



Marcelo de Oliveira Lomonaco

**Alocação de Conversores de Comprimento
de Onda em Redes Parciais**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Rio de Janeiro
Setembro de 2006



Marcelo de Oliveira Lomonaco

**Alocação de Conversores de Comprimento
de Onda em Redes Parciais**

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 de Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Ewerton Longoni Madruga
Universidade Estácio de Sá

Dr. Marcelo Roberto Baptista Pereira Luis Jimenez
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Rodolfo Sabóia Lima de Souza
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de setembro de 2006

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

Marcelo de Oliveira Lomonaco

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações na Universidade do Estado do Rio de Janeiro e especializou-se em Redes de Computadores na PUC-RIO. Tem passagem pela Alcatel Telecomunicações S.A., onde atuou em projetos de redes de transmissão óptica durante 6 anos. Atualmente é consultor Especialista em Redes na PETROBRAS.

Ficha Catalográfica

Lomonaco, Marcelo de Oliveira

Alocação de conversores de comprimento de onda em redes ópticas parciais / Marcelo de Oliveira Lomonaco ; orientador: Marco Antonio Grivet Mattoso Maia. – 2006.

114 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Alocação de conversores de comprimento de onda. 3. Redes ópticas parciais. I. Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

"DEUS,
conceda-me serenidade,
para aceitar as coisas que não posso modificar.
Coragem para modificar aquelas que posso
e sabedoria, para reconhecer a diferença".

(Oração da Serenidade)

Agradecimentos

A DEUS, pelas infinitas dádivas e pela serenidade e coragem concedidas.

Ao Professor Marco Antonio Grivet Mattoso Maia, por sua orientação e particular motivação, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À PUC-Rio e a CAPES, pela oportunidade e suporte, sem as quais seria impossível a realização deste.

A meus pais, pela paciência nesta difícil jornada, e por serem os melhores professores da minha vida.

As minhas irmãs Renata e Roberta, por existirem, e Isabela.

À Shanna e Shaninha, estrelas que jamais se apagarão.

À minha avó, padrinhos, tios/tias, primos e primas.

Ao grande amigo Edésio Nascimento, pela força nos momentos mais difíceis.

Aos irmãos e irmãs espirituais.

À Alcina, por sempre me lembrar dos prazos a cumprir.

Resumo

Lomonaco, Marcelo de Oliveira; Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso (Orientador). **Alocação de Conversores de Comprimento de Onda em Redes Parciais**. Rio de Janeiro, 2006. 114p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho investiga o problema de alocação sub-ótima de conversores de comprimento de onda em nós de redes ópticas parciais, através da proposição de 3 algoritmos baseados nas metaheurísticas GA (Algoritmo Genético), PSO (Otimização por Enxame de Partícula) e SA (Recozimento Simulado). Simulações são apresentadas para ratificar os benefícios com a introdução de conversores nas arquiteturas de rede. Os desempenhos dos algoritmos são mensurados via um simulador, comparando-os com outros algoritmos estabelecidos na literatura.

Palavras-chave

Alocação de conversores de comprimento de onda; Redes ópticas parciais.

Abstract

Lomonaco, Marcelo de Oliveira; Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso (Advisor). **Allocation of Wavelength Converters in Partial Networks.** Rio de Janeiro, 2006. 114p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work investigates the problem of suboptimally placing wavelength converters at nodes of partial optical networks, through the proposition of 3 algorithms based on the metaheuristics GA (Genetic Algorithm), PSO (Particle Swarm Optimization) and SA (Simulated Annealing). Simulations are presented to ratify the benefits with the introduction of wavelength converters on networks architectures. The results of these algorithms are measure by a simulator, comparing them with other algorithms in literature.

Keywords

Wavelength Converter Placement; Partial Optical Networks.

Sumário

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1. Motivação | 14 |
| 1.2. Objetivo | 14 |
| 1.3. Contribuições | 16 |
| 2 REDES ÓPTICAS: CONCEITOS | 17 |
| 2.1. Limitação Conversão Óptica-Elétrica-Óptica (O-E-O) | 17 |
| 2.2. Redes Ópticas: Evolução | 18 |
| 2.3. Redes Ópticas: Classificação | 24 |
| 3 PROBABILIDADE DE BLOQUEIO EM REDES PARCIAIS | 32 |
| 3.1. Cálculo da probabilidade de bloqueio – Modelo 1 (Base) | 32 |
| 3.1.1. Parâmetros do sistema | 32 |
| 3.1.2. Cálculo da Probabilidade de Bloqueio | 34 |
| 3.2. Cálculo da probabilidade de bloqueio – Modelo 2 (Xi, Arakawa e Murata) | 40 |
| 3.2.1. Parâmetros do sistema | 41 |
| 3.2.2. Probabilidade de Bloqueio de uma Conexão | 42 |
| 3.2.3. Probabilidade de Bloqueio em um Roteador Intermediário | 43 |
| 3.2.4. Cálculo da carga por enlace | 45 |
| 3.2.5. Cálculo da carga de conversão por nó intermediário (WCR) | 45 |
| 4 METÁFORAS DE OPTIMIZAÇÃO | 49 |
| 4.1. Algoritmo Genético | 51 |
| 4.1.1. Identificação | 53 |
| 4.1.2. Representação | 53 |
| 4.1.3. Inicialização | 53 |
| 4.1.4. Avaliação | 54 |
| 4.1.5. Seleção | 54 |
| 4.1.6. Operadores Genéticos | 55 |
| 4.2. Otimização por Enxame de Partículas (<i>PSO - Particle Swarm Optimization</i>) | 57 |
| 4.3. Recozimento Simulado (<i>Simulated Annealing</i>) | 58 |
| 5 TRABALHO REALIZADO | 61 |
| 5.1. Modelo de uma rede óptica com conversores de comprimento de onda | 61 |
| 5.2. Metodologias de Alocação de Conversores Propostas | 62 |
| 5.3. Métodos de Referência | 65 |
| 5.4. Simulador | 65 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 70 |
| 6.1. Análise do Ganho Conversão Total x Conversão Zero | 70 |
| 6.2. Comparações entre os métodos de alocação de conversores de comprimento de onda | 81 |
| 6.2.1. Resultados Topologia 1 (NSFNET) | 82 |

| | |
|---|-----|
| 6.2.2. Rede de Referência - Anel com 6 nós | 86 |
| 6.2.3. Resultados NSFNET (0.4 ERLANG por conexão) | 88 |
| 6.2.4. Resultados Topologia 2 (TORÓIDE 4x4) | 91 |
| 6.2.5. Resultados TORÓIDE 4x4 (0.4 ERLANG por conexão) | 95 |
| 6.2.6. Resultados Topologia 3 (HIPOTÉTICA) | 97 |
| 6.2.7. Resultados HIPOTÉTICA (13 comprimentos de onda) | 101 |
| 6.2.8. Resultados Topologia 4 (BACKBONE BELLCORE) | 103 |
| 6.2.9. Resultados BACKBONE BELLCORE (16 comprimentos de onda) | 106 |
| | |
| 7 CONCLUSÕES | 109 |
| 7.1. Trabalhos Futuros | 110 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 111 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Roteamento em redes WDM | 20 |
| Figura 2.2 – Equipamentos WDM 1ª geração | 21 |
| Figura 2.3 – Roteador de comprimento de onda | 22 |
| Figura 2.4 – Roteador de comprimento de onda com capacidade de conversão | |
| Figura 2.5 – Nó com capacidade plena de conversão | 26 |
| Figura 2.6 – Nó com capacidade de conversão parcial | 27 |
| Figura 3.1 – Rota segmentada | 34 |
| Figura 3.2 – Processo de nascimento e morte de comprimentos de onda no j-ésimo enlace | 36 |
| Figura 3.3 – Classificação das conexões correlatadas | 47 |
| Figura 4.1 – Fluxograma Algoritmo Genético | 56 |
| Figura 4.2 – Fluxograma <i>Simulated Annealing</i> | 60 |
| Figura 5.1 – Funcionamento Algoritmo proposto | 64 |
| Figura 5.2 – Fluxograma da Simulação | 68 |
| Figura 5.3 – Estrutura do trabalho | 69 |
| Figura 6.1 – Topologia 1 (NSFNET) | 71 |
| Figura 6.2 – Topologia 2 (TORÓIDE 4x4) | 72 |
| Figura 6.3 – Topologia 3 (HIPOTÉTICA) | 72 |
| Figura 6.4 – Topologia 4 (BACKBONE BELLCORE) | 73 |
| Figura 6.5 – Probabilidade de Bloqueio x Tráfego (NSFNET - 12 comprimentos de onda) | 74 |
| Figura 6.6 – Probabilidade de Bloqueio x Tráfego (TORÓIDE - 15 comprimentos de onda) | 75 |
| Figura 6.7 – Probabilidade de Bloqueio x Tráfego (HIPOTÉTICA - 12 comprimentos de onda) | 76 |
| Figura 6.8 – Probabilidade de Bloqueio x Tráfego (BELLCORE - 15 comprimentos de onda) | 77 |
| Figura 6.9 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Xi, Arakawa e Murata (NSFNET – 12 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 84 |
| Figura 6.10 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Guloso_Base (NSFNET – 12 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 84 |
| Figura 6.11 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Estatístico (NSFNET – 12 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 85 |
| Figura 6.12 – Comparação entre os Métodos Xi, Arakawa e Murata, Guloso_Base e Estatístico (NSFNET – 12 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 85 |
| Figura 6.13 – Topologia Rede de Referência em Anel | 86 |
| Figura 6.14 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Xi, Arakawa e Murata (NSFNET – 12 comprimentos de onda e 0.4 ERLANG por conexão) | 89 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.15 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Guloso_Base (NSFNET – 12 comprimentos de onda e 0.4 ERLANG por conexão) | 89 |
| Figura 6.16 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Estatístico (NSFNET – 12 comprimentos de onda e 0.4 ERLANG por conexão) | 90 |
| Figura 6.17 – Comparação entre os Métodos Xi, Arakawa e Murata, Guloso_Base e Estatístico (NSFNET – 12 comprimentos de onda e 0.4 ERLANG por conexão) | 90 |
| Figura 6.18 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Xi, Arakawa e Murata (TORÓIDE 4x4 – 15 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 92 |
| Figura 6.19 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Guloso_Base (TORÓIDE 4x4 – 15 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 93 |
| Figura 6.20 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Estatístico (TORÓIDE 4x4 – 15 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 93 |
| Figura 6.21 – Comparação entre os Métodos Xi, Arakawa e Murata, Guloso_Base e Estatístico (TORÓIDE 4x4 – 15 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 94 |
| Figura 6.22 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Xi, Arakawa e Murata (TORÓIDE 4x4 – 15 comprimentos de onda e 0.4 ERLANG por conexão) | 95 |
| Figura 6.23 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Guloso_Base (TORÓIDE 4x4 – 15 comprimentos de onda e 0.4 ERLANG por conexão) | 95 |
| Figura 6.24 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Estatístico (TORÓIDE 4x4 – 15 comprimentos de onda e 0.4 ERLANG por conexão) | 96 |
| Figura 6.25 – Comparação entre os Métodos Xi, Arakawa e Murata, Guloso_Base e Estatístico (TORÓIDE 4x4 – 15 comprimentos de onda e 0.4 ERLANG por conexão) | 96 |
| Figura 6.26 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Xi, Arakawa e Murata (HIPOTÉTICA – 12 comprimentos de onda e 0.6 ERLANG por conexão) | 98 |
| Figura 6.27 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Guloso_Base (HIPOTÉTICA – 12 comprimentos de onda e 0.6 ERLANG por conexão) | 99 |
| Figura 6.28 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Estatístico (HIPOTÉTICA – 12 comprimentos de onda e 0.6 ERLANG por conexão) | 99 |
| Figura 6.29 – Comparação entre os Métodos Xi, Arakawa e Murata, Guloso_Base e Estatístico (HIPOTÉTICA – 12 comprimentos de onda e 0.6 ERLANG por conexão) | 100 |
| Figura 6.30 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Xi, Arakawa e Murata (HIPOTÉTICA – 13 comprimentos de onda e 0.6 ERLANG por conexão) | 101 |
| Figura 6.31 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Guloso_Base (HIPOTÉTICA – 13 comprimentos de onda e 0.6 ERLANG por conexão) | 101 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.32 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Estatístico (HIPOTÉTICA – 13 comprimentos de onda e 0.6 ERLANG por conexão) | 102 |
| Figura 6.33 – Comparação entre os Métodos Xi, Arakawa e Murata, Guloso_Base e Estatístico (HIPOTÉTICA – 13 comprimentos de onda e 0.6 ERLANG por conexão) | 102 |
| Figura 6.34 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Xi, Arakawa e Murata (BELLCORE – 15 comprimentos de onda e 0.55 ERLANG por conexão) | 104 |
| Figura 6.35 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Guloso_Base (BELLCORE – 15 comprimentos de onda e 0.55 ERLANG por conexão) | 105 |
| Figura 6.36 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Estatístico (BELLCORE – 15 comprimentos de onda e 0.55 ERLANG por conexão) | 105 |
| Figura 6.37 – Comparação entre os Métodos Xi, Arakawa e Murata, Guloso_Base e Estatístico (BELLCORE – 15 comprimentos de onda e 0.55 ERLANG por conexão) | 106 |
| Figura 6.38 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Xi, Arakawa e Murata (BELLCORE – 16 comprimentos de onda e 0.55 ERLANG por conexão) | 106 |
| Figura 6.39 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Guloso_Base (BELLCORE – 16 comprimentos de onda e 0.55 ERLANG por conexão) | 107 |
| Figura 6.40 – Comparação entre os Métodos Propostos e o Método Estatístico (BELLCORE – 16 comprimentos de onda e 0.55 ERLANG por conexão) | 107 |
| Figura 6.41 – Comparação entre os Métodos Xi, Arakawa e Murata, Guloso_Base e Estatístico (BELLCORE – 16 comprimentos de onda e 0.55 ERLANG por conexão) | 108 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 – Classes das Rede 3ª Geração | 28 |
| Tabela 6.1 – Probabilidade de Bloqueio x Tráfego (NSFNET - 12 comprimentos de onda) | 74 |
| Tabela 6.2 – Probabilidade de Bloqueio x Tráfego (TORÓIDE - 15 comprimentos de onda) | 75 |
| Tabela 6.3 – Probabilidade de Bloqueio x Tráfego (HIPOTÉTICA - 12 comprimentos de onda) | 76 |
| Tabela 6.4 – Probabilidade de Bloqueio x Tráfego (BELLCORE - 15 comprimentos de onda) | 77 |
| Tabela 6.5 – Parametrização das Redes NSFNET, TORÓIDE 4x4, HIPOTÉTICA e BELLCORE | 79 |
| Tabela 6.6 – N° de Conversores x Probabilidade de Bloqueio _ Métodos Propostos (NSFNET – 12 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 82 |
| Tabela 6.7 – Resultados das Probabilidades de Bloqueio das soluções obtidas a partir dos Métodos Propostos e dos Métodos Convencionais, computados através da função e do cálculo real (NSFNET – 12 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 83 |
| Tabela 6.8 – N° de Conversores x Probabilidade de Bloqueio _ Métodos Propostos (TORÓIDE 4x4 – 15 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 91 |
| Tabela 6.9 – Resultados das Probabilidades de Bloqueio das soluções obtidas a partir dos Métodos Propostos e dos Métodos Convencionais, computados através da função e do cálculo real (TORÓIDE 4x4 – 15 comprimentos de onda e 0.5 ERLANG por conexão) | 92 |
| Tabela 6.10 – N° de Conversores x Probabilidade de Bloqueio _ Métodos Propostos (HIPOTÉTICA – 12 comprimentos de onda e 0.6 ERLANG por conexão) | 97 |
| Tabela 6.11 – Resultados das Probabilidades de Bloqueio das soluções obtidas a partir dos Métodos Propostos e dos Métodos Convencionais, computados através da função e do cálculo real (HIPOTÉTICA – 12 comprimentos de onda e 0.6 ERLANG por conexão) | 98 |
| Tabela 6.12 – N° de Conversores x Probabilidade de Bloqueio _ Métodos Propostos (BELLCORE – 15 comprimentos de onda e 0.55 ERLANG por conexão) | 103 |
| Tabela 6.13 – Resultados das Probabilidades de Bloqueio das soluções obtidas a partir dos Métodos Propostos e dos Métodos Convencionais, computados através da função e do cálculo real (BELLCORE – 15 comprimentos de onda e 0.55 ERLANG por conexão) | 104 |