



**Rafael Freitas de Amorim**

## **Problemas de Programação Inteira em Redes Ópticas de Telecomunicações**

### **Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Oscar Porto



**Rafael Freitas de Amorim**

**Problemas de Programação Inteira em Redes Ópticas de  
Telecomunicações**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Oscar Porto**

**Orientador**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Rodolfo Sabóia Lima de Souza**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Marcos Azevedo da Silveira**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico

Rio de Janeiro, 2 de fevereiro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Rafael Freitas de Amorim**

Graduou em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicação e Sistema de Apoio à Decisão em Julho de 2003. Em Agosto de 2003, iniciou o seu mestrado na mesma instituição na área de Métodos de Apoio à Decisão

Ficha Catalográfica

Amorim, Rafael Freitas de

Problemas de programação inteira em redes ópticas de telecomunicações / Rafael Freitas de Amorim ; orientador: Oscar Porto. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

82 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Programação Inteira. 3. SDH. 4. Network Design. 5. Telecomunicação. 6. Redes ópticas. I. Porto, Oscar. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para minhas avós,  
Elzira e Maria das Dores

## **Agradecimentos**

Ao Professor Oscar, por toda a orientação, incentivo e apoio.

À CAPES pelo fornecimento de bolsa de fomento, sem a qual seria impossível a realização deste trabalho.

Ao meu amor, Aline, com seu sorriso e carinho, tudo fica mais fácil.

Aos meus pais, Lauro e Cláudia, por todos ensinamentos e carinho nos momentos difíceis dessa caminhada.

Ao Alexandre José, pelo apoio e incentivo durante todo período de desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus irmãos, Leonardo e Pedro, pela paciência ao longo dessa jornada.

Ao Bruno Flach, Leonardo Scheiner e Gustavo Filizola, por toda atenção, esclarecimentos e apoio nas dúvidas e momentos difíceis.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

## Resumo

Amorim, Rafael Freitas. **Problemas de Programação Inteira em redes ópticas de telecomunicações**. Rio de Janeiro, 2005. 82p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Impulsionadas pelo crescimento do mercado corporativo e pela prestação de serviços para grandes clientes, as operadoras de serviços de telecomunicação estão buscando processos automatizados e redução de custo no desenvolvimento de novos projetos de redes de telecomunicações. Nesse cenário, dois modelos de Programação Inteira são apresentados buscando uma minimização de custos. O primeiro para o problema de planejamento de novas redes. E segundo para o problema de configuração de *trails* nas redes SDH. Uma introdução sobre meios de transmissão, redes de telecomunicações, topologias mais utilizadas e sistemas de proteção são apresentados. Por fim, em ambos problemas, são apresentados estudos comparativos com situações reais, com o intuito de validar os modelos.

## Palavras-chave

Programação Inteira; Redes Ópticas; SDH; Planejamento de redes; Telecomunicação

## Abstract

Amorim, Rafael Freitas. **Problemas de Programação Inteira em redes ópticas de telecomunicações**. Rio de Janeiro, 2005. 82p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Stimulated by the growth of the corporate market and by the services dedicated to big customers, providers are searching for, even more nowadays, automated process and cost reduction on the development of new telecommunications' networks projects. In that setting, two models of Integer Programming will be presented, seeking a minimization of costs. At first, for the problem of planning of new networks, and second for the problem of configuration of trails in the SDH networks. Beyond that, an introduction about transmission lines, networks of communication, topology more utilized and systems of protection will be presented. In both problems, comparing real situations, with the purpose of validate the models.

## Keywords

Integer Programming; Optical Network; SDH; Network Design; Telecommunication

# Sumário

1 Introdução	12
1.1. Motivação	12
1.2. Objetivo	13
1.3. Estrutura da dissertação	14
2 Meios de transmissão utilizados em redes de telecomunicações	15
2.1. Introdução	15
2.2. As Redes de Comunicação	16
2.3. Fibra Óptica	18
2.3.1. Transmissão do sinal óptico	18
2.4. Par metálico	20
2.5. Rádio Digital	21
2.5.1. Transmissão	21
2.5.2. Enlace ponto a ponto e multi-ponto	24
3 Redes de Comunicação	28
3.1. SDH – Hierarquia Digital Síncrona	28
3.1.1. Estrutura de multiplexação em redes SDH	29
3.1.2. Taxas de transmissão de dados	31
3.2. Topologias	32
4 História dos estudos de transmissão óptica	34
4.1.1. Estudos sobre Redes Ópticas	34
4.1.2. Estudos sobre redes ópticas Wide-area	36
4.1.3. Estudos sobre planejamento e reconfiguração de topologia virtual	37
4.1.4. Estudos sobre planejamento de redes de transmissão	40
5 Problema de planejamento de novas redes de telecomunicações	44
5.1. Modelo	45
5.1.1. Índices	45
5.1.2. Conjuntos	46
5.1.3. Dados	46



5.1.4. Variáveis do problema	47
5.1.5. Formulação	48
5.2. Instâncias resolvidas	53
5.3. Resultados computacionais	56
6 Problema de Configuração de Trails nas Redes SDH	60
6.1. Modelo	62
6.1.1. Índices	62
6.1.2. Conjuntos	62
6.1.3. Dados	63
6.1.4. Variáveis	63
6.1.5. Modelo	63
6.2. Instâncias resolvidas	66
6.3. Resultados computacionais	68
7 Conclusão e Trabalhos Futuros	73
8 Referências	75

## Lista de figuras

Figura 1 - Estrutura da rede, atual, em <i>backbone</i> , metropolitana e acesso	17
Figura 2 - Corte seccional da fibra	18
Figura 3 - Refração e reflexão do raio	19
Figura 4 - Propagação do raio na fibra	19
Figura 5 – Transmissão ponto a ponto entre dois pontos fixos	22
Figura 6 – Diagrama funcional do enlace digital ponto a ponto.	23
Figura 7 – Estrutura de multiplexação da SDH	29
Figura 8 – Tipos de topologias e variações	32
Figura 9 – Classificação dos estudos sobre rede óptica	35
Figura 10 – Topologias dos dez problemas tratados	55
Figura 11 – Topologias finais dos problemas	58
Figura 12 – Tipo de topologia de malha	60
Figura 13 – Representação de cada nó real no modelo proposto	61
Figura 14 – Expansão dos nós virtuais em função dos nós reais.	61
Figura 15 – Ocupação das redes antes do modelo	66
Figura 16 – Topologias adotadas nos problemas	67
Figura 17 – Comparação da ocupação antes e depois da modelo	72

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de Hierarquia Digital	23
Tabela 2 – Mapeamento de tributários nos contêineres	29
Tabela 3 – Composição dos contêineres virtuais de ordem inferior (LO VCs)	29
Tabela 4 – Composição dos contêineres virtuais de ordem superior (HO VCs)	30
Tabela 5 – Conteúdo da unidade de Tributário (TU)	30
Tabela 6 – Conteúdo do Grupo de Unidades de Tributário (TUG)	30
Tabela 7 – Conteúdo da Unidade Administrativa (AU)	31
Tabela 8 – Conteúdo do Grupo de Unidades Administrativas (AUG)	31
Tabela 9 – Nível do SDH	31
Tabela 10 – Tabela das características técnicas e econômicas por tecnologia	54
Tabela 11 – Tabela com as demandas dos clientes dos dez problemas	56
Tabela 12 - Tabela com os resultados dos problemas	59
Tabela 13 – Consolidação dos resultados	72