

# Modelo de Otimização para Engenharia de Tráfego Usando Roteamento por Segmentos

Antonio José Silvério, Miguel Elias M. Campista, Luís Henrique M. K. Costa, Rodrigo S. Couto

**Resumo**—Neste artigo formula-se um problema de otimização combinatória biobjetivo em duas etapas, aplicável a redes de roteadores de núcleo de operadoras de telecomunicações, considerando uma rede de *backbone* com roteamento por segmentos e engenharia de tráfego. O modelo tem a finalidade de distribuir os fluxos considerando condições de gargalos de capacidade e métricas de rede estabelecidas pela operadora de Telecomunicações. Resultados baseados em exemplos reais são apresentados, demonstrando-se os benefícios do modelo em relação ao estado da arte das propostas de modelagem de roteamento por segmentos, como o tratamento de múltiplos objetivos de rede minimizando a quantidade de túneis de roteamento por segmentos.

**Palavras-Chave**—Engenharia de tráfego, roteamento por segmentos, gerenciamento de redes.

**Abstract**—In this paper, we propose a two-stage biobjective combinatorial optimization problem, applicable to the core router network of telecommunication operators, considering a backbone network with segment routing and traffic engineering. The model has the purpose of distributing the traffic flows considering network bottlenecks and metrics defined by the telecommunication operators. Results based on real telco networks are presented, demonstrating the benefits of the proposed model in relation to the state of the art of segment routing related works, as multiple network objectives handling, and additionally minimizes the number of segment tunnels.

**Keywords**—Traffic engineering, segment routing, network management.

## I. INTRODUÇÃO

As operadoras de telecomunicações lidam com diversos desafios na configuração e operação de recursos físicos e lógicos da rede, como roteadores que comutam rótulos e túneis MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) [1], tecnologia amplamente empregada atualmente nos *backbones* de operadoras. A complexidade de configuração de túneis MPLS aumenta com a dinamicidade das demandas de tráfego, utilização de múltiplas métricas e diferentes topologias de rede. Frequentemente, é necessário configurar a rede manualmente quando há mudanças na matriz de tráfego ou falhas nos equipamentos e enlacs da rede. Uma possível solução para tal desafio é utilizar configuração automática de túneis em malha completa através de protocolos de sinalização. Porém, além da dificuldade de configuração, é preciso também lidar com a complexidade do plano de controle para manutenção da base de informações de encaminhamento de pacotes, como

o LDP (*Label Distribution Protocol*); e de sinalização para engenharia de tráfego, como o RSVP-TE (*Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering*).

O roteamento por segmentos [2] (*Segment Routing - SR*) é uma proposta que simplifica a configuração e operação da rede, mantendo a base de informação de encaminhamento de pacotes (*Forwarding Information Base - FIB*) apenas nos nós de borda da rede, diminuindo a quantidade de estados nos roteadores de núcleo. Para isso, o SR apoia-se na técnica de roteamento pela origem [2] e na programação de redes SDN (*Software Defined Networks*) [3]. No roteamento por segmentos, os roteadores de núcleo não precisam armazenar estados referentes aos segmentos, ao contrário da tecnologia IP/MPLS tradicional que armazena estados por fluxo na FIB. Entretanto, para reduzir a quantidade de rótulos nos roteadores de borda, é necessário reduzir o número de segmentos utilizados na configuração dos caminhos. Este trabalho formula um problema de otimização combinatória biobjetivo em duas etapas, a fim de distribuir os fluxos de tráfego dos usuários, minimizando a quantidade de segmentos configurados. Do ponto de vista da engenharia de tráfego, o modelo busca o melhor caminho considerando os objetivos de distribuição de carga e latência.

O artigo está estruturado da seguinte forma. A Seção II apresenta o estado da arte de modelos para roteamento por segmentos. A Seção III descreve o roteamento por segmentos e sua aplicação em engenharia de tráfego. A Seção IV aborda o problema da quantificação de túneis MPLS comparada com o uso de roteamento por segmentos, e a necessidade de otimização do número de segmentos usados. A Seção V apresenta o modelo de otimização biobjetivo em duas etapas, cujos resultados são apresentados na Seção VI. Finalmente, a Seção VII conclui este artigo e aponta trabalhos futuros.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

De forma geral, os trabalhos relacionados a otimização em roteamento por segmentos propõem uma quantidade arbitrária de segmentos para um caminho (*k-segmentos*) [4]–[6] através da solução de um problema de fluxos com múltiplas *commodities* (*Multi Commodity Flows*) fixando-se um valor inteiro  $k$ , com caminhos que permitem balanceamento do tráfego ou não. Em [5] é sugerido um modelo em duas fases onde a primeira busca distribuir a carga e cujos

Universidade Federal do Rio de Janeiro - GTA/PEE/COPPE-DEL/POLI. E-mails: {silverio,miguel,luish,rodrigo}@gta.ufrj.br.

resultados são utilizados no modelo da segunda fase para minimização da quantidade de segmentos e de túneis SR-TE (*Segment Routing - Traffic Engineering*), limitado ou não por demanda.

Em [6], a proposta é associar segmentos a sub-caminhos até pontos intermediários escolhidos através de métricas de centralidade de grafos. Essa estratégia, no entanto, considera apenas caminhos mais curtos para solucionar um problema de fluxos com múltiplas *commodities* e, de forma independente, a utilização da capacidade de enlaces. Em [7] é proposta a definição de domínios com nós habilitados e não habilitados para o roteamento por segmentos com plano de encaminhamento de dados IPv6. No domínio com nós habilitados por roteamento por segmentos é aplicada a engenharia de tráfego através de um modelo MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) para minimizar a utilização do enlace. Já em [8], um caminho de roteamento por segmentos para cada demanda que minimize a carga por enlace é calculado, utilizando partição em grafos.

As abordagens da literatura citadas acima tratam apenas uma única função objetivo em um ou mais modelos independentes e sem integração, restringindo-se a uma determinada métrica de rede, com limitações na escolha do melhor caminho que atenda a mais de uma métrica. Este trabalho, diferentemente dos anteriores, propõe um modelo de otimização integrado de duas etapas, onde na primeira etapa as funções objetivo relacionadas as métricas de engenharia de tráfego são harmonizadas em um problema de programação linear biobjetivo e uma segunda etapa mono objetivo para minimização da quantidade de segmentos relativas ao melhor caminho encontrado na primeira etapa, permitindo uma solução eficiente próxima ou até igual ao ótimo de cada modelo independente.

### III. ROTEAMENTO POR SEGMENTOS COM ENGENHARIA DE TRÁFEGO

O roteamento por segmentos é uma técnica de roteamento pela origem: a fonte do fluxo de dados codifica no cabeçalho do pacote uma lista de pontos que o caminho deve conter. Estes pontos são identificados por segmentos. O identificador de segmento (SID – *Segment Identifier*) é representado por um rótulo em redes MPLS, já no IPv6, foi definido um cabeçalho de extensão de roteamento pela fonte, que contém a lista dos segmentos - neste caso, endereços IPv6. Na Figura 1 é ilustrado um exemplo de dois fluxos de tráfego do nó roteador [1] para o [7] com um caminho composto do segmento de nó [1] – [7], e [2] para o [8] com um caminho composto do segmento de nó [2] – [5] e os segmentos de adjacências [5] – [6] e [6] – [8].

A engenharia de tráfego é facilitada com o roteamento por segmentos combinado às redes definidas por software (SDN) [2]. O roteamento por segmentos permite a configuração, a modificação e a remoção de caminhos em um domínio de rede, operando somente nos roteadores de borda da rede. Na engenharia de

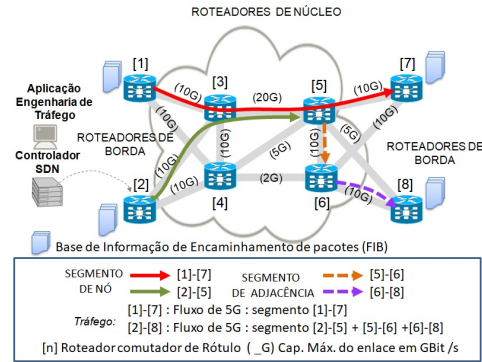


Fig. 1. Combinação de Segmentos de Nó e de Adjacências para construção de caminhos diferentes do caminho mais curto do IGP.

tráfego com roteamento por segmentos, o roteador de núcleo de ingresso classifica os pacotes e impõe as listas de segmentos. Estes correspondem aos sub-caminhos que foram calculados no controlador SDN. Assim, as funcionalidades de engenharia de tráfego são influenciadas pelas decisões do roteamento por segmentos e pelo controlador SDN. Os roteadores intermediários, para efeito do roteamento por segmentos, não existem em sua topologia lógica, sendo apenas pontos de passagem do tráfego, não necessitando de estados adicionais (troca de rótulos e atualizações de tabelas de rótulos) e sinalizações (protocolo RSVP-TE) conforme mostrado na Figura 1. A centralização da engenharia de tráfego permite melhorar a previsibilidade e acelerar a convergência da rede [3] em caso de falhas e mudanças de topologias e de matriz de tráfego. Na Figura 1 a aplicação SDN direciona o tráfego [2] – [8] por uma combinação de segmentos de nó e adjacências diferente do menor caminho definido pelo IGP, a fim de atender requisitos de engenharia de tráfego, como garantir folga na capacidade utilizada dos enlaces.

### IV. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

As operadoras de telecomunicações utilizam, principalmente, redes IP/MPLS com túneis em malha completa, configurados de forma automática pelo protocolo RSVP-TE, ou túneis explícitos ponto a ponto, com ou sem balanceamento de tráfego. Entretanto, esta configuração de túneis explícitos PP (*Point to Point*) são manuais e apoiadas em ferramentas de planejamento *offline*, mesmo quando controladores SDN e PCE (*Path Computation Element*) são empregados. Com o roteamento por segmentos, a ideia básica é dividir os caminhos em sub-caminhos para atender as premissas da engenharia de tráfego e portanto balancear dinamicamente o consumo dos recursos de rede. A quantidade de segmentos para um fluxo de dados com engenharia de tráfego pode variar de um segmento, se a rota desejada coincide com o menor caminho obtido pelo IGP. No pior caso, o número de segmentos no caminho seria igual ao número de enlaces da rede, considerando que a rota utilize todos os enlaces e

nenhum caminho mais curto. Por outro lado, o número de segmentos diferentes disponíveis em uma rede é ‘N + A’, onde ‘N’ é a quantidade de segmentos de nó e ‘A’ de segmentos de adjacência [2] que cresce de forma linear. Já a quantidade de segmentos necessários para a engenharia de tráfego em uma rede é uma quantidade inferior, ou igual no pior caso, quando comparada ao número de túneis explícitos configurados em uma rede IP/MPLS tradicional. Neste caso, o número de túneis é no mínimo da ordem do número ‘F’ de fluxos, exigindo esforço de configuração manual. No pior caso da rede MPLS, os túneis são configurados em malha completa ou seja, da ordem de  $V^2 - V$  túneis, onde V é a quantidade de nós da rede [1].

O roteamento por segmentos soluciona nativamente a configuração em grande escala de túneis através do reuso de segmentos e pela sua flexibilidade de automação através do SDN [9]. No entanto, nos roteadores de borda a configuração de muitos segmentos implica em bases de informação de encaminhamento extensas (*SR-FIB - Segment Routing FIB*), e empilhamento de muitos rótulos [7], comprometendo o desempenho destes roteadores e aumentando a unidade de transmissão (*MTU - Maximum Transmission Unit*). Assim, o ideal é minimizar a quantidade de segmentos necessários.

## V. MODELO PROPOSTO

O modelo proposto recebe um conjunto de fluxos, com suas respectivas demandas, e escolhe quais segmentos serão utilizados por cada um. Em outras palavras, escolhe-se os caminhos de cada fluxo e esses caminhos são configurados por meio de uma sequência de segmentos. A otimização proposta ocorre em duas etapas distintas. A primeira é responsável por calcular os caminhos de cada fluxo. Esses caminhos são calculados de forma a minimizar a carga nos enlaces da rede e minimizar métricas de engenharia de tráfego (TE). No presente trabalho, a métrica TE escolhida é a latência, por ser importante na prestação de serviços críticos de telecomunicações [7]. Na segunda etapa, escolhem-se quais segmentos são utilizados nos caminhos calculados na etapa anterior.

### A. Primeira etapa de otimização

O modelo da primeira etapa consiste em um modelo biobjetivo [10], que calcula os caminhos de cada fluxo na rede, estes caminhos ideais serão posteriormente associados a menor quantidade de segmentos possível, resultantes da segunda etapa. O problema de Programação Linear Inteira Mista (*Mixed Integer Linear Programming - MILP*) é formulado a seguir e as notações utilizadas nesta etapa são apresentadas na Tabela I.

$$f_1(x) \Rightarrow \text{minimizar } \alpha_{max}. \quad (1)$$

$$f_2(x) \Rightarrow \text{minimizar } \sum_{(i,j) \in F} \sum_{(m,n) \in E} C_{TE}^{mn} x_{ij}^{mn}. \quad (2)$$

$$\sum_{m \in V | m \neq n, (m,n) \in E} x_{ij}^{mn} - \sum_{n \in V | m \neq n, (m,n) \in E} x_{ij}^{nm} = \begin{cases} 0 & \text{se } i, j \neq m \\ 1 & \text{se } i = m \\ -1 & \text{se } j = m \end{cases} \quad \forall (i, j) \in F, m \in V. \quad (3)$$

$$\alpha_{max} - \sum_{(i,j) \in F} \frac{f_{ij} x_{ij}^{mn}}{CAP^{mn}} \geq 0 \quad \forall (n, m) \in E. \quad (4)$$

$$0 \leq \alpha_{max} \leq 1. \quad (5)$$

$$x_{ij}^{mn} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in F, (n, m) \in E, \alpha_{max} \in \mathbb{R}. \quad (6)$$

O primeiro objetivo, representado pela Equação 1, busca minimizar a carga na rede. A carga de um enlace, que é um valor entre 0 e 1, é definida como a relação entre a quantidade de tráfego que passa por esse enlace e sua capacidade total. A variável  $\alpha_{max}$  é o valor da maior carga na rede, considerando todos os enlaces. Ou seja, a Equação 1 busca minimizar o pior caso de carga da rede. O segundo objetivo, representado pela Equação 2, busca minimizar o custo de TE na rede. Esse custo é definido neste trabalho como a soma da latência dos enlaces utilizados. A restrição mostrada na Equação 3 garante a conservação de fluxos na rede. A Equação 4 calcula  $\alpha_{max}$ , enquanto a Equação 5 garante que as capacidades dos enlaces sejam respeitadas. A Equação 6 define uma variável Booleana para a presença ou não de fluxo de tráfego entre os nós  $i$  e  $j$  em uma determinada aresta  $(m, n)$ .

Para a solução da função biobjetivo, este trabalho adota uma estratégia de escalarização, que transforma problemas multiobjetivo em problemas mono-objetivo. Isso é realizado aglutinando as Equações 1 e 2 para formar uma solução de harmonização de critério global [11], dada pela Equação 7. Nessa estratégia, executa-se o problema considerando cada uma das funções mono-objetivo separadamente. Após isso, utilizando os valores obtidos, executa-se esse mesmo problema considerando uma função de critério global. Assim, primeiramente considera-se apenas a Equação 1 e encontra-se seu valor ótimo  $f_1^*$ . Em seguida, considera-se apenas a Equação 2 e encontra-se o valor ótimo  $f_2^*$ .

TABELA I  
NOTAÇÕES UTILIZADAS NA PRIMEIRA ETAPA.

Notação	Descrição	Tipo
$F$	Matriz de Fluxos	Conjunto
$V$	Nós	Conjunto
$E$	Enlaces	Conjunto
$f_{ij}$	fluxo de tráfego $(i, j) \in F$	Parâmetro
$CAP^{mn}$	Capacidade do enlace $(m, n) \in E$	Parâmetro
$C_{TE}^{mn}$	Custo de TE do enlace $(m, n) \in E$	Parâmetro
$\alpha_{max}$	Carga máxima da rede	Variável
$x_{ij}^{mn}$	Presença de tráfego no enlace $(m, n) \in E$ referente ao fluxo de tráfego $(i, j) \in F$	Variável

Finalmente, esses dois valores obtidos são utilizados para formar a Equação 7, na qual  $f_1(x)$  e  $f_2(x)$  correspondem, respectivamente, às Equações 1 e 2. A Equação 7 se torna então a função objetivo do novo problema a ser solucionado, que possui as mesmas restrições do formulado anteriormente. O método de programação biobjetivo obtém um conjunto mínimo de soluções pareto-ótimas que atendem as funções mono-objetivo definindo uma fronteira eficiente, próximo do ótimo de cada função independentemente [10].

$$f(x) = \frac{f_1(x) - f_1^*}{f_1^*} + \frac{f_2(x) - f_2^*}{f_2^*}. \quad (7)$$

### B. Segunda etapa de otimização

A segunda etapa consiste em escolher quais segmentos são empregados para configurar cada caminho calculado na primeira etapa. Essa escolha é realizada de forma a minimizar a quantidade de segmentos utilizados. O problema recebe os caminhos da primeira etapa e todas as possíveis sequências de segmentos que podem atender cada caminho. A saída do problema é a indicação, para cada caminho, da sequência de segmentos a ser utilizada. O problema é então modelado como um problema de casamento (*matching*) entre os caminhos e as possíveis sequências de segmentos. O problema de programação inteira (*Integer Programming - PPI*) é mostrado a seguir e as notações utilizadas nesta etapa são apresentadas na Tabela II.

$$(PPI) f_3(x) \Rightarrow \text{minimizar} \sum_{k \in S} y_k. \quad (8)$$

$$\sum_{j \in B | B_{ij}=1} z_{ij} = 1 \quad \forall i \in C. \quad (9)$$

$$\sum_{i \in C} \sum_{j \in B | B_{ij}=1, H_{kj}=1} z_{ij} - y_k | C| \leq 0 \quad \forall k \in S. \quad (10)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in C, j \in B, y_k \in \{0, 1\} \forall k \in S. \quad (11)$$

A função objetivo, dada pela Equação 8, busca minimizar a quantidade de segmentos. A Equação 9 garante que um caminho utiliza apenas uma sequência de segmentos. A Equação 10 é utilizada para calcular  $y_k$ , indicando se um segmento  $k$  é utilizado ou não.

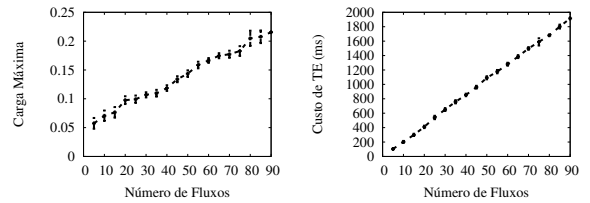
TABELA II  
NOTAÇÕES UTILIZADAS NA SEGUNDA ETAPA.

Notação	Descrição	Tipo
$S$	Possíveis segmentos	Conjunto
$C$	Caminhos calculados na primeira etapa	Conjunto
$B$	Sequências de segmentos que atendem os caminhos da primeira etapa	Conjunto
$B_{ij}$	Indica se a sequência de segmentos $j \in B$ atende o caminho $i \in C$	Parâmetro
$H_{kj}$	Indica se a sequência de segmentos $j \in B$ contém o segmento $k \in S$	Parâmetro
$z_{ij}$	Indica se o caminho $i \in C$ utiliza a sequência de segmentos $j \in B$	Variável
$y_k$	Indica se o segmento $k \in S$ é utilizado por algum caminho da rede	Variável

## VI. RESULTADOS

O modelo descrito na Seção V é programado no IBM CPLEX e utilizado para escolher caminhos e segmentos da rede de uma operadora de telecomunicações doméstica dos EUA, cuja topologia está disponível na ferramenta de planejamento WAE Design da Cisco. Essa rede possui 11 roteadores, 34 enlaces e 92 fluxos de tráfego unidirecionais. Para verificar o comportamento do modelo proposto, executa-se o problema para diferentes números de fluxos inseridos na rede. Em cada amostra, os fluxos são escolhidos aleatoriamente a partir dos 92 fluxos totais. Para cada número de fluxos, os resultados são apresentados com a média das amostras do experimento e um intervalo de confiança com nível de 95%.

A Figura 2 mostra os valores obtidos para cada função objetivo do problema da primeira etapa, em função do número de fluxos inseridos na rede. Pode-se observar, na Figura 2(a), que a carga nos enlaces varia linearmente conforme o crescimento dos fluxos, o que demonstra um equilíbrio na carga e folga dos enlaces da rede. A métrica de TE, apresentada na Figura 2(b), também cresce linearmente com o número de fluxos, mostrando que o modelo encontra caminhos com 20 ms em média de latência. O comportamento linear mostra a baixa variabilidade da latência quando a rede é submetida a uma maior quantidade de fluxos.



(a) Carga da Rede (Equação 1). (b) Custo de TE (Equação 2).

Fig. 2. Valores das funções objetivo para engenharia de tráfego.

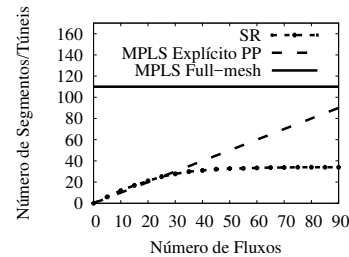


Fig. 3. Número de Segmentos/Túneis (Equação 8).

A Figura 3 mostra o resultado da segunda etapa, que é o número de segmentos configurados na rede de acordo com o número de fluxos, indicado pela curva SR. Além disso, para comparação, apresenta-se o número de túneis MPLS em duas diferentes configurações: explícito PP e malha completa. É possível notar que, no caso de roteamento por segmentos, o número de segmentos cresce linearmente até o valor de 34 segmentos e depois se mantém constante ao

se incrementar o número de fluxos. Isso ocorre pois, a partir de uma quantidade de fluxos, todos os segmentos de nó, adjacência ou a combinação de ambos, são reutilizados. Cada segmento de adjacência corresponde a um enlace e, dessa forma, o número máximo desse tipo de segmentos para um determinado fluxo é igual ao número de enlaces na rede.

A situação na qual todos os segmentos de adjacência são configurados constitui um pior caso da saída da segunda etapa de otimização. Como, nesse caso, todos os enlaces correspondem a um segmento, é possível configurar qualquer caminho na rede com qualquer sequência de segmentos possível. Assim, a partir desse pior caso, o número de segmentos se torna independente do número de fluxos configurados. Na Figura 3, ao comparar com os resultados do MPLS, existem dois casos. No primeiro, utiliza-se a configuração em malha completa (*full-mesh*), na qual  $V^2 - V$  túneis são configurados, sendo  $V$  o número de nós [1]. Essa configuração é independente do número de fluxos e, como a rede possui 11 nós, 110 túneis são configurados. No segundo caso do MPLS, utiliza-se a configuração de túnel explícito ponto a ponto (PP) na qual um túnel é configurado por fluxo. É possível notar, na Figura 3, que o problema deste trabalho encontra um número de segmentos igual ou inferior a todos os casos do MPLS. Além disso, a configuração explícito PP do MPLS cresce linearmente com o número de fluxos, enquanto no SR esse número se estabiliza em 34.

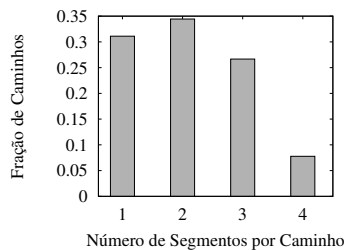


Fig. 4. Distribuição da quantidade de segmentos por caminhos calculados em  $f_3(x)$ .

Finalmente, a Figura 4 mostra a distribuição do número de segmentos utilizados por caminho. A figura mostra que a maior parte dos caminhos utiliza até 2 segmentos. Isso está de acordo com a literatura, que indica que com 2 segmentos por caminho consegue-se atender a maior parte dos fluxos de tráfego [4]. Entretanto, ainda existe uma quantidade significativa de caminhos que empregam três ou quatro segmentos para cumprir as exigências de engenharia de tráfego. Isso está de acordo com o trabalho em [5], que mostra que limitações de carga nos enlaces podem aumentar a quantidade de segmentos necessários.

## VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs um modelo de otimização que se serve do conceito de segmentos para encontrar

caminhos alternativos aos mais curtos encontrados normalmente pelo protocolo de roteamento intra-redes. A ideia foi modelar o problema como biobjetivo e assim garantir requisitos de engenharia de tráfego ao mesmo tempo que se minimiza a quantidade de segmentos. Os resultados demonstraram que a quantidade de segmentos introduz menos estados na rede e ainda que o número de segmentos deve ser maior que 2 na aplicação de engenharia de tráfego, diferente de trabalhos da literatura. Pesquisas futuras podem incluir mais funções objetivo, compondo um vetor de métricas de engenharia de tráfego, bem como a resolução dos problemas biobjetivo através de outros métodos como o de critério de pesos global e lexicográfico, priorizando funções objetivo.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. O trabalho também foi financiado pelo CNPq, FAPERJ, e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), auxílios no. 2015/24494-8 e 2015/24490-2.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Alvarez, "BRKMPL-2100 - deploying MPLS traffic engineering," in *MPLS IETF WG*, Jan. 2016.
- [2] C. Filsfil, N. K. Nainar, C. Pignataro, J. C. Cardonay, and P. François, "The segment routing architecture," in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, Dec. 2015, pp. 1–6.
- [3] C. E. Rothenberg, M. R. Nascimento, M. R. Salvador, and M. F. Magalhães, "Openflow e redes definidas por software: um novo paradigma de controle e inovação em redes de pacotes," *Cad. CPqD Tecnologia*, vol. 7, pp. 65–76, Jun. 2011.
- [4] R. Bhatia, F. Hao, M. Kodialam, and T. Lakshman, "Optimized network traffic engineering using segment routing," in *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Hong Kong, Apr. 2015, pp. 657–665.
- [5] T. Schuller, N. Aschenbruck, M. Chimani, M. Horneffer, and S. Schmitter, "Traffic engineering using segment routing and considering requirements of a carrier IP network," in *IFIP Networking Conference*, Stockholm, Sweden, Jun. 2017, pp. 1–9.
- [6] G. Trimponias, Y. Xiao, H. Xu, X. Wu, and Y. Geng, "On traffic engineering with segment routing in SDN based WANs," *arXiv preprint arXiv:1703.05907*, Mar. 2017.
- [7] A. Cianfrani, M. Listanti, and M. Polverini, "Incremental deployment of segment routing into an ISP network: A traffic engineering perspective," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 25, no. 5, pp. 3146–3160, 2017.
- [8] R. Hartert, P. Schaus, S. Vissicchio, and O. Bonaventure, "Solving segment routing problems with hybrid constraint programming techniques," in *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*. Springer, 2015, pp. 592–608.
- [9] A. Sgambelluri, F. Paolucci, A. Giorgetti, F. Cugini, and P. Castoldi, "SDN and PCE implementations for segment routing," in *European Conference on Networks and Optical Communications (NOC)*, Jun. 2015, pp. 1–4.
- [10] L. de Lima Pinto and K. C. C. Fernandes, "Um algoritmo exato para um problema de programação inteira biobjetivo," in *Anais do XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Vitória, Sep. 2016, pp. 484–494.
- [11] C. Antunes and M. Alves, "Programação linear multiobjetivo - métodos interativos e software," in *Anais do Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa*, Rio de Janeiro, Sep. 2012, pp. 4725–473.