Heurística de Roteamento e Alocação de Fibras em Redes Ópticas

Diego M. A. Lütke

Escola Politécnica – Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)

diegolutke@hotmail.com

Resumo. *O presente artigo desenvolve um algoritmo heurístico de roteamento em redes ópticas para encontrar o caminho físico entre dois pontos (A e B). A proposta utiliza o algoritmo de Dijkstra aplicado a uma topologia de rede óptica modelada como grafo. São discutidos elementos constituintes das redes ópticas, alternativas de algoritmos de roteamento, e aspectos de complexidade relacionados à programação linear e problemas NP-difíceis.*

1. Introdução

Atualmente, as redes ópticas representam a espinha dorsal da conectividade global, responsáveis pela transmissão de grandes volumes de dados em torno do globo terrestre via cabos terrestres e submarinos. Embora as normas e os desafios iniciais das implementações de redes ópticas pioneiras tenham atigindo um platô de estabilidade na última década devido a expansão desse tipo de rede dos backbones para as redes de acesso, ainda há uma série de desafios relacionados a operação e manutencão desse tipo de rede.

Um desses desafios é o roteamento de caminhos físicos, isto é, a definição de quais fibras ópticas devem ser utilizadas para interligar dois pontos de acesso. Este artigo propõe desenvolver um algoritmo heurístico para o roteamento de uma fibra dado uma rede em funcionamento. Para isso, o artigo é estruturado da seguinte forma: na Seção 2 aborda-se os elementos de rede relevantes para o estudo proposto, os algoritmos de base e o que já existe de estudos acadêmicos relevantes próximo do presente artigo na Seção 3 define-se e delimita-se o problema de roteamento, na Seção 4 desenvolve-se o algoritmo e, por fim, as considerações finais são dadas em 5.

2. Fundamentação Teórica

Para o roteamento de fibras, é necessário pelo menos o entendimento básico de dois temas: (1) a composicão de elementos passivos das redes ópticas e (2) algoritmos (no sentido de operações, otimização e tipos de problemas).

2.1. Redes Ópticas

Na teoria dos grafos, um grafo é uma estrutura composta por vértices (V) (também chamados de nós) e arestas (E). A relação entre V e E é dado por $G(V, E)$. Fazendo um paralelo com uma rede óptica, os vértices seriam as Caixas de Emenda (CE) e as Caixas de Atendimento (CA) [Maeda e Montalti 2009]; os cabos ópticos por sua vez seriam as arestas. Um exemplo de CE poste ser visto na Figura 1, a Figura 2 mostra o interior de uma CE.

Os cabos ópticos são constituídos de fibras agrupadas em tubos. Cada fibra por sua vez, pode trafegar zero, um ou vários comprimentos de onda (λ). Em uma rede

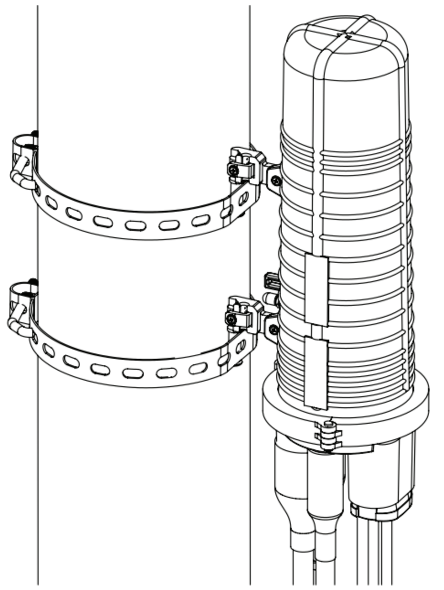

Figura 1. CE fixada em poste

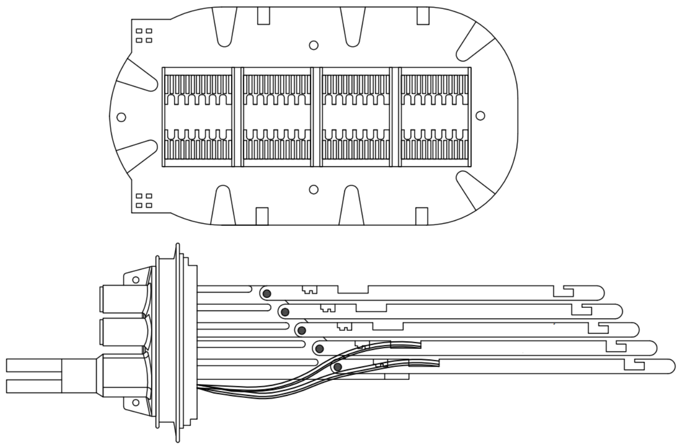

Figura 2. Detalhe das bandejas de CE

física, as fibras são redirecionadas nos vértices (CEs e CAs) de acordo com as demandas de atendimento das operadoras. CAs atendem clientes finais, geralmente com o uso de tecnologias de Redes Ópticas Passivas (PON).

Esse redirecionamento das fibras ocorre com o uso de máquinas de fusão [Maeda e Montalti 2009], cada par de fibras é acomodado em bandejas, conforme mostra a Figura 2. Em um caso ideal, espera-se que de acordo com as requisicões de demanda recebida, a ocupacão das ranhuras seja feita de forma sequencial e organizada. Por exemplo, em um cabo contendo 12 tubos, com 12 fibras cada cabo, o grupo de ranhuras superior recebe o primeiro tubo, o segundo grupo o segundo tubo, assim por diante.

2.2. Algoritmos

Para descobrir a melhor rota, ou seja, qual sequência de cabos e caixas é o caminho mais curto entre uma caixa A e B, podemos considerar pelo menos dois algoritmos: Algoritmo de Dijkstra (encontra o caminho de menor custo em grafos com pesos não negativos) [Dijkstra 2022] e o Algoritmo de Bellman-Ford (lida com arestas de peso negativo, mas com maior complexidade temporal).

Embora o Algoritmo de Dijkstra não funcione com custos negativos, podemos considerá-lo, visto que o custo será igual a distância, um exemplo de uso pode ser visto na Figura 3 em conjunto com a Figura 4. Importante destacar que o Algoritmo de Dijkstra não funciona bem para longas sequências de nós, visto que a lógica do mesmo necessita navegar até o fim do ramo.

Ainda com os problemas observados com o Algoritmo de Dijkstra, podemos considerá-lo, pois do ponto de vista de complexidade de tempo, observa-se três etapas que fazem a base dessa complexiade: (1) quando um novo vértice é empurrado/adicionado à fila de prioridades, (2) quando um vértice com distância mínima é retirado da fila de prioridade e (3) quando a distância de um vértice é diminuída na fila de prioridade. Considerando uma estrutura de fila com lista, empurrar e retirar nós da fila são ambos iguais

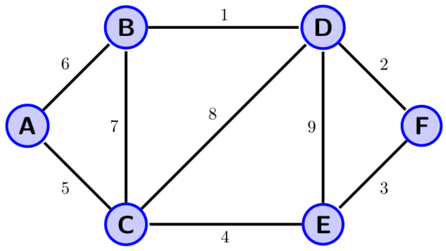

Figura 3. Grafo com custos

	A		B		C		D		E		F	
1	/	0	/	∞	/	∞	/	∞	/	∞	/	∞
2			A	6	A	5	/	∞	/	∞	/	∞
3			A	6			C	13	C	9	/	∞
4							B	7	C	9	/	∞
5									C	9	D	9
6											D	9

Figura 4. Iterações do algoritmo Dijkastra

a $O(V)$, reduzir o nó também igual a $O(V)$, conclui-se que o algoritmo tem uma complexidade de tempo igual a $O(V^2 + EV)$.

O roteamento de fibras pode ser formulado como um problema de programação linear inteira [Griva et al. 2008], onde variáveis binárias indicam se uma fibra ou enlace é utilizado. Entretanto, tais problemas são NP-difíceis [Ozdaglar e Bertsekas 2003], devido à combinação exponencial de caminhos possíveis. Por isso, heurísticas como Dijkstra são práticas e eficientes em instâncias reais.

Além da escolha do caminho, a rede precisa alocar espectro e largura de banda. O problema de *Routing and Wavelength Assignment* (RWA) é conhecido por sua complexidade computacional, reforçando a necessidade de algoritmos heurísticos e aproximativos [Ozdaglar e Bertsekas 2003].

3. Definição do Problema

Para delimitar o escopo do problema, primeiro: elementos ativos não serão considerados (ex.: terminal de linha óptico); segundo: uma fibra será considerada ocupada (isto é, alocada) caso haja um comprimento de onda associado a ela, ao longo desse artigo, vamos considerar apenas um comprimento de onda por alocaćão (multiplexaćão por divisão de onda não será considerado); terceiro: desconsidera-se atenuaćão; quarto: desconsidera-se o uso de splitters, onde um mesmo comprimento de onda em uma fibra é ”espalhado”para n fibras em um nó.

Fazendo um palalelo com [Ozdaglar e Bertsekas 2003] e [Zang et al. 2000], podemos notar a menćão de ”conversores ópticos”, em uma aplicaćão mais genérica. O presente artigo é um ”subconjunto”do tema de alocaćão e roteamento de onda tratado nas referências citadas.

Em uma solućão ótima, as

- como uma rede nova é ocupada? De cima para baixo, ou de baixo para cima? - qual seria a solućão ótima? - cabo de x para n para x fibras (fazer uma figura?); - fatorial das combinaćões; - tubos abertos vs. sangria; - quando fazer manobras; - fazer comparativo com o problema de otimizaćão de fluxo máximo;

Considere uma rede óptica modelada como um grafo $G = (V, E)$, onde V representa os nós (caixas de emenda ou atendimento) e E representa enlaces (cabos/fibras). Cada aresta $e \in E$ possui um peso $w(e)$ correspondente ao custo físico (distância, atenuação ou custo de implantação). O objetivo é determinar o caminho de menor custo entre um nó origem s e um nó destino t.

4. Desenvolvimento

O algoritmo de Dijkstra é empregado para resolver o problema. O pseudo-código é dado a seguir:

1. Inicializar todos os nós com distância infinita, exceto o nó origem s que recebe 0.
2. Marcar todos os nós como não visitados.
3. Selecionar o nó não visitado com menor distância atual.
4. Atualizar as distâncias dos vizinhos, se o novo caminho for mais curto.
5. Repetir até que todos os nós tenham sido visitados ou que o destino t tenha sido alcançado.

   ...

5. Conclusão

Este artigo apresentou uma abordagem para o roteamento físico em redes ópticas utilizando o algoritmo de Dijkstra. A fundamentação teórica mostrou a relevância de representar redes como grafos ponderados e a comparação com outros algoritmos. Ainda que problemas de roteamento óptico pertençam à classe NP-difícil em sua formulação completa (com restrições de alocação de banda e espectro), heurísticas como Dijkstra permitem soluções práticas e eficientes. Como trabalhos futuros, recomenda-se a incorporação de restrições adicionais (capacidade, espectro, múltiplos caminhos redundantes) e a aplicação de técnicas híbridas com programação linear inteira para otimização global.

Referências

Dijkstra, E. W. (2022). A note on two problems in connexion with graphs. In *Edsger Wybe Dijkstra: his life, work, and legacy*, pages 287–290.

Griva, I., Nash, S. G., e Sofer, A. (2008). *Linear and nonlinear optimization 2nd edition*. SIAM.

Maeda, Y. e Montalti, F. (2009). Optical fibres, cables and systems. itu-t manual. *International Telecommunication Union, Geneva*.

Ozdaglar, A. E. e Bertsekas, D. P. (2003). Routing and wavelength assignment in optical networks. *IEEE/ACM transactions on networking*, 11(2):259–272.

Zang, H., Jue, J. P., Mukherjee, B., et al. (2000). A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks. *Optical networks magazine*, 1(1):47–60.