



**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