

Hybrid Algorithms for Routing and Assignment Wavelengths in Optical Networks

K. D. R. Assis, A. F. Santos and W. F. Giazza

Abstract— This paper presents a strategy for the solution of the WDM optical networks planning. Specifically, the problem of Routing and Wavelength Allocation (RWA) in order to minimize the amount of wavelengths used. In this case, the problem is known as the Min-RWA. Two meta-heuristics (Tabu Search and Simulated Annealing) are applied to take solutions of good quality and high performance. The key point is the degradation of the maximum load on the virtual links in favor of minimization of number of wavelengths used; the objective is to find a good compromise between the metrics of virtual topology (load in Gb/s) and of the physical topology (quantity of wavelengths). The simulations suggest good results when compared to some existing in the literature.

Keywords— Optical Networks, Meta-Heuristics, Virtual Topology.

I. INTRODUÇÃO

ATUALMENTE, o número de usuários da Internet vem crescendo exponencialmente devido ao surgimento de novas aplicações envolvendo voz e vídeo, como vídeo sob demanda, teleconferência, imagens médicas de alta resolução etc. Desta forma, tem sido estimulada a pesquisa e o desenvolvimento de novas gerações de redes de transporte, capazes de suportar esses novos tipos de fluxo de informação. Neste contexto, surge um modelo baseado em uma infraestrutura óptica inteligente, que utiliza a tecnologia WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) [1].

A tecnologia WDM proporciona um melhor aproveitamento da capacidade de transmissão das fibras ópticas, possibilitando a transmissão de diversos comprimentos de onda, de forma simultânea, em uma mesma fibra. Desta forma, com o uso da tecnologia WDM, é possível atender uma maior demanda de tráfego [1], [2].

Para o estabelecimento de uma conexão entre dois nós de uma rede óptica WDM, faz-se necessário definir os caminhos ópticos por onde o tráfego será encaminhado, alocando os recursos indispensáveis para o estabelecimento desta conexão [3], [4].

Ao se projetar uma rede WDM, deve-se pensar em soluções (caminhos ópticos) que atendam toda a demanda de tráfego da rede, minimizando a utilização de seus recursos

(quantidade de comprimentos de onda, portas etc). Estas medidas se tornam necessárias para que a rede conserve recursos suficientes, que a possibilitem evoluir e se adaptar satisfatoriamente a demandas futuras e imprevistas [5]. Como forma de auxiliar esse planejamento, propõe-se o uso das meta-heurísticas *Simulated Annealing* e *Tabu Search* com o objetivo de encontrar a melhor solução para o tradicional problema de Roteamento e Alocação de Comprimentos de Onda (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*), [6], levando-se em conta a preservação da capacidade da rede.

Diferente das estratégias tradicionais de projeto da topologia virtual [1] (que usam uma abordagem *top-down*, a partir da demanda de tráfego para definir caminhos e comprimentos de onda), a estratégia adotada neste trabalho é, primeiro disponibilizar recursos (caminhos físicos, comprimentos de onda) para, posteriormente, rotear a demanda de tráfego.

A motivação para aplicar a estratégia proposta é a limitação de recursos que o projetista de rede pode ter que obedecer ou a disponibilidade de recursos que o projetista pode ter que reservar para alocar demandas futuras como, por exemplo:

- supor um número ilimitado ou muito grande de comprimentos de onda disponíveis em uma rede óptica, mediante essa situação, o gerenciamento e roteamento do tráfego pela topologia virtual torna-se complexo e de alto custo.

- usar inicialmente um número muito grande de comprimentos de onda pode bloquear requisições futuras, devido a característica do gerenciamento dos algoritmos de alocação.

As próximas seções deste artigo estarão organizadas da seguinte maneira: na seção 2 serão abordados os conceitos de topologia física e de topologia virtual em uma rede óptica WDM. Na seção 3 será apresentada uma formulação matemática exata para os projetos das topologias descritas anteriormente. A seção 4 descreverá os métodos utilizados para a definição de caminhos ópticos de uma rede óptica. As meta-heurísticas *Simulated Annealing* e *Tabu Search* estarão na seção 5 com suas respectivas estratégias que visam resolver o problema de definição dos caminhos ópticos (caminhos virtuais), de uma rede óptica WDM. A seção 6 apresentará os resultados dos experimentos obtidos. Por fim, na seção 7 estarão as considerações finais.

II. TOPOLOGIA FÍSICA E TOPOLOGIA VIRTUAL

Ao projetar uma rede óptica WDM é necessário definir os caminhos ópticos por onde o tráfego (geralmente medido em

Karcus Day Rosário Assis é professor da Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, Bahia, Brasil, karcus@yahoo.com.

Alex Ferreira dos Santos é estudante de mestrado da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, São Paulo, Brasil, afsantos@usp.br.

William Ferreira Giazza é professor e pesquisador do Grupo de Redes de Computadores, no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, william.giazza@ene.unb.br.

Gb/s) será encaminhado, através do projeto da topologia virtual [6]. Posteriormente, o RWA deve ser resolvido, ou seja, esses caminhos ópticos devem ser roteados por uma topologia física, assim como, comprimentos de onda devem ser alocados de forma adequada.

A Fig. 1 ilustra uma arquitetura de uma rede óptica simples, formando uma topologia física, com os nós (comutadores), numerados de 1 a 6 e interconectados através de enlaces (fibras ópticas) bidirecionais.

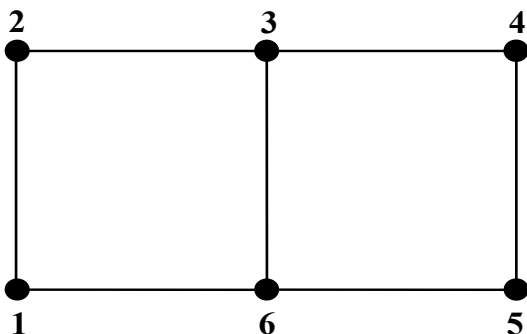


Figura 1. Topologia Física.

O projeto de topologia virtual envolve a definição dos caminhos virtuais para o encaminhamento dos dados entre um par de conexões (fonte e destino). Todos os nós da rede se comunicam através dos caminhos virtuais. Se um comutador não estiver conectado diretamente (conectado virtualmente) com o nó destino, então os dados serão conduzidos por várias rotas virtuais até chegarem ao seu destino. Pode-se visualizar isto na Fig. 2, onde, se o nó 6 não tiver uma conexão (caminho virtual) para o nó 1, mesmo estando conectados fisicamente (Fig. 1), ele terá que passar por dois caminhos virtuais: de 6 para 3 e de 3 para 1. A quantidade de caminhos ópticos utilizados, também é chamada de saltos (*hops*) virtuais. No exemplo anterior, houve a utilização de dois caminhos 6-3 e 3-1, então se diz que ocorreram dois saltos virtuais.

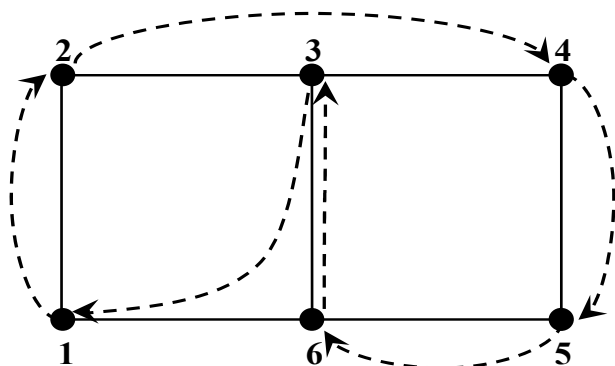


Figura 2. Topologia Virtual.

Após o estabelecimento dos caminhos virtuais o RWA deve ser resolvido, obedecendo a restrição de que

comprimentos de ondas semelhantes não podem ser alocados em caminhos ópticos que passam por um mesmo *link* físico. Para o exemplo da Fig. 2 um possível RWA é mostrado na Tabela I abaixo. Nota-se que só foi necessário o uso de um comprimento de onda para resolver o RWA.

TABELA I
POSSÍVEL RWA PARA A TOPOLOGIA VIRTUAL DA FIG. 2.

CAMINHO VIRTUAL	ROTA FÍSICA	COMPRIMENTO DE ONDA
1-2	1-2	1
2-4	2-3-4	1
3-1	3-6-1	1
4-5	4-5	1
5-6	5-6	1
6-3	6-3	1

III. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Nesta seção serão apresentadas uma formulação matemática, os problemas de projeto da topologia virtual [6] e topologia física (RWA) [12] de uma rede óptica. A implementação de uma topologia sobre a outra é proposta com uma formulação exata de **Programação Linear Inteira**.

A. Notação:

- i e j denotam, respectivamente, *origem e destino* de um caminho óptico.
- m e n denotam nós de uma topologia física, pelos quais pode passar um caminho óptico.

B. Dados:

- Número de nós da rede: N .
- Número de transmissores do nó i : T_i ($T_i \geq 1$). Número de receptores do nó i : R_i ($R_i \geq 1$).
- Matriz de tráfego $A_{s,d}$: denota a taxa média de tráfego que flui do nó s ao nó d .
- Capacidade de cada canal: C (normalmente expressa em bits/segundo).
- Fator de máximo carregamento de um canal: β , $0 < \beta < 1$. β impede que os atrasos de fila em um caminho óptico sejam ilimitados, evitando, dessa forma, um congestionamento excessivo no *link* virtual.
- Número de comprimentos de onda disponíveis: $\zeta = 1, 2, \dots, W$.
- Topologia física (P_{mn}): denota o número de fibras que interconecta os nós m e n . $P_{mn} = 0$ para nós que não são fisicamente adjacentes. $P_{mn} = P_{nm}$ indica que há um número igual de fibras e ambas as direções. $\sum_{mn} P_{mn} = M$ denota o número total de *links* de fibra na rede.

C. Variáveis:

- Caminho óptico: a variável b_{ij} é 1 se existe um caminho óptico do nó i para o nó j na topologia virtual; caso contrário, $b_{ij} = 0$. Note que esta formulação é geral, uma vez que caminhos ópticos não são necessariamente bidirecionais, i.e., $b_{ij} = 1 \nRightarrow b_{ji} = 1$. Além disso, podem existir múltiplos caminhos ópticos num mesmo par fonte-destino, i.e., $b_{ij} > 1$, o que é útil quando o tráfego

entre os nós i e j é maior que a capacidade de um único caminho óptico.

- Roteamento de tráfego: a variável λ_{ij}^{sd} denota a quantidade de tráfego fluindo de um nó s para um nó d sobre um ou mais *links* virtuais.
- Rota na topologia física: a variável p_{mn}^{ij} denota o número de caminhos ópticos entre os nós i e j sendo roteados pelo *link* de fibra m - n .
- $b_{ij\zeta}$ = Número de caminhos ópticos entre os nós i e j usando o comprimento de onda ζ ; sendo $\zeta=1,2,3,\dots,W$.
- Variáveis de designação de comprimentos de onda: $p_{mn\zeta}^{ij} = 1$, se o caminho óptico entre os nós i e j usa o comprimento de onda ζ , e é roteado pelo *link* de fibra m - n .

D. Projeto da topologia virtual (Virtual Topology Design – VTD)

- Objetivo:

$$\text{Minimize: } \frac{1}{\sum_{sd} \Lambda_{sd}} \sum_{ij} \sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd} \quad (1)$$

- Matriz de conexão da topologia virtual:

$$\sum_j b_{ij} \leq T_i, \dots \forall_i \quad (2)$$

$$\sum_i b_{ij} \leq R_j, \dots \forall_j \quad (3)$$

- Variáveis de tráfego na topologia virtual:

$$\sum_j \lambda_{sj}^{sd} = \Lambda_{sd} \quad (4)$$

$$\sum_i \lambda_{id}^{sd} = \Lambda_{sd} \quad (5)$$

$$\sum_i \lambda_{ik}^{sd} = \sum_j \lambda_{kj}^{sd} \dots se \dots k \neq s, d \quad (6)$$

$$0 \leq \lambda_{ij}^{sd} \leq \Lambda_{sd} \cdot \{1 + \text{sgn}(b_{ij} - 0,5)\} / 2 \quad (7)$$

$$\sum_{sd} \lambda_{ij}^{sd} \leq \beta \cdot C \cdot b_{ij} \quad (8)$$

$$\text{Int } b_{ij} \quad (9)$$

E. Projeto da topologia física (Physical Topology Design – PTD)

- E.1) Roteando sobre a topologia física p_{mn}^{ij} :

$$\sum_m p_{mk}^{ij} = \sum_n p_{kn}^{ij}, \dots se \dots k \neq i, j \quad (10)$$

$$\sum_n p_{in}^{ij} = b_{ij} \quad \forall i, j, \quad (11)$$

$$\sum_m p_{mj}^{ij} = b_{ij} \quad \forall i, j, \quad (12)$$

$$\sum_{ij} p_{mn}^{ij} \leq L \cdot P_{mn} \quad \forall i, j, \quad (13)$$

$$\text{Int } p_{mn}^{ij} \quad (14)$$

- E.2) Coloração dos caminhos ópticos:

$$\sum_n p_{in\zeta}^{ij} = \sum_m p_{ml\zeta}^{ij}, \quad \forall i, j, \text{ se } l \neq i, j \quad (15)$$

$$\sum_n p_{m\zeta}^{ij} = b_{ij\zeta} \quad \forall i, j, \zeta \quad (16)$$

$$\sum_m p_{mj\zeta}^{ij} = b_{ij\zeta} \quad \forall i, j, \zeta \quad (17)$$

$$\sum_{ij} p_{mn\zeta}^{ij} \leq P_{mn} \quad \forall \zeta, m, n \quad (18)$$

$$\sum_{\zeta} b_{ij\zeta} = b_{ij} \quad \forall i, j \quad (19)$$

$$\sum_{\zeta} p_{mn\zeta}^{ij} = p_{mn}^{ij} \quad \forall i, j, m, n. \quad (20)$$

$$\text{Int } p_{mn\zeta}^{ij}, b_{ij\zeta} \quad (21)$$

F. Explicação

A função objetivo (1) é uma restrição linear que minimiza os saltos virtuais na rede, sendo uma das maneiras de reduzir o processamento eletrônico. As equações (2) e (3) estabelecem que o número de caminhos ópticos partindo de um nó é restrito ao número de transmissores desse nó; enquanto que o número de caminhos ópticos chegando em um nó é restrito ao número de receptores deste nó. As equações (4)-(6) governam o fluxo de tráfego na topologia virtual. A equação (7) estabelece que o tráfego só pode fluir por um caminho óptico existente, enquanto a (8) especifica a restrição de capacidade na formulação.

No PTD, seções E.1, (9)-(11) são equações de fluxo que governam o roteamento de caminhos ópticos de uma fonte para um destino. A equação (12) estabelece que o número de caminhos ópticos fluindo por um *link* de fibra não excede L .

No PTD, seção E.2, (14)-(16) estabelecem que, para um determinado caminho óptico, um comprimento de onda ζ é conservado em todos os nós. Em (17) esta estabelecido que não há dois comprimentos de onda semelhantes na mesma fibra, i.e., não há dois caminhos virtuais atravessando um *link* de fibra no mesmo comprimento de onda. A equação (18) estabelece que um caminho óptico tenha apenas uma cor e (19) que o número de comprimentos de onda presentes em cada fibra é igual ao número de caminhos ópticos passando pela mesma.

IV. MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Os problemas de topologia virtual e RWA podem ser representados através de funções, variáveis e um conjunto de restrições a serem obedecidas, como descritos anteriormente. Entretanto, esses problemas são NP (*Non-deterministic Polynomial time*) [8], ou seja, à medida que o número de nós da rede cresce, o processamento computacional aumenta exponencialmente e, devido a isto, estes problemas se tornam intratáveis.

Neste trabalho utiliza-se meta-heurísticas, que são métodos de otimização genéricos e servem para resolver diversos problemas computacionais. O intuito é adaptá-las ao problema

proposto neste artigo e, posteriormente, com baixo custo computacional, resolver o problema de maneira a encontrar uma topologia virtual que atenda ao nosso objetivo de minimizar o número de comprimentos de onda utilizados em uma rede óptica, preservando a sua capacidade de abertura para demandas futuras.

V. ESTRATÉGIA META-HEURÍSTICA

Para resolver os problemas de topologia virtual e RWA de redes ópticas utiliza-se um fluxograma (Fig. 3) que descreve os passos a serem seguidos no intuito de encontrar uma boa solução para ambos os problemas. Ao final, tem-se uma solução cuja topologia virtual conterá o conjunto de melhores caminhos virtuais, que serão roteados e alocados em um determinado comprimento de onda na topologia física.

O primeiro passo é encontrar uma topologia virtual independente da topologia física, obedecendo às restrições de números de transmissores/receptores (grau virtual) que limitam o número de conexões virtuais da rede. Para este passo, se aplica as meta-heurísticas para definir os enlaces virtuais, através dos quais os dados serão encaminhados. Pretende-se, assim, definir uma topologia que, nos passos subsequentes, consiga obter o menor número de comprimentos de onda diferentes entre si.

No segundo e terceiro passo serão roteados e designados comprimentos de onda para os caminhos virtuais definidos no passo um – considerando uma rede sem conversores de comprimento de onda.

Ao final, o número de comprimentos de onda alocados será analisado para estabelecer os caminhos virtuais da rede. Se o número de comprimentos de onda encontrado for menor, utiliza-se esta solução (topologia virtual) para continuar o processamento, até que o número de iterações definido pela meta-heurística seja alcançado. Caso a solução encontrada não seja a melhor, gera-se outra solução a partir do melhor resultado obtido até o momento. A simulação termina quando o número de iterações proposto pela meta-heurística é alcançado. Caso o número de iterações não seja alcançado, retorna-se ao primeiro passo. Os resultados encontrados deverão ser o mais próximo da solução ótima ou, eventualmente, serão a solução ótima.

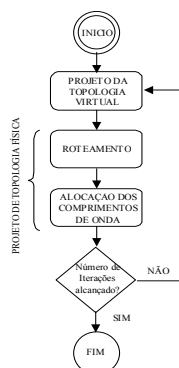


Figura 3. Fluxograma da solução do problema de projeto de rede óptica.

É esperado que ao final do processamento da estratégia proposta (Fig. 3), se tenha uma solução (topologia virtual e RWA) satisfatória, que atenda todo o tráfego da rede, alocando o mínimo de comprimentos de ondas possíveis. Para que este objetivo seja alcançado, utiliza-se duas meta-heurísticas com características distintas, a *Simulated Annealing* e a *Tabu Search*, e os resultados obtidos através de ambas são comparados com algumas heurísticas tradicionais [6].

Para adaptar as meta-heurísticas *Tabu Search* e *Simulated Annealing* aos problemas VTD e RWA, foram utilizadas matrizes bidirecionais, cujas linhas e colunas são representadas pelo número de nós da rede. Todas as soluções iniciais (s_0), atuais (s), vizinhas (v) e finais (s^*), utilizadas na implementação, são representadas em forma de matriz contendo, uma topologia virtual (caminhos virtuais). As soluções vizinhas são geradas a partir da substituição de um caminho virtual da solução atual. A definição dos caminhos virtuais na matriz é feita colocando o valor 1, onde existe caminho estabelecido, e 0, em sua ausência. Nas próximas subseções serão descritos detalhes dessas heurísticas.

A. Simulated Annealing

A meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) também chamada de “recozimento” simulado foi proposta por Kirkpatrick [9]. Inspirado no processo de resfriamento de um conjunto de átomos aquecidos, sua análise é baseada na fundamentação da termodinâmica e utiliza técnicas de busca local probabilística.

Na termodinâmica, para se obter estados de baixa energia de um material é necessário fundi-lo e, posteriormente, levá-lo ao estado de solidificação. Com base neste princípio, o *Simulated Annealing* é composto por duas etapas: na primeira, o material é aquecido a altas temperaturas para alcançar o estado de fusão; na segunda, a temperatura do material é reduzida lentamente, fazendo que o sistema encontre um ponto de equilíbrio caracterizado por uma estrutura ordenada e estável. Se o material for resfriado bruscamente sua estrutura ficará desordenada e instável.

A meta-heurística *Simulated Annealing* é composta pelos seguintes passos:

Passo 1: escolha de uma solução inicial (s_0) através de uma heurística, que pode ser de caráter aleatório ou determinístico. Esta solução passa ser, então, a solução atual (s) e final (s^*). Para esta implementação, a solução inicial foi gerada aleatoriamente.

Passo 2: seleção aleatória de uma solução v vizinha, de s , e análise da variação do valor da função objetivo (Δ), quando s move-se para v . A função objetivo é o número de comprimentos de onda de cada solução.

Passo 3: se a variação, da função objetivo de v , comparada com s , for menor que zero ($\Delta < 0$), o método aceita o movimento e v passa ser a solução atual. Posteriormente é comparado o valor da função objetivo de v com a solução final (s^*), caso v obtenha o valor menor, será considerada, então, como solução final.

Passo 4: se a variação, da função objetivo de v comparada com s , for maior ou igual a zero ($\Delta \geq 0$), v poderá ser aceita como solução atual, mas com a probabilidade $e^{(-\Delta/T)}$, na qual T é a temperatura (estabelecida pelo usuário) que regula a probabilidade de aceitar soluções ruins.

Passo 5: verificar se a temperatura do sistema é maior que zero, em caso afirmativo, retorna-se ao passo 2 e a busca continua até que a temperatura fique menor que zero.

Ao final, a melhor solução encontrada para o problema proposto esta contida na variável solução final (s^*). Esta solução contém a matriz que representa a melhor topologia virtual encontrada para a rede.

B. Tabu Search

A meta-heurística *Tabu Search* (busca tabu ou BT) foi desenvolvida por Glover [10]. Sua principal característica é a utilização de estratégias que procuram imitar o funcionamento de memória dos seres humanos.

A busca tabu é constituída por métodos que exploram um espaço de soluções, movimentando-se de uma solução vizinha para outra, em busca do melhor resultado. Os caminhos percorridos são gravados em uma estrutura de memória chamada de lista tabu. Esta lista contém as soluções que foram percorridas ao longo da busca e que devem ser evitadas. Isto é feito para impedir a ocorrência de ciclos e retrocessos durante o processo de busca.

No entanto, pode-se voltar a explorar, novamente, algumas soluções que estão contidas na lista tabu. Mas, para isto, é necessário que algum critério de quebra de restrição seja aceito. Tais critérios são chamados de critérios de aspiração.

Os critérios de aspiração são técnicas que permitem aceitar certos movimentos tabu, que sejam julgados interessantes para o prosseguimento da pesquisa. O mais simples dos critérios de aspiração consiste em aceitar todo movimento em direção a uma solução que melhore o registro. Este critério é quase unanimemente adotado na maior parte das aplicações.

A meta-heurística *Tabu Search* é composta pelos seguintes passos:

Passo 1: escolha de uma solução inicial através de uma heurística que pode ser de caráter aleatório ou determinístico. Para esta implementação, a solução inicial foi gerada aleatoriamente.

Passo 2: a solução inicial é registrada na lista tabu e adotada como solução atual e final (melhor solução obtida até o momento). Esta lista tem a estrutura de um vetor e armazena o índice de cada matriz, indicando sua topologia virtual.

Passo 3: a partir da solução atual, é escolhida a melhor solução dentre um conjunto de soluções vizinhas. Esta, independente de ser a melhor ou pior do que a atual, será registrada e passará a ser a solução atual.

Passo 4: analisa-se a solução atual, encontrada no passo anterior, caso esta solução seja a melhor encontrada até o momento, ela passará a ser a solução final.

Passo 5: verifica-se o número fixo de iterações estabelecidas para o término da busca. Caso ainda exista iterações a serem feitas volta-se para o passo 3 e a busca

continua até que um número fixo de iterações seja alcançado. O número de iteração é estabelecido pelo usuário.

Ao final da busca tabu, a melhor solução encontrada para o problema proposto esta contida na variável solução final. Esta solução contém a matriz que representa a melhor topologia virtual encontrada para a rede.

VI. RESULTADOS

A. Determinação do Número de Comprimentos de Onda

Para simulação, os dados de entrada são: 1) a matriz de tráfego, 2) o grau virtual (número de transmissores/receptores) e 3) a topologia física da rede. A saída do algoritmo gera: a) os caminhos ópticos (b_{ij} 's), b) roteamento dos b_{ij} 's na topologia física e c) o número de comprimentos de ondas necessários para a configuração desses caminhos ópticos. As matrizes de tráfego, de ambas as redes, foram geradas aleatoriamente, através de uma distribuição uniforme entre 0 e 1, e os números contidos nos enlaces representam a distância entre os nós da rede.

As simulações foram realizadas com duas redes. A primeira é uma rede óptica considerada pequena, com apenas 6 nós e 7 enlaces bidirecionais (Fig. 4), e matriz de tráfego representada pela Tabela II. Com esta rede pode-se obter a melhor solução (solução ótima), calculada por métodos exatos [7]. Os resultados são comparados com os das heurísticas **HLDA** (*Heuristic Logical Topology Design Algorithm*), **MLDA** (*Minimum-delay Logical Topology Design Algorithm*), **TILDA** (*Traffic Independent Logical Topology Design Algorithm*) e **RLDA** (*Random Logical Topology Design Algorithm*). Para detalhes, ver [6]. Os resultados obtidos são mostrados na Fig. 5.

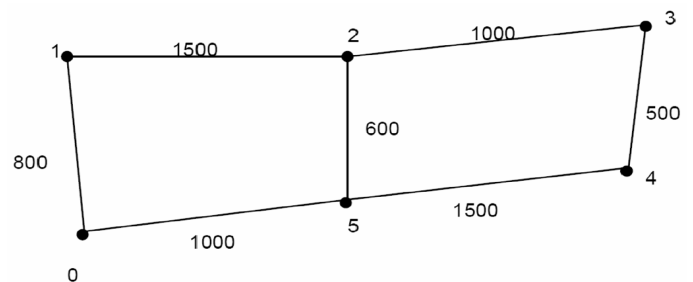


Fig. 4. Topologia Física da Rede Óptica simples.

TABELA II
MATRIZ DE TRÁFEGO DA REDE ÓPTICA SIMPLS.

	00.537	00.524	00.710	00.803	00.976
00.391		00.203	00.234	00.141	00.831
00.060	00.453		00.645	00.204	00.106
00.508	00.660	00.494		00.426	00.682
00.480	00.171	00.522	00.879		00.241
00.950	00.406	00.175	00.656	00.193	

Como pode ser observado na Fig. 5, para todos os graus virtuais estabelecidos, as duas meta-heurísticas obtiveram resultados iguais à solução ótima para os graus 1, 2. No grau 3, apenas a meta-heurística *Simulated Annealing* conseguiu atingir o resultado igual a solução ótima, tornando-se melhor que a meta-heurística *Tabu Search*, para este cenário específico. Para o grau 4, nenhuma das meta-heurísticas obtiveram o resultado ótimo. No entanto, conseguiram melhores resultados que as heurísticas RLDA e HLDA.

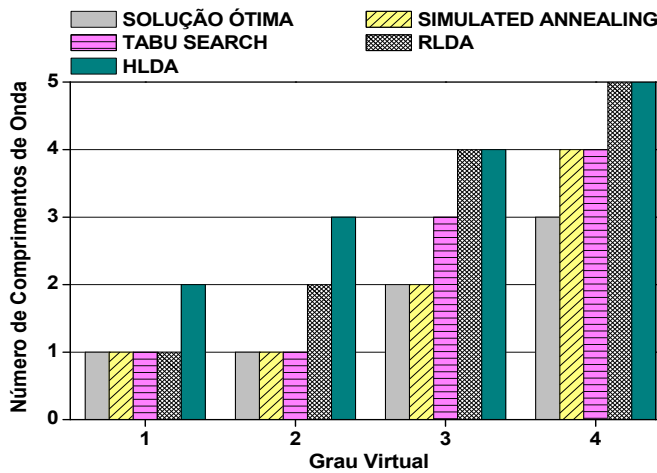


Figura 5 – Resultado da Simulação da Rede Óptica Simples.

Então, já que minimizamos o número de comprimentos de onda na fase de planejamento da rede, provavelmente haverá comprimentos de onda disponíveis para demandas futuras e/ou imprevistas. Logo, a estratégia aqui adotada preserva a capacidade da rede aberta a demandas futuras.

Na segunda simulação, é utilizada a rede óptica NSFNET composta por 14 nós e 20 enlaces bidirecionais interligando os nós da rede (Fig. 6). A matriz de tráfego correspondente a esta rede é representada pela Tabela III e os resultados obtidos são apresentados na Fig. 7.

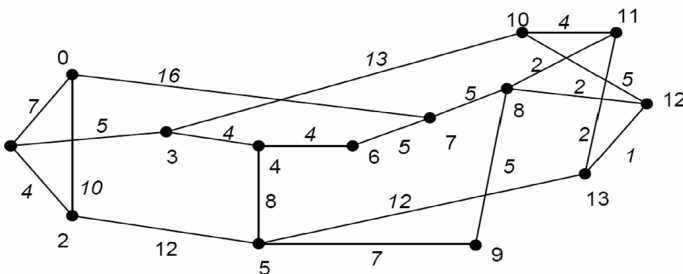


Figura 6 – Rede Óptica NSFNET.

TABELA III
MATRIZ DE TRÁFEGO DA REDE ÓPTICA NSFNET.

	33.029	32.103	26.008	00.525	00.383	82.633	31.992	37.147	00.568	00.358	00.544	00.651	00.160
00.546		00.984	00.902	00.866	00.840	00.013	62.464	00.475	00.001	00.342	00.925	00.656	00.501
35.377	00.459		00.732	00.272	00.413	28.242	00.648	00.909	00.991	56.150	23.617	01.584	00.935
00.739	00.225	00.296		00.896	00.344	00.012	84.644	00.293	00.208	00.755	00.106	00.902	00.715
00.482	96.806	00.672	51.204		00.451	00.979	00.814	00.225	00.694	00.504	00.504	00.431	00.333
00.456	00.707	00.626	00.152	00.109		00.804	00.476	00.429	00.953	00.250	00.322	90.503	00.212
00.042	00.067	00.683	00.882	00.197	00.831		00.585	67.649	56.138	00.896	00.858	73.721	00.582
00.616	00.640	00.096	97.431	00.308	00.441	00.299		00.161	00.490	00.321	00.638	82.231	00.376
00.786	00.323	00.676	00.359	00.019	50.127	12.129	00.650		00.483	45.223	58.164	00.894	00.613
00.037	00.318	00.367	02.981	00.976	00.629	00.525	00.293	00.641		33.922	00.228	00.995	71.905
12.609	00.479	00.146	00.174	00.181	00.072	23.080	00.671	00.634	00.759		00.725	00.592	00.445
00.887	00.004	01.614	00.471	00.120	00.263	00.585	00.086	00.167	95.633	42.828		00.527	00.021
09.019	00.569	00.936	00.975	81.779	00.573	00.738	00.410	00.490	00.948	00.164	00.146		00.436
20.442	00.515	00.719	00.089	39.269	49.984	00.720	00.663	00.658	00.490	00.106	00.765		00.059

Como pode ser observado na Fig. 7, para a rede óptica NSFNET os resultados apresentados pelas meta-heurísticas foram bastantes similares aos resultados das heurísticas. No entanto, as meta-heurísticas conseguiram obter resultados melhores para os graus 2, 3 e 8. No grau 7, as meta-heurísticas chegaram a se igualar com o resultado obtido pela aplicação da heurística TILDA, que se mostrou a melhor dentre todas as heurísticas para este cenário específico, devido a sua estratégia de alocação dos comprimentos de onda. Para os graus 4, 5 e 6 as meta-heurísticas obtiveram resultados iguais, as heurísticas TILDA e MLDA. Ao fazer uma análise semelhante à primeira simulação, com uma rede de 6 nós, a *Tabu Search* obteve melhores resultados para preservar aberta a capacidade da rede.

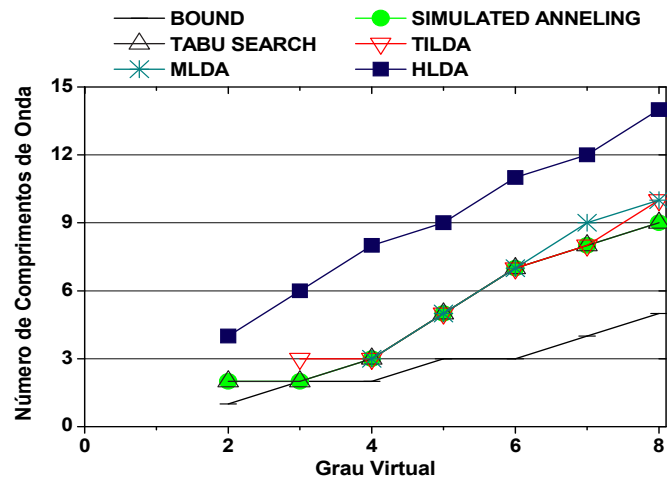


Figura 7 – Resultado da Rede Óptica NSFNET.

B. Roteamento do Tráfego pela Topologia Virtual

Evidentemente, se for obtido uma minimização do número de comprimentos de onda necessários, outra função objetivo é degradada. No caso, o objetivo mais apropriado para comparação é o congestionamento nos *links* virtuais. Para isto, o congestionamento é calculado e comparado com os resultados de [6] – MILP, HLDA e RLDA – e com os resultados de [11] – HIBR – que é um algoritmo híbrido de minimização de congestionamento.

Em relação ao congestionamento, conforme observado na Tabela IV, com as heurísticas *Tabu Search* e *Simulated*

Annealing obtiveram-se resultados menos satisfatórios que os disponíveis na literatura. Entretanto, deve-se lembrar que as heurísticas foram propostas para minimizar o número de comprimentos de onda necessários. E neste caso elas são bastante satisfatórias, como já foi visto na Fig. 7. Além disso, o tempo de simulação é de poucos minutos para uma rede de dimensão grande como a NSFNET, com uma configuração de máquina semelhante a [11]. Enquanto [11] leva aproximadamente 40 minutos e [6] obtém boas soluções MILP com tempo de parada em aproximadamente 50h, a estratégia proposta (*Simulated Annealing* ou *Tabu Search*) leva aproximadamente 10 minutos para fazer o RWA e posteriormente encontrar os valores de congestionamento. Então, se houver capacidade disponível nos *links* virtuais as heurísticas podem ser utilizadas de forma eficiente nos subproblemas tradicionais do projeto da topologia virtual.

TABELA IV
CONGESTIONAMENTO NOS LINKS VIRTUAIS.

Grau Virtual	MILP	HLDA	RLDA	HIBR	Tabu Serach	Simulated Annealing
2	209.17	155.37	266.49	205.64	374.49	309.03
3	103.03	84.58	156.93	101.37	146.86	146.23
4	76.94	65.16	94.17	81.40	111.36	111.36
5	59.37	54.39	69.47	59.94	78.27	69.22

VII. CONCLUSÃO

Diante do exposto, conclui-se que, com as heurísticas propostas e baseado na disponibilidade de carga, pode-se fazer um planejamento de rede óptica com mínima utilização de comprimentos de onda.

Essas estratégias podem ser indispensáveis devido aos seguintes fatores: 1) a disponibilidade de recursos é limitada, quanto mais comprimentos de onda são usados mais custo terá um transponder óptico não sintonizável; 2) mesmo com uma disponibilidade muito grande de comprimentos de onda, minimizar o seu número é essencial para manter a capacidade aberta para tráfegos futuros ou reconfigurações que sejam necessárias em decorrência de falhas; 3) o tempo de decisão pode ser um fator importante, visto que respostas rápidas, mesmo em função da degradação de outros objetivos, podem ser essenciais na relação custo-benefício.

REFERÊNCIAS

- [1] C. S. Murthy and M. Gurusamy, *WDM Optical Networks – Concepts, Design and Algorithms*, Prentice Hall PTR, 2002.
- [2] M. T. Furtado, M. L. Rocha, M. R. Horiuchi, M. R. X. Barros, S. M. Rossi, F. D. Simões e R. Arradi, “Transmissão 4×40 Gb/s por Diferentes Tipos de Fibras e Resíduos de Dispersão com Aproveitamento do Legado Tecnológico de 10 Gb/s”, *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 3, No. 4, Outubro 2005.
- [3] A. C. B. Soares, J. C. Maranhão, W. F. Giozza e P. R. F. Cunha, “First Load Priority: A Wavelength Converter Placement Scheme for Optical Networks with Sparse-Partial Wavelength Conversion”, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores – SBRC*, v.2, p.1089-1103, Curitiba, 2006.
- [4] X. Chu, J. Liu and Z. Zhang, “Analysis of Sparse-Partial Wavelength Conversion in Wavelength-Routed WDM Networks”, *INFOCOM 2004, Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, March, 2004.
- [5] M. L. Kodialam and T. V. Lakshman, “Minimum interference routing with applications to MPLS traffic engineering”, *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*.
- [6] R. Ramaswami e K. N. Sivarajan, “Design of logical topologies for wavelengthrouted optical networks”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(5), pp. 840–851, 1996.
- [7] R. M. Krishnaswamy e K. N. Sivaraja, “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] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Introduction to Algorithms*. theMcGraw-Hill Book Company. Second Edition, 2001.
- [9] S. Kirkpatrick, D. C. Gellat, and M. P. Vecchi, “Optimization by Simulated Annealing”. *Science*, 220:671–680, 1983.
- [10] F. Glover and M. Laguna, *Tabu Search*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
- [11] M. O. Lima, F. O. Lima, E. Oliveira e M. E. V. Segatto, “Um Algoritmo Híbrido para o Planejamento de Redes Ópticas”. *REIC. Revista Eletrônica de Iniciação Científica*, v. 1, p. 1-10. 2006.
- [12] K.D.R. Assis, H. Waldman e W. F. Giozza, Optical Networks: A Complete Design” - *IEEE ComSoc/SBRt Joint Issue of the Journal of the Brazilian Telecommunication Society. Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, v.1, p.1 - 8, 2005.



Karcius Day Rosário Assis é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande, Paraíba, Brasil, em 1997. Obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil, em 2000 e de Doutor, em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil, em 2004. Atualmente é professor da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e suas pesquisas se concentram na área de planejamento e otimização de redes ópticas, tópico no qual tem escrito e revisado artigos.



Alex Ferreira dos Santos nasceu na cidade de Mutuípe, Bahia, Brasil, em 25 de janeiro de 1986. Recebeu o título de Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Salvador (UNIFACS) em Salvador, Bahia, Brasil. Entre os anos de 2005 e 2007, participou do Grupo de Pesquisa em Redes Ópticas do departamento de Engenharia Elétrica e Computação desta Universidade. Atualmente é aluno de Mestrado em Engenharia Elétrica, na área de telecomunicações, da Universidade São Paulo (USP). Suas principais áreas de pesquisas são: Planejamento e Otimização de Redes Ópticas, Algoritmos RWA e Redes Ópticas Passivas (PON).



William Ferreira Giozza é, desde junho de 2009, professor e pesquisador do Grupo de Redes de Computadores, no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil. Recebeu o título de Doutor em Ciência da Computação pela University of Paris, França, em 1982; Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campina Grande, Paraíba, Brasil, em 1979; e graduado em Engenharia Elétrica pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, Brasil, em 1976. De 1976 a 1998, foi professor de Ciência da Computação e Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil. De 1992 a 1993 foi professor associado na University of Paris 6, França. De 2001 a maio de 2009, foi Professor da Universidade de Salvador (UNIFACS), em Salvador, Bahia, Brasil. Atualmente suas pesquisas se concentram na área de redes ópticas e redes sensores sem fio.