk} - 1)] \quad \forall (j,i) \in A \quad \forall dk, dt \in D : dt \neq dk; \quad (13)$$

$$S_{dt} + T_{dt} + G \leq S_{dk} + \chi \cdot [1 - W_{dt,dk}] \quad \forall dk, dt \in D : dt \neq dk; \quad (14)$$

$$S_{dk} + T_{dk} + G \leq S_{dt} + \chi \cdot [1 - W_{dk,dt}] \quad \forall dk, dt \in D : dt \neq dk; \quad (15)$$

A Equação (1) denota a função objetivo, que visa maximizar as demandas estabelecidas. As Equações (2) a (4) são as restrições de conservação dos fluxos de tráfego na topologia física. O número de *slots* para o caminho óptico é fornecido por (5) e (6), considerando um formato de modulação atribuído para atender determinada demanda.

Um formato de modulação é atribuído a um caminho óptico que satisfaça as restrições de (7) a (8), o que implica que um único formato de modulação seja empregado em um caminho óptico e sua limitação de distância deve ser satisfeita. A restrição (9) limita a função objetivo.

A Equação (10) é a capacidade da rede, que por sua vez, limita a quantidade de *slots* a serem utilizados. De (11) a (13) são tratadas as restrições de continuidade para evitar sobreposição de frequências. Por fim, as equações (14) e (15) são restrições de contiguidade, que determinam o uso da banda de guarda, se necessário.

4.2. Formulação PSP

Para redes pequenas, com cerca de 6 nós, a formulação NPSP MILP pode ser resolvida de forma exata, porém, para redes maiores, são necessárias algumas simplificações. 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, ou seja, os caminhos são escolhidos pelo algoritmo visto em [Yen 1971].

Dado o grafo G e o conjunto de demandas D , o 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 predefinidos P_d . Com essa abordagem é possível obter uma solução viável para o MILP para redes grandes, mas a solução ótima não é garantida. A notação, parâmetros e variáveis usadas na formulação PSP são descritas nas subseções abaixo.

4.2.1. Parâmetros

- P_d : Conjunto de k caminhos candidatos para uma demanda d ;
- $\mathcal{P} = \cup_d P_d$: Conjunto total de caminhos candidatos para o conjunto de demandas $D, d \in D$.

4.2.2. Variáveis

- x_p^d : Variável binária que assume valor 0, se o caminho p não é utilizado e 1, se p é utilizado;

Dessa forma, se $\exists p \in P_{d_k}$ and $\exists q \in P_{d_t}$ tal que $p \cap q \neq \emptyset$, então para cada $d_t, d_k \in D$ e todo $p, q \in \mathcal{P}$. Isto posto, para a formulação PSP, a Equação (16) substitui as equações de (2) a (4) da formulação anterior, e determina qual k caminho será escolhido para o estabelecimento da demanda. Bem como, as equações de (17) a (19) são utilizadas no lugar das equações de (11) a (15), que correspondem às restrições de contiguidade e continuidade para o caso particular PSP.

$$\sum_{p \in P_d} x_p^d = 1 \quad \forall d \in D; \quad (16)$$

$$W_{dt,dk} + W_{dk,dt} = 1 \quad \forall dk, dt \in D : dt \neq dk; \quad (17)$$

$$S_{dt} + T_{dt} + G - S_{dk} \leq \chi \cdot [1 - W_{dt,dk} + 2 - x_p^{dk} - x_q^{dt}] \quad \forall p, q \in P_d \quad \forall dk, dt \in D : dt \neq dk; \quad (18)$$

$$S_{dk} + T_{dk} + G - S_{dt} \leq \chi \cdot [1 - W_{dk,dt} + 2 - x_p^{dt} - x_q^{dk}] \quad \forall p, q \in P_d \quad \forall dk, dt \in D : dt \neq dk; \quad (19)$$

5. Simulações e Resultados

Simulações foram executadas para uma rede com seis nós, como pode ser visto na Figura 1 (a). Para redes moderadamente grandes, foi utilizado o Modelo de rede NSFNET, ilustrado na Figura 1 (b). 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 onda é definida para um *slot*. Supõe-se três formatos de modulação disponíveis ($\bar{M} = 3$) para os MILPs. A eficiência espectral de cada formato de modulação, η_z , é definida como $\eta_1 = 2$, $\eta_2 = 4$, $\eta_3 = 8$ bits/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 Gbits/s para todos os pares de nós existentes na rede, ou seja, $V_{u,v}^d = 100$ Gbits/s, $u \neq v$.

Para realizar a otimização proposta e avaliar a sua eficácia, as formulações MILP PSP e NPSP foram resolvidas pelo IBM ILOG CPLEX v.11.0 [ILOG, Inc 2018], 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.

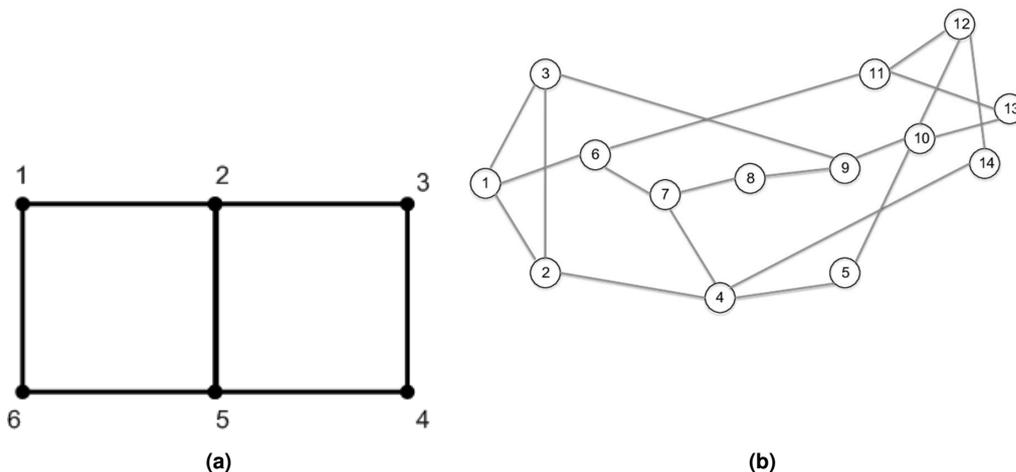


Figura 1. (a) Modelo de Rede de 6 nós. (b) Modelo de rede NSFNET

5.1. Redes Pequenas

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

Com base na veracidade desses 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-RSA é um problema de tempo polinomial não determinístico (NP-hard) [Jinno et al. 2009].

Tabela 2. Valores da função objetivo de (1) 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
GAP %	0	0.28	0	0.29	0

Tabela 3. 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

5.1.1. Comparação de Desempenho e Análise das Demandas Estabelecidas

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. A Figura 2 ilustra os resultados para as formulações NPSP e PSP MILP, respectivamente, no qual observa-se dois gráficos de barras em que o número de demandas estabelecidas para diferentes intervalos da taxa de tráfego estabelecida (ETR - *Established Traffic Rate*) é representado pelas barras para quatro valores de C . Os intervalos de ETR são [0% - 25%), [25% - 50%), [50% - 75%), [75% - 100%) e 100%. Para exemplificar, toma-se $C = 10$ na formulação NPSP (Figura 2(a)), 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 [25% - 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 Figura 2 (a), que para $C \geq 6$, a maioria das demandas de tráfego são totalmente estabelecidas. Por outro lado, para $C = 4$, muitas demandas estão no intervalo ETR mais baixo (entre 0 e 25%). Resultados semelhantes foram encontrados para o PSP [$k = 2$], como visto na Figura 2 (b). 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 2.

5.1.2. Limite de Taxa de Demandas Estabelecidas e de Volume de Tráfego Estabelecido

A Figura 3 mostra a razão entre tráfego estabelecido e tráfego demandado (em preto) e a razão entre demandas estabelecidas e número de demandas requisitadas (em cinza). Ambas as grandezas foram expressas em função da capacidade da rede, C . Quando $C = 12$, pode-se observar que, para NPSP (Figura 3 (a)) ou PSP [$K = 2$] (Figura 3 (b)), 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.

5.2. Redes Grandes

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

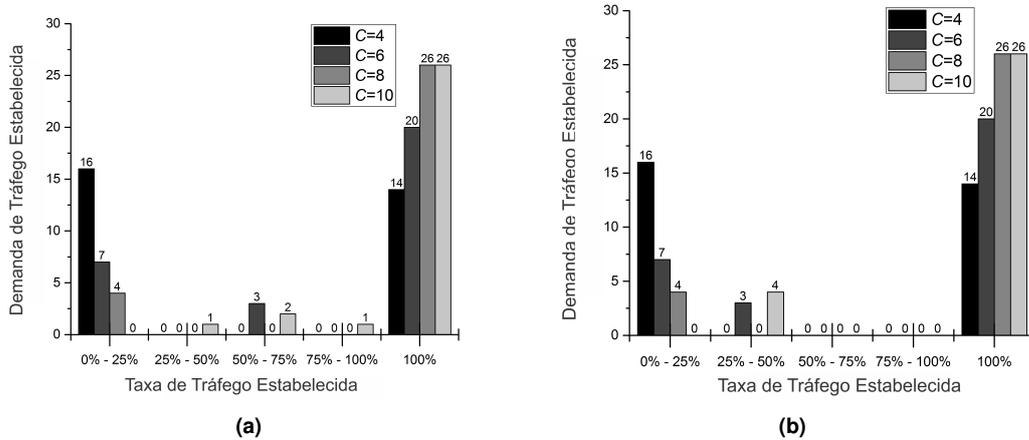


Figura 2. Número de demandas estabelecidas d organizadas em percentuais β em relação a $V_{u,v}^d$. Para $0\% \leq \beta < 25\%$, $25\% \leq \beta < 50\%$, $50\% \leq \beta < 75\%$, $75\% \leq \beta < 100\%$ e $\beta = 100\%$ para a rede de 6 nós. (a) Formulação NPSP, (b) Formulação PSP $k=2$.

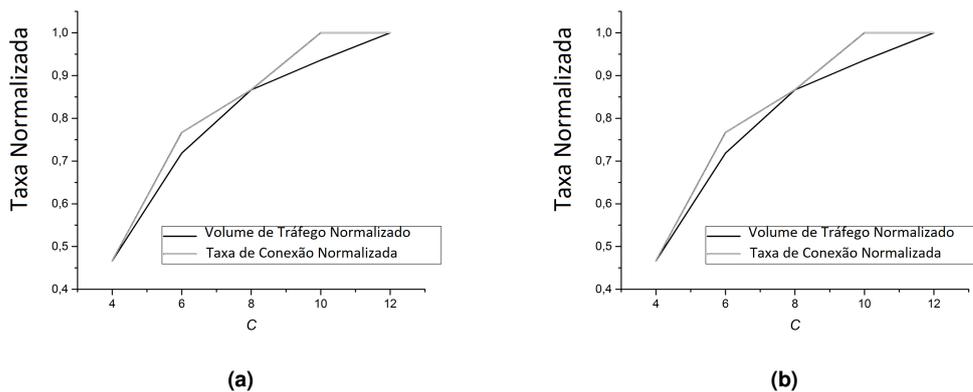


Figura 3. Em preto, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em cinza, taxa de conexão normalizada com relação a C para a rede de 6 nós. (a) NPSP, (b) PSP [$k = 2$].

moderadamente grande, composta por 14 nós e 21 enlaces bidirecionais (Figura 1 (b)). 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 a 12h. Foram usados $k = 1$ ou $k = 2$ para encontrar os caminhos predefinidos de cada demanda. Igualmente, as simulações foram realizadas para três formatos de modulação expostos na Tabela 1 e para uma matriz estática de 100 *Gbits/s* de tráfego para todos os pares de origem e destino.

Embora a complexidade do Max-RWA tenha sido contornada com o uso da formulação PSP, o mesmo não pode ser observado para o Max-RMSA. Tendo em vista o número de nós e de enlaces relativamente pequeno 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.

Alguns resultados para a simulação com o NSFNET são mostrados nas Tabelas 4 e 5. A partir da leitura destas tabelas pode-se concluir que: a formulação PSP com $k = 2$ resultou na saturação da curva de taxa de conexão e atendimento de demandas em $C = 70$. Considerando que o tráfego total na rede é $N * (N - 1) * 100 \text{ Gbits/s}$, onde N é o número de nós na rede, então, para $N = 14$, tem-se 18200 Gbits/s como tráfego total. Esse valor é alcançado para $C = 70$ com $k = 2$, confirmado pelos dados exibidos na Fig. 4. 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.

Tabela 4. Valores da função objetivo de (1) 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. 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
$k = 1$	3608,58	3608,38	3609,23	3608,09

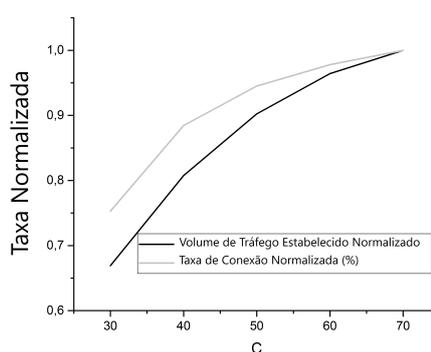


Figura 4. Em preto, volume de tráfego estabelecido normalizado em relação a C . Em cinza, a taxa de conexão normalizada em relação a C e para a rede NSFNET com $k = 2$.

6. Conclusão

A formulação MILP estudada neste trabalho permite a escolha do formato de modulação adequado para cada demanda, a fim de acomodar a demanda de tráfego sujeita a

recursos espectrais limitados. Primeiro, foram realizadas simulações entre as formulações MILP NPS e PSP, em redes de 6 nós. Em seguida, tais resultados foram extrapolados para redes moderadamente grandes, tendo em vista os resultados significativamente próximos da solução ótima global para a rede de pequena instância fixada.

Após a investigação dos resultados obtidos, percebeu-se que a formulação PSP traz valores razoáveis de demandas estabelecidas para redes moderadamente grandes, considerando que se trata de um problema NP-hard. Além disso, pode ser resolvida em tempo de simulação viável com ferramentas computacionais relativamente simples. Por fim, propõe-se uma nova abordagem de planejamento de redes, que pode extrair dados valiosos para o projeto de futuras EONs, em geral.

Para pesquisas futuras pretende-se realizar análise de imparidades, bem como, estudo do formato de modulação e novas heurísticas para planejamento de redes de *backbone*. Além disso, espera-se que, ao considerar a operação dinâmica de EONs, benefícios adicionais sejam obtidos com a implantação de redes flexíveis.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPESB (Proc. BOL0285/2019) e à Universidade Federal da Bahia pelo apoio educacional. Este trabalho é parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais e, quando aplicável, cofinanciado por fundos comunitários no âmbito do projeto UIDB/EEA/50008/2020; e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do Projeto N. 309335/2017-5.

Referências

- Christodoulopoulos, K., Tomkos, I., and Varvarigos, E. A. (2011). Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks. *Journal of Lightwave Technology*, 29(9):1354–1366.
- Cisco public (2019). Cisco Visual Networking Index: Forecast and trends, 2017–2022. White paper.
- ILOG, Inc (2018). ILOG CPLEX: High-performance software for mathematical programming and optimization. See <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer>.
- Jinno, M. (2017). Elastic optical networking: Roles and benefits in beyond 100-gb/s era. *Journal of Lightwave Technology*, 35(5):1116–1124.
- Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y., and Matsuoka, S. (2009). Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE communications magazine*, 47(11):66–73.
- Klinkowski, M., Walkowiak, K., and Jaworski, M. (2011). Off-line algorithms for routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. In *2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks*, pages 1–6.
- Oki, E. and Chatterjee, B. C. (2017). 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.

- Oliveira, H. and Fonseca, N. (2019). 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. SBC.
- Oliveira, H. M. N. S. and da Fonseca, N. L. S. (2017). The coming capacity crunch. In *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, pages 1–6.
- Oner, P. (2016). Routing and spectrum allocation in static fiber optic networks. In *master of science - graduate school of engineering and science of bilkent university*.
- Ruiz, L., González, I., Durán, R. J., d. Miguel, I., Merayo, N., Aguado, J. C., Fernández, P., Lorenzo, R. M., and Abril, E. J. (2017). 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.
- Santos, I. G., Hiago, L., Fontinele, A., Monteiro, J. A. S., Soares, A., and Campelo, D. (2019). 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. SBC.
- Savva, G., Manousakis, K., and Ellinas, G. (2019). 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.
- Swaminathan, M. D. and Sivarajan, K. N. (2002). Practical routing and wavelength assignment algorithms for all optical networks with limited wavelength conversion. In *2002 IEEE International Conference on Communications. Conference Proceedings. ICC 2002 (Cat. No.02CH37333)*, volume 5, pages 2750–2755 vol.5.
- Wang, X., Brandt-Pearce, M., and Subramaniam, S. (2015). 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.
- Wu, H., Zhou, F., Zhu, Z., and Chen, Y. (2019). Spectrum management in elastic optical networks: Perspectives of topology, traffic and routing. In *2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*, pages 1–9.
- Yen, J. Y. (1971). Finding the k shortest loopless paths in a network. *management Science*, 17(11):712–716.
- Zhang, J., Yu, C., Luc, L., Liu, X., and Shen, J. (2019). 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.