

# 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 aéreos e submarinos. Embora as normas e os desafios iniciais das implementações de redes ópticas pioneiras tenham atingido 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 a implementação desse tipo de rede.

Um dos desafios centrais no planejamento e operação dessas redes é o roteamento de caminhos físicos, isto é, a definição de quais fibras ópticas serão utilizadas para conectar dois pontos geográficos distintos. Este artigo propõe desenvolver um algoritmo heurístico para o roteamento de uma fibra dado uma rede em funcionamento. Esse artigo é organizado no seguinte formato: 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.

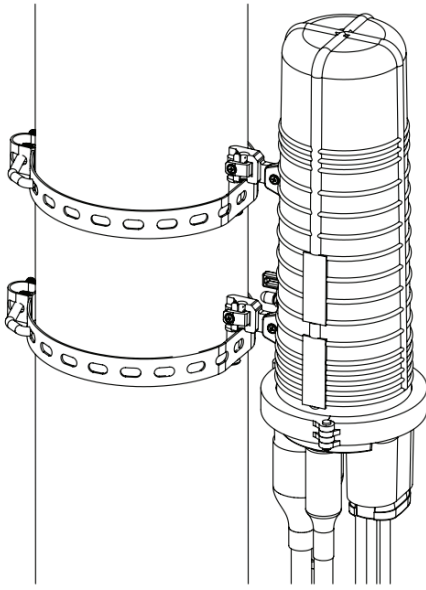
## 2. Fundamentação Teórica

Para o roteamento de fibras, é necessário pelo menos o entendimento básico de dois temas: (1) os elementos que compoem essas redes e (2) algoritmos, no sentido de operações, otimização e tipos de problemas.

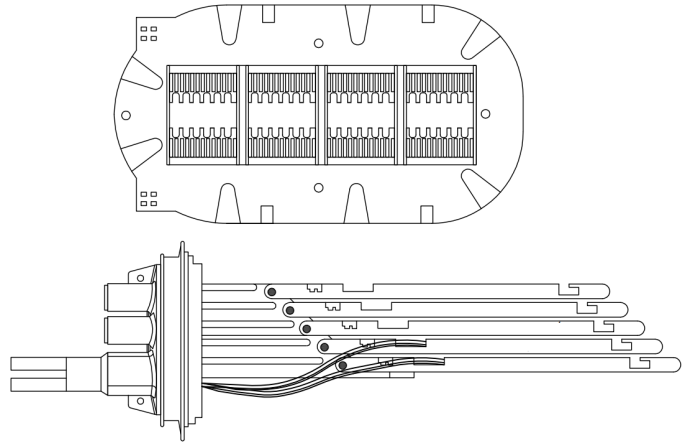
### 2.1. Redes Ópticas

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.

Os cabos ópticos são constituídos de fibras agrupadas em tubos. Cada fibra por sua vez, pode trafegar zero, um ou vários comprimentos de onda ( $\lambda$ ). 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).

## 2.2. Algoritmos

O problema de roteamento em redes pode ser resolvido por diferentes algoritmos. Os mais relevantes para o presente artigo são Dijkstra (encontra o caminho de menor custo em grafos com pesos não negativos) [Dijkstra 2022] e Bellman-Ford (lida com arestas de peso negativo, mas com maior complexidade temporal). Para redes ópticas, em que os custos são sempre não negativos (distância, atenuação, ou custo de instalação), o algoritmo de Dijkstra é mais adequado.

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

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  $t$ .

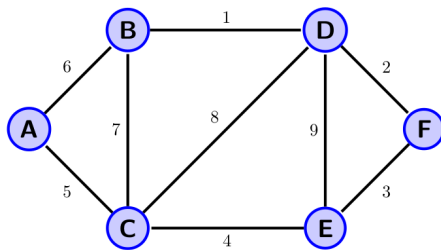


Figura 3. Grafo com custos

|   | A |   | B |          | C |          | D |          | E |          | F |          |
|---|---|---|---|----------|---|----------|---|----------|---|----------|---|----------|
| 1 | / | 0 | / | $\infty$ | / | $\infty$ | / | $\infty$ | / | $\infty$ | / | $\infty$ |
| 2 |   |   | A | 6        | A | 5        | / | $\infty$ | / | $\infty$ | / | $\infty$ |
| 3 |   |   | A | 6        |   |          | C | 13       | C | 9        | / | $\infty$ |
| 4 |   |   |   |          |   |          | B | 7        | C | 9        | / | $\infty$ |
| 5 |   |   |   |          |   |          |   |          | C | 9        | D | 9        |
| 6 |   |   |   |          |   |          |   |          |   |          | D | 9        |

Figura 4. Iterações do algoritmo Dijkstra

## 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.