

Uma Heurística para o Projeto de Topologias Virtuais de Redes Ópticas Tolerantes a Falhas

Luiz Bueno, Renato T. R. de Almeida, Marcelo E. V. Segatto e Elias Oliveira

Resumo—Uma característica desejável em qualquer rede de telecomunicações é a existência de mecanismos capazes de lidar com falhas. Neste artigo uma heurística Random Walk é apresentada para o projeto de redes ópticas, levando em consideração a sua sobrevivência a falhas, é apresentada e comparada com estratégias convencionais. Como objetivo principal a estratégia proposta deve encontrar uma topologia virtual baseada em anéis disjuntos que minimize o congestionamento. Os resultados mostram que a estratégia proposta consegue simultaneamente obter melhores valores de congestionamento, reduzir o esforço computacional e principalmente garantir alternativas para o roteamento para em caso de falhas.

Palavras-Chave—Redes Ópticas WDM, Topologia Virtual, Heurísticas.

Abstract—A desired characteristic on any telecommunication network is the capability to provide continuous service in the presence of failures. In this paper we present a Random Walk heuristic to the design of logical topologies for optical networks where, in addition, the survival of the network is taken into account. The main goal of our approach is to build logical topologies based on overlapped rings. The congestion minimization strategy presented here is compared to others well known heuristics in the literature. The experimental results show that our strategy is able to simultaneously obtain good congestion values, reduce the computational effort and also to provide the user with routing alternatives in case of faults.

Keywords—Optical Network WDM, Virtual Topology, Heuristics.

I. INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos da última década, as redes ópticas se firmaram como a solução mais eficiente para o transporte de dados em alta velocidade. O desenvolvimento da tecnologia de multiplexação de comprimentos de onda (WDM), de novos tipos de fibras e dispositivos ópticos [1] redefiniu o grau de importância de

Os autores são pesquisadores do LabTel (Laboratório de Telecomunicações) - Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil - Campus de Goiabeiras, Av. Fernando Ferrari, s/n, Cx Postal 5011, 29060-970. <http://www.labtel.ele.ufes.br>
e-mail: segatto@ele.ufes.br. Este projeto é parcialmente financiado pelo CNPq, Ref.472627/2003-1

fatores que limitam a velocidade de transmissão de dados [2], aumentando significativamente a flexibilidade do roteamento de tráfego pela rede óptica. Redes formadas por enlaces ópticos ponto-a-ponto com multiplexação de comprimentos de onda, tecnologia que multiplica a ocupação da banda de transmissão disponível no meio óptico, evoluíram para redes com roteamento de tráfego por comprimento de onda, onde há possibilidade de definição de caminhos ópticos interligando diretamente quaisquer pares de nós [3]. Atualmente o projeto de redes ópticas WDM envolve aspectos ligados à engenharia de tráfego e à sobrevivência da rede a eventuais falhas [1], [4], [5].

As redes ópticas semi-transparentes, nosso objeto de estudo neste trabalho, oferecem um bom compromisso entre a quantidade de recursos requeridos na camada óptica, principalmente em número de caminhos ópticos, e de recursos requeridos na camada eletrônica, basicamente a capacidade de processamento para comutação de tráfego [1], [5], [6]. Em tais redes, parte do tráfego é transportada de maneira totalmente transparente, entre os pares de nós interligados diretamente por caminhos ópticos. Para os outros pares de nós, só é possível o transporte de tráfego através de rotas formadas por mais de um caminho óptico em seqüência. Neste caso, o tráfego deve ser processado nos nós intermediários de sua rota fonte-destino para que se efetue sua retransmissão pelo próximo caminho óptico. Ao projetar topologias virtuais de redes WDM com roteamento de tráfego por comprimento de onda, podemos buscar uma solução que minimize e distribui o tráfego alocado aos caminhos ópticos [3], [7], que minimiza o atraso médio de pacotes na rede [3], [4], [5], entre outras opções, como buscar a minimização da quantidade de tráfego comutado eletronicamente nos nós [6]. A solução típica é uma topologia virtual em malha, que oferece um número limitado de rotas totalmente transparentes mas que possibilitam diversas rotas formadas por concatenações de caminhos ópticos.

Em uma rede semi-transparente é imprescindível que seja implementado algum mecanismo de sobrevivência a falhas, dado o enorme volume de dados que pode ser transportado pelos caminhos ópticos. É impor-

tante também considerar que, devido à natureza semi-transparente da rede, cada caminho óptico transporta componentes de tráfego associadas a diversos pares de nós, o que redefine o potencial dano causado pela interrupção de apenas um caminho óptico a regiões muito maiores do que apenas entre os nós localizados em suas extremidades, como ocorreria em uma rede totalmente transparente. Este trabalho propõe um método para projeto de topologias virtuais que garante um requisito fundamental para sobrevivência da rede a uma classe comum de falhas: as que são provocadas por problemas em componentes ativos da rede, como transmissores e receptores [1].

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: na Seção II fazemos algumas considerações sobre o projeto da topologia da rede óptica bem como sua sobrevivência. Na Seção III abordamos a estratégia utilizada para projeto da topologia virtual levando em consideração a sobrevivência da rede; em IV, apresentamos os resultados das simulações determinando o congestionamento da rede e o desempenho computacional do algoritmo proposto. Finalmente, na Seção V, temos as conclusões.

II. O PROJETO E A SOBREVIVÊNCIA DA REDE

A. Projeto de Topologias Virtuais

De maneira geral, o problema de projeto de redes ópticas pode ser resolvido utilizando técnicas de otimização, via programação matemática, para otimizar o valor de uma determinada função objetivo. Os modelos de otimização propostos para projeto de topologias virtuais através de programação linear mista são problemas do tipo *NP*-Árduos [8], de custo computacional muito alto para redes com considerável número de nós [3], [7]. Neste caso, estratégias heurísticas são utilizadas para se encontrar soluções viáveis, próximas da solução ótima [1], [4], [5]. A abordagem típica para o projeto de redes ópticas envolve dois subproblemas [1], [5]: o primeiro é decidir qual topologia virtual deve ser implementada, isto é, qual a configuração de caminhos ópticos que deve ser utilizada para transportar o tráfego. O segundo é a definição do roteamento físico e alocação de comprimento de onda dos caminhos ópticos (RWA). Propomos neste trabalho é um modelo para projeto de topologias virtuais (VTD) com o objetivo de minimizar a carga máxima de tráfego alocada aos caminhos ópticos que compõem a topologia virtual [3], [7], garantindo condições para que seja implementado um mecanismo de sobrevivência a falhas em caminhos ópticos isolados.

O modelo de projeto de topologias virtuais que apresentamos neste trabalho define a solução para a topologia virtual com base na matriz de tráfego Λ , que especifica

as demandas de tráfego médias $\lambda_{(s,d)}$ entre cada par (fonte, destino) dos N nós da rede. Os limites para o número de caminhos ópticos que chegam e saem dos nós são denominados respectivamente grau lógico de entrada e saída. Para efeitos de simplificação do problema consideramos grau lógico de entrada e saída iguais a Δ_l , denominado grau lógico da rede. A solução do problema VTD é composta basicamente pela matriz de topologia virtual B , que informa, através de variáveis binárias $b_{(i,j)}$, se existe ($b_{(i,j)} = 1$) ou não ($b_{(i,j)} = 0$) um caminho óptico interligando o par de nós (i, j) . O congestionamento da rede é definido pela quantidade de tráfego designada ao caminho óptico mais carregado. Admitimos soluções em que haja mais de um caminho óptico interligando o mesmo par de nós. O número máximo de caminhos ópticos interligando o mesmo par de nós (i, j) é definido como multiplicidade.

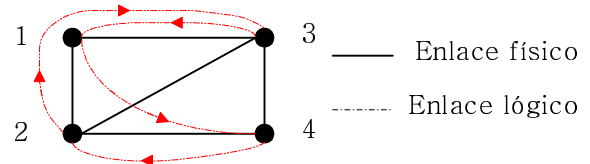


Fig. 1. Rede óptica com 4 nós. Exemplo de roteamento de tráfego em uma rede semi-transparente através de dois caminhos ópticos em sequência

Como as demandas de tráfego $\lambda_{(s,d)}$ geralmente são transportadas por mais de um caminho óptico entre (s, d) , define-se como componentes de tráfego λ_{ijsd} a porção da demanda $\lambda_{(s,d)}$ que é transportada pelo caminho óptico que interliga o par de nós (i, j) . Pode-se observar na Figura 1 que a demanda de tráfego $\lambda_{(2,3)}$ é transportada através de apenas um salto na topologia virtual. Neste caso, o roteamento de $\lambda_{(2,3)}$ é realizado de maneira totalmente transparente através de apenas uma componente de tráfego: λ_{2323} . O transporte da demanda de tráfego $\lambda_{(2,1)}$ é feita não transparente por dois saltos, que definem as componentes: λ_{2321} e λ_{3121} .

O modelo para projeto de topologias virtuais proposto leva em conta todos esses dados e variáveis, de maneira similar a outros trabalhos [3], [6], [7]. Nossa contribuição deste trabalho encontra-se exatamente na estrutura da topologia virtual obtida como solução, que garante requisitos básicos para a implantação de um mecanismo de sobrevivência a falhas. Mais adiante descrevemos as particularidades desta estrutura adotada para a topologia virtual.

B. Requisitos para Sobrevivência a Falhas

Devido à enorme capacidade de transmissão de dados e à diversidade de tráfego transportada por cada caminho óptico de uma rede WDM semi-transparente, torna-se muito importante projetar uma topologia virtual adequada à implementação de um mecanismo de sobrevivência a falhas. Considerando a rede mostrada na Figura 2, uma falha que interrompa apenas o caminho óptico que interliga o par (2, 4) causa não apenas a interrupção da comunicação entre este par de nós, mas também toda a comunicação entre (3, 4). Esse exemplo mostra que a simples falha em um caminho óptico pode causar danos ao transporte de demandas de tráfego localizadas entre diversos pontos da rede, dependendo das componentes de tráfego transportadas por esse caminho óptico. Os protocolos das camadas superiores à camada óptica (*IP*, *ATM*, *MPLS* e *SDH*, por exemplo) têm seus próprios procedimentos para recuperação em caso de falhas. Esses mecanismos de sobrevivência a falhas têm de maneira geral um requisito básico: a existência de mais de uma rota disponível para transporte de dados entre todos os pares de nós da rede. As características de uma rota utilizada como alternativa em caso de falhas definem o tipo de mecanismo de sobrevivência implementado, que pode ser classificado como dedicado ou compartilhado, reversível ou não-reversível, unidirecional ou bidirecional [1].

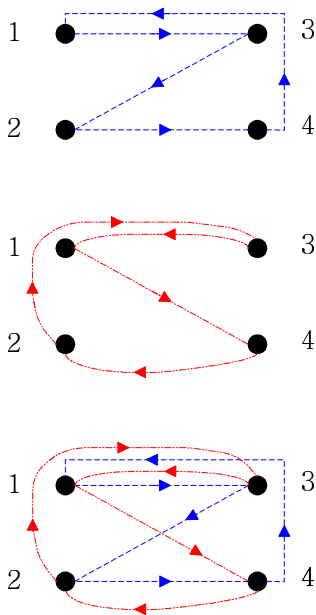


Fig. 2. Exemplo de formação de topologia virtual através de anéis disjuntos para uma rede de 4 nós. (a) Um exemplo de anel lógico disjunto. (b) Outro exemplo de anel disjunto. (c) A sobreposição dos anéis (a) e (b) formando uma topologia de grau lógico dois.

No modelo proposto neste trabalho, pretendemos projetar uma topologia virtual que satisfaça ao requisito básico de diversidade de rotas entre todos os pares de nós da rede, o que possibilita a implementação de um esquema de proteção unidirecional e compartilhado [1] em caso de falhas em caminhos ópticos isolados. Portanto, se houver falha no caminho óptico que interliga o par de nós (i, j) , o tráfego transportado deve ser redirecionado para outra rota entre (i, j) . A garantia de que a topologia virtual projetada pelo modelo proposto atende ao requisito básico de diversidade de rotas entre os pares de nós (i, j) se deve ao fato de que possui uma estrutura formada pela sobreposição de Δ_l anéis lógicos disjuntos, compostos cada um por $N - 1$ caminhos ópticos. Estes caminhos podem ser gerados através da obtenção de caminhos Eulerianos da rede [9], ou por algoritmos específicos [8], como o que apresentamos na próxima seção.

III. SOLUÇÃO HEURÍSTICA PROPOSTA

O problema de projeto da topologia virtual e distribuição de tráfego em uma rede óptica é modelado como um problema de programação linear mista, como já descrito antes na Seção II-A, onde algumas das variáveis de decisão são binárias. Estas variáveis vão definir a existência ou não de um enlace lógico entre dois nós quaisquer da rede [3], [5].

A possibilidade de se abordar este tipo de problema via algoritmos exatos se torna intratável, à medida que o número de nós na rede cresce. A proposta deste trabalho é de apresentar uma estratégia heurística através da qual uma rede de grande porte, envolvendo muitas restrições e variáveis, pode ser resolvida em um tempo razoável. Assim como a proposta apresentada por Ramaswami em [3], estaremos interessados em uma solução subótima, mas de boa qualidade.

Nosso processo de geração da topologia é tal que, automaticamente, estaremos provendo estruturas capazes de garantir um melhor grau de sobrevivência para a rede, como foi descrito na Seção II.

A heurística é conhecida na literatura como *Random Walk* [10]. Portanto, nosso procedimento consiste em cada vez que uma boa solução for encontrada, darmos uma grande chance ao algoritmo de buscar por soluções que estejam distantes no espaço de busca da última solução encontrada. Por solução distante no espaço de busca entendemos um vetor solução em que seus elementos sejam (quase) todos diferentes do outro vetor solução comparado.

Quando uma solução melhor que a última não puder ser encontrada, então daremos mais chance do processo buscar por soluções vizinhas à esta última encontrada.

Neste caso boa parte dos elementos dessa última solução serão preservados e apenas alguns serão modificados. Com isto esperamos preservar parte da estrutura que fez com que esta última solução fosse considerada a melhor, até este ponto.

A. Heurística Random Walk (RW)

A opção pelo uso desta heurística é devido ao fato da facilidade de sua implementação e, como veremos mais adiante, por produzir bons resultados em um tempo reduzido quando comparado com outros métodos apresentados na literatura [3], [7], [11], [12].

A heurística Random Walk, descrita através do Algoritmo 3.1, pode ser exemplificada em breves palavras da seguinte forma. Inicialmente é gerada uma solução randômica que descreve uma topologia virtual para a rede óptica (linha 5 do Algoritmo). Em outras palavras, nós geramos um vetor de valores 0s ou 1s para as variáveis binárias que aparecem no modelo proposto por Ramaswami [3]. Com esta topologia virtual definida resolvemos o problema, agora linear, para determinarmos o congestionamento para esta rede com esta dada topologia (linha 10). Este novo problema é resolvido rapidamente por um resolvidor linear – mais detalhes sobre este resolvidor na Seção IV.

É importante ressaltar que não estamos gerando qualquer tipo de topologia, mas topologias em forma de anéis. Quando o grau lógico da rede for maior que 1, teremos anéis sobrepostos, porém disjuntos, como descrito na Seção II-A. Anéis lógicos são considerados disjuntos quando não houver caminhos ópticos em comum entre eles, como ilustrado na Figura 2.

Uma vez tendo o valor do congestionamento, agora vamos buscar por outra topologia que diminua o congestionamento. Faremos isso através de duas estratégias: ora *diversificando*, ora *intensificando* o espaço de busca. Na primeira estratégia, tentaremos diversificar a última estrutura da topologia lógica encontrada. Faremos isso dando uma maior chance na geração aleatória de um vetor com valores completamente novos para as variáveis binárias, na esperança de que esta nova topologia possa resultar num congestionamento de menor valor que o anterior (linha 18 do Algoritmo 3.1). Desta forma estaremos explorando grandes regiões do espaço de busca.

Já a segunda estratégia procura gradativamente intensificar o espaço de busca (linha 22) em torno da última solução encontrada. Quando a topologia gerada impossibilitar um menor congestionamento em relação a solução anterior, o procedimento buscará uma melhoria na última topologia encontrada, inicialmente com uma probabilidade grande de diversificação, mas com a

repetição do insucesso, o procedimento dará cada vez mais chance para a intensificação em torno da solução vizinha. Por solução vizinha entenda-se um vetor que tenha poucas componentes (valores 0 ou 1) diferentes em relação ao anterior. Desta forma, a topologia vizinha guardará boa semelhança estrutural com aquela da qual esta última originou.

O procedimento terminará quando, depois de `n_iter` iterações não conseguirmos nenhuma melhora com respeito a minimização do congestionamento (linha 8).

Algoritmo 3.1:

```

1 Heurística RW
2 begin
3   probabilidade; n_iter;
4   Gera aleatoriamente um vetor de valores para
5   as variáveis binárias  $b_{(i,j)}$  – Define uma topologia.
6   while iteracoes < n_iter do
7     Resolve o problema linear para esta dada
8     topologia.
9     p = probabilidade
10    if melhor solucao
11      then
12        Gera uma nova topologia com p
13        chance de ser totalmente aleatoria.
14        iteracoes = 0
15      else Gera uma nova topologia com
16        1 – p chance de se um vizinho.
17        p = p – 0.01, sse p > 0.1
18        iteracoes = iteracoes + 1
19    fi
20  od
21 end

```

IV. RESULTADOS

Nossos experimentos consistiram, inicialmente, em analisar o congestionamento calculado pelo algoritmo RW das redes NFSNET e compará-lo com os seguintes procedimentos apresentados na literatura: MILP, HLDA e RLDA, todos estes apresentados em [3]. O primeiro procedimento trata-se de programação linear inteira mista em que o autor interrompeu a execução do programa em 10^7 iterações, ou seja, sem necessariamente ter encontrado a solução ótima. Já os dois outros procedimentos, são heurísticas propostas pelo autor tanto para resolução do projeto de topologia virtual como, também, a distribuição do tráfego na topologia.

Foram analisadas dois padrões de matrizes de tráfego P_1 e P_2 da rede NFSNET. Na matriz P_1 , o padrão de tráfego é mais concentrado entre apenas 42 dos nós da rede, com pouco tráfego entre os restantes. Já para a matriz P_2 , as demandas em cada nó da rede possui uma distribuição uniforme entre eles.

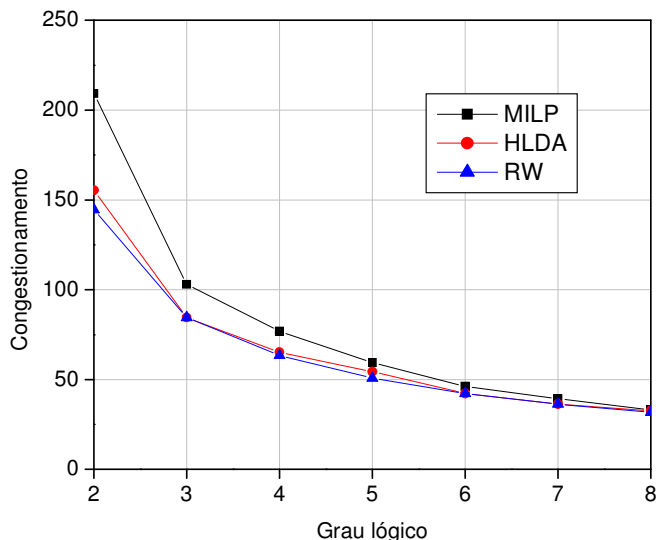


Fig. 3. Congestionamento para a rede NFSNET (14 Nós).

A Figura 3 mostra o congestionamento em função do grau lógico para os diversos procedimentos citados acima, considerando a matriz de tráfego P_1 . Vale ressaltar que a heurística RW apresentou sempre melhor desempenho que os procedimentos MILP, RLDA e HLDA. Estes resultados estão numericamente também apresentados na Tabela I. A primeira coluna apresenta cada valor de *Grau Lógico* utilizado nos experimentos realizados. Na coluna *MILP*, apresentamos os resultados de congestionamento obtidos por Ramaswami, os resultados apresentados pelos procedimentos *HLDA* e *RLDA*, respectivamente terceira e quarta colunas, também foram obtidos por Ramaswami em [3]. Na quinta coluna, estão os resultados obtidos pela heurística proposta neste trabalho. A diferença de desempenho entre a melhor heurística de [3] e a heurística RW é apresentada na última coluna, sendo que os valores negativos representam situações onde a nossa heurística obteve melhor desempenho.

Os algoritmos que implementam a heurística descrita na Seção III, RW, foram desenvolvidos na linguagem C. Juntamente com estes algoritmos, nós utilizamos a biblioteca GNU GLPK 4.0¹ para a resolução do problema linear de distribuição de tráfego (veja Algoritmo 3.1 na Seção III). A configuração do computador onde se realizou os experimentos foi a seguinte: um PC Celeron 750MHz com 128Mbytes de RAM. Os experimentos foram executados várias vezes com diferentes sementes para a função de randomização.

A heurística RW teve também um bom desempenho em termos de tempo de execução: a média de tempo para

Matriz de Tráfego P_1 [3]					
Grau Lógico	MILP	HLDA	RLDA	RW	<i>diff</i> %
2	209,17	155,37	266,49	144,60	-6,9
3	103,03	84,58	156,93	84,58	0,0
4	76,94	65,16	94,17	63,44	-2,6
5	59,37	54,39	69,47	50,75	-5,1
6	46,27	42,29	55,27	42,29	0,0
7	39,27	36,25	44,16	36,25	0,0
8	33,24	32,68	39,70	31,72	-1,7

TABELA I

CONGESTIONAMENTO CALCULADO PELO PROCEDIMENTO RW E COMPARADO COM OUTROS DA LITERATURA.

a resolução dos problemas de 14 nós foi de 10 minutos para os problemas envolvendo a matriz P_1 e 40 minutos para aqueles envolvendo a matriz P_2 .

Na Tabela II apresentamos os resultados dos procedimentos citados anteriormente, agora para a matriz de tráfego P_2 .

Matriz de Tráfego P_2 [3]					
Grau Lógico	MILP	HLDA	RLDA	RW	<i>diff</i> %
2	297,98	544,16	382,73	284,67	-4,47
3	189,78	261,63	216,22	189,78	0,0
4	142,33	142,33	146,49	142,33	0,0
5	113,87	113,87	113,87	113,87	0,0
6	94,89	94,89	95,40	94,89	0,0
7	81,33	81,33	81,33	81,33	0,0
8	71,17	71,17	72,37	71,17	0,0

TABELA II

CONGESTIONAMENTO CALCULADO PELO PROCEDIMENTO RW E COMPARADO COM OUTROS DA LITERATURA.

Por estes novos resultados podemos ver que a heurística HLDA não obteve um bom desempenho para os graus 2 e 3 da rede. Os resultados mostram que mesmo diante de uma mudança na estrutura da distribuição de tráfego, a heurística RW obteve uma melhor adaptação.

V. CONCLUSÕES

O aumento da demanda por serviços diferenciados em redes ópticas tem crescido muito nos últimos anos. O tráfego de informação nestas redes tem se tornado vital para as corporações. Um pequeno tempo de falha na rede pode significar uma grande perda para os usuários, portanto torna-se importante projetar topologias virtuais adequadas à implementação de mecanismos de sobrevivência a falhas.

¹<http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>

Neste trabalho, uma nova heurística foi apresentada para o problema de projeto de topologias virtuais em redes ópticas. O procedimento RW utiliza anéis lógicos disjuntos, o que permite levar em consideração aspectos de sobrevivência já durante o projeto.

Testes foram realizados em uma rede de 14 nós para duas situações de matriz de tráfego: uma matriz com tráfego uniformemente distribuído e outra com tráfego concentrado em apenas 20% dos pares de nós da rede.

No projeto da topologia virtual, a heurística RW proposta nesse trabalho busca atender ao requisito básico de diversidade de rotas entre todos os pares de nós da rede através da sobreposição de anéis lógicos disjuntos para a formação de uma topologia virtual. Desta forma torna-se possível a implementação de um esquema de proteção em caso de falhas em caminhos ópticos isolados. Nosso modelo se inspira em esquemas de proteção dirigidos à topologias físicas com enlaces em anéis unidirecionais e bidirecionais, como por exemplo redes SDH e SONET. Entretanto, enquanto estes esquemas são aplicados a camada física o nosso se aplica à topologia lógica.

Os resultados foram obtidos em função do congestionamento da rede, muito embora nosso objetivo principal era a geração de topologias tolerantes à falhas.

Para as duas situações de tráfego citadas acima, nossa heurística obteve um bom desempenho quando comparada com outros procedimentos apresentados na literatura [3].

REFERÊNCIAS

- [1] Ramaswamy, R. and Sivarajan, K. N., *Optical Networks*, 2nd ed. Morgan Kaufmann Pub. Inc., San Francisco, 2002.
- [2] Dhodhi, M.K., Tariq, S., and Saleh, K.A., "Bottlenecks in Next Generation DWDM-based Optical Networks," *Comp. Commun.*, vol. 24, pp. 1726–1733, 2001.
- [3] Ramaswami, R., "Design of Logical Topologies for Wavelength-Routed Optical Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 840–851, 1996.
- [4] Cahn, R., *Wide Area Network Design: Concepts and Tools for Optimization*, 1st ed. Morgan Kaufmann Pub. Inc., 1998.
- [5] Mukherjee, B., *Optical Communication Networks*. McGraw-Hill Series on Computer Communications, 1997.
- [6] Almeida, R.T.R., Pereira, L.C.B., Potratz, K., Oliveira, E., Segatto, M. E. V., and Calmon, L.C., "Addressing the Electronic Bottleneck to Virtual Topology Design of Optical Networks," in *Proceedings of International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC'2003*, Foz do Iguaçu/PR, 2003.
- [7] Krishnaswamy, R.M. and Sivarajan, K.N., "Design of Logical Topologies: A Linear Formulation for Wavelength-Routed Optical Networks with No Wavelength Changers," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 9, no. 2, April 2001.
- [8] Ahuja, R. K., Magnanti, T. L., and Orlin, J. B., *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*, 1st ed. Prentice Hall, 1993.
- [9] Gibbons, A., *Algorithmic Graph Theory*. Cambridge University Press, 1994.
- [10] Selman, B., Kautz, H.A., and Cohen, B., "Noise Strategies for Improving Local Search," in *Proceedings of the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'94)*, Seattle, 1994, pp. 337–343. [Online]. Available: citeseer.ist.psu.edu/selman94noise.html
- [11] Assis, K.D.R., Waldman, H., and Calmon, L.C., "Virtual Topology Design for a Hypothetical Optical Network," *Revista do Instituto Nacional de Telecomunicações*, vol. 5, no. 1, 2002.
- [12] Banerjee, D. and Mukherjee, B., "Practical Approaches for Routing and Wavelength Wavelength Assignment in Large All-Optical Wavelength-Routed Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 5, pp. 903–908, 1996.