

# Técnica de *Grooming* Aplicada ao Problema Multi-objetivo de Roteamento em Redes Ópticas com Proteção nos Enlaces

Rangel Silva Oliveira<sup>1</sup>, Fillipe Gustavo Brandão<sup>1</sup>, Geraldo Robson Mateus<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação  
Universidade Federal de Minas Gerais

{rangel, fillipe, mateus}@dcc.ufmg.br

**Resumo.** Este artigo apresenta a modelagem matemática para o problema de *Grooming* em redes ópticas com proteção nos enlaces. A qualidade de serviço é provida quando o atendimento das requisições satisfazem a algum critério. Para isso, é apresentado o problema multi-objetivo, mais especificamente os modelos contem quatro critérios a serem minimizados, sendo o primeiro o número de enlaces utilizados no transporte, o segundo é o número de requisições rejeitadas, o terceiro é balanceamento de carga na rede e o quarto o número de comprimentos de onda usados pelos produtos.

Foram propostos dois modelos matemáticos, um deles considerando o *Grooming* e o outro não. O objetivo principal é compará-los de acordo com as respectivas complexidades e com o número necessário de comprimentos de onda para alocar todos as requisições. Os testes são executados utilizando o pacote comercial CPLEX 12.1.0.

**Palavras-chave:** *Grooming*, Redes ópticas, Roteamento, TEL&SI - PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações.

**Abstract.** This paper presents a mathematical modeling for the *Grooming* problem in optical networks with protection on the links. The quality of service is provided when the attendance of the requests satisfy some criterion. For this, we present the multi-objective problem, specifically the model contains four criteria to be minimized, the first being the number of links used in the transport, the second is the number of rejected requests the third is the load balancing in the network and the fourth the number of wavelengths used by the products.

We propose two mathematical models, one considering the *Grooming* and the other not. The main objective is to compare them according to their complexity and the number of required wavelengths to allocate all requests. The tests are performed using the commercial package CPLEX 12.1.0.

**Keywords:** *Grooming*, Optical Networks, Routing, TEL&SI - OR in Telecommunications and Information Systems.

## 1. Introdução

Atualmente, as redes ópticas definem um cenário importante nas telecomunicações, devido à grande capacidade de transmissão de dados e ao pequeno atraso na entrega de pacotes através dos enlaces ópticos. Estes, por sua vez, são utilizados principalmente como *backbones* de instituições e empresas, pelo fato de precisarem de uma banda de passagem maior e pelo fato de que o custo associado à implantação de rede ópticas ser bem elevado.

Entretanto, para redes que proveem uma boa qualidade de serviço não basta apenas definirmos uma configuração de alto poder de transmissão de dados, é necessário usar técnicas para que tal objetivo seja alcançado, o que demanda investimento em uma infraestrutura mais complexa.

O trabalho em questão aborda quatro técnicas de otimização para definir características de redes ópticas a fim de melhorar seu desempenho e minimizar custos. A primeira trata do roteamento de pacotes, ou seja, dado uma rede de entrada, a solução é obter rotas para todas as requisições de forma a atender a um objetivo. No caso em questão esse objetivo é minimizar os enlaces utilizados.

A segunda trata do atendimentos das requisições, em que há possibilidade de uma requisição ser atendida ou não. A terceira aborda o balanceamento de carga nos enlaces e a quarta a minimização da alocação dos comprimentos de onda necessários para o tráfego dos produtos através da rede.

O *Grooming* é agregado ao problema *RWA*<sup>1</sup> com proteção nos enlaces e pode ser definido como uma técnica que visa à melhor utilização da capacidade de transmissão da rede, trafegando vários produtos em um mesmo comprimento de onda.

O objetivo do artigo é comparar duas abordagens, sendo que uma delas utiliza o o *Grooming* e a outra não. A ideia é utilizar o problema multi-objetivo para um melhor entendimento das mesmas, provendo uma análise mais completa sobre vantagens e desvantagens em se utilizar determinada abordagem.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão bibliográfica tomada como base para a elaboração do artigo. A Seção 3 apresenta as modelagens matemáticas para o problema *RWA* com proteção nos enlaces e o problema associado com a aplicação do *Grooming*. Já a Seção 4 apresenta os resultados obtidos com a execução dos modelos e análise dos mesmos. Por fim temos a Seção 5 que apresenta as considerações finais sobre projeto de redes ópticas e um resumo sobre os modelos matemáticos apresentados.

## 2. Revisão Bibliográfica

O problema abordado pode ser formulado com um modelo de Programação Linear Inteira [Bazaraa et al., 1990] e é encontrado na literatura basicamente como *RWA* [Zang et al., 2003]. O enfoque deste trabalho está no processo de proteção de rotas. Para simplificar vamos supor um grafo  $G(V, A)$  em que  $V$  é o conjunto de vértices e  $A$  o conjunto de arestas. Seja um par origem-destino  $(i, j)$  que caracteriza uma demanda  $k$  da rede. Pretende-se atender todas as demandas  $d_k$ , sendo  $i, j \in V$  e  $d_k$  a quantidade de unidades do produto<sup>2</sup>  $k$ .

<sup>1</sup>Do termo em inglês *Routing Wavelength Assignment*: Roteamento e Assinalamento de Comprimentos de Onda

<sup>2</sup>Commodity ou tráfego de comunicações, ou seja, um fluxo de *bits* que representa um pacote de dados na rede

Uma formulação do problema tratado neste artigo, que também leva em consideração a segurança na transmissão de dados utilizando o tipo de proteção *SNC-P*, pode ser vista em [O'Carvalho, 2007]. A ênfase de seu trabalho é aplicar a proteção em uma rede em anel, em que no caso de alguma falha em um arco da rede, os pacotes possam ser roteados através de uma rota alternativa. Como se trata de um anel, essa rota seria construída em sentido oposto. A diferença entre o trabalho mencionado anteriormente e o artigo em questão é que este aplica a proteção em uma rede em malha e permite apenas uma rota principal a cada demanda a ser trafegada. Diferente da formulação proposta por [O'Carvalho, 2007], que permite que o tráfego seja dividido em várias partes e cada parte possa agir como se fosse um produto, tendo suas próprias rotas definidas na rede.

Um trabalho sobre modelagens de roteamento de pacotes pode ser encontrado em [Resendo, 2008]. Neste último, o autor apresenta uma série de formulações para o problema, uma baseado em arcos, outra em caminhos. Esta última propõe a definição previamente das rotas para o tráfego de comunicações na rede, ou seja, um conjunto de melhores caminhos entre o par origem-destino do produto  $k$ . Esta abordagem de obtenção de rotas pode ser visto em [Shier, 1976]. Para o desenvolvimento deste artigo, foi levado em consideração esses dois aspectos citados, ambos utilizados para a implementação da heurística proposta para o problema.

Este artigo é baseado na abordagem do problema multi-objetivo que é encontrado em [Brandão, 2010]. O trabalho apresenta os modelos matemáticos e as heurísticas para o problema *RWA* com proteção nos enlaces. O trabalho em questão é uma extensão da modelagem apresentada neste último, agregando a característica de *Grooming*, que pode ser encontrado em [Júnior et al., 2006] e [Filho et al., 2003].

### 3. Definição do Problema e Modelagem Matemática

Devido ao elevado número de indicadores de *QoS* que podem ser considerados no roteamento em redes ópticas, as técnicas de otimização multi-objetivo podem ser consideradas como alternativa para solução, de forma mais ampla, deste problema.

Ao se considerar um número maior de objetivos, tem-se um aumento na complexidade do problema, uma vez que o resultado de tal otimização fornece um conjunto de soluções, diferentemente do caso mono-objetivo que gera apenas uma solução, ou seja, um ponto de mínimo/máximo. Tendo como base o descrito anteriormente, o modelo apresentado possui além do objetivo de se minimizar o número de enlaces, outros três objetivos, ambos podendo ser considerados indicadores de *QoS* da rede. Logo passa-se a ter quatro funções objetivos, caracterizadas como:

- $f_1$  : O número de enlaces utilizados no transporte de cada uma das requisições. Nesta função leva-se em conta tanto os enlaces utilizados na rota de trabalho quanto na de proteção. Quanto menos enlaces forem utilizados no transporte da demanda menor será o atraso na transmissão dos dados;
- $f_2$  : A quantidade de requisições rejeitadas na rede. Obviamente, quanto menos requisições forem rejeitadas, maior a taxa de demandas atendidas, aumentando assim a confiabilidade da rede;

- $f_3$  : O balanceamento de carga na rede. Isto nos diz que a carga está distribuída entre os enlaces da rede;
- $f_4$  : O número de comprimentos de onda utilizados para o transporte dos produtos  $k$ .

O *Grooming* é uma técnica utilizada que tem por finalidade o atendimento do máximo de produtos possível utilizando o menor número de comprimentos de onda. Em redes de telecomunicações, isso é observado quando pretende-se agregar tráfegos de baixa velocidade em apenas um canal, transmitindo todas as requisições em um enlace de alta capacidade e de alta velocidade (no caso, o enlace óptico). Então, a ideia do *Grooming* é prover uma melhor utilização dos comprimentos de onda, de forma individual, fazendo com que várias requisições possam ser atendidas utilizando o mesmo canal de comunicação.

De forma a criar a proteção na rede, para cada demanda  $d_k$  são criadas duas rotas, uma de trabalho (primária) e outra de proteção (secundária), esta última pode ser disjunta de enlaces ou nós em relação a primeira, dependendo claro se a proteção é feita em cima dos enlaces ou nós da rede. Nos modelos apresentados neste artigo, a proteção é feita em cima dos enlaces, supondo uma requisição  $k$  na rede, não pode haver duas rotas tais que  $r_1$  e  $r_2$  compartilhem algum arco, portanto  $r_1 \cap r_2 = \emptyset$ , sendo  $r_1$  a rota de trabalho e  $r_2$  a rota de proteção.

Antes de apresentarmos o problema multi-objetivo, é necessário definir os conjuntos, os parâmetros e as variáveis que fazem parte das modelagens matemáticas que os seguem.

### Conjuntos:

- $N$  : conjunto dos nós da rede;
- $A$  : conjunto das arestas da rede;
- $S$  : conjunto dos comprimentos de onda disponíveis em cada aresta;
- $K$  : conjunto dos produtos a serem trafegados na rede.

### Parâmetros:

- $d_k$  : demanda do produto  $k$  associada a um par origem-destino;
- $Q_s$  : capacidade do comprimento de onda  $s$  em unidades de produto;
- $W_{ij}$  : número total de comprimentos de onda suportados na aresta  $(i, j) \in A$ ;
- $B_{ij}$  : capacidade total de um enlace óptico, ou seja,  $B_{ij} = \sum_{s \in S} Q_s$ ;
- $origem_k$  : nó de origem do produto  $k$ ;
- $destino_k$  : nó de destino do produto  $k$ .

### Variáveis:

- $x_{ij}^k$  : 1 se o produto  $k$  usa a aresta  $(i, j)$  na rota de trabalho, 0 caso contrário;
- $x_{ij}^{kp}$  : 1 se o produto  $k$  usa a aresta  $(i, j)$  na rota de proteção, 0 caso contrário;
- $t_{ij}^s$  : 1 se o comprimento de onda  $s$  é utilizado na aresta  $(i, j)$  para o produto  $k$ ;
- $a_k$  : 1 se o produto  $k$  é atendido na rede, 0 caso contrário;
- $\alpha$  : variável real usada para o balanceamento da rede.

### 3.1. Modelo Matemático do Problema sem *Grooming*

O problema *RWA* com proteção nos enlaces pode ser modelado como a seguir:

$$\min = \begin{cases} f_1 = \sum_{k \in K} (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \\ f_2 = \sum_{k \in K} (1 - a^k) \\ f_3 = \alpha \\ f_4 = \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} t_k^{sij} \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{(l,i) \in A} x_{li}^k = \begin{cases} a^k, & \text{se } i = \text{origem}_k, \quad \forall k \in K \\ -a^k, & \text{se } i = \text{destino}_k, \quad \forall k \in K \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{kp} - \sum_{(l,i) \in A} x_{li}^{kp} = \begin{cases} a^k, & \text{se } i = \text{origem}_k, \quad \forall k \in K \\ -a^k, & \text{se } i = \text{destino}_k, \quad \forall k \in K \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S} Q_s t_k^{sij} \geq d_k(x_{(i,j)}^k + x_{(i,j)}^{kp}), \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} Q_s t_k^{sij} \leq \alpha B_{ij}, \quad \forall (i,j) \in A \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} t_k^{sij} \leq W_{ij}, \quad \forall (i,j) \in A \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} t_k^{sij} \leq 1, \quad \forall (i,j) \in A, \quad \forall s \in S \quad (7)$$

$$t_k^{sij} \leq t_k^{s-1,ij}, \quad \forall k \in K, \forall s \in S, \forall (i,j) \in A \quad (8)$$

$$x_{ij}^{kp} + x_{ij}^k \leq 1, \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (9)$$

$$x_{ij}^k, x_{ij}^{kp}, t_k^{sij} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

A função objetivo  $f_1$  procura minimizar o número de enlaces utilizados no transporte de cada uma das requisições. Nesta função leva-se em conta tanto os enlaces utilizados na rota de trabalho quanto na de proteção. Quanto menos enlaces forem utilizados no transporte da demanda, menor será o atraso. A função  $f_2$  procura atender o máximo de requisições possíveis. Já a função  $f_3$  tenta prover o balanceamento de carga e por último  $f_4$  procura minimizar o número total de comprimentos de onda alocados na rede.

Em 2 e 3 são explicitadas as restrições clássicas de conservação de fluxo, as quais garantem que todo o tráfego que entra em um determinado vértice deverá ser o mesmo a sair, exceto na origem e destino da requisição.

Já as restrições demonstradas em 4 tem o objetivo de garantir que a capacidade, em comprimentos de onda, alocadas a cada arco para cada produto  $k$  seja maior que a demanda do produto  $k$  no arco  $(i,j)$ .

As restrições expressas em 5 garantem que a capacidade dos comprimentos de onda utilizados no transporte do conjunto de requisições passantes no arco  $(i,j)$  não ultrapassem a capacidade máxima do mesmo. A variável  $\alpha$  é a responsável pelo balanceamento da rede e que é minimizada pela função  $f_3$ .

As restrições em 6 garantem que o número de comprimentos de onda alocados nos arcos  $(i,j)$ , que foram utilizados por cada uma das requisições  $k$ , deve

ser menor ou igual a capacidade do arco em número de comprimentos de onda,  $W_{ij}$ .

Em 7 são mostradas as restrições responsáveis por garantir que apenas uma única requisição  $k$  possa ser transportada pelo comprimento de onda  $s$  pertencente ao enlace  $(i, j)$ , ou seja, um mesmo comprimento de onda não pode transportar, em um mesmo enlace, mais de uma demanda.

Em 8 basicamente é imposto que os comprimentos de onda devem ser utilizados na sequência de sua numeração

Por fim a restrição 9 é utilizada para garantir que uma mesma requisição não compartilhe o mesmo enlace tanto na rota de trabalho quanto na de proteção. Logo esta restrição garante que a rota de trabalho seja disjunta de arco da rota de proteção para uma dada requisição.

### 3.2. Modelo Matemático do Problema com *Grooming*

$$\min = \begin{cases} f_1 = \sum_{k \in K} (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \\ f_2 = \sum_{k \in K} (1 - a^k) \\ f_3 = \alpha \\ f_4 = \sum_{s \in S} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} t_{ij}^s \end{cases} \quad (11)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{(l,i) \in A} x_{li}^k = \begin{cases} a^k, & \text{se } i = \text{origem}_k, \quad \forall k \in K \\ -a^k, & \text{se } i = \text{destino}_k, \quad \forall k \in K \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (12)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{kp} - \sum_{(l,i) \in A} x_{li}^{kp} = \begin{cases} a^k, & \text{se } i = \text{origem}_k, \quad \forall k \in K \\ -a^k, & \text{se } i = \text{destino}_k, \quad \forall k \in K \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} d_k (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \leq \sum_{s \in S} Q_s t_{ij}^s, \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} d_k (x_{ij}^k + x_{ij}^{kp}) \leq \alpha B_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A \quad (15)$$

$$\sum_{s \in S} t_{ij}^s \leq W_{ij}, \quad \forall (i, j) \in A \quad (16)$$

$$t_{ij}^s \leq t_{ij}^{s-1}, \quad \forall s \in S, \forall (i, j) \in A \quad (17)$$

$$x_{ij}^k + x_{ij}^{kp} \leq 1, \quad \forall (i, j) \in A, \forall k \in K \quad (18)$$

$$x_{ij}^k, x_{ij}^{kp}, t_{ij}^s \in \{0, 1\} \quad (19)$$

Para aplicar a técnica de *Grooming* ao problema multi-objetivo, é necessário realizar algumas modificações na modelagem de forma a refletir os resultados esperados. A primeira modificação se encontra na variável de alocação de comprimentos de onda. Ela tem sua dimensão diminuída de uma ordem, já que para definição do *Grooming* não é necessário alocar um comprimento de onda exclusivamente para um produto na rede, o problema sem *Grooming* tem essa característica como premissa. Uma outra modificação é a Restrição 14, que por sua vez define que para todos os produtos a serem atendidos, a capacidade total do arco deve ser capaz de alocar um subconjunto dos mesmo. Esta é a restrição que

define o *Grooming*, pois neste caso é possível alocar vários produtos em apenas um comprimento de onda, diferentemente do modelo sem *Grooming*.

A Restrição 15 define a capacidade de balanceamento de carga na rede, ou seja, a divisão do fluxo de dados a fim de não sobrecarregar os enlaces da rede. A Restrição 16 define que para todo arco  $(i, j)$ , o número de comprimentos de onda alocados no enlace não deve ultrapassar a capacidade do arco.

#### 4. Resultados e Discussão

As instâncias foram testadas com o resolvidor *CPLEX 12.1.0*. A configuração da máquina de referência para os testes é a seguinte:

- Linux 2.6.28-13-server Ubuntu x86\_64 GNU/Linux;
- Processador *QuadCore Intel(R) Xeon(R) CPU E5405, 2.00GHz*;
- *8GB* de memória *RAM* e *6MB* de cache *L2*.

##### 4.1. Entradas

O grafo associado aos testes é constituído pelos custos associados a cada uma das arestas e das suas respectivas capacidades em número de comprimentos de onda que podem ser alocados nelas. Segue abaixo um exemplo simples de entrada.

**Listagem 1. Exemplo de Entrada**

```

1 # produtos (id origem destino demanda) {
2   1 1 3 20
3   2 4 2 30 }
4 # comprimentos de onda (id capacidade) {
5   1 10
6   2 10
7   3 10 }
8 # numero de vertices da rede
9 { 4 }
10 { arquivo_grafo }
```

Os testes tem como objetivo a comparação entre as modelagens com e sem *Grooming*, portanto foi utilizada apenas uma rede como entrada, mostrada na Figura 1, e para cada instância o número de produtos é incrementado de 5.

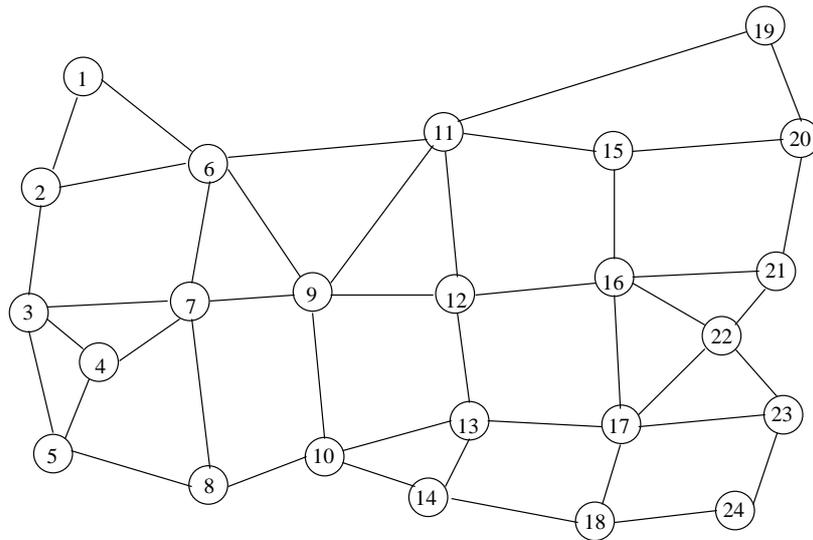


Figura 1. Instância utilizada nos testes

A Tabela 1 apresenta o resultado para os testes levando em consideração as quatro funções objetivo mostradas em 3. Devido ao grande tempo necessário para obter a solução ótima para todos os casos, os resultados apresentam um *gap* abaixo de 10%, mantendo o mesmo tempo de execução para todos os casos. Como o objetivo do trabalho é comparar soluções equivalentes nas abordagens, o fator tempo de execução não interfere na interpretação dos resultados.

Tabela 1. Resultados

Instância	Modelo com Grooming				Modelo sem Grooming			
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
test_1	116	20	0.000363	42	116	20	0.004	116
test_2	157	25	0.000227	45	157	25	0.004	157
test_3	206	30	0.000231	45	206	30	0.005	206
test_4	252	35	0.0002655	46	252	35	0.006	252
test_5	299	40	0.0003975	46	299	40	0.006	299
test_6	347	45	0.000397	49	347	45	0.007	347
test_7	382	50	0.000397	52	382	50	0.008	382
test_8	416	55	0.0004535	60	416	55	0.008	416
test_9	448	60	0.0004585	60	448	60	0.009	448
test_10	494	65	0.000506	60	494	65	0.009	494

Pelos resultados obtidos para a função objetivo  $f_1$  fica claro que não há diferenças em se adotar uma modelagem com *Grooming* ou sem *Grooming*. Neste caso, o que é levado em consideração é a minimização das rotas e mesmo que a alocação dos comprimentos de onda seja realizado, o *Grooming* pode não ser realizado.

Analisando os resultados para a função  $f_2$  também é fácil perceber que as abordagens não interferem na obtenção do valor de  $f_2$ , ou seja, todas as demandas foram atendidas em cada uma das instâncias apresentadas. Foi feita uma

modificação na apresentação da função objetivo  $f_2$  de tal forma que  $f_2 = \sum_{k \in K} a_k$ , só para uma melhor compreensão do atendimento das requisições na rede, o valor de  $f_2$  representa o número de requisições atendidas. Um ponto interessante a ser observado é que, mesmo que para as instâncias apresentadas não houve diferenças no valor da função objetivo, é possível perceber que se aproveitamos melhor a capacidade de um comprimento de onda, fazemos com que seja mais fácil atender um conjunto maior de requisições. Neste caso, a abordagem com *Grooming* vai prover uma maior capacidade de atendimento das requisições.

Os resultados mais interessantes em relação às diferentes modelagens são apresentados pelas funções objetivo  $f_3$  e  $f_4$ . A função  $f_3$  representa o balanceamento de carga na rede e pelo que pode ser observado na Tabela 1, o modelo com *Grooming* apresenta a melhor opção. O motivo deste comportamento pode ser explicado pelo fato de haver uma melhor utilização da capacidade dos comprimentos de onda, fazendo com que haja um número mínimo de comprimentos de onda alocados em um arco  $(i, j)$ , mas haja um grande número de enlaces que estão sendo usados para transportar as requisições. Isso implica que o somatório dos comprimentos de onda alocados será maior nestes caso, mas eles estarão balanceados entre os enlaces da rede. Caso não houvesse o *Grooming*, haveria uma maior parcela de  $B_{ij}$  que não estaria sendo utilizada, implicando em um aumento da função objetivo.

A execução do modelo usando a função objetivo  $f_4$  é a configuração que leva ao resultado mais significativo para o problema de *Grooming* em redes ópticas.  $f_4$  representa o número de comprimentos de onda alocados em todos os enlaces da rede. Podemos observar claramente que o valor para o modelo com *Grooming* é bem menor do que o sem *Grooming*, tal fato é comprovado de acordo com a proposta do problema, já que o objetivo da técnica é justamente diminuir o número de comprimentos de onda alocados na rede.

Uma característica interessante do problema com *Grooming* pode ser exemplificada do *test\_8* até o *test\_10*. Nota-se que o número de comprimentos de onda alocados não é alterado neste intervalo. Essa característica é explicada pela porcentagem de capacidade ainda não utilizada nos comprimentos de onda alocados nos enlaces. Caso haja uma capacidade ainda inutilizada nos comprimentos de onda, os novos produtos podem ser agregados naqueles já alocados. Por outro lado, se analisarmos o modelo sem *Grooming*, não acontece esse tipo de comportamento, já que é definido o uso exclusivo de um  $s \in S$  em um enlace  $(i, j) \in A$  para uma requisição  $k$ , sendo assim o número total é sempre crescente com o aumento do número de requisições.

## 5. Conclusões

Este trabalho apresentou modelos para resolução de problemas que envolvem o projeto de redes ópticas *WDM*. Mais especificamente o problema de *RWA* sobre redes transparentes e o problema de Roteamento. A característica de proteção da rede foi adicionada a todos os modelos a fim de reduzir o número de demandas rejeitadas devido à uma falha em algum enlace ou nó da rede óptica.

A técnica de *Grooming* é agregada ao modelo *RWA* com proteção nos enlaces com o intuito de melhor utilizar os comprimentos de onda disponíveis nos arcos da rede. Visto que a capacidade de transmissão de dados de um comprimento de onda é muito elevada, a não utilização do *Grooming* faz com que haja uma sub-

utilização dos comprimentos de onda, ou seja, dado que um produto ocupe uma pequena porcentagem de sua capacidade, o restante ficará inutilizado. Aplicando o *Grooming*, é possível agregar vários produtos em apenas um comprimento de onda, minimizando assim o custo com a alocação.

Através da análise dos resultados apresentada na Seção 4, é possível observar que há dois cenários em que a aplicação do *Grooming* leva a melhores resultados, que é o caso do balanceamento de carga na rede e da alocação de comprimentos de onda. Para ambos os cenários, o motivo para obter melhores resultados é baseado na realização do *Grooming*. Em relação às instâncias testadas, não há ganhos em se adotar uma estratégia baseada em *Grooming* para as outras funções, apesar de que para a função  $f_2$  ainda haver uma melhor oportunidade de atendimento das requisições com esta abordagem.

De modo geral, a modelagem com *Grooming* é a melhor opção. No entanto, o modelo é mais complexo e os dispositivos ópticos da rede devem atender ao que é proposto pelo modelo. O trabalho tem como premissa o fato de que os dispositivos sejam capazes de agrupar os produtos em um mesmo comprimento de onda, ficando a cargo do modelo definir qual seria a melhor forma de fazer isso.

## Referências

- Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., and Sherali, H. D. (1990). *Linear programming and network flows (2nd ed.)*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.
- Brandão, F. G. (2010). Modelos e algoritmos para o projeto de redes Ópticas WDM. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Filho, T., R., P. P., Júnior, P., G., Z. K., and Mateus, G. R. (2003). Um algoritmo para reconfiguração e agrupamento de tráfego em redes Óticas wdm. *XXXV SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2003, Natal. Anais do XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2003*.
- Júnior, P., G., Z. K., and Mateus, G. R. (2006). Heurística Lagrangeana para o Problema de Traffic Grooming em Redes Óticas WDM. *XXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, 2006, Curitiba. Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, 2006, 2:1121–1138*.
- O'Carvalho, H. (2007). Alocação de tráfego em redes ópticas em anel com proteção. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Resendo, L. C. (2008). Contribuições para o projeto de grooming de tráfego sobre redes ópticas WDM. Tese de doutorado, Universidade Federal do Espírito Santo.
- Shier, D. R. (1976). Algorithms for finding the k shortest paths in a network. *OR-SA/TIMS Joint National Meeting*, page 115.
- Zang, H., Ou, C., and Mukherjee, B. (2003). Path-protection routing and wavelength assignment (RWA) in WDM mesh networks under duct-layer constraints. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(2):248–258.