1
Introdução

Problemas de otimização combinatória são freqüentes no projeto e na operação de sistemas de telecomunicações. Grande parte desses problemas são NP-difíceis. Diante do fato de não se conhecerem algoritmos determinísticos polinomiais que resolvam esta classe de problemas de forma exata, dois tipos de abordagens são geralmente empregadas: algoritmos aproximados (ou heurísticas) e algoritmos exatos. Algoritmos aproximados, no caso geral, não garantem a qualidade da solução obtida. Entretanto, na prática fornecem soluções de boa qualidade em tempo polinomial.

Em redes de fibras óticas, a informação é transmitida na forma de um sinal luminoso. Cada enlace pode conter várias fibras óticas operando em taxas de transmissão da ordem de terabits por segundo, muito mais rápidas do que os dispositivos eletrônicos disponíveis atualmente. A tecnologia WDM (do inglês *Wavelength Division Multiplexing*) possibilita um maior aproveitamento da grande faixa de banda disponível nos enlaces de fibra ótica, pois permite que o sinal luminoso seja particionado em diversos canais de transmissão, cada um multiplexado em um comprimento de onda diferente,

A arquitetura de redes óticas mais utilizada atualmente é baseada em comutação de circuitos óticos. Estas redes são compostas por um conjunto de comutadores óticos (nós) interconectados por um conjunto de enlaces WDM. Os comutadores podem ser configurados para estabelecer canais de comunicação que percorrem vários enlaces sem que o sinal ótico sofra conversão para o domínio eletrônico nos comutadores intermediários. Estes canais são conhecidos como *caminhos óticos* (*lightpaths*, em inglês). Um caminho ótico deve ser multiplexado com o mesmo comprimento de onda em todos os enlaces em sua rota, a não ser que os comutadores sejam equipados com conversores óticos de comprimentos de onda. Múltiplos caminhos óticos podem utilizar o mesmo comprimento de onda, contanto que não compartilhem um enlace da rede.

Um conjunto de caminhos óticos define uma topologia virtual sobre a topologia física da rede. O tráfego de dados é realizado sobre a topologia virtual, independentemente de como as fibras óticas estão distribuídas fisicamente. O projeto de topologias virtuais consiste em determinar o conjunto de caminhos óticos que devem ser estabelecidos para criar um topologia virtual que seja ideal para transmitir um determinado tráfego de dados de acordo com uma métrica de desempenho. Este problema é amplamente estudado e discutido em [87].

Uma vez que a topologia virtual é definida, uma rota e um comprimento de onda devem ser atribuídos a cada caminho ótico. Dados a topologia física de uma rede WDM e um conjunto de requisições de caminhos óticos (topologia virtual), o problema de roteamento e atribuição de comprimentos de onda - RWA (do inglês *Routing and Wavelength Assignment*) consiste em definir uma rota e atribuir um comprimento de onda para cada caminho ótico, de modo que caminhos óticos cujas rotas compartilhem algum enlace da rede usem comprimentos de onda diferentes. Diversas variantes de RWA já foram estudadas na literatura [22, 92, 93]. Elas se diferenciam principalmente pelos padrões de tráfego e pelas métricas de avaliação utilizadas.

Nesta tese, estuda-se a versão do problema de RWA onde as requisições de caminhos óticos são conhecidas a priori e a conversão de comprimentos de onda não está disponível, ou seja, os caminhos óticos devem utilizar o mesmo comprimento de onda em todo o percurso do transmissor até o receptor. O objetivo é minimizar o número total de comprimentos de onda utilizados para rotear todos os caminhos óticos. Este problema é conhecido como min-RWA [57] ou Problema de Coloração de Caminhos [30] e é descrito formalmente a seguir.

Seja $N = (X, A)$ um grafo direcionado representando uma rede ótica, onde X é o conjunto de nós e A é o conjunto de arcos (fibras óticas). Denota-se por $\mathcal{T} = \{t_1, t_2, \ldots, t_l\}$ o conjunto de requisições de caminhos óticos, cada uma delas definida por um par de vértices em X. O problema min-RWA consiste em definir uma rota p_i e um comprimento de onda w_i para cada caminho ótico $t_i \in \mathcal{T}$, de forma que dois caminhos óticos que compartilhem algum enlace da rede tenham comprimentos de onda diferentes e que o número total de comprimentos de onda utilizados seja mínimo. É provado em [30] que min-RWA é NP-Difícil. Embora possa ser formulado como um problema de multifluxos inteiros [93], não são conhecidos algoritmos exatos na literatura para min-RWA.

As primeiras heurísticas propostas na literatura decompõem min-RWA em dois subproblemas [7, 48]. Primeiramente, resolve-se um problema de roteamento, onde escolhe-se uma única rota $p_i \in R_i$ para cada caminho ótico $t_i \in \mathcal{T}$, onde R_i é o conjunto de todas as possíveis rotas de t_i em N. Uma vez que as rotas estão fixadas, resolve-se um problema de atribuição de comprimentos de onda. Este último consiste num problema de coloração de vértices - GCP (do inglês *Graph Coloring Problem*) [66] num grafo de conflitos $G = (V, E)$. Cada vértice $v \in V$ representa a rota de um caminho ótico e existe uma aresta $e \in E$ entre cada par de vértices cujas rotas correspondentes compartilham algum arco de N. As cores atribuídas aos vértices representam os comprimentos de onda nos quais os caminhos óticos correspondentes serão multiplexados. O número cromático do grafo de conflitos é igual ao número mínimo de comprimentos de onda necessários para estabelecer todos os caminhos óticos com as rotas que foram fixadas a priori. A principal dificuldade desta abordagem é que a escolha incorreta das rotas dos caminhos óticos pode levar a soluções de baixa qualidade, mesmo que o problema de atribuição de comprimentos de onda seja resolvido de forma exata.

Li e Simha [63] propuseram outra estratégia de decomposição para min-RWA, baseada no Problema de Coloração de Partições - PCP. Seja $G_P = (V, E, Q)$ um grafo particionado, conforme ilustrado na Figura 1.1(a), onde V é o conjunto de vértices, E é o conjunto de arestas e $Q = \{Q_1, Q_2, \ldots, Q_q\}$ é uma partição de V em q subconjuntos disjuntos. Cada subconjunto $Q_i \in Q$ é chamado de *componente* da partição. O PCP consiste em selecionar e colorir um único vértice de cada componente, de modo que dois vértices adjacentes no grafo induzido pelos vértices selecionados tenham cores diferentes (Figura 1.1(b)). Os vértices não coloridos, assim como suas arestas, podem ser ignorados. O objetivo é minimizar o número total de cores utilizadas. Quando o número de vértices em cada componente é igual a um, o PCP reduz-se ao problema de coloração de vértices e, conseqüentemente, também é NP-Difícil.

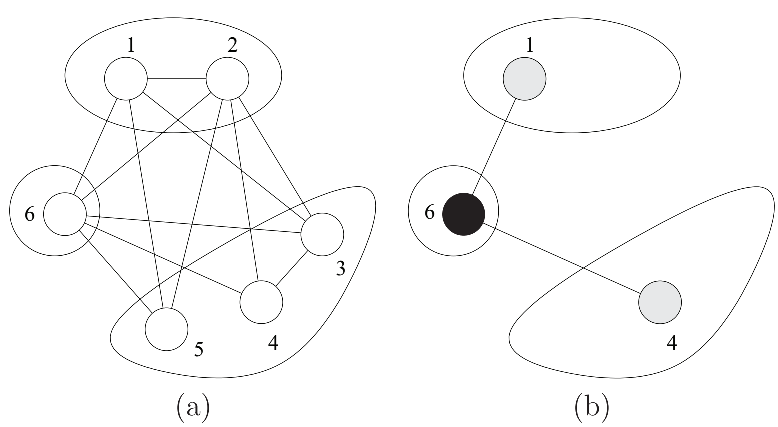

Figura 1.1: (a) Grafo particionado e (b) sua coloração ótima com duas cores.

A estratégia de decomposição proposta por Li e Simha [63] decompõe min-RWA em dois subproblemas. Primeiramente, escolhe-se um subconjunto de rotas $P_i \subseteq R_i$ para cada caminho ótico $t_i \in \mathcal{T}$. Em seguida, uma única rota $p_i \in P_i$ e um comprimento de onda são atribuídos a cada caminho ótico, resolvendo-se um problema de coloração de partições num grafo de conflitos particionado construído da seguinte forma. Os vértices do grafo correspondem às rotas candidatas e existe uma aresta entre cada par de vértices cujas respectivas rotas compartilham algum enlace da rede. O conjunto de vértices é particionado de forma que todos os vértices correspondentes ao mesmo caminho ótico estejam posicionados na mesma componente da partição. O vértice colorido em cada componente define a rota que será usada pelo caminho ótico correspondente e a cor deste vértice corresponde ao comprimento de onda no qual o caminho ótico será multiplexado.

As principais heurísticas para a solução de min-RWA e PCP são apresentadas no Capítulo 2. No Capítulo 3 são propostos algoritmos e estruturas de dados que permitem implementar de forma eficiente as melhores heurísticas disponíveis para min-RWA na literatura. No Capítulo 4, é proposto um algoritmo genético com chaves aleatórias para min-RWA, além de um *framework* de software que permite a implementação rápida de heurísticas desse tipo. Em seguida, o Capítulo 5 apresenta um algoritmo exato para o problema de coloração de partições e sua aplicação à solução de min-RWA. As conclusões da tese são apresentadas no último capítulo.