

Virtualização de Redes Ópticas Elásticas: Formulação Linear Considerando o *Grooming* de Tráfego

K. D. R. Assis, L. A. J. Mesquita, R. C. Almeida Jr, T. Moura e M. S. Alencar

Resumo - As Redes Ópticas Elásticas (*Elastic Optical Networks* - EON) com virtualização, podem ser usadas como uma tecnologia de transporte promissora. Logo, este artigo propõe duas formulações de Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP) para o planejamento da virtualização de EONs, uma considerando *grooming* e outra sem *grooming*. As formulações desenvolvidas usam as restrições de formato de modulação para garantir a eficiência do projeto em termos de largura de banda para uma rede física sujeita a várias Topologias Virtuais Ópticas (*Virtual Optical Networks*-VONs). A abordagem com *grooming* soluciona o problema de Projeto da Topologia Virtual (*Virtual Topology Design* - VTD) e Problema de Projeto da Topologia Física (*Physical Topology Design* - PTD) conjuntamente. Diferentemente do planejamento sem *grooming* que soluciona apenas o VTD. Diante disso, mostra-se que a abordagem com *grooming* pode fornecer bons resultados, já que resolve o problema de uma forma completa, quando comparado à abordagem sem *grooming*, que resolve o problema de planejamento de forma parcial.

Abstract—An Elastic Optical Network (EON) can be used as a transport technology for virtualization of optical networks. Two Mixed-Integer Linear Programming (MILP) formulations (*grooming* and *non-grooming* approaches) are proposed in this paper, to design EON networks for different Virtual Optical Networks (VON). The formulations use the concept of modulation format to guarantee efficiency in terms of bandwidth for a physical substrate subject to several virtual topologies. The proposed *grooming* approach jointly solves the multiple virtual topology design and physical topology design problems. On the other hand, the *non-grooming* approach solves only the physical topology design. It is shown that the *grooming* approach can provide good results, since it solves the problem for a complete design when compared to the design without grooming.

I. INTRODUÇÃO

O problema do projeto de topologia virtual, ou VTD, em redes ópticas vem sendo estudado há um longo tempo [1]. Esse problema tornou-se mais complexo com a possibilidade de ter várias topologias virtuais ópticas (VONs) sobre uma mesma topologia física. Este processo é conhecido como virtualização de rede, ocorrendo quando várias topologias virtuais independentes compartilham recursos da topologia física [2, 3],

Karcus D. R. Assis, Leonardo A. J. Mesquita, Thiale Moura e Marcelo S. Alencar estão com o Departamento de Eng. Elétrica da Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, Brasil, e-mail: karcus.assis@ufba.br

Raul C. Almeida Jr está com o Departamento de Eng. Eletrônica da Universidade Federal de Pernambuco., Recife, Brazil.

ou seja, são mapeadas na topologia física. Normalmente, o problema de mapeamento de VONs apresenta as seguintes características na maioria dos trabalhos da literatura: 1) as requisições por VONs são pré-conhecidas; e 2) os recursos dos nós e enlaces da topologia física são infinitos.

A aplicação da virtualização de redes passou a permitir que os componentes de uma rede física partitionassem sua capacidade de maneira a realizar simultaneamente múltiplas funções, estabelecendo infraestruturas lógicas distintas e mutuamente isoladas. Ou seja, assim como a virtualização de sistemas, tradicionalmente usada em sistemas computacionais, provê o compartilhamento dos recursos de um nó computacional por múltiplos sistemas, a virtualização de redes provê um método para que múltiplas arquiteturas de rede heterogêneas compartilhem o mesmo substrato físico - neste caso, componentes de uma rede como roteadores, comutadores, links físicos etc.

Este artigo apresenta um estudo, através de formulações MILPs, de como planejar o mapeamento de VONs sobre uma rede óptica elástica [6] (Comprimentos de onda de grade flexível em vez de uma grade fixa em 50GHz). O estudo é feito levando em consideração o problema de Roteamento e Alocação de Espectro (Routing and Spectrum Allocation-RSA) para cada VON e obedecendo as restrições de continuidade e contiguidade para cada VON e entre as VONs [3–5], sempre com o objetivo de minimizar o espectro usado. Restrições de formato de modulação também são usadas. Diferentemente de outros trabalhos da literatura, uma MILP considera o *grooming* de tráfego para cada VON e uma outra formulação MILP sem *grooming* é usada para efeitos de comparação. As duas MILPs não têm caminhos pré-determinados (normalmente dados pelo algoritmo de yen). Logo, a formulação tende a encontrar as rotas adequadas e achar o valor ótimo da função objetivo.

O presente artigo está organizado da seguinte maneira: Alguns trabalhos relacionados são apresentados na Seção II; as formulações do MILPs são abordadas na Seção III; simulações e resultados são apresentados na Seção IV; finalmente, o artigo é concluído na Seção V.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Virtualização de redes ópticas elásticas é definida como a composição de múltiplas VONs isoladas coexistindo simultaneamente sobre o mesmo substrato físico [2–5]. A EON [7] é uma tecnologia de transporte adequada para virtualização devido à possibilidade de obter um mapeamento eficiente de recursos virtuais para o substrato físico compartilhado.

Assim, convém utilizá-la ao implementar a virtualização de rede, para assim fazer um planejamento adequado. Os autores em [2] propõem uma estratégia de mapeamento através de uma formulação MILP com rotas pré-definidas e restrições de formato de modulação. Entretanto, a formulação é implementada sem *grooming*. Recentemente, [9] e [10] também propuseram formulações MILPs para o problema de virtualização em redes ópticas, mas eles também não estudam a abordagem com *grooming*.

As abordagens MILP propostas neste artigo também são baseadas em RSA adaptável à distância (referido como *Routing, Modulation Spectrum Assignment - RMSA*), que é concebido como o esquema operacional mais apropriado para EONs uma vez que considera que diferentes caminhos ópticos podem ser estabelecidos usando diferentes formatos de modulação, de acordo com requisitos da taxa de erro de bit (referido como BER - *Bit Error Rate*) e restrições de camada física. A principal contribuição deste trabalho é assumir *grooming* em cada VON e a rota para cada demanda (sobre topologias virtuais e físicas) é determinada pelas equações do balanço de fluxo na formulação. Desta forma, rotas pré-calculadas não são necessárias.

A análise em termos de número máximo de índice de slots de espectro utilizados, realizada neste trabalho, verifica que a MILP com *grooming* encontra bons resultados em comparação com a abordagem sem *grooming*.

III. FORMULAÇÕES MILPs

Pode ser visto nos trabalhos relacionados que algumas formulações MILPs foram propostas para resolver o problema de virtualização em relação à EON, mas, do que é de conhecimento destes autores, nenhuma foi proposta para lidar com a abordagem com *grooming*. Este artigo introduz uma formulação MILP capaz de fornecer a solução ótima para várias matrizes de demanda de tráfego das VONs que requerem alocação simultânea levando em consideração o *grooming*.

Nesta seção, a primeira MILP é usada para resolver o projeto completo, VTD e PTD simultaneamente, ou seja, considerando *grooming*. Já a segunda MILP resolve apenas o PTD, ou seja, sem *grooming*. As notações, parâmetros e variáveis são descritos nas subseções a seguir.

A. Notação

- s e d denotam os nós de origem e destino das demandas de tráfego D na rede, respectivamente.
- i e j denotam nós de origem e destino de um caminho óptico de largura de banda variável, respectivamente.
- m e n denotam pontos finais de um enlace físico na rede.
- z denota o tipo de formato de modulação de um conjunto de M formatos de modulação disponíveis.
- t denota a VON de um conjunto T de topologias virtuais.

B. Dados

- $G = (N, E)$: Um gráfico com um conjunto de nós N em que cada nó é associado com um nó da rede física, e um conjunto de enlaces E em que cada enlace está associada a um enlace físico da rede.

- $\Lambda^{sd,t}$: Elemento de matriz de tráfego, usado para denotar a intensidade do tráfego (em Gbps) do nó de origem s para o nó de destino d na topologia virtual t .
- FGB : Banda de Guarda do Filtro (*Filter Guard Band - FGB*), que representa a banda de guarda entre dois caminhos ópticos no espectro.
- Largura de banda do slot: Ω .
- d_{mn} : Distância entre os nós m e n na topologia física.
- Eficiência espectral do formato de modulação z : η_z , em que $z \in 1, \dots, M$.
- Alcance máximo para um caminho óptico usando o formato de modulação z : d_z , em que $z \in 1, \dots, M$.

C. Variáveis

- $v^{ij,t}$: largura de banda de um caminho óptico elástico do nó i para nó j na topologia virtual t . (Gbps).
- $\lambda_{ij}^{sd,t}$: Quantidade de fluxo de tráfego (em Gbps) da fonte s para destino d que é roteado no caminho óptico do nó i para nó j na topologia virtual t .
- $b_{ij,t}$: Variável binária usada para indicar se existe um enlace virtual t entre um par de nós.
- $p^{ij,t}$: Uma variável inteira que quantifica a largura de banda (em termos de número de slots) de um caminho óptico elástico do nó i para nó j na topologia física para topologia virtual t .
- $P_{mn}^{ij,t}$: Quantidade de largura de banda que um caminho óptico do nó i para nó j que usa em um enlace de fibra $m-n$ (em termos de número de slots) para topologia virtual t .
- $A_{mn}^{ij,t}$: Uma variável binária para indicar se o caminho óptico do nó i para nó j em t passa pelo enlace $m-n$. $A_{mn}^{ij,t}$ é igual a 1 se $P_{mn}^{ij,t} > 0$; é igual a 0 se $P_{mn}^{ij,t} = 0$.
- Indicador de formato de modulação $e_{ij,t}^z$: Uma variável binária que indica se um caminho óptico elástico do nó i para nó j emprega o formato de modulação z em t .
- $S_{ij,t}$: Uma variável inteira que denota a frequência de início (primeiro slot) para o caminho óptico $i-j$ em t .
- $W_{ij}^{ku,t}$: Uma variável binária que é igual a 1 se a frequência inicial do caminho óptico $i-j$ é menor que a frequência inicial do caminho óptico $k-u$. (i.e., $S_{ij,t} < S_{ku,t}$) e 0 de outra forma.
- C : Índice máximo de slots da faixa espectral utilizada em qualquer enlace físico.

A função objetivo é minimizar o índice máximo de slots de espectro utilizado, C .

D. Abordagem com Grooming de Tráfego

Nesta subseção, a formulação com restrições do VTD e PTD é apresentada. O VTD leva em consideração o *grooming* de tráfego.

- **Função Objetivo:**

$$\text{Minimizar} : C \quad (1)$$

- **Sujeito a:**

Restrições para VTD:

$$\sum_j \lambda_{ij}^{sd,t} - \sum_j \lambda_{ji}^{sd,t} = \begin{cases} \Lambda^{sd,t} & \text{if } i = s \\ \Lambda^{sd,t} & \text{if } i = d \\ 0 & \text{if } i \neq d \end{cases} \quad (2)$$

$$\forall (s, d) \in D, t \in T$$

$$\lambda_{ij}^{sd,t} \leq b_{ij,t} \Lambda^{sd,t} \quad \forall (i, j), (s, d) \in D, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd,t} = v^{ij,t} \quad \forall (i, j), t \in T \quad (4)$$

Restrições para PTD:

$$C \geq s^{ij,t} + p^{ij,t} \quad \forall (i, j), t \in T \quad (5)$$

$$p^{ij,t} \geq \left(\frac{v^{ij,t}}{\Omega \cdot \eta_z} \right) - (1 - \epsilon_z^{ij,t}) \cdot \chi \quad \forall (i, j), t \in T, z \in M \quad (6)$$

$$p^{ij,t} \leq \left(\frac{v^{ij,t}}{\Omega \cdot \eta_z} \right) + 1 + (1 - \epsilon_z^{ij,t}) \cdot \chi \quad \forall (i, j), t \in T, z \in M \quad (7)$$

$$\sum_z \epsilon_z^{ij,t} \leq 1 \quad \forall (i, j), t \in T \quad (8)$$

$$p^{ij,t} \leq \chi \cdot \sum_z \epsilon_z^{ij,t} \quad \forall (i, j), t \in T \quad (9)$$

$$\frac{v^{ij,t}}{\chi} \leq \sum_z \epsilon_z^{ij,t} \leq \chi \cdot v^{ij,t} \quad \forall (i, j), t \in T \quad (10)$$

$$\sum_n P_{mn}^{ij,t} - \sum_n P_{nm}^{ij,t} = \begin{cases} p^{ij,t} & m = i \\ -p^{ij,t} & m = j \\ 0 & m \neq i, j \end{cases} \quad (11)$$

$$\forall (i, j), t \in T$$

$$A_{mn}^{ij,t} \geq P_{mn}^{ij,t} / \chi \quad \forall (i, j), t \in T, (m, n) \in E \quad (12)$$

$$A_{mn}^{ij,t} + A_{ml}^{ij,t} \leq 1 \quad \forall (m, n) \in E \neq (m, l) \in E \quad (13)$$

$$\sum_{mn} A_{mn}^{ij,t} \cdot d_{mn} \leq \sum_z d_z \cdot \epsilon_z^{ij,t} \quad \forall (i, j), t \in T \quad (14)$$

$$[(A_{mn}^{ij,t_p} + A_{mn}^{ku,t_q}) - 1] \leq W_{ku,t_q}^{ij,t_p} + W_{ij,t_p}^{ku,t_q} \leq 1 \quad (15)$$

$$S^{ij,t_p} + p^{ij,t_p} + FGB \leq S^{ku,t_q} + \chi \cdot [1 - W_{ku,t_q}^{ij,t_p}] \quad (16)$$

$$\forall (i, j), t_p \in T, (k, u), t_q \in T, (i, j, t_p) \neq (k, u, t_q)$$

$$S^{ku,t_q} + p^{ku,t_q} + FGB \leq S^{ij,t_p} + \chi \cdot [1 - W_{ij,t_p}^{ku,t_q}] \quad (17)$$

$$\forall (i, j), t_p \in T, (k, u), t_q \in T, (i, j, t_p) \neq (k, u, t_q)$$

A equação 1 é a função objetivo da formulação MILP, que, juntamente com a restrição 5, é delineada para minimizar o número máximo de slots de espectro usados entre todas as demandas de todas VONs sobre qualquer enlace físico.

A conservação do fluxo de tráfego nos nós de um enlace virtual em t é expressa pela restrição 2. O componente do tráfego oferecido para um caminho óptico devido a um par de nós pode ser, no máximo, a quantidade de fluxos de tráfego entre o par de nós. Este fato está representado pela restrição 3.

A soma do tráfego devido a todos (s, d) pares de nós em t que são roteados através do enlace virtual $i - j$ está descrita na restrição 4. As restrições de 6 a 10 garantem que um único formato de modulação seja atribuído a qualquer enlace virtual na rede. A conservação de slots nos nós dos enlaces físicos da rede em uma topologia virtual t é expressada pela restrição 11. Observe que um enlace virtual que passa através de um nó da rede física tem que ser totalmente comutado para um único enlace de saída.

A restrição 12 é responsável por definir o valor de $A_{mn}^{ij,t}$, enquanto que a restrição 13 garante que um enlace virtual seja encaminhado apenas em uma das fibras de saída do nó. A restrição 14 limita a distância percorrida pelo caminho óptico de acordo com o limite imposto pelo formato de modulação atribuído no processo de otimização.

A variável binária W_{ku,t_q}^{ij,t_p} é definida de modo que seja igual a 1 se a frequência inicial do enlace virtual $i - j$ em t_p é menor que a frequência inicial do enlace virtual $k - u$ em t_q (i.e., $S^{ij,t_p} < S^{ku,t_q}$) e 0 caso contrário. A Equação 15 garante que, se um enlace virtual $i - j$ em t_p e $k - u$ em t_q compartilhar qualquer fibra na rede, ex. $m - n$, então $A_{mn}^{ij,t_p} = A_{mn}^{ku,t_q} = 1$ e, portanto, $W_{ku,t_q}^{ij,t_p} + W_{ij,t_p}^{ku,t_q} = 1$, que afirma que W_{ku,t_q}^{ij,t_p} ou W_{ij,t_p}^{ku,t_q} é igual a um e o outro é igual a zero. Portanto, juntamente com as equações 16 e 17, pode-se garantir que os espectros de diferentes caminhos ópticos de todas as VONs não se sobreponham, no qual FGB é o filtro de banda de guarda assumido. Por outro lado, se os caminhos ópticos $i - j$ in t_p e $k - u$ in t_q não compartilham nenhuma fibra na rede, então A_{mn}^{ij,t_p} e A_{mn}^{ku,t_q} nunca podem ser igual a um ao mesmo tempo, no qual, pelas restrições 16 e 17, permitem que W_{ku,t_q}^{ij,t_p} e W_{ij,t_p}^{ku,t_q} ambas podem ser igual a zero. Portanto, não há sobreposição de espectro para os caminhos ópticos, como esperado.

E. Abordagem sem Grooming de Tráfego

Esta subseção apresenta a formulação sem considerar o grooming de tráfego. Observa-se que duas grandes mudanças são feitas em relação à formulação anterior: 1) As restrições de VTD são eliminadas. 2) Alterar todos os índices de $(i - j)$ para $(s - d)$, pois, os enlaces virtuais são obtidos diretamente da matriz de tráfego. Portanto, as restrições de 18 a 30 são

semelhantes às anteriores e a função objetivo é a mesma (equação 1).

Restrições para PTD:

$$C \geq s^{sd,t} + p^{sd,t} \quad \forall (s, d), t \in T \quad (18)$$

$$p^{sd,t} \geq \left(\frac{\Lambda^{sd,t}}{\Omega \cdot \eta_z} \right) - (1 - \epsilon_z^{sd,t}) \cdot \chi \quad \forall (s, d), t \in T, z \in M \quad (19)$$

$$p^{sd,t} \leq \left(\frac{\Lambda^{sd,t}}{\Omega \cdot \eta_z} \right) + 1 + (1 - \epsilon_z^{sd,t}) \cdot \chi \quad \forall (s, d), t \in T, z \in M \quad (20)$$

$$\sum_z \epsilon_z^{sd,t} \leq 1 \quad \forall (s, d), t \in T \quad (21)$$

$$p^{sd,t} \leq \chi \cdot \sum_z \epsilon_z^{sd,t} \quad \forall (s, d), t \in T \quad (22)$$

$$\frac{\Lambda^{sd,t}}{\chi} \leq \sum_z \epsilon_z^{sd,t} \leq \chi \cdot \Lambda^{sd,t} \quad \forall (s, d), t \in T \quad (23)$$

$$\sum_n P_{mn}^{sd,t} - \sum_n P_{nm}^{sd,t} = \begin{cases} p^{sd,t} & m = s \\ -p^{sd,t} & m = d \\ 0 & m \neq s, d \end{cases} \quad (24)$$

$$\forall (s, d), t \in T$$

$$A_{mn}^{sd,t} \geq P_{mn}^{sd,t} / \chi \quad \forall (s, d), t \in T, (m, n) \in E \quad (25)$$

$$A_{mn}^{sd,t} + A_{ml}^{sd,t} \leq 1 \quad \forall (s, d), t \in T, (m, n) \in E \neq (m, l) \in E \quad (26)$$

$$\sum_{mn} A_{mn}^{sd,t} \cdot d_{mn} \leq \sum_z d_z \cdot \epsilon_z^{sd,t} \quad \forall (s, d), t \in T \quad (27)$$

$$\left[(A_{mn}^{sd,t_p} + A_{mn}^{ku,t_q}) - 1 \right] \leq W_{ku,t_q}^{sd,t_p} + W_{sd,t_p}^{ku,t_q} \leq 1 \quad (28)$$

$$\forall (s, d), t_p \in T, (k, u), t_q \in T, (s, d, t_p) \neq (k, u, t_q), (m, n) \in E$$

$$S^{sd,t_p} + p^{sd,t_p} + G \leq S^{ku,t_q} + \chi \cdot \left[1 - W_{ku,t_q}^{sd,t_p} \right] \quad (29)$$

$$\forall (s, d), t_p \in T, (k, u), t_q \in T, (s, d, t_p) \neq (k, u, t_q)$$

$$S^{ku,t_q} + p^{ku,t_q} + G \leq S^{sd,t_p} + \chi \cdot \left[1 - W_{sd,t_p}^{ku,t_q} \right] \quad (30)$$

$$\forall (s, d), t_p \in T, (k, u), t_q \in T, (s, d, t_p) \neq (k, u, t_q)$$

IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para testar a eficiência das formulações MILPs da Seção III, simulações foram executadas para a rede com 4 nós ilustrados na Figura 1. A largura do slot, Ω , está definido como 12.5 GHz e a banda de guarda, G , também é definida como 12.5 GHz, ou seja 1 slot na formulação. Assumiu-se a disponibilidade de 3 formatos de modulação ($M = 3$). A eficiência espectral, η_z , é definido como $\eta_1 = 1$, $\eta_2 = 4$ e $\eta_3 = 8$ bit/s/Hz para cada z formato de modulação. O alcance máximo de um caminho óptico para cada formato de modulação z é $d_1 = 3$, $d_2 = 2$ e $d_3 = 1$ salto. Três VONs sobre uma topologia física foram simuladas como três matrizes de tráfego $|\Lambda^{sd,t}|$ para $t = 1, 2, 3$. Cada nó envia 100 Gbps para todos os outros nós, isto é $\Lambda^{sd,t} = 100$ Gbps. As simulações foram realizadas usando as formulações MILPs com e sem *grooming* e com $M = 1$ ou $M = 3$ formatos de modulação. A simulação das MILPs usou o IBM ILOG CPLEX [11] em um processador Intel i7 3.6GHz com 32GB de RAM.

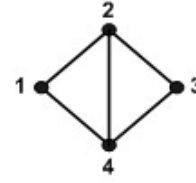


Fig. 1: Rede com 4 nós usada para simulações

1) *O índice máximo de slots*: A tabela abaixo mostra o resultado. A formulação MILP com *grooming* teve um melhor desempenho e foi capaz de minimizar o número máximo de slots sobre os enlaces da rede. Esses resultados são esperados, pois o *grooming* agrega o tráfego para alguns pares fonte-destino, evitando a necessidade de $N \cdot (N - 1)$ conexões. Um bom desempenho com 3 formatos de modulação também foi obtido, evidenciando que as restrições de formato de modulação devem ser utilizados nos problemas que envolvem redes EON. Entretanto, muito autores não a consideram.

TABLE I: Índice máximo de slots em relação ao número de Formatos de Modulação (MF), abordagem com *grooming* e sem *Grooming*

Número de MF	Índice Máximo de Slot, C	
	Com <i>Grooming</i>	Sem <i>Grooming</i>
$M = 1$	21	24
$M = 3$	7	11

2) *O número de transceptores ópticos*: Já o custo na rede é concentrado principalmente nos transceptores ópticos. O número de transceptores usados na formulação com *grooming* pode ser reduzido pela agregação cuidadosa de fluxos de tráfego em caminhos ópticos. Desta forma, a Fig. 2 mostra o número de transceptores ópticos usados com os resultados da Tabela 1. Verifica-se de maneira imediata a eficiência da abordagem com *grooming* com relação ao custo do transceptores ópticos, já que a estratégia sem *grooming* exige $N \cdot (N - 1)$ transceptores ópticos.

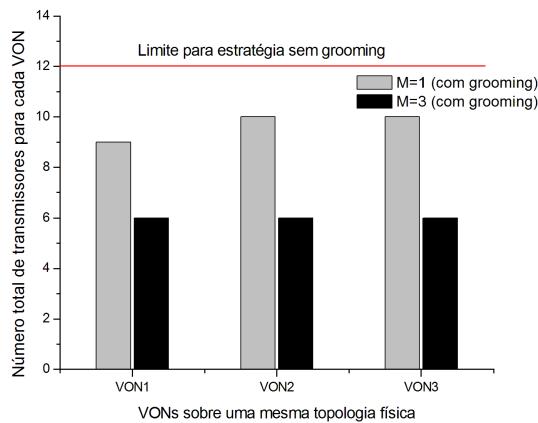


Fig. 2: Number of transceivers.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho estuda o planejamento de redes ópticas elásticas com virtualização. Em primeiro lugar, introduziu-se o problema e desenvolveu-se duas formulações MILPs para resolver problema, uma com *grooming* e outra sem *grooming*. Diferentes formatos de modulação também foram usados como restrições das MILPs e as rotas na topologia física não foram pré-calculadas. Com a formulação com *grooming* é possível economizar recursos (em termos de espectro) o que possibilita a disponibilização de serviços para as demandas de diferentes topologias virtuais. O problema descrito neste artigo é NP completo. Logo, heurísticas estão sob desenvolvimento para simulação de redes com maiores instâncias. Entretanto, acredita-se que este trabalho serve como um bom *background* para o desenvolvimento destas heurísticas tendo como guia a abordagem matemática aqui descrita.

REFERENCES

- [1] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 840-851, June 1996.
- [2] A. Hammad, R. Nejabati and D. Simeonidou, "Novel approaches for composition of online virtual optical networks utilizing O-OFDM technology," *39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013)*, London, 2013, pp. 1-3.
- [3] K. D. R. Assis et al., "Network virtualization over elastic optical networks with different protection schemes," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, no. 4, pp. 272-281, April 2016.
- [4] H. Zhang, Y. Wang, X. Qiu, W. Li and Q. Zhong, "Network operation simulation platform for network virtualization environment," *2015 17th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, Busan, 2015, pp. 400-403.
- [5] Saridis, G, Peng, S, Yan, Y, Aguado, A, Guo, B, Arslan, M, Jackson, C, Miao, W, Calabretta, N, Agraz, F, Spadaro, S, Bernini, G, Ciulli, N, Zervas, G, Nejabati,

- R Simeonidou, D, 2016, 'LIGHTNESS: A Function-Virtualizable Software Defined Data Center Network with All-Optical Circuit/Package Switching'. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol 34., pp. 1618-1627.
- [6] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord and S. J. B. Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. s12-s20, February 2012.
- [7] M. Jinno et al. "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 11, pp. 66-73, November 2009.
- [8] E. J. Dávalos and B. Barán, "A Survey on Algorithmic Aspects of Virtual Optical Network Embedding for Cloud Networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 20893-20906, 2018.
- [9] P. Soto, P. Maya and J. F. Botero, "Resource Allocation Over EON-Based Infrastructures in a Network Virtualization Environment," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 16, no. 1, pp. 13-26, March 2019.
- [10] Nashid et al, "Achieving a Fully-Flexible Virtual Network Embedding in Elastic Optical Networks" *INFOCOM 2019*. To be published.
- [11] ILOG, Inc,"ILOG CPLEX: note = "See <https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer>"