

Heurística de Roteamento e Alocação de Fibras em Redes Ópticas

Diego M. A. Lütke

Escola Politécnica
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

18 de Outubro de 2025

Resumo

1. Introdução
2. Contexto e Diagnóstico
3. Estado da Arte
4. Escopo do Problema
5. Estudo de Caso
6. Conclusão

1 - Introdução — Motivação e Objetivo

- O papel crítico das redes de fibra óptica em infraestruturas de telecom.
- A necessidade de eficiência e qualidade na entrega de projetos.
- Os impactos de uma rede desorganizada (e.g. demora em manutenções preventivas e emergenciais).
- Alternativas menos custosas.

1 - Introdução — Objetivo

- Propor uma heurística prática para roteamento físico (i.e. escolha da rota + escolha da fibra).
- Otimizar a escolha de rotas e a alocação de fibras disponíveis, considerando aspectos práticos da rede.

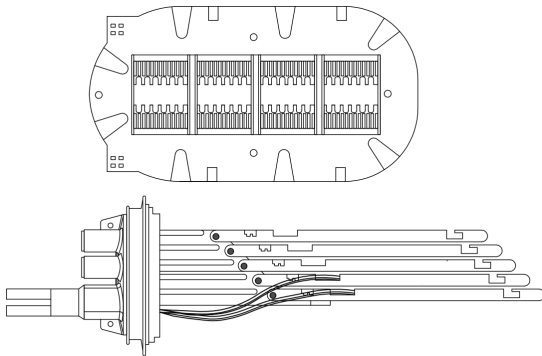
2 - Contexto e Diagnóstico

- A operação de redes ópticas em telecomunicações depende do uso de sistemas de gerenciamento de rede para roteamento e alocação de fibras.
- O problema pode ser modelado como um grafo, em que vértices (também chamados de nós) representam caixas/terminações ópticas e arestas representam enlaces ópticos.
- Esse tipo de modelagem permite aplicar algoritmos clássicos de roteamento (e.g. Dijkstra e Bellman-Ford).
- O primeiro desafio é criar uma heurística que combine o menor caminho físico com a disponibilidade de fibras livres, evitando bloqueios e permitindo escalabilidade da rede.
- O segundo desafio é definir o problema, de modo a fazer um paralelo com o problema NP-completo de otimização *Routing and Wavelength Assignment* (RWA).

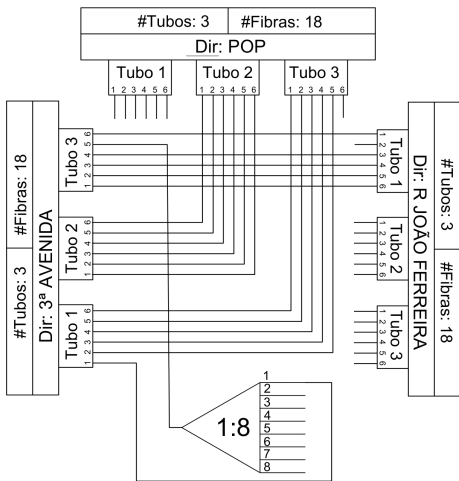
3 - Estado da Arte — Redes Ópticas

- Os cabos ópticos são formados por fibras agrupadas em tubos, e cada fibra pode transmitir um ou mais comprimentos de onda (λ).
- As fibras são redirecionadas nos vértices (CEs e CAs) conforme as demandas das operadoras, sendo os CAs responsáveis pelo atendimento a clientes via tecnologias PON.
- O redirecionamento das fibras é feito por máquinas de fusão, organizando as conexões em bandejas de forma sequencial e estruturada conforme a demanda.

3 - Estado da Arte — Redes Ópticas



3 - Estado da Arte — Redes Ópticas



3 - Estado da Arte — Algoritmos

- São considerados dois algoritmos clássicos: Dijkstra e Bellman-Ford.
- O Algoritmo de Dijkstra encontra o caminho de menor custo em grafos com pesos não negativos.
- Bellman-Ford permite arestas com pesos negativos, mas apresenta maior complexidade temporal.

3 - Estado da Arte — Algoritmo de Dijkstra

- No contexto de redes óptica, Dijkstra é aplicável, pois o custo corresponde à distância, não havendo pesos negativos.
- A complexidade de tempo do Dijkstra envolve três operações principais: inserção, remoção e atualização de vértices na fila de prioridades.
- Com estrutura de fila baseada em lista, o algoritmo apresenta complexidade total $O(V^2 + EV)$.

Ponto de Atenção

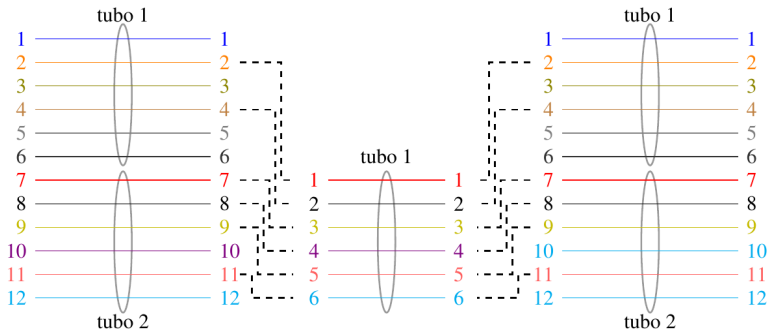
O Algoritmo de Dijkstra não é ideal para longas sequências de nós, devido à necessidade de percorrer todo o ramo.

4 - Escopo do Problema

1. Elementos ativos são desconsiderados (i.e. DWDMs, OLTs).
2. Multiplexação e conversores de onda são desconsiderados.
3. Atenuação é desconsiderado.
4. Considera-se uma fibra ocupada quando há um comprimento de onda associado a ela, ou seja, um λ por alocação.

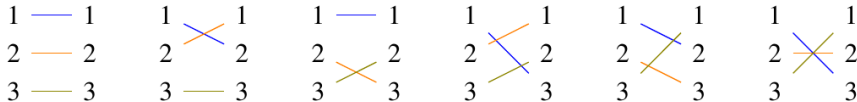
4 - Escopo do Problema — Pontos de Observação

- Em redes novas, as fibras são geralmente alocadas de forma espelhada (do menor ao maior índice).
- Em falhas ou substituições temporárias de cabos, o "espelhamento" pode se perder, mas o retorno dos comprimentos de onda as mesmas fibras simplifica a reorganização.



4 - Escopo do Problema — Pontos de Observação

- A alocação de fibras é um problema NP-completo, com crescimento combinatorial fatorial $O(n!)$ semelhante ao problema do caixeiro-viajante.



5 - Estudo de Caso

- Cálculo das n melhores rotas: custo depende da implementação de Dijkstra / K-shortest.
- Análise de cada rota: espaço proporcional ao comprimento da maior rota (pilha de conexões) $\Rightarrow O(n)$ em termos práticos.
- A escolha de fibra é linear na quantidade de enlaces da rota (verificação por enlace).

5 - Estudo de Caso — Resultados Esperados

- Identificar rotas viáveis com melhor aproveitamento de fibras.
- Redução de bloqueios e manutenção do espelhamento físico nas bandejas.
- Simplicidade de integração com NMS e implementação em ferramentas como NetworkX/Cisco CML.

5 - Estudo de Caso — Limitações

- Sem testes empíricos no artigo (falta validação em simulação/produção).
- Não trata múltiplos comprimentos de onda por fibra nem atenuação.
- Estratégia heurística pode não ser ótima em cenários altamente carregados.

5 - Conclusão

- Heurística integra cálculo de menor caminho com regras práticas de alocação de fibra.
- Boa relação entre simplicidade operacional e aplicabilidade prática.
- Serve como base para implementações e experimentos futuros.

Trabalhos Futuros

- Implementação e avaliação em simulador (CML, NetworkX, OMNeT++).
- Extensão para múltiplos λ por fibra (RWA completo) e inclusão de atenuação/distância.
- Comparação com heurísticas/algoritmos meta-heurísticos (GA, GRASP, etc.).
- Integração com dados reais de inventário e políticas de operação.

Figure

Uncomment the code on this slide to include your own image from the same directory as the template .TeX file.

Referências

- ▶ V. ALWAYN, *Optical network design and implementation*, Cisco Press, 2004.
- ▶ M. S. BAZARAA, J. J. JARVIS, AND H. D. SHERALI, *Linear programming and network flows*, John Wiley & Sons, 2011.
- ▶ E. W. DIJKSTRA, *A note on two problems in connexion with graphs*, Numerische Mathematik, 1 (1959), p. 269–271.
- ▶ I. GRIVA, S. G. NASH, AND A. SOFER, *Linear and nonlinear optimization 2nd edition*, SIAM, 2008.
- ▶ E. LAWLER, *The Travelling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*, Wiley-Interscience series in discrete mathematics and optimization, John Wiley & Sons, 1985.
- ▶ Y. MAEDA AND F. MONTALTI, *Optical fibres, cables and systems. itu-t manual*, International Telecommunication Union, Geneva, (2009).
- ▶ B. MUKHERJEE, I. TOMKOS, M. TORNATORE, P. WINZER, AND Y. ZHAO, *Springer handbook of optical networks*, Springer Nature, 2020.
- ▶ A. E. OZDAGLAR AND D. P. BERTSEKAS, *Routing and wavelength assignment in optical networks*, IEEE/ACM transactions on networking, 11 (2003), pp. 259–272.
- ▶ R. RAMASWAMI, K. SIVARAJAN, AND G. SASAKI, *Optical networks: a practical perspective*, Morgan Kaufmann, 2009.
- ▶ H. ZANG, J. P. JUE, B. MUKHERJEE, ET AL., *A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks*, Optical networks magazine, 1 (2000), pp. 47–60.