

**Pontifícia Universidade Católica
Do Rio de Janeiro**



ANA PAULA LAMARÃO TAVARES

**Roteamento e Alocação de Comprimento de
Onda em Redes Ópticas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica – Rio de Janeiro para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro, 30 de Agosto de 2003



Ana Paula Lamarão Tavares

**Roteamento e Alocação de
Comprimento de Onda em Redes
Ópticas**

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.

Dr. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Ernesto Leite Pinto

IME

Dra. Rosângela Fernandes Coelho

IME

Dr. Marcelo Roberto Baptista Pereira Luis Jimenez

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de agosto de 2003

Ficha Catalográfica

Tavares, Ana Paula Lamarão

Roteamento e alocação de comprimento de onda em Redes Óticas / Ana Paula Lamarão Tavares; orientador: Marco Antonio Grivet Mattoso Maia. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

104 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. Redes óticas. 3. Roteamento e alocação de comprimentos de ondas. 4. Programação linear. 5. Algoritmo de enumeração recursiva. 6. Roteamento óptico. 7. WDM. I. Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

*aos que me deram as maiores e
melhores lições de vida para
que eu pudesse me tornar quem
sou.*

Meus Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Marco Antonio Grivet Mattoso Maia, pela paciência, dedicação, qualidade e competência a mim oferecidas, sem as quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Professor Luiz Costa, pelo apoio e compreensão durante a fase inicial do Mestrado.

Ao meu marido Luis Alberto, pela compreensão nos momentos difíceis e pelo carinho em estar ao meu lado durante esta conquista que é tão importante na minha vida.

À minha filha Ana Luiza, que ainda na barriga se comportou para que fosse possível o término da minha dissertação.

Aos meus pais Luiz Carlos e Marisa, que souberam me educar, dando-me as maiores lições de vida, e que nunca permitiram que eu desistisse de avançar.

Aos meus tios Marco e Marília, que tanto me incentivaram a seguir adiante.

Aos Professores do CETUC pelo apoio e pelos ensinamentos oferecidos.

Ao meu chefe anterior na Alcatel, Sergio Meireles e ao meu atual chefe, Marcelo Arraes, que me deram a oportunidade de realizar o curso de mestrado.

Ao amigo Alexandre Almeida, pela força e auxílio na execução deste trabalho e por estar sempre disposto a ajudar.

Às grandes amigas Maria Luiza Maia Morgado e Fernanda Abreu Neves, por estarem sempre presentes.

Às amigas Graça e Rosemary, que sempre me auxiliaram na construção deste trabalho.

Ao Vinícius, que sempre me ajudou na parte burocrática.

À PUC-Rio pelo suporte financeiro.

Resumo

Tavares, Ana Paula Lamarão; Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso.
Roteamento e Alocação de Comprimento de Onda em Redes Ópticas.
Rio de Janeiro, 2003. 103p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A indústria das comunicações tem passado nos últimos anos, mundialmente, por profundas transformações. A *Internet* é a responsável pela maior destas transformações. Com o advento da *Internet*, existe a necessidade de uma banda de transmissão maior para o tráfego de dados. Para resolver esse problema, surgiu o conceito de redes ópticas e a multiplexação no domínio do comprimento de onda. Entretanto, isso criou um outro problema: o roteamento dos pacotes. A maior parte das redes de comunicação hoje em dia, ainda possui muitos sinais eletrônicos, o que significa que os sinais ópticos precisam ser convertidos em elétricos para serem ampliados, regenerados ou roteados e, depois, reconvertidos para ópticos. Isso acaba gerando atrasos na transmissão dos sinais e um gargalo nas redes ópticas. Para minimizar este problema, vários algoritmos foram criados. Apegando-se a tais fatos, este estudo explora o tema para implementar um algoritmo de enumeração recursiva, que tem como objetivo alocação de comprimentos em redes ópticas, visando minimizar o custo total de transmissão. Esse algoritmo foi testado e comparado com o algoritmo de programação linear, que fornece a solução ótima.

Palavras-chave

Redes ópticas, roteamento e alocação de comprimentos de onda, programação linear, algoritmo de enumeração recursiva, roteamento óptico, WDM.

Abstract

Tavares, Ana Paula Lamarão; Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso.
Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks. Rio de Janeiro, 2003. 103p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The communication industry was passing in lastest years by great transformations in world. *Internet* is the mainly responsible for that, because there is the necessity of a large band to data transmission. The optical networks concept and wavelength division multiplexing technology were arised in order to solve this problem. However, this created another problem: the packet routing. The major part of communications networks still has electronics signals. This means that the optical signals have to be converted into electrical signals to be amplified, regenerated and routed and later recovered into optical. This implies in a delay on the data transmission and creates a bottleneck in the optical networks. Some algorithms have been created to minimize this problem. This dissertation has tried to develop an algorithm to solve RWA (routing and wavelength assignment) problems, aiming at the minimum total cost to transmitt datas. This algorithm was tested and compared with the linear program algorithm that gives the optimal solution to RWA problem.

Keywords

Optical networks, RWA, linear program, REA, Optical routing, WDM.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 IMPORTÂNCIA DAS REDES ÓPTICAS.....	14
1.1.1 LARGURA DE BANDA	16
1.1.2 DESEMPENHO DE ERRO.....	17
1.1.3 TRANSPARÊNCIA DE PROTOCOLO	17
1.1.4 CONFIABILIDADE, DISPONIBILIDADE E MANUTENÇÃO	18
1.2 PAPEL DAS REDES ÓPTICAS NO MERCADO ATUAL	18
1.3 ROTEAMENTO EM REDES ÓPTICAS	21
1.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO ROTEAMENTO ÓPTICO.....	22
1.5 ROTEAMENTO ÓPTICO X ROTEAMENTO ELÉTRICO	24
2. PROGRESSOS E DESAFIOS DAS REDES ÓPTICAS.....	27
2.1 CARACTERÍSTICAS TOPOLÓGICAS DAS REDES.....	27
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS REDES ÓPTICAS	29
2.3 REPRESENTAÇÃO DAS REDES ÓPTICAS.....	31
2.3.1 REPRESENTAÇÃO POR GRAFOS	31
2.3.2 REDES MULTINÍVEIS	32
2.3.3 REUSO DE COMPRIMENTO DE ONDA	33
2.3.4 CONVERSÃO DE COMPRIMENTO DE ONDA	33
2.4 ASPECTOS DE TRÁFEGO.....	35
2.5 ROTEAMENTO ÓPTICO NAS REDES DE COMUNICAÇÃO.....	37
2.5.1 MODELAGEM POR MATRIZ DE TRÁFEGO FIXA.....	38
2.5.2 MODELAGEM POR PERMUTAÇÕES	38
2.5.3 MODELAGEM POR CARGA MÁXIMA.....	39
2.5.4 MODELAGEM ESTATÍSTICA.....	40
2.6 TIPOS DE ROTEAMENTO DE COMPRIMENTO DE ONDA	41
2.7 RWA – ROUTING AND WAVELENGTH ASSIGNMENT	42

2.7.1 O CASO DAS REDES COM MÚLTIPLOS ENLACES	46
2.7.2 ATRIBUIÇÃO DE COMPRIMENTOS DE ONDA E ROTAS ALTERNATIVAS.....	49
3. DESCRIÇÃO E SOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	50
3.1 METODOLOGIA DE CONVERSÃO DE GRAFO ORIGINAL PARA GRAFO AUMENTADO	53
3.2 ALGORITMO DE DETERMINAÇÃO DAS ROTAS ÓTIMAS.....	57
3.3 ALGORITMO PROPOSTO	62
4. SIMULAÇÕES	67
4.1 SIMULAÇÕES EM GLPK	71
4.2 SIMULAÇÃO EM REA	86
4.3 TABELA COMPARATIVA.....	96
5. CONCLUSÃO	98
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	99

Lista de Figuras

1.1 TIPOS DE REDES WDM.....	20
2.1 CARACTERÍSTICAS TOPOLÓGICAS DE UMA REDE.....	28
2.2 REDE ESTRELA SINGLE HOP DO TIPO BROADCAST AND SELECT.....	29
2.3 EXEMPLO DE UMA REDE ESTRELA WDM MULTIHOP COM 8 NÓS.....	30
2.4 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA REDE MULTINÍVEL.....	32
2.5 ROTEAMENTO DE PORTADORAS ÓPTICAS EM UMA WAN WDM.....	33
2.6 REDE DE ROTEAMENTO WDM INTEIRAMENTE ÓPTICA.....	34
2.7 RESTRIÇÃO DA CONTINUIDADE DO COMPRIMENTO DE ONDA EM UMA REDE DE ROTEAMENTO WDM.....	35
2.8 DIFERENTES MODELOS DE REDE CORRESPONDENDO A ARESTAS E CAMINHOS DE LUZ DIRECIONAIS OU NÃO.....	44
2.9 EXEMPLO PARA ILUSTRAR A DIFERENÇA ENTRE O USO OU NÃO DOS CONVERSORES DE COMPRIMENTO DE ONDA.....	46
2.10 FATOR DE REUSO.....	47
2.11 FATOR DE REUSO PARA UM DETERMINADO NÚMERO DE COMPRIMENTOS DE ONDA.....	48
3.1 EXEMPLO DE GRAFO AUMENTADO COM $L = 2$	56
3.2 DEPENDÊNCIA DO NÚMERO DE RESTRIÇÕES E VARIÁVEIS EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE COMPRIMENTOS DE ONDA.....	62
3.3 DIAGRAMA EM ÁRVORE.....	64
4.1 REDE HIPOTÉTICA - REDE BIDIRECIONAL COM 6 NÓS E 8 ENLACES.....	67
4.2 SEGUNDA REDE HIPOTÉTICA: REDE BIDIRECIONAL COM 12 NÓS E 20 ENLACES.....	68
4.3 TERCEIRA REDE - ROTA SUL DA BRT (BIDIRECIONAL COM 25 NÓS E 28 ENLACES).....	69
4.4 REDE WDM DA EMBRATEL (BIDIRECIONAL COM 10 NÓS E 12 ENLACES).....	70
4.5 ROTA RÁDIO DA BRT (REDE COM 10 NÓS E 12 ENLACES BIDIRECIONAIS).....	70
4.6 REDE HIPOTÉTICA – REDE UNIDIRECIONAL COM 6 NÓS E 8 ENLACES.....	71

Lista de Tabelas

4.1 TABELA COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	96
--	----