

UM ALGORITMO DE MELHORIA DETERMINÍSTICA E BUSCA ADAPTATIVA PARA O PROJETO DE REDES ÓTICAS WDM

Leandro Colombi Resendo

Instituto Federal do Espírito Santo - IFES

leandro@ifes.edu.br

Moises Renato Nunes Ribeiro

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

moises@ele.ufes.br

Resumo

O problema do projeto de redes ópticas pode ser dividido em três subproblemas, o projeto da topologia virtual, o roteamento e atribuição dos comprimentos de onda e o problema de *grooming* de tráfego. Nesse trabalho é proposta uma heurística para o projeto de redes ópticas, construída com base em 4 procedimentos: a construção de uma solução inicial de boa qualidade, um processo de melhoria determinística, uma busca local sistemática e uma busca aleatória. Como resultado inicial, é apresentado uma análise de relevância e ajuste de todos os processos envolvidos na heurística. Os testes numéricos foram realizados em duas redes translúcidas, 6 e 14 nós, com diferentes níveis de conectividade. Para a comparação da qualidade das soluções obtidas é mostrado os resultados de um método híbrido (heurística + modelo da programação linear inteira) encontrado na literatura.

Palavras chave: problema *grooming* de tráfego; redes ópticas WDM; heurística.

Abstract

The optical network design problem can be divided in three sub problems, virtual topology design, the problem of routing and wavelength assignment and traffic grooming problem. An approach to design this multi-layer network problem is proposed, using four procedures: a high-quality initial solution, a deterministic method to improve this initial solution, a systematic local search, and a process of random search. In computational tests are presented the relevance analysis for each procedure, and their parameters adjustment. Numerical tests are accomplished on two translucent optical networks, 6 and 14 nodes, considering several connectivity levels. In addition, in the test of quality of results it was presented results obtained from a hybrid method (ILP approach + heuristic) found in literature.

Keywords: traffic grooming problem; WDM optical network; heuristic.

1. Introdução

Entre os diversos benefícios das redes ópticas pode-se destacar, talvez como um dos mais importantes, a capacidade de suportar vários canais de transmissão em uma única fibra através da multiplexação por divisão de comprimento de onda (Wavelength Division Multiplexing – WDM). Porém, a maioria dos clientes/aplicações dessas redes não necessita de um canal inteiro. Na tentativa de melhor aproveitar essa capacidade de transmissão, tem-se observado um empenho em pesquisa para o desenvolvimento de técnicas com o objetivo de acomodar as demandas de tráfego sobre esses canais, de forma eficiente. Relacionados ao problema da acomodação das demandas em uma rede usando sistemas WDM, pode-se citar os seguintes subproblemas: Projeto da Topologia Virtual (*Virtual Topology Design - VTD*) [RS96], Roteamento e atribuição dos Comprimentos de Onda (*Routing and Wavelength Assignment - RWA*) [JMT04] e o Problema de *Grooming* de Tráfego (*Traffic Grooming Problem - TGP*) [RD02]. A seguir é apresentada uma breve descrição de cada um desses:

- Uma das principais funcionalidades das redes ópticas é a possibilidade de se estabelecer caminhos ópticos. Esses caminhos são definidos como conexões ponto-a-ponto que são transparentes aos nós intermediários, isto é, para essas conexões não é realizado processamento eletrônico para fins de roteamento em tais nós. Assim, o VTD consiste basicamente na escolha dos caminhos ópticos da rede.
- Uma vez escolhidos os nós de origem e destino dos caminhos ópticos, é necessário acomodá-los sobre a rede física, isto é, escolher a rota e o comprimento de onda usado por cada conexão. A essa tarefa dá-se o nome de RWA.
- O TGP é definido como o problema de combinar demandas de baixa velocidade em canais de transmissão de alta capacidade. Em geral, considera-se uma configuração de caminhos ópticos pré-estabelecidos e o TGP consiste em combinar o tráfego dentro desses caminhos ópticos.

As Figuras 1, 2 e 3 ilustram os problemas de VTD, RWA e TGP no contexto das redes ópticas. Em cada Figura é representado uma rede óptica com nós de núcleo (2, 3, 5, 6 e 7) e nós de borda (1, 4 e 8), onde cada nó de borda possui usuários e serviços. Na Figura 1 é representado duas demandas, com origem nos nós 1 e 8 e ambas destinadas ao nó 4, em um cenário de rede onde as demandas sofrem processamento eletrônico em todos os nós (conhecido com rede opaca) e sem agrupamento de tráfego. Nesse cenário nota-se o uso de dois comprimentos de onda nos enlaces 2-3 e 3-4 e um processamento eletrônico nos nós 2, 3, 5 e 7, sendo que os nós 2 e 3 precisam processar as duas demandas. Além desses recursos, contabiliza-se também 16 conversões óptica-eletrônica ou eletrônica-óptica que são realizadas por dispositivos chamados de transceptores, que também representam custo à rede.

Na Figura 2 são representadas as mesmas demandas, 1-4 e 8-4, porém admitindo a possibilidade de agrupamento de tráfego no nó 2. Assim, com uma solução para o TGP e o RWA obtêm-se a economia de 1 comprimento de onda nos enlaces 2-3 e 3-4 com uma redução de 4 transceptores. Contudo, os nós 2 e 3 continuam com a mesma quantidade de processamento eletrônico.

Usando 1 caminho óptico, entre os nós 2 e 4, a Figura 3 representa uma rede translúcida. Com uma solução para o VTD, RWA e o TGP combinados, essa figura apresenta um configuração onde, além da redução do número de comprimentos de onda e extinção do processamento eletrônico no nó 3, obteve-se a acomodação do tráfego com apenas 10 transceptores.

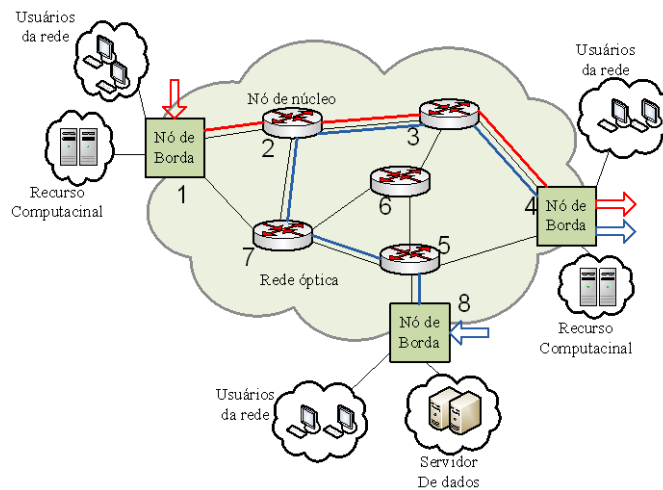


Figura 1: Demandas 1-4 e 8-4 em uma rede **opaca** e **sem** agrupamento de tráfego

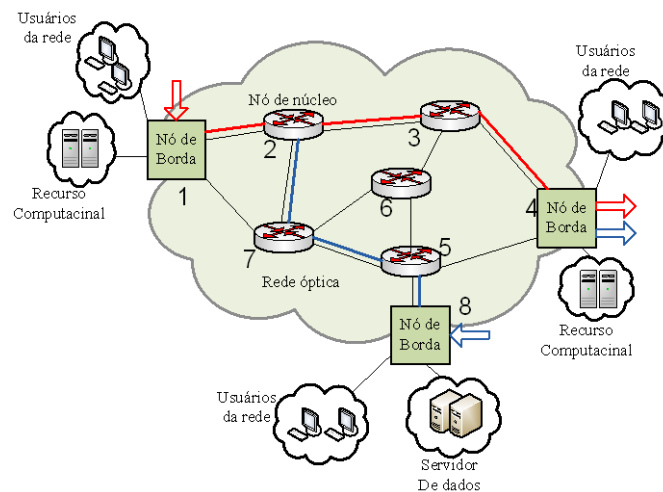


Figura 2: Demandas 1-4 e 8-4 em uma rede **opaca** e **com** agrupamento de tráfego

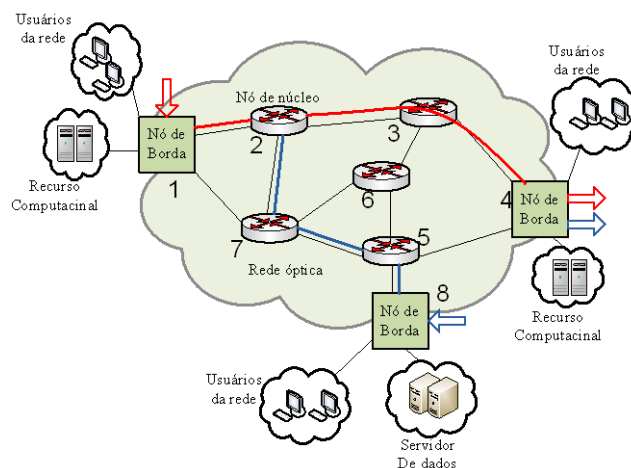


Figura 3: Demandas 1-4 e 8-4 em uma rede **translúcida** e **com** agrupamento de tráfego

Comparando as Figuras 1, 2 e 3 fica claro que um dos principais objetivos dos problemas de VTD, RWA e TGP é encontrar uma configuração da rede, de forma a acomodar o tráfego minimizando os custos em instalação. Esse será função objetivo para o algoritmo desenvolvido nesse trabalho.

Para cada um dos problemas, é possível encontrar na literatura uma grande quantidade de métodos para a solução, que se dividem basicamente em métodos heurísticos e exatos. Como a complexidade do problema da configuração das redes óptica é NP-Completo [WCF00], seguindo a tendência de outros trabalhos de tentar encontrar soluções de boa qualidade em um tempo computacional viável, nesse artigo é proposta uma heurística para tal problema. Ainda é apresentada uma comparação dos resultados obtidos nesse trabalho com outro artigo que propõem um modelo híbrido [RRC07]. Nesse modelo, uma heurística pré-seleciona e atribui rotas a um conjunto de caminhos ópticos possíveis, em seguida um modelo de programação linear inteira (*Integer Linear program* – ILP) escolhe os caminhos ópticos que devem ser efetivamente usados para compor uma solução para o TGP [RRC07].

1.1. Trabalhos Relacionados e Contribuições

Na literatura existem alguns algoritmos que já são bem conhecidos para os subproblemas citados. Dentre os problemas mencionados, provavelmente o mais estudado é o problema de roteamento e atribuição dos comprimentos de onda. Para o roteamento, os algoritmos encontrados na literatura podem ser divididos em três métodos básicos: rota fixa, rotas alternativas pré-fixadas e rotas adaptativas [ZJM00], onde o método de rota fixa utiliza apenas uma rota possível para atender cada conexão. Assim, caso não haja mais recurso em algum ponto da rota a conexão é bloqueada. O método de rotas alternativas é similar ao anterior, porém possui um conjunto de possíveis rotas. Para o mecanismo de rotas adaptativas o caminho é calculado dinamicamente conforme o estado atual de rede. Nesse trabalho é usado o método de rotas adaptativas, acrescido da possibilidade de particionamento de uma demanda, roteando cada parte por caminhos diferentes. Junto com o roteamento, é comum encontrar a atribuição dos comprimentos de onda, formando o conhecido problema de RWA. Em [ZJM00] são analisados 10 algoritmos para a atribuição dos comprimentos de onda, sendo constatado um similar desempenho entre todos eles.

Para o TGP já existem propostas na literatura várias heurísticas, sendo algumas citadas a seguir. Uma das formas de se construir uma heurística é através do uso de uma meta-heurística. Sendo a meta-heurística uma representação de um algoritmo geral que pode ser aplicado em diferentes problemas de otimização, necessitando apenas de pequenas modificações para a adaptação de um problema específico. A seguir são citadas e comentadas algumas meta-heurísticas aplicadas ao TGP:

- GRASP: [BB02] apresenta um algoritmo para encontrar soluções para o VTD com a minimização do número de caminhos ópticos, porém o trabalho ainda carece de uma comparação com modelos exatos e a apresentação de uma busca local sistemática, que os autores sugerem como trabalhos futuros;
- Algoritmo Genético: em [AAG06] é apresentado um Algoritmo Genético para o TGP junto com outras heurísticas para a comparação. Contudo, em geral, uma comparação de resultados entre heurísticas não é muito confiável, pois nenhuma delas assegura a otimalidade de resultados ou um limite inferior nos resultados;
- *Simulated Annealing*: em [DSS03] é apresentada uma heurística usando o *Simulated Annealing* para o TGP com proteção para falha única de enlace. Como o trabalho anteriormente mencionado, esse também apresenta a comparação com outras heurísticas, porém inclui nos resultados numéricos uma comparação com modelos ILPs, admitindo soluções com 10% de *gap*. Adicionalmente, a proposta do trabalho se limita ao estudo das redes opacas e, também não oferece suporte para a reprodução dos resultados, omitindo as matrizes de tráfego estudadas;
- Busca Tabu: aplicado ao TGP é detalhada em [BHJ06]. Contudo, o trabalho não apresenta comparações ou meios para reprodução dos resultados. O processo usado para gerar a solução

inicial para a heurística nesse trabalho é similar ao proposto em [BHJ06]. Porém, como nas outras heurísticas citadas, nos algoritmos propostos não existe a possibilidade da sub-divisão de uma demanda em mais de uma conexão, que é uma funcionalidade oferecida pelas redes ópticas. Como a divisão de demandas é frequentemente observada em soluções para o TGP geradas por modelos ótimos (por formulações ILP), a heurística aqui proposta tenta imitar esse fenômeno para a redução do número de transceptores;

- encontram-se ainda outros métodos, como heurísticas baseadas na intuição dos autores, com a apresentada em [ZZM05]. Nesse trabalho, a heurística apresentada é extremamente simples, primeiro são atribuídos as conexões de um salto e em seguida o restante, em ordem decrescente da quantidade de demanda. Note que nesse caso tal algoritmo apenas constrói uma solução, não apresentando nenhum tipo de busca local ou tentativa de melhoria da solução gerada.

A heurística aqui proposta segue a subdivisão do problema de otimização das redes ópticas descrita anteriormente. Após a pré-seleção dos caminhos ópticos, o método utilizado para otimização do TGP é composto basicamente de quatro funções: i) a construção de uma solução inicial, ii) um método determinístico para eliminar canais subutilizados, iii) um procedimento de busca local sistemática, iv) e um procedimento para gerar perturbações aleatórias no processo de busca local. Na próxima seção é apresentado um pseudo-código dando uma visão geral da construção da heurística, bem como a explicação de cada uma das funções que a compõe. Na Seção 3 são apresentados alguns resultados numéricos para redes de 6 e 14 nós, contendo ainda os resultados obtidos por um modelo híbrido para a comparação [RRC07]. Nos resultados numéricos é apresentado para cada rede física testada, um número crescente de caminhos ópticos, oferecendo como configuração para otimização da rede, desde a rede opaca até uma rede totalmente transparente. Além da contribuição do modelo heurístico as comparações dos resultados numéricos trazem conclusões interessantes para a otimização de redes com capacidade de agrupamento de tráfego. Finalmente, na última seção, são apresentadas algumas conclusões e sugeridas possíveis formas de evolução desta heurística.

2. Heurística para o TGP em Redes Translúcidas

O pseudo-código do Algoritmo 1, que chamamos de *Systematic and Adaptive Search Heuristic (HeuristicSAS)*, representa em linhas gerais a heurística proposta. Nessa heurística a pré-seleção e o roteamento do conjunto de caminhos ópticos são realizados separados do algoritmo usado para resolver o TGP. Assim, os caminhos ópticos são apenas novas restrições para o TGP, que é resolvido pelos procedimentos *Squeeze*, Busca Local (BL) e *Random Search* (RS).

Algoritmo 1: *HeuristicSAS* (N)

```
1: Entrada: Matriz de tráfego e a topologia física da rede
2: Projeto de Topologia Virtual (Algoritmo 2)
3: Gerar Solução Inicial
4: Squeeze (Algoritmo 3)
5: for Critério de parada 1 do
6:     Busca Local - BL
7:     for Critério de parada 2 do
8:         Random Search - RS (Algoritmo 4)
9:     end for
10: end for
```

Note que a heurística é construída em módulos. Sendo possível, de forma bem simples, a retirada ou inserção de novos módulos de otimização. A seguir é feito um detalhamento dos procedimentos usando no Algoritmo 1.

Escolha e Roteamento de um Caminho Óptico

Tentando reduzir o número de transceptores nos nós intermediários em uma conexão, a função usada para escolher os caminhos ópticos pondera entre: i) a quantidade de tráfego da requisição entre os nós s e d ; e ii) a quantidade de saltos de uma demanda sd . Por outro lado, para cada caminho óptico, um novo transceptor precisa ser instalado. Assim, espera-se que a redução do número de transceptores obtida pelo uso de novos caminhos ópticos tenha um limite ótimo.

Na heurística proposta, os caminhos ópticos são escolhidos segundo uma ordem de prioridade,

$$TL_{sd}, TL_{sd} = H_{sd} \times (\text{traf}[s][d] + \text{traf}[d][s]), \quad (1)$$

onde H_{sd} é o número de saltos do caminho mínimo entre sd e $\text{traf}[s][d]$ é a demanda de tráfego entre os nós sd , dada pela matriz de tráfego.

O pseudo-código do Algoritmo 2 ilustra o procedimento que acomoda os caminhos ópticos na topologia física.

Algoritmo 2: Atribuição dos Caminhos Ópticos

```

1: Entrada: Escolher número de caminhos ópticos existentes na rede.
2: Ordenar os caminhos ópticos segundo  $TL_{sd}$ .
3: for Para todos os caminhos ópticos  $l$ . do
4:   for Percorrer todas as rotas  $k$ , possíveis para o caminho óptico  $l$ . do
5:     for Percorrer todos os comprimentos de ondas,  $w$ . do
6:       if A rota  $k$  e comprimento de onda  $w$  está disponível then
7:         Atribuir o caminho óptico  $l$  na a rota  $k$  e comprimento de onda  $w$ .
8:       end if
9:     end if
10:  end for
11: end for

```

Na linha 4 do Algoritmo 2 as rotas já estão previamente ordenadas pelo número não decrescente de saltos. Assim, os caminhos ópticos são roteados segundo o menor caminho que tenha pelo menos um comprimento de onda disponível. Isto é feito de forma que cada enlace físico ainda tenha disponível pelo menos um comprimento de onda para a comunicação entre nós fisicamente adjacentes. Uma vez escolhidos e roteados todos os caminhos ópticos, a redução do número de transceptores é quantificada através de uma sequência em cenários de rede. De modo que o primeiro cenário de rede tenha, além dos enlaces físicos, um caminho óptico para rotear as demandas de tráfego; o segundo, com 2 caminhos ópticos; e subsequentemente, o último cenário de rede possui disponível pelo menos uma conexão direta entre dois nós, sendo um enlace físico ou um caminho óptico. Através dessa sequência de cenários de rede, com uma quantidade progressiva de caminhos ópticos, os resultados numéricos também mostram a relação entre a quantidade de caminhos ópticos disponíveis e a economia de transceptores.

Cenário Inicial

De posse dos possíveis caminhos ópticos resultantes do VTD, é necessário gerar uma solução inicial que será a entrada dos procedimentos para as melhorias de solução, propostos no Algoritmo 1. Vale destacar que em todos os procedimentos onde é realizado algum roteamento de demanda, é permitida a subdivisão das demandas em canais e rotas diferentes. Mais adiante é exemplificado este recurso.

Para gerar o cenário inicial, é utilizado um algoritmo para encontrar as k -menores rotas entre cada par origem e destino. Nesse trabalho é usado o algoritmo de Yen [Ye71]. Durante a construção da solução inicial, o algoritmo primeiramente tenta atribuir a rota com o menor número de saltos. Para gerar soluções iniciais de boa qualidade foram analisados três processos, atribuindo as demandas na ordem crescente, decrescente e arbitrária, de carga. Adicionalmente, tem-se que as redes estudadas neste trabalho sempre terão capacidade para acomodar as demandas de tráfego. Apenas por questões de implementação, os comprimentos de onda foram previamente ordenados como, $\{1, 2, \dots, w\}$. Assim, têm-se os seguintes casos:

1. A demanda entre o par sd é menor do que a banda disponível no “primeiro” canal de uma rota. Neste caso, a atribuição é trivial e a demanda é imediatamente alocada.
2. A demanda entre o par sd é maior do que a banda disponível no “primeiro” canal de uma única rota, porém ainda existem outros canais disponíveis nessa rota. Assim, é alocada a maior quantidade de demanda possível no canal primeiro canal com alguma disponibilidade e o restante nos canais seguintes, obedecendo à ordem pré-estabelecida. Note que, nesse caso, a demanda é subdividida usando mais de um canal na mesma rota.
3. A demanda entre o par sd é maior do que a banda disponível no “menor” canal de uma única rota, sendo que já não existem mais canais disponíveis nesta rota. Assim, é alocada a maior quantidade de demanda possível nesta rota e o restante da demanda é alocado na próxima rota, seguindo os procedimentos 1 e 2 anteriores. Neste caso, a demanda também é subdividida, porém usando mais de uma rota.

Assim, nota-se que a solução inicial aqui proposta é determinística, contrário do que acontece em outras heurísticas encontradas na literatura. Por exemplo, o GRASP, que insere um fator probabilístico na construção de uma solução inicial [BB02].

Para as funções a seguir, denotar-se-á uma configuração/solução da rede por $C_{r,w}^{sd}$, representando a quantidade de tráfego com origem no nó s e destino no nó d usando a rota r e comprimento de onda w , e o número de transceptores usados nesta solução é dado por $NT(C_{r,w}^{sd})$.

Squeeze

Essa função tem como objetivo eliminar dispositivos subutilizados, através de um procedimento determinístico descrito no pseudocódigo do Algoritmo 3.

Algoritmo 3: *Squeeze*

- 1: **Entrada:** Uma configuração da rede, $C_{r,w}^{sd}$
- 2: **for** Para cada canal w sobre uma conexões ponto-a-ponto (enlace físico ou caminho óptico) ij
- do**
- 3: **if** w é subutilizado **then**
- 4: **Encontrar** todas as demandas sd passando por este canal.
- 5: **Re-rotear** sd usando um caminho disjunto de ij , criando uma nova configuração $C_{r,w}^{sd}$.
- 6: **if** $NT(C_{r,w}^{sd}) < NT(C_{r,w}^{sd})$ **then**
- 7: Aceitar $C_{r,w}^{sd}$ como a configuração atual.
- 8: **end if**
- 9: **end if**
- 10: **end for**

Descrição do Algoritmo 3:

O método percorre todas as conexões ponto-a-ponto (enlace físico ou caminho óptico transparente) e comprimentos de onda, buscando canais com um baixo nível de utilização. Quando encontrado um comprimento de onda w na condição de subutilizado, o algoritmo tenta re-rotear todas as demandas sd passando por este canal w , de forma que cada nova rota deve ser disjunta do enlace ij , onde foi encontrado o comprimento de onda w com baixa utilização. Esta tarefa tem o objetivo de eliminar um transceptor do cenário de rede $C_{r,w}^{sd}$, que está sendo subutilizado. Por observação, é considerado um canal subutilizado aquele transportando tráfego abaixo de 25% da capacidade. Abaixo desse valor, observou-se que, quando o algoritmo elimina o uso de um componente, acaba tornando subutilizado outro ponto da rede. Resultados numéricos comprovando estas afirmações são apresentados na Seção 3. Note que se tal função for executada duas vezes sobre o mesmo cenário de rede será obtida a mesma nova configuração, assim o procedimento *Squeeze* é considerado determinístico. Apesar desse processo ser restrito em termo de busca de novas soluções, combinando uma busca local sistemática e uma busca aleatória, o mesmo contribuiu para a melhoria do desempenho da heurística.

Busca Local (BL)

Primeiramente, é necessário definir a vizinhança onde é realizada a busca por uma nova solução. Assim, seja $C_{r,w}^{sd}$ uma configuração da rede, onde tal estrutura contém informações sobre o particionamento, roteamento, atribuição de comprimento de onda e carga de todas as demanda de origem-destino (sd). Como as rotas são indexadas em ordem crescente do número de saltos, a vizinhança assumida é definida como a troca de uma rota de índice t por outra de índice $(t + 1)$ ou $(t - 1)$, para todas as subdivisões de cada demanda sd . Como exemplo, assumamos uma configuração $C_{r,w}^{sd}$ onde existe uma demanda de 48 unidades de tráfego do nó 2 para o nó 5, sendo roteadas 32 unidades de tráfego pela rota 0 e comprimento de onda 1, e 16 unidades de tráfego sendo roteados usando a rota 1 e comprimento de onda 0. Na Figura 4 é destacada, com uma elipse tracejada, a parte da vizinhança de $C_{r,w}^{sd}$ que está relacionada com o par origem-destino (2,5). Note que o índice do comprimento de onda está com uma interrogação, isso significa que o algoritmo tenta alocar a demanda em questão em qualquer comprimento de onda daquela rota; caso não seja possível, este elemento é excluído da vizinhança de $C_{r,w}^{sd}$. Assim, a busca local é realizada em todos os pares sd .

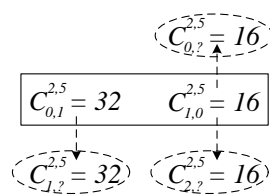


Figura 4: Ilustração de uma parte da vizinhança de uma solução $C_{r,w}^{sd}$ relacionada aos nós de origem-destino (2,5)

Durante o processo de análise da vizinhança, caso um novo cenário encontrado possua uma configuração com um número menor de transceptores, este novo cenário é considerado como a solução atual. Para o caso de uma solução possuir o mesmo número de transceptores do cenário atual, é decidido aleatoriamente, com uma probabilidade de 50%, se esse elemento da vizinhança se torna o cenário atual. Isso possibilita a troca sistemática de configuração sem que haja aumento do número de transceptores, buscando escapar de mínimos locais.

Random Search

Esse procedimento realiza uma busca aleatória na solução atual, através do re-roteamento de uma demanda sd escolhida. O objetivo aqui é tentar escapar de possíveis mínimos locais encontrados pela Busca Local e *Squeeze*. O Algoritmo 4 mostra o pseudo-código do procedimento. Apesar do algoritmo usar uma idéia bem simples, foi possível obter bons resultados.

Algoritmo 4: RS

- 1: **Escolha aleatória** de uma demanda sd
- 2: **Desalocar** traf[s][d] do(s) caminho(s) usado(s) para atender sd
- 3: **Escolha aleatória** de um novo caminho para sd gerando a configuração $C_{r,w}^{sd}$.
- 4: **if** $NT(C_{r,w}^{sd}) \leq NT(C_{r,w}^{sd})$ **then**
- 5: Aceitar $C_{r,w}^{sd}$ como solução da configuração atual
- 6: **end if**

Descrição do Algoritmo 4:

Em uma configuração da rede $C_{r,w}^{sd}$ é escolhida aleatoriamente uma demanda sd , sendo todos os pares sd equiprováveis. Assim, toda a demanda de sd (traf[s][d]) é realocada em um novo caminho diferente do anterior, gerando assim uma nova configuração da rede $C_{r,w}^{sd}$. Como anteriormente, as possibilidades das novas rotas também são equiprováveis. Caso $C_{r,w}^{sd}$ tenha um número menor ou igual de transceptores em relação à configuração $C_{r,w}^{sd}$, $C_{r,w}^{sd}$ será considerada como cenário atual.

3. Avaliação da Heurística

A avaliação da heurística foi feita sobre duas topologias de rede, de 6 e 14 nós apresentadas na Figura 5.

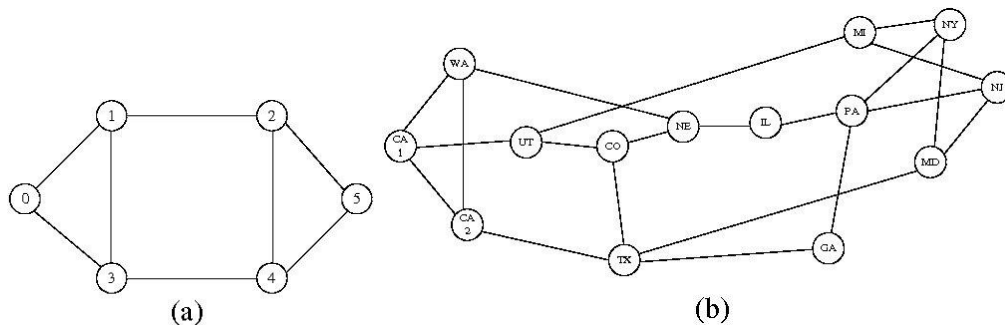


Figura 5: Topologias das redes de 6 nós (a) e 14 nós (b)

Para a comparação com os resultados obtidos pela *HeuristicSAS*, também são apresentados os resultados obtidos pelo método híbrido, anteriormente mencionado. Contudo, os processos de resolução dos modelos ILPs foram limitados a 1 hora. Os modelos ILPs gerados pelo método híbrido foram resolvidos usando o software Cplex 9.0. Os testes numéricos foram realizados usando as matrizes de tráfego apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Matrizes de tráfego usada nas redes de 6 e 14 nós

nós	0	1	2	3	4	5	nós	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	48	48	32	16	16	1	0	48	16	48	48	32	16	16	16	16	48	32	32	48
1	32	0	16	48	32	48	2	48	0	32	16	16	48	48	16	16	16	32	32	16	16
2	16	16	0	16	48	64	3	16	16	0	16	32	32	16	48	16	48	16	32	16	32
3	16	16	16	0	32	16	4	32	16	16	0	16	48	16	48	16	16	48	16	32	16
4	64	16	16	32	0	16	5	16	16	48	32	0	16	16	16	32	48	32	32	32	48
5	16	16	16	48	16	0	6	32	64	16	32	16	0	16	48	32	16	32	32	16	48
							7	16	16	48	32	16	16	0	32	48	48	48	48	16	16
							8	32	32	16	16	32	32	16	0	48	16	32	64	16	16
							9	16	48	48	32	32	48	32	16	0	32	32	32	16	32
							10	16	16	16	16	32	16	64	32	16	0	32	16	32	32
							11	32	16	16	48	32	32	32	32	16	16	0	32	32	32
							12	16	16	64	16	32	16	16	64	32	32	16	0	32	16
							13	32	16	32	16	32	16	32	16	16	16	48	48	0	64
							14	48	16	32	32	32	32	32	32	32	16	16	64	16	0

3.1. Avaliação dos Parâmetros

Nesta seção é analisado o desempenho de cada procedimento utilizado na heurística e os resultados obtidos com a variação dos parâmetros existentes em cada um deles. Nas Figuras de 6 a 11, a abscissa apresenta o número de caminhos ópticos disponíveis para rede e a ordenada trás o número de transeptores obtidos em cada instância.

Solução Inicial

A Figura 6 apresenta os resultados numéricos obtidos pela função usada para gerar a solução inicial, comparando a acomodação das demandas em ordem crescente (as demandas de menor carga primeiro), arbitrária e decrescente (as demandas de maior carga primeiro). Nota-se que a ordenação decrescente produz soluções iniciais de baixa qualidade, que pode comprometer o desempenho das funções *Squeeze* e BL, afetando também o resultado final obtido pela heurística. Essa característica se deve ao fato do algoritmo permitir o particionamento do tráfego em rotas e canais diferentes. Adicionalmente, comparando a ordenação crescente e arbitrária observa-se que a primeira é ligeiramente melhor, porém, há casos onde a ordenação arbitrária obteve resultados melhores do que a ordenação crescente. Contudo, os resultados numéricos mostraram que a diferença entre estas duas formas de ordenação, crescente e arbitrária, não é suficiente para influenciar no desempenho das funções *Squeeze* e BL.

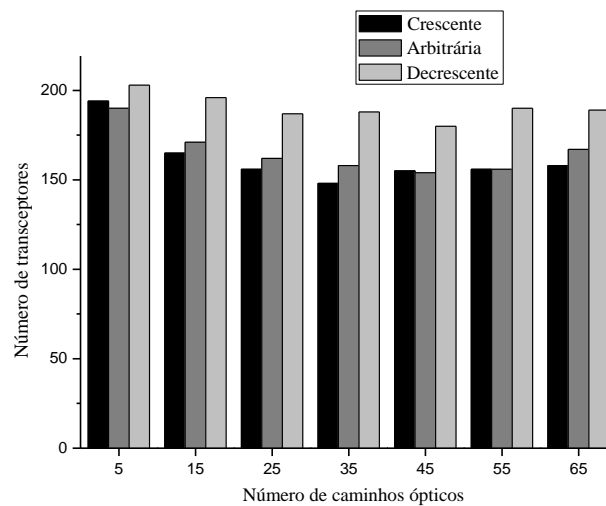


Figura 6: Análise de desempenho do procedimento que gera a Solução Inicial

Parâmetro de Subutilização dos Comprimentos de onda

A Figura 7 mostra os resultados obtidos para configuração inicial e o procedimento *Squeeze* em alguns dos níveis de conectividade estudados (i.e., número de caminhos ópticos diferentes). O procedimento *Squeeze* é analisado variando o parâmetro que define quais comprimentos de onda estão sendo subutilizados. Assim, os resultados investigados são: o resultado obtido pelo procedimento usado para construir a solução inicial e o procedimento de *Squeeze*, considerando canais subutilizados como 25%, 50% e 75% da sua capacidade. O procedimento que obteve melhor desempenho considera a extinção dos canais utilizando 25% da sua capacidade, exceto para 15 e 25 caminhos ópticos, que obtiveram resultados próximos ao de 50%. Portanto, o critério para determinar a subutilização de comprimentos de onda usados na heurística foi de 25% da capacidade do canal. Adicionalmente, note que a tentativa de deixar todos os comprimentos de onda com uma alta utilização pode piorar a solução inicial, que já é considerada boa. Por exemplo, para os casos da rede com 5 e 65 caminhos ópticos.

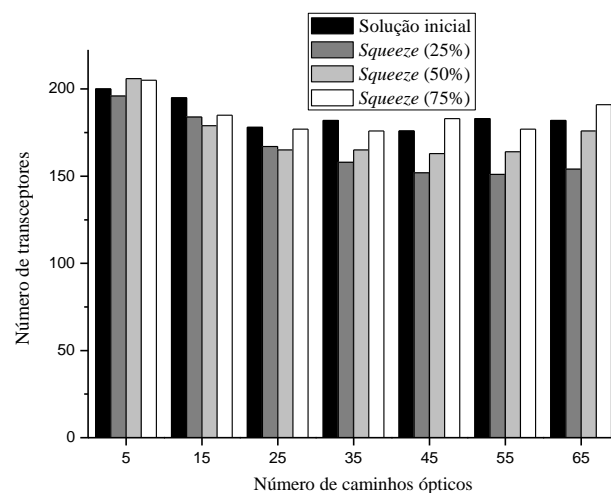


Figura 7: Análise de desempenho do procedimento de *Squeeze*

Critérios de Parada

O Algoritmo 1 apresenta dois *loops* básicos, sendo o primeiro para repetir o processo de busca local e, interno a esse, outro para repetir a busca aleatória. Inicialmente considerou-se como critério de parada desses procedimentos, um índice de utilização da rede. Como em alguns testes, tais procedimentos iniciaram um *loop* de parada indeterminada, assim em ambos os casos foi adotado o número de iterações como critério de parada. A escolha desses números de iterações foi puramente empírica e obtida através dos resultados ilustrados nas Figuras 8 e 9.

A Figura 8 representa alguns dos resultados obtidos pelo procedimento de *Random Search*. Para esse teste, o algoritmo PA foi aplicado sobre a solução inicial, variando apenas o número de iterações (para 100, 1000 e 10000 iterações). Nota-se que na maioria dos casos, 100 iterações não são suficientes para uma melhora considerável, sendo que 1000 e 10000 iterações obtiveram resultados bem próximos. Para os resultados com 15 e 35 caminhos ópticos, 1000 iterações alcançaram um resultado ligeiramente inferior ao atingido com 10000 iterações. Esse fenômeno se deve à total aleatoriedade no procedimento. A Figura 9 ilustra o desempenho do procedimento de Busca Local em relação ao número de iterações. Nota-se que 10 ou 100 iterações atingiram os mesmos resultados, melhorando apenas após 1000 iterações. Para simplificar o gráfico são apresentadas até 1000 iterações, porém realizando mais testes para o procedimento BL, constatou-se não haver mais ganhos na qualidade das soluções a partir de 1000 iterações. Sendo assim, em ambos critérios de parada foram usados 1000 iterações. Os resultados apresentados nas Figuras 8 e 9 ainda mostram que a solução de roteamento por caminho mínimo, que é uma solução oferecida por muitos sistemas comerciais, é uma configuração ineficiente para redes com capacidade de agrupamento de tráfego.

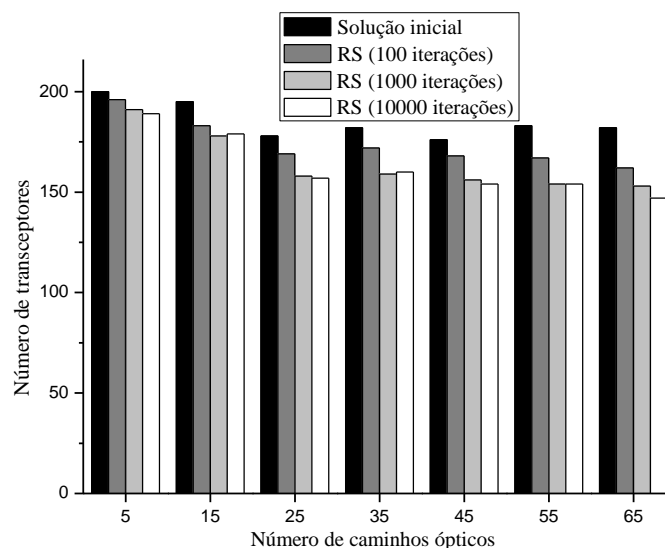


Figura 8: Análise de desempenho do procedimento *Random Search*, com o Critério de Parada 2

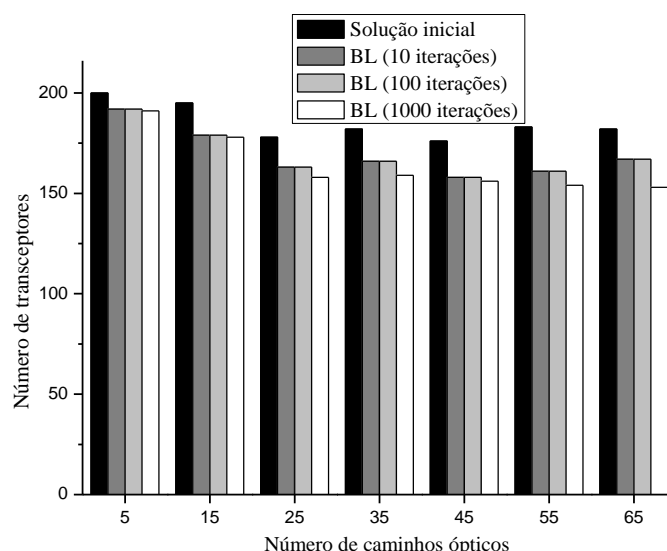


Figura 9: Análise de desempenho do procedimento *Random Search*, com o Critério de Parada 1

Comparação da heurística com um Modelo ILP

As Figuras 10 e 11 trazem os resultados obtidos pela *HeuristicSAS* e pelo modelo híbrido, para as redes de 6 e 14 nós, respectivamente. Adicionalmente, na Figura 11, o número no topo da coluna dos resultados do método híbrido mostra o *gap* retornado pelo Cplex após uma hora de processamento, sendo que as colunas que não apresentam tal *gap* obtiveram o resultado ótimo para a instância em questão.

A Figura 10 apresenta os resultados da heurística, com e sem o procedimento de busca local, comparados com o modelo híbrido usando como função objetivo a minimização global do número de transceptores, para a rede de 6 nós ilustrados na Figura 5 (a). Nessa comparação os resultados apresentados pela heurística com busca local foram próximos do ótimo obtidos pelo modelo híbrido. Isto pode ser observado em todos os níveis de conectividade da rede, desde a rede opaca até a rede com a possibilidade de uso de todos os caminhos ópticos. Cabe destacar que a rede de seis nós não oferece um número de variáveis suficiente para uma análise do tempo computacional, pois a heurística é resolvida quase que instantaneamente, e o modelo ILP não excedeu 1 minuto de processamento em nenhuma das instâncias. Comparando os resultados heurísticos nota-se que a heurística com busca local obteve melhores resultados em quase todos os casos, exceto para 4 e 6 caminhos ópticos, onde as duas obtiveram os mesmos resultados. Provavelmente, nesses casos, devido ao reduzido tamanho da rede o procedimento RS foi capaz de obter uma solução de boa qualidade.

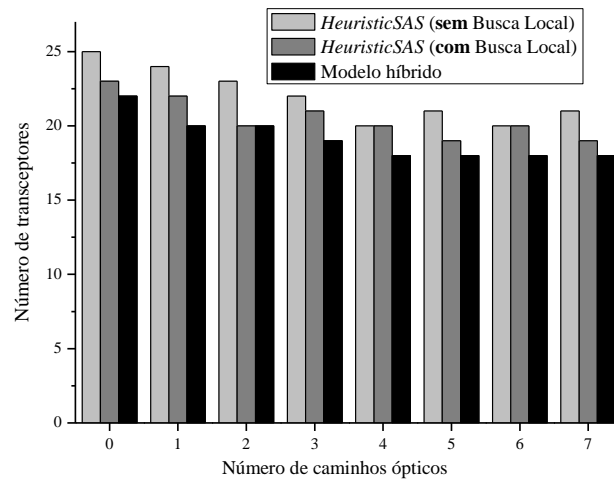


Figura 10: Comparação dos resultados obtidos pela *HeuristicSAS* e pelo método híbrido para a rede de 6 nós

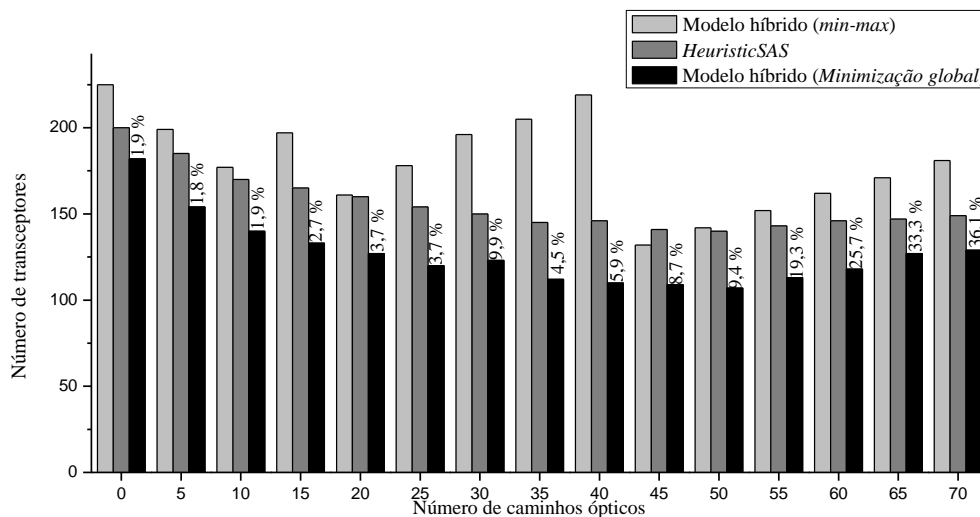


Figura 11: Comparação dos resultados obtidos pela *HeuristicSAS* e pelo método híbrido para a rede de 14 nós, considerando as funções objetivo de min-max e de minimização global

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos pela *HeuristicSAS* e pelo modelo híbrido (apresentado em [RRC07]), com as funções objetivo de minimização global e minimização do enlace mais carregado, “min-max”, do número de transceptores, para a rede de 14 nós. Comparando os tempos computacionais dos três métodos tem-se que: a formulação ILP com minimização global foi interrompida após uma hora de processamento, sendo apresentado o *gap* no topo de cada coluna, a formulação otimizada para o min-max é resolvida em menos de 1 minuto e a heurística obtém o resultado com aproximadamente 4 minutos. No método híbrido, a função objetivo com a minimização global obtém melhores resultados em relação ao número total de transceptores, porém, o modelo com esta função objetivo mostra claramente uma complexidade computacional mais elevada, sendo esta complexidade crescente com o número de conexões da rede, como mostrado através do *gap*. Observando os resultados obtidos pela função objetivo de minimização do enlace mais carregado, tal comportamento é explicado pelo fato da otimização ser feita para o enlace mais carregado. Encontrando o mínimo, para esse enlace o

modelo pode distribuir o tráfego na rede de maneira mais uniforme, aumentando o número total de transceptores. Porém, quando o novo caminho óptico acrescido proporcionando uma redução no número de transceptores, o modelo passa a ter menos “espaço” para rotear o tráfego, assim obtendo também um número baixo de transceptores. Adicionalmente, tem-se que a formulação minimizando o pior caso obteve o min-max igual 5 transceptores para a rede opaca (zero caminho óptico), 4 transceptores para a rede com 5 caminhos ópticos, 3 para a rede com 10 e 15 caminhos ópticos, 2 para a rede tendo de 20 a 40 caminhos ópticos e 1 para a rede tendo acima de 45 caminhos ópticos.

Comparando os resultados da Heurística com as duas formulações ILP, na Figura 11, nota-se que a heurística proposta obteve um resultado entre as duas formulações. Exceto para 45 caminhos ópticos, onde ambas as formulações ILP foram melhores do que a Heurística. Porém, como pode ser observada na figura, as formulações ILP apresentam dificuldades. Como por exemplo, o fato da minimização global possui uma alta complexidade computacional, exigindo um tempo de processamento muito grande. Adicionalmente, os resultados obtidos pelo min-max são altamente dependentes do número de caminhos ópticos disponíveis na rede, não sendo conhecido *a priori* o número de caminhos ópticos para o melhor desempenho do modelo. Enquanto a *HeuristicSAS* independe desses fatores.

4. Conclusão

A *HeuristicSAS* trabalha os problemas de VTD e TGP de forma separada, onde o algoritmo de VTD se resume em habilitar os caminhos ópticos e o TGP é responsável por escolher o conjunto dos caminhos ópticos que são efetivamente usados e atribuir os comprimentos de onda (RWA). A heurística proposta para o TGP, apresentada neste trabalho, consiste basicamente em quatro funções: uma para gerar a solução inicial, uma função para tentar eliminar canais subutilizados, uma busca local sistemática e uma busca aleatória interno ao processo de busca sistemática, tentando “fugir” de possíveis mínimos locais. Para avaliar a heurística, nos resultados numéricos, foram usadas duas redes, com 6 e 14 nós. Nas primeiras análises feitas para a heurística, são apresentados alguns resultados numéricos com o desempenho individual de cada procedimento. Além disso, é mostrado o desenvolvimento do processo de escolha dos parâmetros envolvidos na heurística. Adicionalmente, nessa etapa foi obtido como uma conclusão não prevista, o fato de um roteamento feito por caminho mínimo apresentar uma solução de baixa qualidade para redes com capacidade de agrupamento de tráfego. Em seguida, é feita uma comparação da *HeuristicSAS* com os resultados de um modelo híbrido, para as funções objetivo de minimização global e min-max. Para a rede com 6 nós, a heurística obteve resultados próximos aos encontrados pelo modelo ILP (para a minimização global), encontrando o ótimo para o caso da rede com 2 caminhos ópticos. Para a rede com 14 nós, os resultados da *HeuristicSAS* são comparados um modelo ILP usando as funções objetivo de minimização global e min-max. Para tais resultados, a Figura 11 mostra que a heurística obtém valores intermediários aos alcançados pelas duas funções objetivo, porém, sem as diferentes dificuldades apresentadas por cada função objetivo do modelo. Como por exemplo, a complexidade do modelo usando a minimização global, em relação ao número de conexões, e a variação dos resultados para as diferentes quantidades de caminhos ópticos, com o min-max. Além disso, os resultados da Figura 11 podem ser utilizados para inferir o crescimento da complexidade do modelo híbrido com as funções objetivo de minimização global e min-max, em relação ao número de conexões de uma topologia. Para isso basta observar o crescimento do *gap* após uma hora de processamento do modelo ILP, na minimização global.

Como trabalhos futuros pode-se “evoluir” a heurística, inserindo novas funcionalidades, para o uso de outras estratégias, como por exemplo, múltiplas soluções iniciais, ou o “cruzamento” de soluções. Outra “evolução” interessante é a implementação de funções para que a heurística possa contemplar outros aspectos das redes ópticas, como restrições de camada física. Cabe ainda destacar que toda a apresentação dos algoritmos e exemplos foi feita de

maneira a possibilitar a reprodução da heurística e dos resultados obtidos. Isso permite uma comparação confiável com outros trabalhos e métodos propostos.

Agradecimento

Esse trabalho foi parcialmente patrocinado pelo PRPPG/Ifes – Progrupos através do Edital 01/2010 e FAPES – Processo 45445648/09.

5. Referências Bibliográficas

[AAG06] Awwad, O., Al-Fuqaha, A. I. e Guizani, M., *Genetic Approach for Traffic Grooming, Routing, and Wavelength Assignment in WDM Optical Networks with Sparse Grooming Resources*, ICC '06, IEEE International Conference on Communications, vol. 6, pp. 2447-2452, (2006).

[BB02] Brunato, M. e Battiti, R., *A multistart randomized greedy algorithm for traffic grooming on mesh logical topologies*, Conference on Optical Network Design and Modelling, pp. 417-430, (2002).

[BHH06] Bouffard, A., Houle, A. e Jaumard, B., *GRWA Provisionning and Segment Protection in WDM Optical Networks*, CCECE '06, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 999-1002, (2006).

[DR02] Dutta, R. e Rouskas, G.N., *Traffic grooming in WDM networks: past and future*, IEEE Network, pp. 46-56, 2002.

[DSS03] Datta, P., Sridharan, M., e Somani, A. K., *A simulated annealing approach for topology planning and evolution of mesh-restorable optical networks*, Proceedings of IFIP Working Conference on Optical Network Design and Modeling, vol. 1, pp. 23-40, (2003).

[JMT04] Jaumard, B., Meyer, V. e Thiongane, B., *ILP formulations and optimal solutions for the RWA problem*, Global Telecommunications Conference, pp. 1918-1924, 2004.

[RRC07] Resendo, L. C., Ribeiro, M. R. N. e Calmon, L. C., *Efficient Grooming-Oriented Heuristical Solutions for Multi-Layer Mesh Networks*, Journal of Microwaves and Optoelectronics, pp. 263-267, 2007.

[RS06] Ramaswami, R. e Sivarajan, K. N., *Design of logical topologies for wavelength routed optical network*, IEEE J. Sel. Areas Comun, vol. 14, pp. 840-851, 1996.

[WCF00] WAN, P., CALINESCU, G. e FRIEDER, O., *Grooming of arbitrary traffic in SONET/WDM BLSRs*, Selected Areas in Communications, [S.I.], v.18, n.10, pp.1995–2003, Oct, 2000.

[Ye71] Yen, J. Y., *Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network*, Management Science, vol. 17, n°. 11, pp. 712-716, (1971).

[ZJM00] Zang, H., Jue, J. P. e Mukherjee, B., *A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks*, SPIE Optical Networks Magazine, vol. 1, pp. 47-60, (2000).

[ZZM05] Zhu, H., Zhu K. e Mukherjee, B., *Traffic Grooming in Optical WDM Mesh Networks*, Springer Science + Business Media, 2005.